

Konceptualni model pristupačnoga programskoga sustava zasnovanoga na trodimenzijskim korisničkim interakcijama i potpomognutom prikazu trodimenzijskoga objekta

Kešelj Dilberović, Ana

Doctoral thesis / Disertacija

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:897624>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-03**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory](#)





Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ana Kešelj Dilberović

**KONCEPTUALNI MODEL PRISTUPAČNOGA
PROGRAMSKOGA SUSTAVA ZASNOVANOGA
NA TRODIMENZIJSKIM KORISNIČKIM
INTERAKCIJAMA I POTPOMOGNUTOM PRIKAZU
TRODIMENZIJSKOGA OBJEKTA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ana Kešelj Dilberović

**KONCEPTUALNI MODEL PRISTUPAČNOGA
PROGRAMSKOGA SUSTAVA ZASNOVANOGA
NA TRODIMENZIJSKIM KORISNIČKIM
INTERAKCIJAMA I POTPOMOŽNUTOM PRIKAZU
TRODIMENZIJSKOGA OBJEKTA**

DOKTORSKI RAD

Mentorica: prof. dr. sc. Željka Car

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Ana Kešelj Dilberović

**A CONCEPTUAL MODEL OF AN ACCESSIBLE
SOFTWARE SYSTEM BASED ON THREE-
DIMENSIONAL INTERACTIONS AND ASSISTED
REPRESENTATION OF THE THREE-
DIMENSIONAL OBJECT**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Professor Željka Car, PhD

Zagreb, 2024.

Doktorski rad je izrađen na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za telekomunikacije.

Mentorica: prof. dr. sc. Željka Car

Doktorski rad ima: 163 stranice

Doktorski rad br.:

ŽIVOTOPIS MENTORICE

Željka Car (rod. Sever) je redovita profesorica u trajnom zvanju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) Sveučilišta u Zagrebu. Na istom je fakultetu diplomirala 1993., završila magisterij znanosti 1996. i doktorirala 2001. godine, sve pod mentorstvom prof. dr. sc. Branka Mikca. Od 1993. zaposlena je na FER-u na Zavodu za telekomunikacije.

Područje znanstvenog interesa su joj digitalna pristupačnost, primjene novih tehnologija za inkluzivnu komunikaciju i edukaciju osoba s invaliditetom te procesi upravljanja projektima. Sudjeluje na znanstvenim i tehnološkim projektima Ministarstva znanosti i obrazovanja i Hrvatske zaklade za znanost, projektima financiranim iz fondova Europske unije i UNICEF-a te vodi multidisciplinarnе projekte uz potporu Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti i Sveučilišta u Zagrebu te projekte suradnje s industrijskim i državnim partnerima. Sudjeluje u nastavi na preddiplomskom, diplomskom, poslijediplomskom specijalističkom studiju "Upravljanje projektima" i doktorskom studiju FER-a. U okviru Sveučilišta u Zagrebu sudjeluje na preddiplomskom studiju Vojno inženjerstvo na Hrvatskom vojnom učilištu. U okviru među-sveučilišne suradnje sudjeluje na diplomskom studiju Primijenjeno/poslovno računarstvo na Sveučilištu u Dubrovniku. Nastavnik je na doktorskom studiju Poremećaji jezika, govora i slušanja na Edukacijsko-rehabilitacijskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Voditeljica je istraživačkog Laboratorija za asistivne tehnologije i potpomognutu komunikaciju na FER-u koji je dio Centra za umjetnu inteligenciju FER-a. Pokrenula je multidisciplinarna istraživanja u području razvoja digitalnih usluga za osobe s invaliditetom u RH te je koordinatorica Kompetencijske mreže ICT-AAC. Kao članica tima ICT-AAC dobitnica je Državne nagrade Ivan Filipović koju dodjeljuje Hrvatski sabor i nagrade za Projekt godine 2019. koju dodjeljuje Udruga za projekt menadžment PMI Zagreb Hrvatska. Članica je Stručnog savjeta Pravobranitelja za osobe s invaliditetom.

Autorica je većeg broja znanstvenih radova objavljenih u međunarodnim časopisima i znanstvenim skupovima, poglavlja u knjizi, sveučilišnih udžbenika i stručnih radova. Sudjeluje u pripremi i vođenju znanstvenih i stručnih skupova. Članica je stručnih udruga IEEE, MIPRO, ELMAR i Hrvatskog društva za biomedicinsko inženjerstvo i medicinsku fiziku. Jedan od osnivača Udruge za projekt menadžment PMI, ogranak Zagreb, Hrvatska.

ABOUT THE SUPERVISOR

Željka Car (born Sever) is a full professor at the University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER). She received B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees in electrical engineering from the same faculty, in 1993, 1999, and 2001, respectively under supervision of the professor Branko Mikac. Since March 1993, she has been working in the Department of Telecommunications at FER.

Her scientific interests include digital accessibility, implementation of new technologies for inclusive communication and education of people with disabilities, and project management processes. She participates in scientific and technological projects of the Ministry of Science and Education of the Republic of Croatia and the Croatian Science Foundation, projects funded by the European Union and UNICEF, and leads multidisciplinary projects supported by the Croatian Academy of Sciences and Arts and the University of Zagreb, as well as cooperation projects with industrial and governmental partners. She participates in the undergraduate, graduate, postgraduate specialist study "Project Management" and the PhD study at FER. Within University of Zagreb, she participates in the undergraduate studies of military engineering at the Croatian Military Academy. Within the framework of inter-university cooperation, she participates in graduate study Applied/Business Computing at the University of Dubrovnik. She is a lecturer in the PhD study Speech, Language and Hearing Disorders at the Faculty of Education and Rehabilitation, University of Zagreb. She is the head of the research Laboratory for assistive technology and Alternative and Augmentative Communication which is the part of the Centre for Artificial Intelligence at FER, at FER. She initiated multidisciplinary research in the field of development of digital services for people with disabilities in Croatia, and is the coordinator of the Competence network ICT-AAC. As a member of the ICT-AAC team, she is a winner of the Ivan Filipović State Award of the Croatian Parliament and the Project of the Year 2019 Award given by the association PMI Zagreb Croatia. She is a member of the Professional Council of the Ombudsman for Persons with Disabilities.

She is the author of numerous scientific articles published in international journals and scientific meetings, book chapters, university textbooks and professional papers. She participates in the preparation and management of scientific and professional conferences. She is a member of professional associations IEEE, MIPRO, ELMAR and Croatian Society of Biomedical Engineering and Medical Physics. She is one of the founders of the association PMI Zagreb Croatia.

Zahvala

Prvo bih htjela zahvaliti svojoj mentorici, prof. dr. sc. Željki Car. Hvala vam na svim znanjima, savjetima, stručnosti i neumornoj podršci koji su me vodili kroz cijeli moj doktorat.

Hvala vam što ste vjerovali u mene, čak i onda kada ja nisam.

Hvala kolegama sa Sveučilišta u Dubrovniku i Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, a posebno hvala profesoru Krunoslavu i Mariu. Hvala svim studentima koji su mi pomogli i motivirali me tijekom mog doktorata.

Dragim prijateljima, a posebno Katarini, Mihaeli, Mari, hvala vam pomoći, podršci i razumijevanju. Anamaria, ne znam što bih bez tvojih savjeta i ohrabrenja. Hvala ti što si uvijek bila tu za mene.

Hvala mojim roditeljima, sestrama i njihovim obiteljima. Vaša bezuvjetna ljubav, podrška i vjera u mene bili su neprocjenjivi. Hvala vam što ste bili uz mene kroz svaki izazov, što ste me ohrabrali i vjerovali u moj uspjeh. Bez vas, ne bih mogla postići ovaj cilj. Hvala vam od srca.

Posebno hvala mom suprugu Teu. Tvoja podrška, ljubav i razumijevanje su moj najveći oslonac. Hvala ti što si uvijek bio uz mene i vjerovao u mene.

Svim kolegama na sličnom putu - vjerujte u sebe i ustrajte. Vaša vjera, snaga i odlučnost vodit će vas prema uspjehu.

SAŽETAK

Napredak tehnologije omogućio je široku primjenu trodimenzijskih vizualizacijskih tehnologija poput virtualne stvarnosti, proširene stvarnosti i holograma. Ove tehnologije posebno su korisne u edukaciji gdje se ističu u primjeni za učenike s teškoćama u učenju jer potiču aktivno sudjelovanje i olakšavaju vizualizaciju apstraktnih pojmova. Međutim, razvoj rješenja koja osiguravaju digitalnu pristupačnost i inkluzivnost za sve učenike i dalje zaostaje za tehnološkim napretkom.

Cilj doktorskog rada je istražiti mogućnosti prilagodbe prikaza trodimenzijskih objekata i trodimenzijskih interakcija u pristupačnom programskom sustavu za edukaciju. Osim toga, cilj je oblikovati konceptualni model takvog sustava koji se temelji na prilagođenom prikazu trodimenzijskog objekta. Ovaj model uključuje pomagala, metode i tehnike koje korisnici s invaliditetom mogu koristiti za lakšu vizualizaciju i interakciju s trodimenzijskim objektima, čime se osigurava inkluzivnost i učinkovitost u obrazovnom procesu. U doktorskome radu definirani su parametri pristupačnosti zasnovani na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija u edukacijskim programskim sustavima. Parametri pristupačnosti koji su bili dio istraživanja su veličina objekta, prisustvo distraktora, intuitivnost korištenja korisničkog sučelja te veličina i udaljenost elemenata za interakciju. Predložena je prilagodba trodimenzijskog prikaza i interakcija pod nazivom potpomognuti prikaz sa svrhom povećanja pristupačnosti s fokusom na primjenu u programskim rješenjima za piramidalne holograme. Ova prilagodba omogućuje korištenje programskih rješenja, poglavito edukacijskih za korisnike s teškoćama u percepciji 3D sadržaja ili interakcija. Rezultati istraživanja poslužili su kao temelj za specifikaciju konceptualnog modela i smjernica za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju temeljenog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma.

Ključne riječi: trodimenzijske interakcije, trodimenzijski prikaz, pristupačnost, hologrami, edukacija

Extended Abstract

A conceptual model of an accessible software system based on three-dimensional interactions and assisted representation of the three-dimensional object

The use of visualization technologies in education allows students to learn complex concepts from various subjects, such as mathematics, physics, biology, and history, more effectively through interactive and hands-on approaches. Technologies like augmented reality, virtual reality, and holograms provide opportunities for a deeper understanding of specific educational content by enabling students to explore and interact with 3D models, simulations, and interactive displays in innovative ways. Integrating these technologies into the educational process encourages active student participation, helps visualize abstract concepts, and offers a safe environment for experimentation, enhancing understanding and engagement in learning. Visualization technologies offer benefits for students with learning disabilities, who often face challenges in the educational process. Children with developmental disabilities frequently have limited attention spans, making sustained engagement in learning tasks difficult. By using interactive 3D models and simulations, these technologies enable active participation and better comprehension of abstract concepts through hands-on and visually engaging methods, contributing to cognitive development and learning motivation.

A key feature of the learning experience is interaction with educational software systems. Traditional user interfaces rely on mice, keyboards, and touchscreens as input devices. Advances in computer technology have led to the development of new interfaces, where traditional devices are often unsuitable. Visualization technologies require more intuitive forms of interaction, such as three-dimensional interactions, necessitating new interface components enabled by specialized devices. Another critical aspect of educational software system is accessibility. Digital accessibility refers to the extent to which a computer program, website, or device is acceptable and suitable for use by people with disabilities and older individuals, leading to their greater integration into modern society. Digital inclusion encompasses efforts to improve the social inclusion of people with disabilities and older individuals by adapting existing or developing new services based on information and communication technology, facilitating more effective communication, access to information, and educational support.

Despite the rapid development of visualization technology, research related to accessibility of these technologies remains underdeveloped. Solutions are needed to overcome the barriers

these technologies present to children with disabilities, ensuring they have equal learning opportunities. Assisted representation of 3D objects can significantly contribute to educational inclusion by offering alternative ways for users to see and interact with 3D content. Assisted representation of 3D object uses aids, methods, and techniques from the field of assisted communication to adapt the display of 3D objects, ensuring that everyone has equal access. For example, in the case of a 3D holographic display, the assisted representation might show the object in 2D on a mobile device, making it easier for users to see and interact with the content.

The aim of this doctoral thesis is to investigate the possibilities of adapting the representation of three-dimensional objects and interactions in an accessible educational software system and to design a conceptual model of such a system. This model is based on an adapted content representation that includes tools, methods, and techniques that users with disabilities utilize to visualize and interact with three-dimensional objects more easily.

The original scientific contributions of this doctoral thesis is as follows. First, it defines accessibility parameters by evaluating user interactions in educational software systems that utilize three-dimensional visualization technologies. Secondly, it involves the adaptation of the representation of three-dimensional objects and interactions to improve accessibility. Third, it develops a conceptual model for an accessible educational software system, which incorporates augmented reality and pyramidal hologram technologies.

To achieve the outlined contributions, the research presented in this dissertation is structured into five comprehensive chapters. Chapter 1 provides an overview of the most critical topics relevant to the dissertation. It thoroughly analyzes three-dimensional technology, focusing on interactions and accessibility, and reviews two existing software systems in the fields of augmented reality and holograms.

Chapter 2 describes the research that was conducted to define accessibility parameters based on the evaluation of three-dimensional user interactions in educational program systems. This research consisted of two phases: (i) testing a research instrument, (ii) conducting a user survey. Research instrument is a prototype educational software system that allows users to learn about geometric solids which offers the following 3D interactions: grab and release interaction, pinch interaction, combination of grab and release with rotate, and swipe and finger tap interaction.

The evaluation of accessibility parameters for 3D user interaction includes a detailed analysis of elements such as object size, distance from the user, and interface intuitiveness. This ensures that interactions with objects in the virtual environment are efficient, intuitive, and

accessible for all users, promoting universality and inclusion. Accessibility guidelines defined in this research, specifically tailored to the needs of 3D interaction. create interfaces that not only meet basic accessibility requirements but also improve the user experience. The implementation of user interface elements, such as sliders to control rotation, enables precise manipulation of objects with minimal effort and without frustration for the user. This extends the existing accessibility guidelines to better meet the special requirements of 3D interactions. The recommendation for implementing accessibility options is to first consider the goal and purpose of the software system to be developed. The first accessibility parameter is the size of the object with which the user is in direct 3D interaction. For software systems that aim to improve the accuracy of the user, smaller 3D objects with a ratio of 1:0.5 compared to the user's virtual hand showed the best result based on the research conducted. For software systems where the speed of performing certain interactions is important, it is recommended to use the ratio of object to virtual hand for the user's interaction with the object at the level of 1:1, which ensures a balance between the complexity of the task and the user's ability to successfully perform the given activities.

Another accessibility parameter is distraction during the interaction in the form of other 3D objects. Based on the research results, it is recommended that the design of the 3D interface in time-critical software systems (e.g. quizzes) should be free of potential distractors, while distracting elements can be useful to increase the user's engagement when interacting with objects. In the tasks without distractors, task completion times were shorter than in the tasks with distractors. However, in the tasks with distractors, no examinees skipped the level, indicating that the distractors, i.e. distracting 3D elements, although challenging, are not too much of an obstacle and encourage greater concentration and involvement in the task. The tasks with the distractors also made it clear that subjects were more satisfied with the ease of the task and the importance of precision. Distractors may help to maintain users' attention and improve their skills.

The third accessibility parameter is the direct and indirect interaction with 3D objects. The results of the conducted research suggest that indirect interaction, e.g. with a slider, is more intuitive and accessible and enables more precise and efficient manipulation of 3D objects. Tasks with indirect interaction via a slider have a shorter execution time compared to tasks with direct interaction with a 3D object. Although it is to be expected that direct interactions are more effective and "natural" for the respondents, the results indicate the opposite. The slightly higher ratings of ease in rotating the 3D object and satisfaction with precision in tasks involving indirect interaction via the slider can be attributed to participants' lack of experience

with 3D interactions, coupled with the current limitations of motion detection technology, which is not yet advanced enough to provide natural and intuitive direct interaction. This points to the importance of clear and intuitive user interface elements for 3D interactions, especially when learning new skills or tasks, and suggests that further development of gesture recognition technology could improve the effectiveness of face-to-face interactions in the future. It is recommended that users be given the ability to use the user interface elements according to their preferences, with the option to add or remove these elements via the accessibility settings.

The fourth analyzed accessibility parameter was related to the size and spacing of interaction elements on the user interface, such as buttons. Analysis of the data in the research conducted showed that the larger button dimensions and appropriate spacing allowed for a balance between ease of pressing and precision, reducing user frustration. This is consistent with Fitts' law, which states that the time required for a target action depends on the distance to the target and the size of the target. The size and positioning of the button have been optimized to allow users to interact more easily and precisely, reducing frustration and increasing user satisfaction. The dimensions and distance of the button are specified in relative units within the virtual space of the software system.

The time to complete tasks at all four levels shows a similar trend - the time to complete the task is longer when a new interaction is used for the first time. This result underlines the importance of ensuring consistency across different levels and tasks when implementing interaction mechanisms to facilitate user adaptation and increase efficiency in task completion.

The next chapter, 3, focuses on customizing the display of 3D objects and interactions to optimize accessibility. To investigate how such customization can enhance accessibility, an educational software system based on a pyramidal hologram was developed as a search instrument, allowing research participants to independently adjust the parameters of the 3D object and interactions to aid in task-solving. The research was conducted through three activities: (i) Familiarizing the respondents with the research, (ii) Testing the research instrument, and (iii) Completing a user survey. The research included 59 participants in total. Among these, 22 participants have some form of disability or have temporary difficulties, representing 37% of the total sample. The analysis of interactions from the research instrument focuses on both 3D and 2D interactions implemented in this software system.

The analysis of the interactions from the research instrument refers to the evaluation of the 3D and 2D interactions implemented in the education software system mentioned before. For

research participants with disabilities (N=22), 2D interactions such as sliders and buttons were found to be the most accessible for this group. Research participants without disabilities showed greater flexibility and adaptability in using different interaction methods and consistently showed a preference for 2D interactions via sliders and buttons.

As the average execution times for 3D and 2D interactions varied significantly between the different participant categories, a detailed analysis of preferences was conducted based on the type of difficulty. Further analysis revealed that participants with cognitive and neurological disorders and/or specific learning disabilities found 2D button interactions to be the easiest method and showed the least variation within the data. Participants with motor disabilities achieved the most consistent results with 2D slider interactions, while 3D interactions showed the most variability, indicating a higher level of difficulty for these participants. For participants with visual impairments, 3D interactions were optimal considering the amount of time required to complete the tasks. For hearing-impaired participants, 2D button interactions were less challenging than 2D slider interactions, albeit with slightly more variability compared to 3D interactions.

The next parameter in the analysis of interaction adaptation was the subjective experience of how switching from sliders to buttons helped in solving the tasks. A small percentage of research participants rated the change as minimally helpful: 4.55% (one participant with disabilities) and 2.7% (one participant without disabilities) rated it as a 1. A rating of 2 was recorded for 13.64% (three participants with disabilities) and 10.81% (four participants without disabilities). The largest group of participants without disabilities, 40.91% (nine participants), rated it a 3. 4.55% (one participant with disabilities) and 24.32% (nine participants without disabilities) rated it a 4. Finally, a rating of 5 was given by 36.36% (eight participants with disabilities) and 24.32% (nine participants without disabilities). These results indicate that the majority found the change from sliders to buttons to be beneficial, suggesting that the implementation of buttons improves accessibility and simplifies task completion.

The analysis of the display customization analysis from the research instrument included three important options: Resizing the object, changing the background color, and managing object animations. The first option, object resizing, explored the prevalence of different size preferences between research participants with and without disabilities and identified their challenges and preferences. This analysis summarized the use of different object sizes in all tasks completed by each research participant group. The groups included participants with cognitive and neurological disorders and/or specific learning difficulties (N=16), participants

with motor disabilities (N=7), participants with visual impairments (N=4), participants with hearing impairments (N=3) and participants with no difficulties (N=37).

The research data showed that all groups of research participants, regardless of disability type, preferred the largest object size. This preference was particularly pronounced among participants with various impairments. Research participants without difficulties also preferred larger objects but showed greater variability in their choice. These results suggest that when implementing object size customization options, larger dimensions should be provided to meet the needs of all users, with a larger initial object size setting.

The second customization analyzed was the background color of the 3D object. Participants could choose between a black and a white background, with black being the default setting. Analysis results showed a clear preference for a black background among all participant groups, especially among the visually impaired, where black was used in 85% of the tasks (36 out of 40). This suggests that when customizing the background color, black should be the default option, with the option to change it according to users' individual preferences.

The third customization analyzed was related to the management of object animations. Different groups of research participants were analyzed, including all tasks solved by each group. Participants could disable the animations during the tasks, with the animations enabled by default. The research results showed that all groups preferred deactivated animations, especially participants with cognitive and neurological disorders and participants with motor difficulties, as deactivated animations improved concentration and reduced potential distractions. Participants without disabilities also preferred deactivated animations, albeit to a lesser extent. These results suggest that display customization should include the ability to disable animations by default, with the option to enable them based on individual user preferences.

Chapter 4 defines and describes a conceptual model of an accessible educational software system based on augmented reality and pyramidal hologram technologies, developed based on the research studies previously conducted and described. The key elements of the conceptual model are outlined, including three-dimensional and two-dimensional environments, the components of the software s, and the communication model between these two environments. Additionally, a flowchart illustrating the process of using 2D and 3D displays and interactions is presented. This chapter also defines guidelines for developing accessible software system based on augmented reality and pyramid hologram technology. The integration of educational content in both 3D and 2D formats, allowing for interaction in both forms, is fundamental to creating inclusive educational solutions. These solutions ensure

equal access to quality education for all students, regardless of their individual needs and abilities.

Chapter 5 presents the conclusions and directions for further research in this area. However, the research conducted in this dissertation has certain limitations. The use of specialized equipment such as Leap Motion in both surveys limited the time and number of respondents, as each survey was conducted individually. A larger sample size would provide more reliable and generalizable results, especially for respondents with disabilities. In the second study, measurements related to the circuit were not verified (e.g., differences in display resolution or monitor specifications), which posed challenges related to the 3D object display. Additionally, ambient conditions, such as lighting, significantly impacted the 3D display but were not considered as parameters in the second research.

Research has highlighted the need for environments that facilitate the learning and mastery of 3D interactions through detailed instructions, guidance and feedback. Currently, there are no standardized guidelines for learning 3D interactions. The development of effective training methods and tools could significantly enhance user experience and the application of 3D technologies in different contexts.

Adapting 3D interactions and representations can significantly improve the accessibility and efficiency of software systems based on visualization technologies. Developing automated methods to adjust interaction complexity, customize user interfaces and modify 3D representations according to individual needs is an innovative and under-researched solution that could ensure optimal experiences for all users regardless of their abilities and challenges.

Keywords: three-dimensional interactions, three-dimensional representation, accessibility, holographic technology, education

Sadržaj

Uvod	1
1. Pregled područja istraživanja	4
1.1. Vizualizacijske tehnologije	4
1.1.1 Virtualna i proširena stvarnost	5
1.1.2. Holografska tehnologija	7
1.2. Interakcije u vizualizacijskim tehnologijama.....	10
1.2.1 Trodimenzijske interakcije.....	10
1.2.2 Prirodne interakcije	12
1.3. Pristupačnost vizualizacijskih tehnologija	13
1.3.1. Primjer pristupačne mobilne aplikacije zasnovane na proširenoj stvarnosti....	16
1.3.2. Primjer pristupačne mobilne aplikacije zasnovane na holografskoj tehnologiji	22
1.3.3. Primjena strojnoga učenja za povećanje pristupačnosti web-aplikacija	25
2. Definicija parametara pristupačnosti zasnovana na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija	34
2.1. Opis istraživanja	34
2.2. Istraživački instrument GeometryGame.....	35
2.3. Rezultati i analiza prikupljenih podataka	43
2.3.1. Analiza demografskih karakteristika ispitanika iz upitnika	44
2.3.2. Analiza interakcije <i>dohvati i pusti</i>	46
2.3.3. Analiza interakcije primicanja prstiju obje šake	56
2.3.4. Analiza interakcija prijelaz šake u stranu i rotacije.....	64
2.3.5. Analiza interakcije pritiska gumba pomoću <i>virtualnog prsta</i>	71
2.4. Diskusija ostvarenih rezultata istraživanja	79
3. Prilagodba prikaza trodimenzijskog objekta i trodimenzijskih interakcija s ciljem povećanja pristupačnosti	82

3.1.	Opis istraživanja	83
3.2.	Opis ideje i prve verzije programskog rješenja za 3D interakcije i 3D prikaz HoloZoo	89
3.2.1.	Razvoj istraživačkog instrumenta za analizu prilagodbe trodimenzijskog prikaza i interakcija	92
3.2.2.	Interakcije i scenariji istraživačkog instrumenta	95
3.2.3.	Ograničenja istraživanja	100
3.3.	Rezultati i analiza podataka prikupljenih tijekom istraživanja	100
3.3.1.	Analiza odgovora ispitanika iz korisničke ankete	101
3.3.2.	Analiza interakcija i prilagodbi interakcija	110
3.3.3.	Analiza prilagodbe prikaza 3D objekta	123
3.3.4.	Prilagodba rješenja za ispitanike s oštećenjima vida	128
3.3.5.	Dodatna zapažanja istraživača i povratne informacije ispitanika	130
3.4.	Diskusija ostvarenih rezultata istraživanja	131
4.	Konceptualni model pristupačnoga programskoga sustava zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma	135
4.1.	Opis modela	136
4.2.	Komponente pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju	139
4.3.	Model komunikacije između 2D i 3D prikaza	140
4.4.	Proces korištenja interakcija i prikaza	142
4.5.	Smjernice za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma	144
4.5.1.	Smjernice za vidljivost 3D prikaza	144
4.5.2.	Smjernice za operabilnost	146
4.5.3.	Smjernice za razumljivost	147
4.5.4.	Sažetak smjernica za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma	148
5.	Zaključak i budući rad	150

Literatura	152
Životopis.....	161
Biography	163

Uvod

Uz napredak digitalne tehnologije, stvaranje trodimenzijskih grafičkih objekata postalo je široko dostupno na računalima i pokretnim uređajima. Tehnologije kao što su virtualna stvarnost (VR), proširena stvarnost (AR) i hologrami omogućuju detaljan i interaktivan prikaz ovih 3D objekata, pružajući mogućnost promatranja iz različitih kutova i perspektiva. Sve te tehnologije zajednički se nazivaju vizualizacijskim tehnologijama [1].

Korištenje vizualizacijskih tehnologija u obrazovanju omogućava učenicima učinkovitije usvajanje složenih koncepata iz različitih predmeta, poput matematike, fizike, biologije i povijesti, kroz interaktivne i praktične pristupe [2]. Ove tehnologije, kao što su proširena stvarnost, virtualna stvarnost i hologrami, pružaju priliku za dublje razumijevanje specifičnih obrazovnih sadržaja i tema, omogućujući učenicima istraživanje i interakciju s materijalima poput 3D modela, simulacija i interaktivnih prikaza na inovativne načine [3]. Uvođenje navedenih tehnologija u obrazovni proces potiče aktivno sudjelovanje učenika, omogućuje im vizualizaciju apstraktnih pojmova i pruža im mogućnost eksperimentiranja u sigurnom okruženju, što značajno doprinosi njihovom razumijevanju i angažmanu u učenju [4].

Vizualizacijske tehnologije nude značajne prednosti učenicima s teškoćama u učenju, koji se često suočavaju s jedinstvenim izazovima u obrazovnom procesu. Djeca s teškoćama u razvoju često imaju ograničenu sposobnost održavanja pažnje, a u skladu s tim i nemogućnost fokusa na traženo u obrazovnom procesu tijekom duljeg vremena. Nove tehnologije za vizualizaciju sadržaja učenja, poput proširene stvarnosti, mogu privući njihov interes i usmjeriti njihovu pažnju dovoljno dugo da osiguraju učinkovito učenje. Korištenjem interaktivnih 3D modela i simulacija ove tehnologije omogućuju učenicima aktivno

sudjelovanje i bolje razumijevanje apstraktnih pojmova kroz praktične i vizualno privlačne pristupe, što doprinosi njihovom kognitivnom razvoju i motivaciji za učenje [5].

Jedna od važnijih značajki iskustva učenja je interakcija s programskim sustavom za edukaciju [6]. Tradicionalna korisnička sučelja koriste miševe, tipkovnice i zaslone osjetljive na dodir kao ulazne uređaje. Napredak u računalnoj tehnologiji doveo je do razvoja novih sučelja u područjima u kojima tradicionalni uređaji često nisu prikladne. Vizualizacijske tehnologije zahtijevaju intuitivnije oblike interakcije, poput trodimenzijskih interakcija. Takav oblik interakcija zahtijeva nove komponente sučelja koje omogućuju specijalizirani uređaji.

Sljedeći važan aspekt edukacijskih programskih sustava je pristupačnost. Digitalna pristupačnost odnosi se na mjeru u kojoj je računalni program, web stranica ili uređaj prihvatljiv i prikladan za korištenje osobama s invaliditetom i starijim osobama, što rezultira većim stupnjem uključenosti navedenih skupina u suvremeno društvo. Digitalna uključenost podrazumijeva sva nastojanja da se poveća razina socijalne uključenosti osoba s invaliditetom i starijih osoba prilagodbom postojećih ili razvojem novih usluga temeljenih na informacijskoj i komunikacijskoj tehnologiji, koje omogućuju učinkovitiju komunikaciju, pristup informacijama i pomoć u obrazovanju.

Unatoč brzom razvoju vizualizacijske tehnologije, istraživanja vezana za inkluzivnost i pristupačnost ovih tehnologija još uvijek zaostaju za potrebama tržišta. U području obrazovanja, potrebno je pronaći rješenja koja će premostiti barijere koje ova tehnologija predstavlja djeci s teškoćama u učenju, omogućujući im jednake mogućnosti za učenje kao djeci urednog razvoja. Potpomognuti prikaz 3D objekata, uz korištenje pomagala i metoda, može značajno doprinijeti inkluzivnosti u obrazovanju. Potpomognuti prikaz 3D objekta je prikaz koji se zasniva na integraciji pomagala, metoda i tehnika iz područja potpomognute komunikacije s ciljem ostvarivanja jednakih mogućnosti korištenja 3D vizualizacijske tehnologije.

Cilj ovog doktorskog rada bio je istražiti mogućnosti prilagodbe prikaza trodimenzijskih objekata i trodimenzijskih interakcija u pristupačnom programskom sustavu za edukaciju te oblikovati konceptualni model takvog sustava. Ovaj model temelji se na prilagođenom prikazu edukacijskog sadržaja koji uključuje pomagala, metode i tehnike koje korisnici s invaliditetom koriste kako bi lakše vizualizirali i ostvarili interakciju s trodimenzijskim objektima. Cilj konceptualnog modela je identificirati osnovne elemente programskih rješenja koji koriste prikaz trodimenzijskih objekata i trodimenzijske interakcije uz osiguranu

inkluzivnu alternativu u stvarnom vremenu za osobe koje ne mogu koristiti navedeni prikaz i interakcije. Svrha je konceptualnog modela osigurati kvalitetne temelje za daljnji razvoj programskih rješenja koja koriste navedeni prikaz i interakcije, s naglaskom na rješenja zasnovana na primjenu piramidalnih holograma u obrazovanju, ali i sva ostala inkluzivna programska rješenja zasnovana na drugim tehnologijama koja koriste trodimenzijski prikaz i interakcije u različite svrhe.

Izvorni znanstveni doprinos disertacije je sljedeći:

- Definicija parametara pristupačnosti zasnovana na vrednovanju trodimenzionalnih korisničkih interakcija u programskim rješenjima za edukaciju zasnovanim na trodimenzionalnim vizualizacijskim tehnologijama
- Prilagodba prikaza trodimenzionalnog objekta i trodimenzionalnih interakcija s ciljem povećanja pristupačnosti
- Specifikacija konceptualnog modela pristupačnog programskog sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma.

S ciljem ostvarivanja navedenog doprinosa, provedena su istraživanja predstavljena u nastavku disertacije, a radnja disertacije je podijeljena na pet poglavlja. U prvom poglavlju napravljen je pregled relevantnih tema za doktorsko istraživanje. Analizirana je i opisana trodimenzijska tehnologija, s naglaskom na interakcije i pristupačnost te su opisana dva postojeća programska rješenja iz područja proširene stvarnosti i holograma. U razvoju programskog rješenja korišten je piramidalni hologram, kao i u istraživačkom instrumentu opisanom u doktorskoj disertaciji zbog cjenovne pristupačnosti. U drugom poglavlju opisano je istraživanje provedeno u svrhu definiranja parametara pristupačnosti temeljenih na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija u edukacijskim programskim rješenjima. Tijekom istraživanja identificirani su ključni faktori pristupačnosti, što je omogućilo formuliranje smjernica i preporuka za unapređenje postojećih i budućih trodimenzijskih edukacijskih programskih rješenja. Treće poglavlje stavlja fokus na prilagodbu prikaza 3D objekata i interakcija s ciljem optimizacije pristupačnosti. U četvrtom poglavlju definiran je i opisan konceptualni model pristupačnog programskog sustava za edukaciju zasnovan na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Zaključak i prijedlozi za nastavak istraživanja u ovom području detaljno su prikazani u petom poglavlju.

1. Pregled područja istraživanja

Ovo poglavlje pruža pregled ključnih tema relevantnih za provedeno doktorsko istraživanje. Prvo će se analizirati koncepti vezani uz trodimenzijske tehnologije, uključujući virtualnu stvarnost, proširenu stvarnost i holografske tehnologije. Fokus će biti usmjeren na njihovu primjenu, s posebnim naglaskom na njihovu ulogu u području obrazovanja. Detaljnije će se proučiti značaj interakcija unutar vizualizacijskih tehnologija, istražujući njihov doprinos obogaćivanju iskustava učenja. Nadalje, sustavno će se analizirati pristupačnost vizualizacijskih tehnologija. Ovo poglavlje također obuhvaća detaljan opis dva postojeća programska rješenja razvijenih u području proširene stvarnosti i holografske tehnologije koje su utjecale na razvoj istraživačkih instrumenata opisanih u poglavljima 2.2. i 3.2.1.

1.1. Vizualizacijske tehnologije

Trodimenzijska (3D) vizualizacija definira se kao proces stvaranja grafičkog sadržaja korištenjem programskih tehnologija, pri čemu se objekt reproducira uz pomoć računala ili pokretnog uređaja s odgovarajućom programskom opremom i omogućava se promatranje vizualiziranog 3D objekta iz različitih kutova i s različitih strana [7]. 3D objekti se mogu prikazati pomoću vizualizacijskih tehnologija kao što je prikaz na zaslonu računala korištenjem 3D grafike ili pomoću tehnologija poput virtualne i proširene stvarnosti ili holograma [8]. Sve vrste interakcija koje korisnik može obavljati u 3D virtualnom svijetu nazivaju se trodimenzijske (3D) interakcije [9].

3D vizualizacija ima značajan potencijal i primjenu u raznim područjima poput znanosti, umjetnosti, zdravstva, itd. Među njima se posebno ističe obrazovanje. Vizualizacija i interaktivna manipulacija 3D objektima mogu značajno poboljšati iskustvo učenja [10].

Upravo se 3D vizualizacija i mogućnost interakcije povezuju uz pojam virtualnog okruženja za učenje. Virtualno okruženje za učenje podrazumijeva programsku platformu dostupnu putem Interneta koja učenicima nudi digitalna rješenja koja obogaćuju iskustvo učenja. Učenici mogu pristupiti potrebnim materijalima ili podacima neovisno o vremenu ili lokaciji te dijeliti znanja putem aplikacija za online komunikaciju [11]. Postoje najmanje tri zahtjeva koja bi se trebala ispuniti kako bi virtualni oblik učenja bio uspješan, a to su dostupnost Interneta, dostupnost podrške koja održava sustav te dostupnost nastavnika koji može pomoći učenicima u situacijama kada se suoče s poteškoćom prilikom učenja [12]. Osim virtualnog, postoji i tradicionalno okruženje za učenje koja uključuje nastavnika koji predaje nastavne sadržaje, odnosno objašnjava koncept znanja dok učenici slušaju i vode bilješke [11]. Ovakav oblik nastave je usmjeren na nastavnika te se informacije dijele samo na jedan način (putem klasičnog predavanja). Za razliku od tradicionalnog učenja, poučavanje u virtualnom okruženju omogućava organizaciju različitih aktivnosti kojima se u središte procesa učenja i poučavanja stavlja učenika, a do željenih informacija se može doći na više načina putem predavanja te različitih praktičnih i vizualnih prikaza [5]. Osim tradicionalnog i virtualnog okruženja za učenje, u literaturi se može pronaći i takozvani kombinirani oblik učenja. Kombinirani, odnosno hibridni oblik učenja, nije samo jednostavna mješavina oba navedena oblika učenja kojom se tradicionalni oblik učenja nadopunjuje virtualnim i obrnuto, već se odnosi na njihovu integraciju, pri čemu se kombinira ono što se smatra najboljem u oba oblika, kao što je primjerice integracija tehnologije poput proširene stvarnosti u nastavu koja se održava fizički u učionicama [13].

1.1.1 Virtualna i proširena stvarnost

Virtualna stvarnost (engl. *Virtual Reality*, VR) je okruženje usmjereno na vizualna i imerzivna (uranjajuća) iskustva korisnika kroz interaktivne simulacije. Tim simulacijama korisnicima se omogućava uključivanje u okruženje u kojem se mogu pojaviti objekti i događanja iz stvarnog svijeta što im pruža subjektivni osjećaj prisutnosti [14]. Virtualna stvarnost pronašla je primjenu među raznolikom populacijom korisnika, uključujući i osobe s invaliditetom. Za razliku od virtualne stvarnosti, proširena stvarnost (engl. *Augmented Reality*, AR) se oslanja na poboljšanje stvarnih objekata oko korisnika pomoću tehnologije. Proširena stvarnost se može smatrati kao potkategorija virtualnog okruženja, u kojoj se virtualni elementi preklapaju sa stvarnom slikom svijeta [15]. Cilj proširene stvarnosti je obogaćivanje korisničkog iskustva i poboljšanje percepcije i interakcije sa stvarnim svijetom putem 3D virtualnih objekata. AR tehnologija omogućuje umetanje virtualnih elemenata, poput 3D modela, grafika ili

informacija, u prikaz stvarnog okruženja. To omogućuje korisnicima da vide i dožive stvarni svijet na obogaćen način, gdje se virtualni objekti mogu prikazivati u stvarnom vremenu, kao da su dio okoline.

Korištenje VR i AR prepoznato je u medicini, gdje se najčešće koristi za učenje anatomije [16], [17], [18], [19], u učenju i treniranju vještina poput oživljavanja [20] i, primjerice, kao pomoć u pripremi za operaciju [21]. Korištenje navedenih tehnologija prepoznato je i u glazbenom obrazovanju, kao pomoć u učenju gradiva na građevinskom [22] i grafičkom fakultetu [23] te kao rješenje za učenje računalne sigurnosti [24].

Prema autorima u [25], primjena AR-a se dijeli u tri glavne kategorije:

1. **Prezentacija i vizualizacija:** Ova kategorija AR aplikacija odnosi se na primjene koje koriste proširenu stvarnost za prikazivanje informacija, vizualizaciju podataka ili prezentaciju proizvoda na inovativan način. Primjeri uključuju AR prezentacije na konferencijama, virtualno turističko razgledavanje, prikazivanje informacija o proizvodima u trgovinama ili interaktivno prikazivanje arhitektonskih modela.
2. **Industrija:** AR aplikacije u industriji koriste se za podršku i poboljšanje rada u industrijskim postavkama. To može uključivati obuku i simulacije, prikazivanje uputa i referentnih informacija na radnim mjestima, pomoć u održavanju i popravcima, kao i praćenje i upravljanje inventarom.
3. **Obrazovanje kroz zabavu (*Edutainment*):** *Edutainment* je spoj riječi "edukacija" i "zabava" te se odnosi na AR aplikacije koje kombiniraju edukacijski i zabavni sadržaj. Ove aplikacije mogu pružiti interaktivno učenje kroz igre, animacije i druge oblike zabave. Primjeri uključuju AR igre za učenje matematike, povijesti ili prirodnih znanosti, virtualne eksperimente i interaktivne priče.

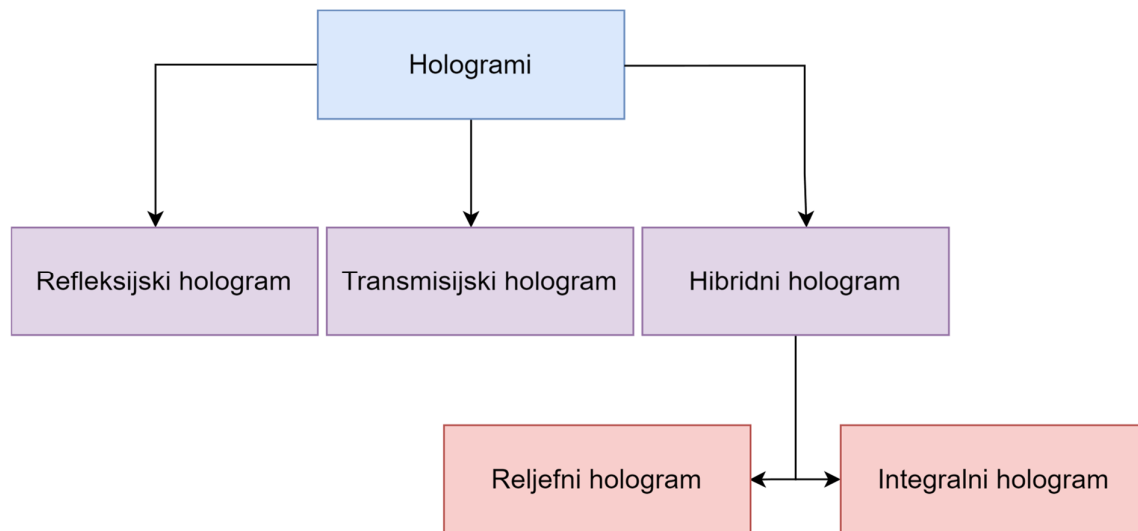
Navedena podjela pomaže u razumijevanju različitih područja primjene proširene stvarnosti i kako se AR tehnologija koristi u različite svrhe, a osobito na edukaciju.

Pristup učenju kroz igre s proširenom stvarnošću sve više postaje popularan u obrazovanju jer ima potencijal povećati motivaciju djece za učenje, posebno u predmetima poput matematike [26]. Međutim, kako bi takve AR aplikacije bile učinkovite u obrazovanju, važno je osigurati da budu pravilno dizajnirane, s posebnim naglaskom na implementaciju univerzalnog dizajna i pristupačnosti.

1.1.2. Holografaska tehnologija

Holografaska tehnologija je novitet u tehnologiji vizualizacije. Holografija je metoda koja se koristi za snimanje uzoraka svjetlosti. Ti se obrasci reproduciraju kao trodimenzijska slika koja se naziva hologram [27].

Prema Tung Jeongu postoji više vrsta holograma i različiti načini njihove klasifikacije [28]. Osnovna podjela je na refleksijske, transmisijske i hibridne holograme. Podjela je prikazana na slici 1.1.



Slika 1.1 Podjela holograma prema vrsti prikaza

Refleksijski hologram (engl. *reflection hologram*), u kojem se trodimenzijska slika vidi u blizini njegove površine, najčešći je tip holograma. Hologram je osvijetljen bijelom svjetlosti, koja se drži pod određenim kutom i udaljenošću. Dakle, slika se sastoji od svjetlosti koju reflektira hologram. **Transmisijski hologram** (engl. *transmission hologram*) se promatra pomoću laserske svjetlosti, obično iste vrste, koja se koristi prilikom snimanja holograma. Svjetlost se usmjerava sa stražnje strane holograma, a slika se prenosi na stranu promatrača. Virtualna slika koja se prikazuje može biti izrazito oštra i duboka. **Hibridni hologram** (engl. *hybrid hologram*) predstavlja vrstu holograma koja se nalazi između refleksijskih i transmisijskih holograma te uključuje razne varijacije i kombinacije oba tipa. Ova vrsta holograma kombinira karakteristike i osobine refleksijskih te transmisijskih holograma kako bi postigla određene efekte i funkcionalnosti. Jedan primjer hibridnog holograma je reljefni (engl. *embossed*) hologram. Reljefni hologrami se koriste u masovnoj proizvodnji za zaštitu od krivotvorenja, primjerice na kreditnim karticama, novcu i putovnicama. U ovom postupku,

dvodimenzijski interferencijski uzorak se stvara pomoću laserskog svjetla koje interferira na određenoj površini, stvarajući jedinstvene uzorke. Nakon toga, navedeni interferencijski uzorak se prenosi na tanku plastičnu foliju putem procesa utiskivanja. Utiskivanje se provodi pomoću specijalnih matrica koje sadrže reljefni uzorak holograma. Plastična folija prolazi kroz stroj za utiskivanje gdje se pod visokom temperaturom i pritiskom reljefni uzorak utiskuje u površinu folije. Rezultat je holografski uzorak koji je teško kopirati i koji se koristi kao zaštita protiv krivotvorenja [29]. Drugi primjer hibridnog holograma je integralni hologram. Integralni hologrami se izrađuju iz niza fotografija objekta, kao što su žive osobe, vanjske scene, računalne grafike ili rendgenske slike. Obično se objekt "skenira" kamerom, snimajući ga iz različitih kutova. Svaka slika se prikazuje na LCD zaslonu koji je osvijetljen laserskom svjetlošću i koristi se kao objektni snop za snimanje holograma na uskom vertikalnom dijelu holografske ploče. Postoje još i tehnike poput holografske interferometrije te hologrami poput višekanalnih holograma te računalno generiranih holograma [28]

Holografska interferometrija je tehnika koja koristi dvije snimke istog objekta u različitim stanjima (prije i poslije promjene) kako bi stvorila interferencijski uzorak. Taj uzorak otkriva sitne pomake i deformacije na objektu, koje se vide kao rubovi pomaka. Ova metoda omogućava precizno praćenje i mjerenje mikroskopskih promjena na objektu [30]. **Višekanalni hologram** omogućuju promatranje različitih objekata mijenjanjem kuta gledanja. Ova tehnologija ima veliki potencijal za pohranu podataka, jer svaki kut može sadržavati različite informacije, što značajno povećava količinu podataka koja se može pohraniti na jednom hologramu [31]. **Računalno generirani hologram** temelji se na primjeni matematičkih modela za kreiranje holograma bez potrebe za fizičkim objektima. Ovi hologrami koriste tri elementa: izvor svjetlosti, hologram i sliku. Kada su dva od ovih elemenata poznata, treći se može točno izračunati. Na primjer, poznavajući valnu duljinu svjetlosti i strukturu holograma, moguće je izračunati konačni uzorak svjetlosti. Ova tehnologija omogućuje stvaranje preciznih holografskih uzoraka i koristi se u uređajima poput čitača diskova (engl. *CD player*) za kontrolu i usmjeravanje laserskog svjetla. Računalno generirani hologram također omogućuje razvoj holografskih zaslona i sučelja, pružajući interaktivno iskustvo s trodimenzijskim sadržajem [32].

Hologrami se mogu klasificirati prema načinu projekcija, od vrlo jednostavnih poput piramidalnog holograma do laserskih holograma [8]. Piramidalni hologram je vrsta holograma koja koristi trokutasti ili piramidalni oblik za prikazivanje trodimenzijskih slika. Ova vrsta holograma stvara efekt dubine i percepcije trodimenzionalnosti bez potrebe za

posebnim naočalama ili drugim dodatnim uređajima. Piramidalni hologrami funkcioniraju na temelju principa difrakcije svjetlosti. Snimanje piramidalnog holograma uključuje prikaz, odnosno perspektivu objekta iz više različitih kutova. Svaki kut snimke predstavlja pogled s druge strane piramide. Kada se takvi snimci kombiniraju u hologram, rezultat je trodimenzijska slika koja se može promatrati sa svake strane piramide. Ovaj način trodimenzijske projekcije smatra se dijelom proširene stvarnosti [33].

Analiza primjene holograma u edukaciji [3] pokazala je kako hologrami pozitivno djeluju na kognitivni razvoj učenika. Holografske projekcije privlače pažnju učenika jer omogućuju da neki predmet prouče iz različitih kuteva, što indirektno rezultira povećanjem razumijevanja gradiva. Istraživanje [34] kao glavne nedostatke primjene ove tehnologije navodi nedostatke infrastrukture, visoke troškove provedbe te nedostatak stručnjaka. Zbog toga autori u [35] predstavljaju primjer piramidalnog holograma koji bi se koristio za edukacijske svrhe, a čije je oplošje napravljeno od prozirnog čvrstog materijala poput stakla ili plastike s bazom u kojoj je ogledalo. Hologram se postavi na ekran pokretnog uređaja koji prikazuje trodimenzijski objekt čiji će se odraz odbiti od zrcalo piramide te će objekt prikazati kao hologram. Osim holograma, predlažu i korištenje kontrole holograma uz pomoć pokreta ruke (engl. *Hand Gesture Controle*).

Osim u edukaciji, hologrami su svoju primjenu našli u medicini gdje se snimke magnetske rezonance i računalne tomografije prikazuju trodimenzijski. Istraživanje provedeno među liječnicima koji koriste holograme [36] pokazalo je kako ovakva, poboljšana vizualizacija, rezultira bržim učenjem, preciznijim interpretiranjem slika i obavljanjem hitnih intervencija za manje vremena. Jednostavna aplikacija predstavljena u [37] prikazuje otkucaje srca pomoću piramidalnog holograma. Informacije o otkucajima srca su se prikupljale pomoću senzora ugrađenih u kameru pametnog telefonu koji pomoću fotopletizmografije mjeri puls pacijenta. Fotopletizmografija je jednostavna optička metoda kojom se može detektirati promjena volumena krvi u krvnim žilama. Potom su relevantnost prikupljenih informacija provjerava pomoću specifičnog algoritma. Kao krajnji proizvod, korisnici mogu vidjeti simulaciju otkucaja vlastitog srca. Ispitanici su dali pozitivne povratne informacije zbog čega autori ovog članka žele proširiti svoje istraživanje te pokušati napraviti aplikaciju koja bi se mogla šire primjenjivati u medicini.

Preliminarni rezultati istraživanja i jednostavni primjeri trodimenzijskih sučelja su prikazani u [38] gdje su autori opisali izrađeni holografski ekran koji je korisnicima omogućio izravnu

interakciju s hologramom. U istraživanju je fokus stavljen na funkcijsko testiranje, pa su korisnici trebali birati na holografskom sučelju između dva ponuđena odgovora poput „Y“ i „N“. O potencijalu holografskih sučelja govori i istraživanje provedeno u [39] gdje je opisana evaluacija holografskog korisničkog sučelja u usporedbi s tradicionalnim sučeljima. Istraživanje je pokazalo kako su ispitanici holografsko sučelje smatrali privlačnijim i prirodnijim za upotrebu.

Holografška tehnologija ima značajan potencijal za poboljšanje obrazovnih procesa kroz vizualizaciju nastavnog sadržaja. Piramidalni hologrami su se pokazali kao najprikladniji zbog svoje cjenovne pristupačnosti i jednostavne implementacije. Iz tih razloga, odabrani su za korištenje u istraživanju opisanom u 3. poglavlju. Sljedeće poglavlje bavit će se istraživanjem i analizom različitih oblika interakcije unutar sustava za učenje, s posebnim naglaskom na sustave u kojima su implementirane vizualizacijske tehnologije.

1.2. Interakcije u vizualizacijskim tehnologijama

Kao jedna od važnijih značajki iskustva učenja u tradicionalnim i virtualnim okruženjima za edukaciju prepoznata je mogućnost interakcije s programskim rješenjima, odnosno, u ovom slučaju, sustavom za učenje [40]. Sustav za učenje može se definirati kao integrirani skup digitalnih alata i resursa, uključujući tekstove, videozapise, interaktivne kvizove i simulacije, osmišljenih za podršku i unapređenje obrazovnog procesa. Ovi sustavi uključuju mrežne stranice, programska rješenja i digitalne materijale koji omogućuju učenicima pristup obrazovnim sadržajima, praćenje njihovog napretka te interakciju s nastavnicima i vršnjacima [41]. Tradicionalna dvodimenzijaska korisnička sučelja računalnih sustava poznata su većini korisnika. Interakcija s ovakvim sučeljima uglavnom se ostvaruje korištenjem ulaznih uređaja poput miša ili tipkovnice te zaslona kao izlaznog uređaja. Pri tome se zaslon osjetljiv na dodir može koristiti kao ulazni i kao izlazni uređaj. Razvoj računalne sklopovske podrške i programske opreme doveo je do razvoja korisničkih sučelja i programskih rješenja u kojima tradicionalni ulazni uređaji poput tipkovnice i miša često nisu pogodni za korištenje [42]. To je posebice izraženo u virtualnim okruženjima gdje još uvijek nije potvrđeno kakav je oblik interakcije najintuitivniji za korisnika te kojim uređajem se takva interakcija može postići.

1.2.1 Trodimenzijske interakcije

Trodimenzijska (3D) interakcija predstavlja način interakcije između čovjeka i računala, odnosno općenito nekog stroja, u kojem se korisnici mogu slobodno kretati i stupati u

interakciju unutar trodimenzijskog prostora. Sama interakcija uključuje procesiranje informacija kako od strane ljudi, tako i od strane strojeva, gdje je fizički položaj elemenata unutar trodimenzijskog okruženja ključan za postizanje željenih rezultata. Prostor u trodimenzijskoj interakciji može se definirati kao stvarno fizičko okruženje, virtualni okruženje stvoreno računalnom simulacijom ili hibridna kombinacija oba okruženja [43]. Kad se stvarni fizički prostor koristi za unos podataka, korisnik ostvaruje interakciju sa strojem putem ulaznog uređaja koji prepoznaje korisnikove geste. S druge strane, kada se koristi za izlaz podataka, simulirana 3D virtualna scena se projicira u stvarni svijet pomoću odgovarajućeg izlaznog uređaja (hologram, naočale za virtualnu stvarnost i sl.). Važno je napomenuti da interaktivni sustavi koji prikazuju 3D grafiku ne uključuju nužno 3D interakciju. Primjerice, ako korisnik na svom stolnom računalu razgledava model zgrade odabirom različitih točaka gledišta iz klasičnog izbornika, to ne predstavlja oblik trodimenzijske interakcije. Unutar iste aplikacije, ako korisnik pritisne na ciljani objekt kako bi navigirao do njega, tada se dvodimenzijski unos putem miša izravno pretvara u trodimenzijsku virtualnu lokaciju. Takav oblik interakcije se smatra trodimenzijskom interakcijom [43].

Većina 3D interakcija su obično složenije od uobičajenih načina interakcija korištenjem miša i tipkovnice ili zaslona osjetljivog na dodir jer zahtijevaju nove komponente sučelja koje se najčešće postižu korištenjem specijaliziranih uređaja. Ovakve vrste uređaja potencijalno nude neograničene mogućnosti u dizajniranju novih interakcija temeljenih na korisničkom iskustvu [33]. Glavne kategorije ovih uređaja su standardni ulazni uređaji (engl. *standard input devices*), uređaji za praćenje (engl. *tracking devices*), upravljački uređaji (engl. *control devices*), navigacijska oprema (engl. *navigation equipment*), sučelja za geste (engl. *gesture interface*), 3D miševi i sučelja mozak-računalo (engl. *brain-computer interface*).

Postoje različiti uređaji poput nosivih senzora, ekrana osjetljivih na dodir te uređaja za interakciju temeljenih na računalnom vidu koji korisnicima omogućuju realističnu 3D interakciju [44]. Od senzora koji uspješno prepoznaju prirodne geste ruku posebice se ističe Leap Motion [45]. Leap Motion je mali periferni uređaj koji je dizajniran prvenstveno za detekciju gesta ruke i položaja prstiju korisnika. Uređaj koristi tri infracrvene LED diode i dva CCD senzora (engl. *charge-coupled device*, CCD). Prema navodima proizvođača Leap Motiona, točnost senzora u detekciji položaja vrha prsta je 0,01 mm.

Jedan od izazova prilikom implementacije interakcije gestama ruku je činjenica da ne postoji nikakva norma, model ni znanstveno dokazani prototip na koji način korisnik točno može vršiti interakciju s trodimenzijskim objektom [42].

Iako su web kamere jedan od važnijih uređaja pri istraživanju mogućih interakcija s 3D objektima, još uvijek nije pronađeno rješenje za optimalnu procjenu položaja ruku s obzirom na ambijentalna te sklopovska ograničenja [46]. U radu [47] predstavljen je sustav praćenja ruku u virtualnoj i proširenoj stvarnosti koristeći web kameru. Za razliku od kamera ugrađenih u VR uređaje, koje ograničavaju pozicioniranje ruku i ponekad uzrokuju nelagodu nekim korisnicima, ovaj sustav omogućuje veću slobodu kretanja ruku i prirodniji položaj. Sustav postiže visoku točnost predviđanja gesta od 99% te omogućuje simultanu interakciju više korisnika, čime se značajno poboljšavaju kolaborativna iskustva u 3D VR/AR okruženjima.

Korištenje markera kao jedno od mogućih rješenja za ostvarivanje interakcija putem web kamera predstavljeno je u radu [48]. Razvijena je aplikacija u kojoj su implementirani markeri za proširenu stvarnost za interakcije, a za vizualizaciju objekta, u ovom slučaju planete Zemlje, koristi se holografška projekcija pomoću projekcijske piramide. Interakcija korisnika s aplikacijom temelji se na postavljanju markera na bazu projekcijske piramide koja nakon detekcije markera mijenja prikazani objekt u piramidi uz snimljenu naraciju koja pobliže objašnjava što je prikazano.

1.2.2 Prirodne interakcije

Kao jedno od mogućih rješenja za intuitivnu interakciju s 3D sučeljima ističe se prirodna interakcija (engl. *natural interaction*) [49]. Prirodna interakcija s programskim rješenjima odvija se na isti način poput komunikacije među osobama - pokretima, gestama ili govorom. Geste se smatraju tehnikom koja potencijalno može pružiti prirodnije i kreativnije metode za komunikaciju s različitim programskim rješenjima. Još jedan razlog za to je činjenica da se ruke češće koriste za gestikuliranje u usporedbi s drugim dijelovima tijela te su prirodni medij za komunikaciju među ljudima [51]. Prirodne interakcije nisu nužno 3D interakcije, iako se često koriste u 3D sučeljima. Mogu se primjenjivati u 2D sučeljima, primjerice kroz glasovne naredbe.

Uz prirodne interakcije često vezujemo pojam prirodnih korisničkih sučelja (engl. *Natural User Interface*, NUI). Prednost prirodnog korisničkog sučelja leži u tome što korisnička

interakcija omogućava korisniku korištenje šireg spektra osnovnih vještina u usporedbi s tradicionalnim grafičkim korisničkim sučeljima koja se uglavnom oslanjaju na miš i tipkovnicu za interakciju [52].

Uobičajeno je vjerovanje da će korisničko sučelje postati prirodno samo zbog korištenja gesta kao načina interakcije. Međutim, promatranjem višedodirnih (engl. *multi-touch*) gesti na uređaju Apple iPad, koje se općenito smatraju primjerom prirodne interakcije, postaje jasno da je stvarnost nešto složenija, iako neke geste na iPadu korisniku dolaze prirodno i intuitivno - kao što je klizanje prstom po zaslону ulijevo ili udesno. Na primjer, klizanje jednim prstom omogućava listanje stranica ili premještanje sadržaja s jedne strane zaslona na drugu, simulirajući analogni svijet. Međutim, neke geste zahtijevaju više učenja, kao što je prelazak s četiri prsta ulijevo ili udesno kako bi se prešlo s jedne aplikacije na drugu. Ovakve geste nisu intuitivne i zahtijevaju dodatno učenje jer nije očigledno kako izvršiti interakciju. To zahtijeva razumijevanje veze između geste i radnje koja se obavlja [53].

Veći dio koncepta prirodnih interakcija i sučelja temelje se na Microsoftovim definicijama i smjernicama. Bill Buxton, vodeći istraživač u Microsoftu, ističe da NUI "koristi vještine koje smo razvili kroz cijeli život u stvarnom svijetu, smanjujući kognitivno opterećenje i time smanjujući distrakciju". Osim toga, naglašava da NUI uvijek treba izraditi uzimajući u obzir kontekst uporabe. Postizanje prirodnosti u svakom kontekstu uporabe i za sve korisnike je izazovno. Iako geste, glas i dodir igraju važnu ulogu u mnogim prirodnim korisničkim sučeljima, korisnicima će se doista činiti prirodnima samo ako su u skladu s njihovim razinama vještina i specifičnim scenarijima korištenja te kontekstu uporabe aplikacije i gesti. Na primjer, Bill Buxton naglašava da bi glasovna korisnička sučelja mogla biti najprirodniji izbor za vožnju automobila, ali možda nisu prikladna u scenarijima s više ljudi u blizini, kao što je u prepunom vozilu gdje je privatnost važna. S obzirom na tehnologiju dostupnu početkom 21. stoljeća, stvaranje trodimenzijskih sučelja koja se univerzalno čine prirodnim za sve korisnike je gotovo nemoguć zadatak. Umjesto pokušaja da prirodna korisnička sučelja budu univerzalna, fokus bi trebao biti na prilagođavanju svakog ovakvog sučelja određenim korisnicima i kontekstima [53].

1.3. Pristupačnost vizualizacijskih tehnologija

Osim mogućnosti interakcije, jedan od bitnih aspekata edukacijskih programskih rješenja je i pristupačnost. Digitalna pristupačnost označava mjeru u kojoj je neki računalni program, web sjedište ili uređaj prihvatljiv i pogodan za korištenje od strane osoba s invaliditetom i osoba

starije životne dobi. Primjenom digitalne pristupačnosti postiže se veći stupanj uključenosti osoba s teškoćama u suvremeno društvo. Digitalna uključenost, odnosno digitalna inkluzija, predstavlja sva nastojanja da se poveća stupanj društvene uključenosti osoba s invaliditetom i osoba starije životne dobi prilagodbom postojećih ili razvojem novih usluga zasnovanih na informacijskoj i komunikacijskoj tehnologiji, koje će omogućiti efikasniju komunikaciju, pristup informacijama i podršku pri edukaciji [54]. Prema statistici Ministarstva znanosti i obrazovanja¹, u Republici Hrvatskoj u osnovnim školama u razdoblju od 2022. do 2023. godine bilo je ukupno 309179 učenika i 28044 učenika s teškoćama u učenju. To znači da je ukupan udio učenika s teškoćama u razvoju bio 9,07%.

Inkluzija u obrazovanju temelji se na načelu da svi učenici trebaju učiti zajedno, neovisno o njihovim teškoćama ili razlikama. Prema socijalnom modelu invaliditeta, prilagodbom okruženja i pružanjem odgovarajuće podrške, osobe s invaliditetom mogu biti uključene u sve aspekte života, uključujući obrazovanje i zapošljavanje [55]. Isključivanje učenika s teškoćama u učenju iz redovnog obrazovnog okruženja često ima negativne učinke. Sudjelovanjem u redovitom školskom programu, učenici s teškoćama u učenju mogu postati interaktivniji i aktivniji u obrazovnom procesu te se bolje socijalizirati s vršnjacima, što je neophodno za razvoj inkluzivnog društva. Obrazovanje učenika s teškoćama u učenju predstavlja jedinstven izazov. Često kod učenika s teškoćama u učenju postoji granično zadržavanje pažnje, stoga ih je teško zadržati dulje vrijeme na određenom zadatku. Nove tehnologije koje služe za vizualizaciju edukacijskog sadržaja poput proširene stvarnosti mogu stimulirati njihov interes i privući im pažnju dovoljno da bi osigurali učinkovito učenje [56].

Većina istraživačkih radova iz područja pristupačnosti vizualizacijskih tehnologija usmjerena je na osobe s oštećenim vidom jer je većina sadržaja vizualna. U cilju povećanja pristupačnosti, uređaji za nadomještaj osjetila (engl. *Visual-to-Audio Sensory Substitution Devices*, SSD-ovi) mogu se koristiti za sonificiranje vizualnih informacija sa zaslona. Sonificiranje je tehnika prenošenja informacija putem zvuka, neovisno o riječima i govoru. Ovi uređaji prepoznaju slike sa zaslona i pretvaraju ih u zvuk. Slike su segmentirane u matricu 30×50, a svaka ćelija je povezana s bojom i mjestom. Boje su definirane pomoću modela HSL (engl. *Hue, Saturation, Lightness*), koji koristi nijansu (*hue*), zasićenost (*saturation*) i svjetlinu (*lightness*) boja. HSL vrijednosti se grupiraju u 6 boja, svaka je

¹ Ministarstvo znanosti i obrazovanja – Adresar školskih ustanova:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizWE3YTE4OWQtOWJmNC00OTJmLWE2MjktYTQ5MWJINDNIZDQ0IiwidCI6IjJMTFjYmNjLWI3NjEtNDVkYi1hOWY1LTRhYz0ZTFkNCIsImMiOj9> [Pristup: 1. rujna 2023.]

povezana s drugim glazbenim instrumentom. U istraživanju [57], korišten je uređaj EyeMusic SSD koji prenosi vizualne podatke koristeći različite osjetila, oslanjajući se na sposobnost mozga da reinterpreтира informaciju preko preostalih osjetila poput sluha. Ispitivanje je obuhvatilo 13 ispitanika, uključujući četiri osobe rođene s oštećenim vidom i devet osoba koje su nosile povez oko očiju. Ispitanici su prvo prošli fazu učenja, a zatim su obavljali različite zadatke. Osobe s oštećenim vidom uspješno su izvršavale sve zadatke sa 100% uspješnosti. Ovi rezultati ukazuju na značajan potencijal uporabe SSD-ova za sonificiranje slike kako bi se osigurala pristupačnost i poboljšala interakcija u virtualnim okruženjima.

U radu [58] opisan je prototip programskog rješenja za pristupačnost u virtualnim okruženjima. Implementirani prototip je programsko rješenje otvorenog koda GearVRF Accessibility2 of GearVR kojeg su razvili tvrtke Oculus i Samsung. Prototip prikazuje trodimenzijsko okruženje tematski vezano uz more i nebo, s funkcionalnostima poput prikaza vremena, aplikacija, sata i razine baterije. Implementirane opcije pristupačnosti uključuju povećanje/smanjenje sadržaja, inverziju boja (engl. *inverted colours*), automatsko čitanje teksta unutar aplikacije te dodavanje opisa video zapisima i slikama (engl. *captions*). Prototip je uspješno evaluiran s grupom od 12 ispitanika s različitim vrstama oštećenja, a korisnici su prepoznali korisnost ovakvog pristupačnoga rješenja.

U [59] je sugerirano da se pristupačnost u AR može postići korištenjem glasovnih naredbi, haptičkim ili taktilnim povratim informacijama ili prilagodbom vizualnih prikaza za slabovidne korisnike. Autori uvode pojam AR4VI (engl. *Augmented Reality For Visual Impairment*) što je pristup u kojem se sugerira uvođenje natpisa s informacijama o prostornoj lokaciji u aplikacijama poput Google Maps-a. Jedan od jednostavnih načina postizanja pristupačnosti za osobe koje imaju disleksiju opisan je u [60]. Rješenje se zasniva na snimanju teksta prikazanog na nekom uređaju ili tiskanom mediju pomoću kamere pametnog telefona te primjeni načela proširene stvarnosti kako bi se tekst prilagodio prikazom osobama s disleksijom. Skenirani tekst se prikazuje na ekranu pametnog telefona te korisnik može povećati kontrast teksta i pozadine i promijeniti font čime tekst može prilagoditi svojim potrebama.

Iako se vizualizacijska tehnologija u posljednje vrijeme brzo razvija, istraživanja vezana za inkluzivnost i pristupačnost ove tehnologije imaju sporiji tempo [61]. S obzirom na to da je temelj inkluzivnog obrazovanja taj da sva djeca trebaju učiti zajedno, u području vizualizacijskih tehnologija potrebno je iznaći rješenje koje će premostiti potencijalne barijere

koje predstavljaju ove tehnologije učenicima s teškoćama te omogućiti različite prilagodbe vizualiziranog objekta s obzirom na različite uvjete i kontekste njihove primjene. Jedno od mogućih rješenja je **potpomognuti prikaz 3D objekta**. Kao što je definirano u uvodu, potpomognuti prikaz 3D objekta je prikaz koji se zasniva na integraciji pomagala, metoda i tehnika iz područja potpomognute komunikacije s ciljem ostvarivanja jednakih mogućnosti korištenja 3D vizualizacijske tehnologije. Primjerice, za 3D holografski prikaz, potpomognuti prikaz objekta je 2D prikaz na pokretnom uređaju. Definicija je oblikovana s obzirom na definiciju potpomognute komunikacije koja je definirana kao integrirana skupina sastavnica koje uključuju simbole, pomagala, metode i tehnike koje korisnici rabe s ciljem jačanja komunikacija, a cilj je ostvariti funkcionalnu komunikaciju te cjelovito sudjelovanje u dobnim primjerenim aktivnostima uz stjecanje novih znanja i iskustva [54].

1.3.1. Primjer pristupačne mobilne aplikacije zasnovane na proširenoj stvarnosti

U sljedećem poglavlju bit će opisan primjer pristupačne mobilne aplikacije zasnovane na proširenoj stvarnosti, čiji su razvoj i iskustva korištenja u praksi tijekom zadnjih nekoliko godina utjecali na razvoj istraživačkog instrumenta korištenog u istraživanju prilagodbi 3D prikaza i interakcija i ostvarivanju znanstvenog doprinosa ovog rada.

Na temelju *Metodologije za razvoj pristupačnih mobilnih programskih rješenja* [62], na Sveučilištu u Dubrovniku razvijena je mobilna AR aplikacije ARGeoBody koja pomaže u učenju o geometrijskim tijelima. Metodologija se temelji se na općim *Smjernicama o pristupačnost web sadržaja 2.1 (WCAG)*², a ove opće smjernice nadograđene su konkretnim primjerima i zaključcima izvedenim iz provedenog istraživanja o stvarnim potrebama korisnika pristupačnoga mobilnoga prototipa.

Aplikaciju su razvile dvije studentice Studija računarstva Sveučilišta u Dubrovniku, u sklopu njihovog diplomskog projekta i diplomskog rada [63], [64]. Aplikacija ARGeoBody namijenjena je učenicima osnovnih škola kako bi im pomogla u upoznavanje i učenje o osnovnim geometrijskim tijelima kroz proširenu stvarnost temeljenu na markerima. Marker su u obliku QR kodova, a svaki marker povezan je s određenim geometrijskim tijelom. Skeniranjem markera unutar aplikacije, korisnicima se na zaslonu prikazuje odgovarajuće geometrijsko tijelo. Aplikacija je strukturirana u tri razine: (i) *razina za učenje*, (ii) *razina za prepoznavanje geometrijskih tijela pomoću markera*, i (iii) *razina za provjeru znanja*. Cilj

² Smjernice za pristupačnost web sadržaja 2.1, <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>, [Pristup: 12. listopada 2023.]

razvoja je bio prikazati u proširenoj stvarnosti geometrijska tijela te implementiranim načinima interakcija prilagoditi aplikaciju što je moguće većem broju korisnika, bez obzira na mogućnosti i znanje. Aplikacija ARGeoBody razvijena je programskoj tehnologiji Unity³, inačica 2017.1.0f3. Za implementaciju proširene stvarnosti korištena je platforma Vuforia⁴, inačica 8.6.10. Unity je višeplatformsko razvojno okruženje koji nudi integrirano razvojno okruženje za razvoj 2D i 3D računalnih igara te za izradu aplikacija koje služe za 3D vizualizaciju. Razvojni paket Vuforia izabran je za implementaciju proširene stvarnosti zbog jednostavnosti korištenja te podrške za razvoj na platformama Android i iOS. Aplikaciju je moguće preuzeti u obliku *apk* datoteke. Minimalna inačica Android sustava na pokretnim uređajima mora biti Jelly Bean 4.1⁵.

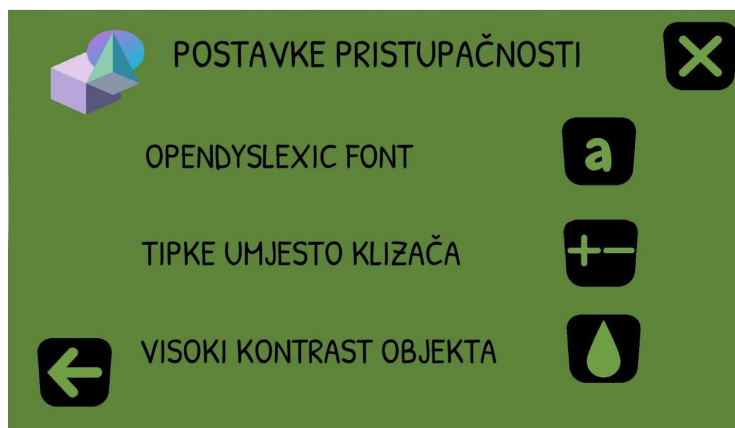
U skladu sa svrhom aplikacije i njenim specifičnim kontekstom korištenja, pažljivo je implementiran optimalan skup opcija pristupačnosti temeljen na gore spomenutima *Metodologiji za razvoj pristupačnih mobilnih programskih rješenja* [62] i smjernicama WCAG. S obzirom na raznovrsnost potreba i sklonosti korisnika, posebno unutar populacije osoba s invaliditetom (OSI), ključno je bilo integrirati načela univerzalnog dizajna (UD) i pristupačnosti kako bi se omogućilo da širok spektar učenika mogu imati zadovoljavajuće korisničko iskustvo s aplikacijom. Univerzalni dizajn je termin koji označava bilo koji zahvat koji se odnosi na neku okolinu, proizvod i/ili uslugu, a koji ima za cilj osigurati da svatko, uključujući i buduće generacije, bez obzira na dob, spol, sposobnosti ili kulturne pozadine, može sudjelovati u društvenim, ekonomskim, kulturnim i zabavnim aktivnostima s jednakim mogućnostima [65]. Kako bi aplikacija bila prikladna za osobe s oštećenjem vida, u aplikaciju su implementirane mogućnosti odabira teme, odnosno različite kombinacije boja teksta, pozadine i gumba. Također, implementirana je i opcije promjene kontrasta u visoki kontrasta za prikaz geometrijskih tijela u proširenoj stvarnosti. Aplikacija sadrži i opciju za promjenu fonta teksta u font koji je prikladniji za osobe s disleksijom. Zbog mogućih poteškoća koje osobe s motoričkim oštećenjima mogu imati pri korištenju klizača, implementirana je mogućnost zamjene klizača s gumbima. Ova prilagodba omogućava jednostavniju kontrolu veličine i brzine rotacije geometrijskih tijela, čime se povećava pristupačnost sustava za korisnike s motoričkim oštećenjima [26]. Sve opcije pristupačnosti dostupne su unutar prozora "Postavke" smještenog u donjem desnom kutu panela. Za pristup tim opcijama (Slika

³ Unity, <https://unity.com/>, [Pristup: 13. listopada 2023.]

⁴ Vuforia, <https://developer.vuforia.com/>, [Pristup: 13. listopada 2023.]

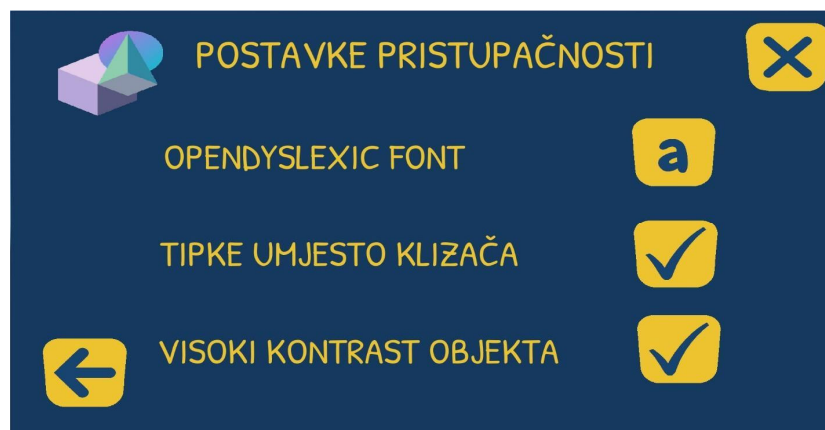
⁵ Android 4.1. Jelly Bean. www.android.com/versions/jelly-bean, [Pristup: 13. listopada 2023.]

1.2) korisnici mogu koristiti posebno dizajniranu tipku za opcije pristupačnosti, koja je oblikovana prema međunarodno prepoznatoj ikoni za digitalnu pristupačnost.



Slika 1.2 Izbornik za opcije pristupačnosti u ARGeoBody aplikaciji
(Izvor: snimka zaslona)

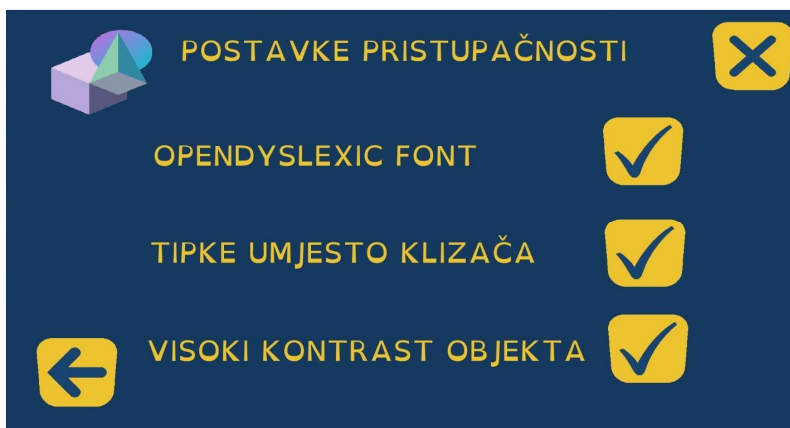
U "Postavkama pristupačnosti" korisnicima je dostupna opcija prilagodbe fonta teksta u aplikaciji. Umjesto standardnog fonta (Slika 1.3), moguće je odabrati font koji je posebno prilagođen potrebama osoba s disleksijom (Slika 1.4). Disleksija je specifični poremećaj učenja koji se karakterizira problemima s čitanjem, nastalim zbog poteškoća u prepoznavanju fonema i njihovom povezivanju s pisanim simbolima. Ovaj poremećaj nije povezan s intelektualnim sposobnostima, oštećenjima vida ni poznatim neurološkim oštećenjem [66].



Slika 1.3 Standardni font u ARGeoBody aplikaciji
(Izvor: snimka zaslona)

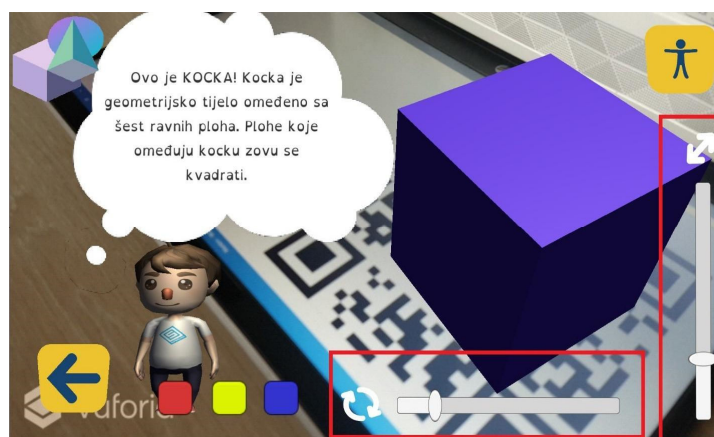
Fontovi prilagođeni osobama s disleksijom imaju specifične karakteristike koje ih razlikuju od standardnih fontova. Na primjer, slova su blago ukošena, donje crte su deblje, a visine slova poput "b", "d" i "p" variraju. Takav dizajn pomaže korisnicima s disleksijom da lakše

prepoznaju i razlikuju slova, smanjujući greške i napor pri čitanju. U aplikaciji je za promjenu fonta teksta korišten font OpenDyslexic, razvijen posebno za osobe s disleksijom.⁶



Slika 1.4 Opendyslexic font u ARGeoBody aplikaciji
(Izvor: snimka zaslona)

U ovoj aplikaciji, "klizači" su interaktivni elementi koji se koriste u scenama proširene stvarnosti. Pomoću njih, korisnik može mijenjati veličinu geometrijskog tijela i brzinu njegove rotacije (Slika 1.5). Prvi klizač horizontalno je postavljen pri dnu ekrana i koristi se za kontrolu brzine rotacije geometrijskog tijela. Pomičući prst s lijeva na desno, korisnik ubrzava rotaciju, dok obrnuto usporava. Drugi klizač, smješten vertikalno uz desni rub ekrana, omogućuje mijenjanje veličine objekta. Pomicanjem prsta odozdo prema gore povećava se veličina geometrijskog tijela, dok obrnuto smanjuje.



Slika 1.5 Interakcija putem klizača u ARGeoBody aplikaciji
(Izvor: snimka zaslona)

Opcija zamjene klizača s četiri gumba (Slika 1.6) omogućuje upravljanje brzinom rotacije i veličinom objekta. Donji dio ekrana sadrži dvije tipke s oznakama "+" i "-" za kontrolu brzine

⁶ OpenDyslexic font, <https://www.dafont.com/open-dyslexic.font>, [Pristup: 14. listopada 2023.]

rotacije. Na desnom rubu ekrana su dvije dodatne tipke s istim oznaka, za kontrolu veličine objekta. Funkcionalnost ovih tipki je ista kao kod prethodnih klizača. Tipka s oznakom "+" ubrzava rotaciju, dok tipka s oznakom "-" usporava. Isto tako, tipka s oznakom "+" povećava veličinu objekta, dok tipka s oznakom "-" smanjuje.



Slika 1.6 Interakcija putem gumba u aplikaciji ARGeoBody
(Izvor: snimka zaslona)

Ova prilagodba je uključena kao opcija pristupačnosti u aplikaciji kako bi se olakšalo korištenje osobama s motoričkim teškoćama. Motoričke vještine odnose se na usvojene tehnike izvođenja pokreta ili kombinacije pokreta koje zahtijevaju precizno kontroliranje mišića s ciljem postizanja određenog zadatka. Motoričke poteškoće uključuju niz poremećaja koji utječu na finu i grubu motoriku te ravnotežu tijela, što rezultira problemima u svakodnevnim motoričkim aktivnostima [67].

Kako bi se geometrijski objekti u proširenoj stvarnosti učinili vidljivijima za slabovidne osobe sa slabovidnošću, implementirana je opcija postavljanja visokog kontrasta objekta. Budući da vidljivost tih objekata također ovisi o uvjetima okruženja korisnika, nije moguće potpuno kontrolirati njihov prikaz. U aplikaciji ARGeoBody, markeri se koriste za prikaz objekata u proširenoj stvarnosti, a važno je osigurati dobro osvjetljenje za ispravno prepoznavanje markera kamerom. U optimalnim uvjetima osvjetljenja, objekti su prikazani crnom bojom kako bi se maksimalno istaknuli u odnosu na okolinu (Slika 1.7).



Slika 1.7 Izgled geometrijskog tijela poslije odabira opcije za visoki kontrast objekta
(Izvor: snimka zaslona)

Slijedeći smjernice *Metodologije za razvoj pristupačnih mobilnih programskih rješenja*, dodana je opcija odabira teme (Slika 1.8) unutar aplikacije kako bi se olakšalo korištenje slabovidnim osobama. Preporučeni omjer kontrasta između pozadine i teksta je 7:1, a minimalni 4,5:1. Također je važno omogućiti više kombinacija boja pozadine i teksta koje osiguravaju dovoljan kontrast.

Odabrane kombinacije boja u ovoj aplikaciji su:

- Crno (#000000) – Žuta (#feeb39) tema,
- Plavo (#1a4571) – Žuta (#ecc431) tema,
- Crveno (#c72e2b) – Crna (#000000) tema,
- Zeleno (#709e44) – Crna (#000000) tema.



Slika 1.8 Izgled tema unutar ARGeoBody aplikacije
(Izvor: snimka zaslona)

U sklopu diplomskog rada [64] provedena je evaluacija aplikacije s ciljem procjene njezine prilagođenosti svim korisnicima, odnosno primjene načela univerzalnog dizajna. Evaluacija je također ispitala primjenjivost aplikacije u školskoj nastavi te identificirala područja za poboljšanje. U istraživanju je sudjelovalo 88 ispitanika, a rezultati su pokazali da je aplikacija intuitivna, jednostavna za korištenje te da su ispitanici bili zadovoljni dizajnom i preglednošću tekstova, gumba i ostalih elemenata aplikacije.

Implementacija i korištenje aplikacije ARGeoBody utjecalo je na doktorsko istraživanje u smislu smjernica za razvoj istraživačkog instrumenta HoloZoo, detaljno opisanog u potpoglavlju 3.2.1. Visoka razina zadovoljstva korisnika intuitivnošću i jednostavnošću korištenja ARGeoBody-a potaknula je primjenu sličnih dizajnerskih načela u istraživačkom instrumentu HoloZoo. Na primjer, u HoloZoo-u su elementi korisničkog sučelja, poput klizača za rotaciju objekata te klizača za povećavanje i smanjivanje objekata, postavljeni na sličan način. Također, implementirane su opcije pristupačnosti poput promjene kontrasta i zamjene klizača gumbima.

1.3.2. Primjer pristupačne mobilne aplikacije zasnovane na holografskoj tehnologiji

U sklopu projekta INNOSID razvijena je aplikacija HoloGeometry. Projekt INNOSID⁷, čije puno ime glasi "Inovativna rješenja temeljena na novim tehnologijama za poboljšanje socijalne uključenosti osoba s invaliditetom", bio je Erasmus+ projekt vođen od strane Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Glavni cilj projekta bio je unaprijediti socijalnu uključenost osoba s invaliditetom, s posebnim naglaskom na osobe s Downovim sindromom, kroz razvoj inovativnih rješenja temeljenih na novim tehnologijama. Konzorcij projekta čini šest visokoškolskih ustanova: Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Dubrovniku, Universitat Politècnica de València, University of Debrecen, Institut Mines Telecom Universitat Atlantique Bretagne Pays de la Loire i Instituto Politécnico de Santarém. Osim visokoškolskih ustanova, sudjelovala je i nevladina organizacija Hrvatska udruga za Down sindrom⁸.

Aplikacija HoloGeometry također je, kao i prethodno opisana aplikacija ARGeobody, razvijena je s namjerom pružanja podrške učenicima tijekom učenja o geometrijskim tijelima. U domeni geometrije, posebna pažnja se posvećuje činjenici kako se geometrijski likovi i tijela često prikazuju iz jedne perspektive u udžbenicima, što može rezultirati poteškoćama u primjeni naučenog znanja u različitim prostornim orijentacijama ili u sposobnosti ekstrapolacije informacija [68].

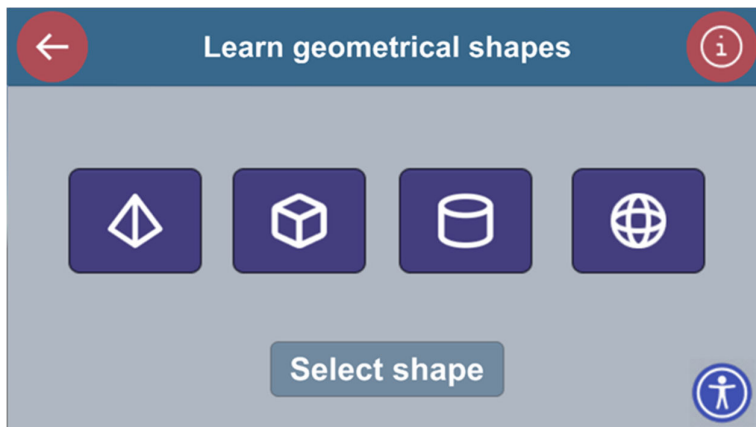
HoloGeometry je razvijen za računala ili/i pokretne uređaje te koristi holografsku tehnologiju za lakšu vizualizaciju geometrijskih tijela. Aplikacija je dizajnirana tako da polovica ekrana služi za prikaz holograma, dok se na drugoj polovici nalaze klizači, gumbi, tekst i druge

⁷ INNOSID, <http://sociallab.tel.fer.hr/innosid/>, [Pristup: 4. studenog 2023.]

⁸ Hrvatska udruga za Down sindrom, <https://www.zajednica-down.hr/>, [Pristup: 4. studenog 2023.]

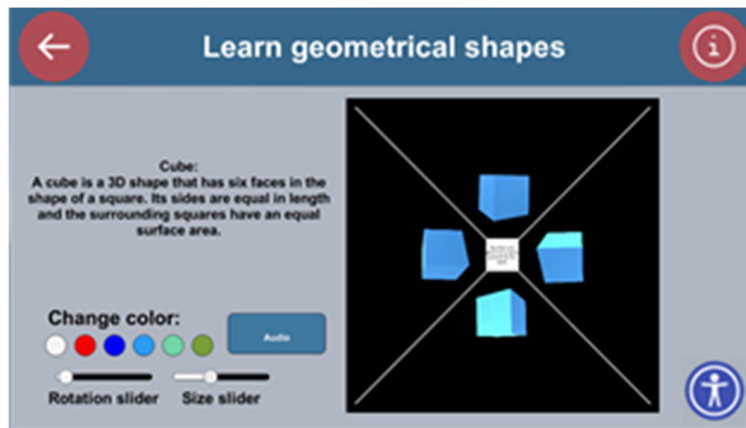
komponente aplikacije. Važno je napomenuti da ne postoji drugi uređaj za simulaciju holograma, kao primjerice u aplikaciji HoloZoo detaljnije opisanoj u poglavlju 3.2. Tijekom razvoja aplikacije posebna pažnja posvećena je pristupačnosti i univerzalnom dizajnu, na primjer, svako geometrijsko tijelo dolazi s opisom u tekstualnom i audio formatu. Također je moguće promijeniti font u onaj prikladan za osobe s disleksijom te je moguće promijeniti boju prikazanog geometrijskog tijela kako bi se poboljšala njegova vidljivost. Aplikacija je dostupna na engleskom jeziku.

Aplikacija uključuje tri razine: (1) *Naučite geometrijska tijela*, (2) *Prepoznajte geometrijske tijela* i (3) *Provjerite svoje znanje*. Prva razina odnosi se na učenje geometrijskih tijela. Korisnici se mogu upoznati s 4 različita geometrijska tijela: sferom, piramidom, cilindrom i kockom (Slika 1.9)



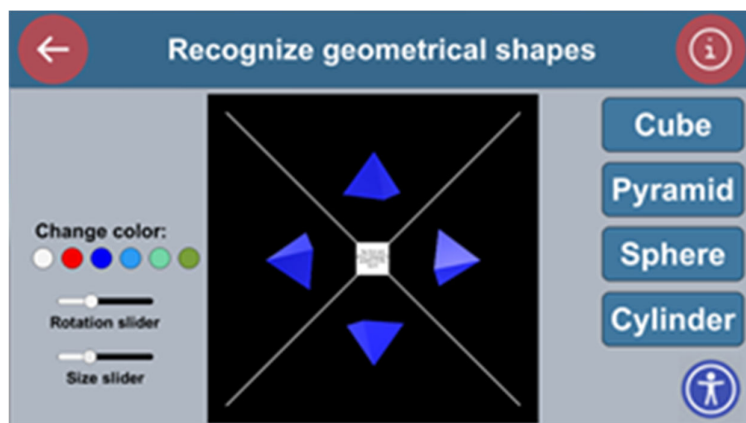
Slika 1.9 Prikaz prva razine *Naučite geometrijska tijela*
(Izvor: snimka zaslona)

Geometrijsko tijelo koji se prikazuje na hologramu se može povećavati, smanjivati i rotirati korištenjem klizača. Osim rotiranja, moguće je promijeniti boju 3D objekta, odnosno geometrijskog tijela, a dostupne boje su bijela, crvena, tamno plava, svijetlo plava, svijetlo zelena i tamno zelena. Audio zapis tekstualnog opisa prikazanog 3D objekta određenog geometrijskog tijela dostupan je pritiskom na gumb *Audio*. Primjer kako je dizajnirana scena s opisom jednog geometrijskog tijela, u ovom slučaju kocke, prikazan je na slici 1.10.



Slika 1.10 Prikaz scene o učenju geometrijskog tijela kocke
(Izvor: snimka zaslona)

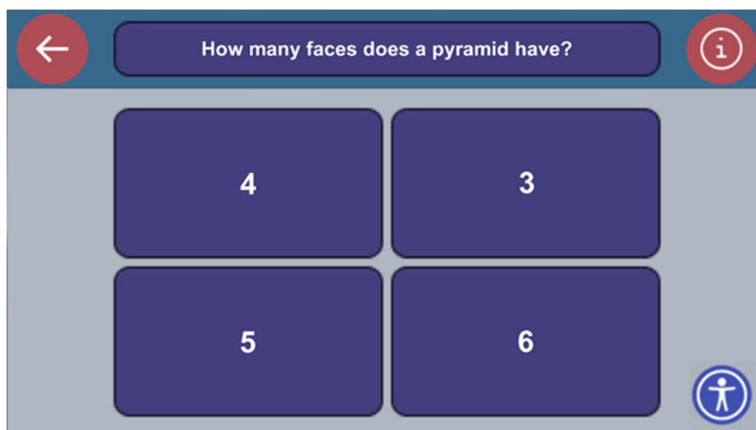
Druga razina, *Prepoznajte geometrijske tijela*, dizajnom je slična prvoj razini, ali služi za utvrđivanje znanja stečenog na prvoj razini, odnosno za uvježbavanje razlikovanja geometrijskih tijela. Na ovoj razini, korisnicima se na hologramu prikazuju različiti geometrijska tijela, a zadatak im je prepoznati koje tijelo je prikazano. Zaslone je dizajniran za prikaz holografski prikaz 3D objekta u sredini. Na lijevoj strani sučelja nalaze se gumbi za interakciju s hologramom, a na desnoj strani ponuđeni odgovori, od kojih korisnik treba odabrati ispravan. Sučelje ove igre prikazan je na slici 1.11.



Slika 1.11 Prikaz druge razine *Prepoznajte geometrijska tijela*
(Izvor: snimka zaslona)

Kada korisnik odabere treću razinu, *Provjerite svoje znanje*, pokreće se kviz koji uključuje deset nasumično odabranih pitanja o geometrijskim tijelima s ciljem provjere usvojenih znanja o geometrijskim tijelima u prethodnim razinama (Slika 1.12). Svako pitanje prati četiri ponuđena odgovora, od kojih je samo jedan točan. Ako korisnik odabere netočan odgovor, taj odgovor će se obojiti crveno, dok će točan odgovor postati zelen. Nakon završetka kviza, na

zaslonu se prikazuje statistika koja uključuje broj točno odgovorenih pitanja i postotak uspješnosti.



Slika 1.12 Prikaz treće razine *Provjerite svoje znanje*
(Izvor: snimka zaslona)

Razvoj HoloGeometrya utjecao je na razvoj istraživačkog instrumenta HoloZoo kroz zaključak da holografski prikaz treba biti potpuno odvojen od sučelja s pitanjima kako bi se korisnicima omogućio veći i jasniji prikaz 3D objekta.

1.3.3. Primjena strojnoga učenja za povećanje pristupačnosti web-aplikacija

Primjena strojnoga učenja u prilagodbi korisničkih sučelja koristi se u različitim područjima pa tako i u razvoju u web-aplikacija za prilagodbu korisničkih sučelja. Analizirajući korisničke interakcije, model strojnoga učenja može optimizirati dizajn web-aplikacije, izgled i funkcionalnost, stvarajući sučelje koje je prilagođeno potrebama korisnika [69]. Korisničko sučelje (engl. *user interface*, UI) odnosi se na sve vizualne elemente, kontrole i komponente putem kojih korisnici ostvaruju interakciju s aplikacijom, odnosno programskim sustavom. To uključuje boje, tipografiju, gumbe, ikone i raspored elemenata koji zajedno definiraju izgled i način funkcioniranja sučelja. Glavni cilj korisničkog sučelja je učiniti interakciju s programskim sustavom što jednostavnijom, intuitivnijom i učinkovitijom za korisnike [70]. Kao što je ranije spomenuto u radu, univerzalni dizajn je pristup dizajniranju proizvoda i okruženja tako da budu upotrebljivi za što širi spektar ljudi bez potrebe za dodatnim prilagodbama [65]. To uključuje dizajniranje korisničkog sučelja koje je jednostavno, intuitivno i pristupačno za sve korisnike, uključujući one s invaliditetom.

Prilagodba korisničkog sučelja odnosi se na proces optimizacije i modifikacije sučelja kako bi se poboljšalo korisničko iskustvo, uzimajući u obzir specifične potrebe i preferencije

korisnika [71]. Važni aspekti prilagodbe korisničkog sučelja uključuju personalizaciju i pristupačnost. Personalizacija omogućavanja korisnicima prilagodbu izgled i funkcionalnost sučelja prema svojim preferencijama, kao što su promjena boje, veličina fonta i raspored elemenata korisničkog sučelja. Pristupačnost podrazumijeva implementacija značajki koje omogućuju korištenje sučelja osobama s invaliditetom, kao što su opcije za promjenu kontrasta, glasovne naredbe i podrška za čitače ekrana. Prilagodba korisničkog sučelja dijelom se oslanja na principe univerzalnog dizajna, ali ide korak dalje u optimizaciji korisničkog sučelja prema specifičnim potrebama pojedinih korisnika.

S obzirom na raširenost web-aplikacija, zadovoljstvo korisnika iskazano kroz korisničko iskustvo postaje važan faktor za daljnji razvoj ovakvih aplikacija [72]. Općenito, tri najčešće ocjenjivane varijable zadovoljstva korisnika su jednostavnost korištenja, percipirana korisnost i mogućnost odgovarajuće prilagodbe korisničkog sučelja potrebama korisnika. Popularne metode evaluacije zadovoljstva korisnika su korisničke ankete, intervjui i analiza podataka. Miraz et al. [73] proveli su istraživanje o univerzalnoj uporabljivosti dizajna korisničkih sučelja, fokusirajući se na osnove adaptivnih (engl. *Adaptive User Interface*, AUI) i inteligentnih korisničkih sučelja (engl. *Intelligent User Interface*, IUI) preko tri područja: umjetne inteligencije (engl. *Artificial Intelligence*, AI), modeliranje korisnika (engl. *User Modeling*, UM) i interakcija čovjek-računalo (HCI). Rad naglašava kako su potrebno provesti dodatna istraživanja kako bi se utvrdile prednosti i učinkovitost IUI u usporedbi s AUI te odrediti trebaju li sučelja biti pod kontrolom sustava ili korisnika. Autori ističu kako je primjena ovih koncepata u području programskih sustava za edukaciju prioritet, gdje bi strojno učenje podatke skupljalo kroz interakcije korisnika u ozbiljnim igrama. AlRawi [74] koristio je metrike uporabljivosti za ispitivanje odnosa između uporabljivosti web-aplikacija i izvedbe krajnjih korisnika, koristeći opažanja i povratne informacije korisnika. U ovom kontekstu, izvedba krajnjeg korisnika objašnjava se u smislu učinkovitosti, efikasnosti, pamtljivosti, razumljivosti i zadovoljstva korisnika. Rezultati istraživanja sugeriraju moguću povezanost između uporabljivosti i izvedbe krajnjih korisnika.

Postoji nekoliko pristupa dizajnu interaktivne web-stranice prilagođene korisniku. S jedne strane, postoje standardne metode evaluacije, poput one predstavljene u [75]. U ovom su radu autori Kaur i Sharma istraživali probleme uporabljivosti odabranih popularnih web-aplikacija na temelju različitih parametara, koristeći tradicionalne metode testiranja uporabljivosti. Wang [76] je analizirao prioritete u dizajnu sučelja koji su važni za starije osobe. Polustrukturiranim upitnikom ispitao je potrebe korisnika Interneta starije životne dobi te je dobio

niz pokazatelja koji opisuju njihove specifične potrebe u web sučeljima. Hijerarhijskom analizom izračunao je težinu tih pokazatelja. Na temelju rezultata dao je prijedloge za poboljšanje pristupačnosti sučelja za starije osobe. Postoje i inovativniji pristupi, poput pristupa autora u [77] koji opisuju evolucijski algoritam za automatsko generiranje dizajna web stranica. *Real-time Usage Mining* (RUM) koristi informacije iz klijentskih zapisa (engl. *client logs*) za razvoj adaptivnih web-aplikacija. Informacije o ponašanju korisnika koji trenutno koriste web-aplikaciju mogu se koristiti za prilagođavanje korisničkog sučelja u stvarnom vremenu na temelju tih informacija kako bi se poboljšalo korisničko iskustvo.

Ako se korisnička sučelja promatraju kao spektar mogućnosti prilagodbe, na jednom kraju tog spektra nalaze se sučelja koja korisnici mogu samostalno prilagoditi kako bi povećali njihovu upotrebljivost i učinkovitost interakcije. Na drugom kraju spektra su inteligentna korisnička sučelja. Prema Šumak et. al [78], inteligentna korisnička sučelja (IUI) teže poboljšanju interakcije čovjeka i računala, posebno u smislu korisničkog iskustva i upotrebljivosti sučelja, koristeći se umjetnom inteligencijom. Rad također pruža opsežan pregled nastojanja ocjenjivanja korisničkog iskustva (UX) i uporabljivosti IUI-ja tijekom posljednjeg desetljeća. Osim toga, rad ističe područja gdje nedostaju istraživanja o IUI te analizira postojeća istraživanja i daje sustavni preglede literature. Fokus je stavljen na inteligentna, kontekstualno osjetljiva i multimodalna korisnička sučelja, prilagodljiva korisnička sučelja, inteligentnu interakciju čovjeka i računala, te prilagodljiva i prilagođavajuća korisnička sučelja.

Istraživanje primjene strojnoga učenja u evaluaciji korisničkih sučelja

U daljnjem tekstu opisat će se istraživanje o primjeni strojnoga učenja u evaluaciji dizajna korisničkih sučelja [79], stavit će se poseban naglasak na osobni doprinos u tim istraživanjima i s obzirom na taj utjecaj na ostvarivanje znanstvenih doprinosa doktorskog istraživanja opisanog u ovoj disertaciji. Doprinosi drugih autora bit će spomenuti isključivo u smislu objašnjavanja konteksta istraživanja.

Cilj istraživanja primjene strojnoga učenja u evaluaciji korisničkih sučelja bio je provjeriti mogu li modeli strojnoga učenja evaluirati različite dizajne korisničkog sučelja na način da ih rangiraju prema njihovoj pristupačnosti i uporabljivosti od najlošijeg prema najboljem. Pristupačnost je u ovom istraživanju razmatrana s aspekta postojećih smjernica i metodologija za razvoj pristupačnih mobilnih aplikacija i web-sjedišta [62][80]. U svrhu istraživanja, razvijen je istraživački instrument u formatu web-aplikacije. Istraživanje je podijeljeno u dvije aktivnosti. U prvoj aktivnosti, ispitanici rješavaju jednostavne matematičke zadatke u web

aplikaciji te ocjenjuju izgled korisničkog sučelja ocjenama od 1 do 5. Tijekom prve aktivnosti istraživanja, web aplikacija automatski bilježi vrijeme rješavanja zadataka, tekst pitanja, odgovor korisnika i izgled korisničkog sučelja. Druga aktivnosti podrazumijevala je čišćenja i pripremu prikupljenih podataka te njihovu analizu korištenjem različitih modela strojnoga učenja. U istraživanju je dobrovoljno sudjelovalo 338 ispitanika, većinom studenti prijediplomskih i diplomskih studija Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilišta u Dubrovniku. Podaci su prikupljeni na način da su ispitanici pristupali web aplikaciji optimiziranoj za korištenje na pokretnim uređajima.

Odabrane tehnologije za razvoj istraživačkog instrumenta bile su HTML, SCSS, JavaScript i PHP 7.0. Razvijena je web aplikacija u kojoj se nasumično generira izgled korisničkog sučelja na način da se generira raspored elemenata, boja pozadine i fonta, vrsta i veličina fonta iz unaprijed definiranih klasa opisanih u SCSS-u.

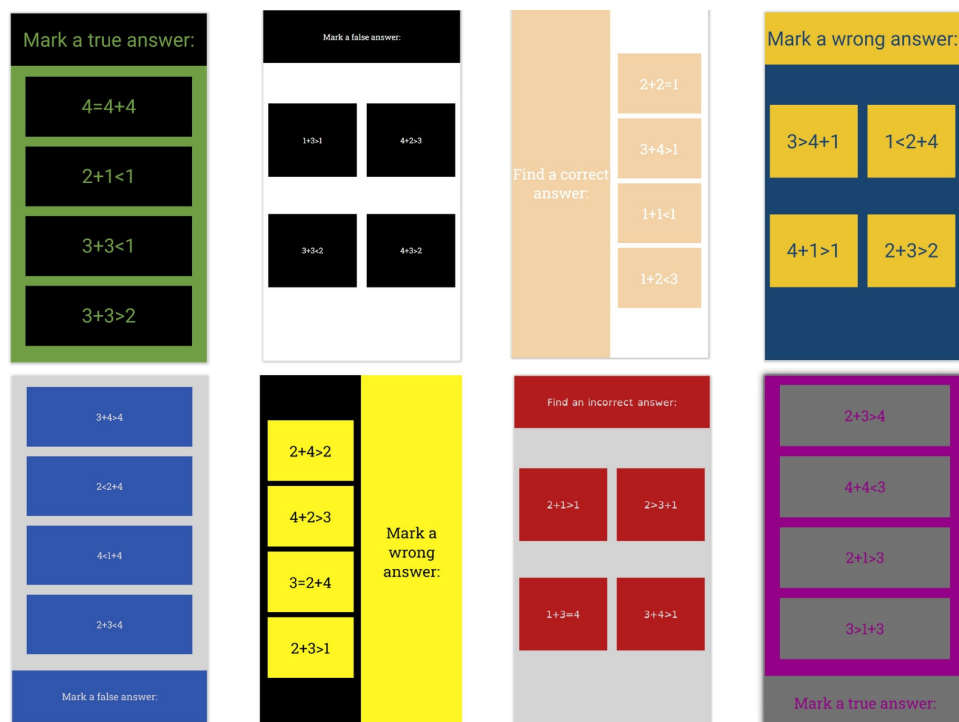
Web-aplikacija je dizajnirana po uzoru na klasične aplikacije za kvizove, koje se također koristi u programskim sustavima za edukaciju. U aplikaciji postoji 6 različitih rasporeda elemenata korisničkog sučelja. Korišteno je 18 različitih kombinacija boja fonta i pozadine. Osam kombinacija boja izabrane su iz *Metodologije za razvoj pristupačnih mobilnih programskih rješenja* [62]. Ostalih 10 kombinacija su napravljene prema preporukama da kontrast između pozadine i teksta bude 7:1, dok je minimalni prihvatljivi kontrast 4,5:1. Ove kombinacije uključuju i kontraste koji su ispod minimuma prihvatljivog kontrasta. Kombinacije boja i fontova s njihovim omjerom i pripadajućom HTML klasom prikazane su u Tablici 1.1. Fontovi su izabrani na sličan način kao i kombinacije boja. Preporuka je da se *sans serif* font koristi kao zadani font [80], ali nekim korisnicima za čitanje više odgovaraju *serif* fontovi. Osim *sans-serif* i *serif* fontova, korišten je i font za osobe s disleksijom OpenDyslexic. Odabrane veličine fonta bile su 16px, 18px, 27px i 36px. Neke od kombinacija izgleda, boja i fontova mogu se vidjeti na slici 1.13. Kombinacije navedenih izgleda, boja, fontova i veličina fontova korištene su kao skup podataka za učenje.

Tablica 1.1 Kombinacije boja pozadine i fonta s omjerom kontrasta i pripadajućim HTML klasama

HTML klasa	Boja pozadine	Boja fonta	Omjer kontrasta boje pozadine i fonta
color1	#FEFF26	#000000	19,54:1
color2	#ECC431	#1A4571	5,86:1

color3	#000000	#709E44	3,15:1
color4	#000000	#C72E2B	5,44:1
color5	#000000	#FFFFFF	21:1
color6	#D4D4D4	#3255AE	4,65:1
color7	#F2D2A6	#FFFFFF	1,44:1
color8	#727272	#940088	1,66:1
color9	#000000	#FEFF26	19,54:1
color10	#1A4571	#ECC431	5,86:1
color11	#709E44	#000000	3,15:1
color12	#C72E2B	#000000	5,44:1
color13	#FFFFFF	#000000	21:1
color14	#3255AE	#D4D4D4	4,65:1
color15	#FFFFFF	#F2D2A6	1,44:1
color16	#940088	#727272	1,66:1
color17	#D4D4D4	#B41D1D	4,52:1
color18	#B41D1D	#D4D4D4	4,52:1

Web-aplikacija se sastoji od 15 nasumično generiranih matematičkih pitanja s 4 ponuđena odgovora od kojih je samo jedan točan. Pitanja su podijeljena u 3 ciklusa od po 5 pitanja (ukupno 15). Na početku svakog ciklusa pitanja, generira se novi izgled sučelja. Pitanja su jednostavne matematičke jednadžbe kako bi se izbjegla moguća pristranost zbog znanja sudionika. Kako bi se dobili precizni podaci o vremenu i utvrdili stvarni utjecaj fonta na učinkovitost sučelja, bilo je potrebno osigurati da ispitanici pročitaju cijelo pitanje, zbog toga je svako pitanje bilo drugačije od prethodnih i automatski generirano. Aplikacija automatski bilježi informacije o korisničkom sučelju nasumično dodijeljenom ispitaniku (izgled, kombinacija boja, kontrast, vrsta i veličina fonta), pitanje, odgovore, odgovor ispitanika i vrijeme koje je ispitanik je proveo odgovarajući na pitanje. Vrijeme odgovora mjereno je od trenutka kada je sučelje određenog pitanja potpuno učitano i prikazano ispitaniku do trenutka kada je ispitanik odgovorio na pitanje i kada je aplikacija počela učitavati sljedeće pitanje.



Slika 1.13 Podskup kombinacija razmjesta elemenata sučelja, boja i fontova u istraživačkom instrumentu
(Izvor: snimka zaslona)

Na temelju prikupljenih informacija o izgledu sučelja (poput rasporeda elemenata, boja, fontova i sl.) i postavljenih pitanja, kreirane su i pohranjene slike korisničkih sučelja. Ove slike su generirane pomoću skripte za generiranje slika korisničkih sučelja, a pohranjene su na poslužitelju na kojem se nalazi web-aplikacija. Skripta za generiranja slika korisničkih sučelja tijekom generiranja slika zamijenila je tekst pitanja slovom "a" kako bi se spriječilo da model strojnoga učenja donosi zaključke temeljene na specifičnom tekstu pitanja. Slovo "a" je izabrano jer je ekspresivno te su na tom slovu vidljiva sva svojstva vrste fonta [81]. Tim generiranim slikama i podacima prikupljenim od korisnika tijekom prve istraživačke aktivnosti, naučen je model strojnoga učenja.

Nakon provođenja istraživanja u kojem je dobrovoljno sudjelovalo 338 ispitanika, počela je druga aktivnost istraživanja koja je podrazumijevala analizu i pripremu podataka koji će se potom koristiti u modelima strojnoga učenja. Podaci koji se koriste za učenje modela strojnoga učenja su slike korisničkih sučelja te vrijeme provedeno na tom sučelju. Međutim, kako bi se testirale stvarne mogućnosti modela strojnoga učenja, pripremljen je dodatni skup podataka za testiranje modela strojnoga učenja s prethodno nepostojećim kombinacijama elemenata sučelja, boja i fontova, uključujući potpuno nova izgleda sučelja. Novi izgledi

korisničkog sučelja uključivali su 4 nova rasporeda elemenata na korisničkom sučelju te 3 nove kombinacije boja i fontova. Nove kombinacije boja i fontova odabrane su istim postupkom kao i kombinacije boja i fontova koje su prethodno korištene za učenje modela strojnoga učenja.

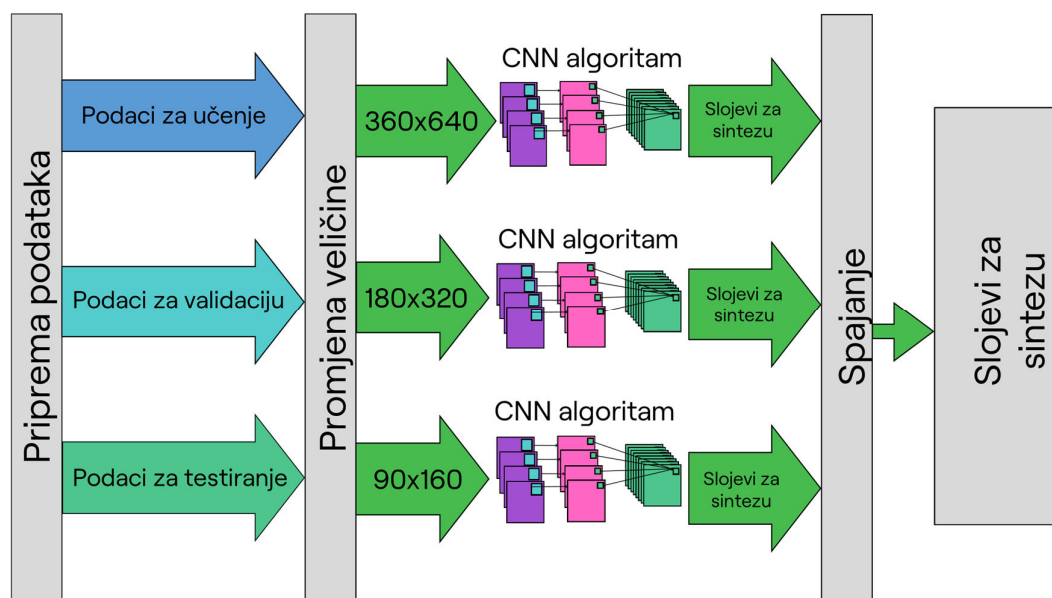
Neki ispitanici nisu odgovorili na sva postavljena matematička pitanja u istraživačkom instrumentu te je prikupljeno 4448 odgovora. S obzirom na to da je cilj bio istražiti utjecaj različitih korisničkih sučelja u zadacima gdje je točnost važna, iz skupa podataka izuzeti su svi odgovori gdje ispitanici nisu odabrali točan odgovor (17,18% odgovora), nakon čega je u skupu ostalo 3684 točnih odgovora. U nastavku istraživanja obrađivani su samo podaci gdje su ispitanici odgovorili točno. S prvim pitanjem svakog ciklusa pitanja ranije opisanog (1., 6. i 11. pitanje), ispitaniku se prikazuje novi izgled sučelja. Ovaj izgled i postavke razlikuju se od sučelja koja je ispitanik prethodno vidio u aplikaciji. Dok odgovara na ta pitanja, ispitanik se navikava na novi izgled sučelja u tom ciklusu. Kao rezultat toga, prosječno vrijeme odgovora na prvo pitanje u svakom ciklusu značajno je duže od prosječnog vremena odgovora na ostala pitanja u tom ciklusu. Ova pojava može se objasniti univerzalnim dizajnom [65]. Naime, jedan od ključnih principa univerzalnog dizajna, koji se odnosi na jednostavnost i intuitivnost, u praksi se provodi tako da dizajn ostane stabilan i predvidljiv. To podrazumijeva da, nakon što se korisnik navikne na određeni dizajn i interakcije prilikom korištenja programskog sustava, ne bi trebao doživljavati neočekivane promjene u dizajnu i interakcijama. Kako bi se eliminirali učinci prilagodbe ispitanika na novo korisničko sučelje, ta pitanja su isključena iz skupa podataka za treniranje i testiranje. Budući da su pitanja jednostavna, a upitnik je koncipiran tako da postoji samo jedan točan odgovor, ako je prvi ponuđeni odgovor točan, ispitanik nije trebao čitati daljnje odgovore. To znači da je vrijeme potrebno za odgovoriti na pitanje kada je točan odgovor na prvoj poziciji znatno kraći od vremena odgovora kada je točan odgovor na kasnijim pozicijama. Na primjer, ako je točan odgovor na zadnjem mjestu, ispitanik mora pročitati pitanje i sva četiri odgovora kako bi došao do njega. Kako bi se eliminirao utjecaj položaja točnog odgovora na vrijeme odgovora, vrijeme odgovora je normalizirano pomoću jednadžbe (1).

$$\text{normalizirano vrijeme odgovora} = \frac{\text{vrijeme odgovora}}{\text{pozicija odgovora} + 1} \quad (1)$$

Daljnja analiza podataka otkrila je dvije problematične skupine vremena odgovora. Prva skupina obuhvaća vrlo kratka vremena u kojima nije bilo moguće da je ispitanik pročitao

pitanje i barem jedan odgovor. Druga skupina uključuje ekstremne vrijednosti u obliku vrlo dugih vremena, gdje je pretpostavljeno da su ispitanika u odgovaranju spriječili vanjski čimbenici ili da su web-aplikacija ili pokretni uređaj imali tehničkih problema, kao što su usporenje rada ili prekidi u funkcionalnosti. Takvi problematični odgovori čine oko 2% svih odgovora. S obzirom na njihov potencijalni negativni utjecaj na rezultate istraživanja, iz skupa podataka isključeni su svi odgovori kojima je normalizirano vrijeme bilo kraće od 0,5 s i dulje od 5 s. Nakon ovog izuzimanja, u skupu je ostalo 98% točnih odgovora, što iznosi ukupno 2632 odgovora.

Kako bi se dokazala hipoteza da se učinkovitost korisničkog sučelja može evaluirati pomoću modela strojnoga učenja, točnije pomoću konvolucijskih neuronskih mreža (engl. *Convolutional neural network*, CNN), testirani su sljedeći modeli strojnoga učenja: čisti CNN, VGG19 (*Visual Geometry Group*), InceptionResNetV2, Xception i ResNet50, te ansambli strojnoga učenja za regresiju. Za učenje i testiranje modela korišteno je računalo sljedećih performansi: proces AMD Ryzen Threadripper 3960X, grafička kartica NVIDIA GeForce RTX 3090 s 24 GB radne memorije, te Linux Ubuntu 20.04 operacijski sustav. Generalizirani model strojnoga učenja prikazan je na slici 1.14, a ostali detalji vezani uz rezultate istraživanja nalaze se u radu [79].



Slika 1.14 Generalizirani model strojnoga učenja za procjenu učinkovitosti korisničkih sučelja

[79]

Rezultati istraživanja pokazuju da se pomoću modela strojnoga učenja mogu evaluirati i rangirati potpuno nova korisnička sučelja unutar zadanih elemenata korisničkog sučelja što uključuje boje, kontraste, fontove i raspored elemenata korisničkog sučelja.

Ovo istraživanje je doprinijelo znanstvenom doprinosu u nekoliko aspekata:

1. *Definicija parametara pristupačnosti zasnovana na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija u programskim rješenjima za edukaciju zasnovanim na trodimenzijskim vizualizacijskim tehnologijama:* primjena modela strojnoga učenja u analizi različitih UI dizajna, boja, fontova i rasporeda omogućila je definiranje početnih vrijednosti parametara koji imaju potencijal optimizirati pristupačnost u 3D edukacijskim aplikacijama. Ovi parametri uključuju početne veličine objekata i raspored elemenata korisničkog sučelja.
2. *Prilagodba prikaza trodimenzionalnog objekta i trodimenzijskih interakcija s ciljem povećanja pristupačnosti:* analiza kako različite konfiguracije korisničkog sučelja utječu na učinkovitost i brzinu rješavanja zadataka predstavljala je početnu točku za proširenje istraživanja na 3D objekte i interakcije. Iako su web-aplikacije s 2D sučeljima različite od 3D sučelja i 3D prikaza, mogu se primijeniti opća načela poput kontrasta boja, veličine fonta i rasporeda elemenata s obzirom da se odnose na percepcije korisnika. Na temelju rezultata istraživanja, prilagođene su dimenzije i način interakcije s 3D objektima u kasnije razvijenom istraživačkom instrumentu HoloZoo kako bi se olakšalo korištenje i poboljšala pristupačnost. Također, saznanja koja su dobivena tijekom ovog istraživanja potaknula su osmišljavanje potpomognutog prikaza trodimenzijskog objekta, koji koristi 2D sučelje za prikaz i interakciju s 3D objektom, primjenjujući stečena saznanja iz 2D sučelja na 3D kontekst kao početnu točku za analizu korisničkog iskustva.

2. Definicija parametara pristupačnosti zasnovana na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija

U svrhu definiranja parametara pristupačnosti zasnovanih na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija u programskim rješenjima za edukaciju zasnovanim na trodimenzijskim vizualizacijskim tehnologijama, razvijen je istraživački instrument GeometryGame. Kroz ovo istraživanje, identificirani su parametri koji utječu na pristupačnost, kako bi se kasnije mogle razviti smjernice i preporuke za unapređenje postojećih i budućih trodimenzijskih edukacijskih programskih rješenja.

2.1. Opis istraživanja

Tijekom razdoblja od svibnja do prosinca 2023. godine, provedeno je istraživanje u Dubrovniku i Zagrebu primjenom istraživačkog instrumenta u formi igre zasnovane na trodimenzijskim objektima i trodimenzijskim interakcijama GeometryGame (detaljno opisanog u poglavlju 2.2). Dio istraživanja se odvijao se u prostorijama Sveučilištu u Dubrovniku, dok se preostali dio istraživanja odvijao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Ispitanici istraživanja su individualno sudjelovali, pristupajući testiranju jedan na jedan pod nadzorom ispitivača, pri čemu je svakom ispitaniku bilo dodijeljeno 15 minuta za provedbu istraživanja. Istraživanje je provedeno na laptopu Acer, model Nitro AN515-46, procesora AMD Ryzen 7 6800H 3.20 GHz, grafička kartica NVIDIA GeForce RTX 3050, 16GB radne memorije te uređaj Leap Motion prve generacije.

Prije početka istraživanja, svakom ispitaniku su detaljno predstavljene kontekst istraživanja, postupak istraživanja te svrha i ciljevi istraživanja usmenim putem.

Svaki ispitanik je dao svoj pristanak prije sudjelovanja u korisničkom testiranju. Nakon istraživanja, ispitanici su ocjenjivali interakcije unutar aplikacije koristeći Likertovu skalu unutar platforme Google Forms .

Prva aktivnost ovog istraživanja je uključivala korisničko testiranje istraživačkog instrumenta. Proces korisničkog testiranja za istraživački instrument odvijao se na laptopu na koji je bio uključen uređaj Leap Motion. GeometryGame na laptopu pokreće istraživač. Razine istraživačkog instrumenta, odnosno zadaci i vrste interakcije detaljnije su opisane u poglavlju 4.2. Druga aktivnost uključuje ispunjavanje ankete od strane ispitanika, pri čemu je anketa izrađena u alatu Google Forms.

2.2. Istraživački instrument GeometryGame

Istraživački instrument GeometryGame je razvijen u obliku igre u višeplatformskom programskom okviru za razvoj igara Unity, inačica 2020.2.6f1. Za implementaciju trodimenzijskih korisničkih interakcija izabran je uređaj Leap Motion 1 generacije. Dizajn istraživačkog instrumenta je temeljen na konceptima i smjernicama koje su prethodno definirane i implementirane u suradnji sa studenticom studija Primijenjeno/poslovno računarstvo Sveučilišta u Dubrovniku u okviru njezinog diplomskog rada [82]. GeometryGame predstavlja prototip edukacijskog programskog rješenja za učenje korisnika o geometrijskim tijelima, s implementiranim 3D interakcijama. Važno je istaknuti kako je istraživački instrument koncipiran s obzirom na korisničke interakcije na način da su ispitanici u svakom trenutku mogli vidjeti svoje virtualne šake na ekranu. Odnosi udaljenosti i veličina definirani su upravo putem tih virtualnih ruku.

Istraživački instrument ima 4 razine koje su podijeljene na podrazine. U svakoj razini implementirane su specifične 3D interakcije:

1. Interakcija *dohvati i pusti* - implementirana u prvoj razini,
2. Interakcija *primicanja prstiju obje šake* - implementirana u drugoj razini,
3. Interakcija *prijelaz šake u jednu stranu i rotacija* - implementirana u trećoj razini,
4. Interakcija *pritiska 3D gumba pomoću virtualnog prsta* - implementirana u četvrtoj razini.

Radi lakšeg praćenja razina, u daljnjem tekstu one će biti označene na sljedeći način, pri čemu su nazivi usklađeni s interakcijama implementiranim u svaku od njih:

1. Prva razina - *R_dohvat*,
2. Druga razina - *R_prsti*,
3. Treća razina - *R_šaka*,
4. Četvrta razina - *R_virtualni_prst*.

U *R_dohvat* cilj je ubaciti tri geometrijska tijela (kuglu, kocku i piramidu) u kutije s prikladnom oznakom geometrijskog tijela. Implementirana interakcija je *dohvati i pusti* (engl. *grab and release*) geometrijsko tijelo te interakcija ubacivanja geometrijskog tijela u kutiju. Slika 2.1 prikazuje dizajn *R_dohvat*.



Slika 2.1 Prikaz dizajna *R_dohvat*
(Izvor: snimka zaslona)

R_dohvat podijeljen je na četiri podrazine koje se razlikuju po veličini objekata koje ispitanik treba dohvatiti. S time su se htjele istražiti optimalne veličine objekta u odnosu na virtualnu šaku korisnika. Podrazine su imenovane na sljedeći način, u skladu sa specifičnostima svake od njih:

1. Prva podrazina - *P_osnovna*,
2. Druga podrazina - *P_uvećanje*,
3. Treća podrazina - *P_smanjenje*,
4. Četvrta podrazina - *P_kontrast*.

Odnos između veličine geometrijskog tijela i veličine virtualne šake koja se vidi tijekom interakcije je prikazana Tablicom 2.1. Udaljenost objekta i virtualne šake je definirana preko Unity komponente *transform* koja definira položaj, rotaciju i skaliranje objekata u 3D

prostoru. Kada se definiraju vrijednosti u komponenti objekta *transform*, te vrijednosti predstavljaju relativne jedinice unutar prostora Unity, dok stvarne fizičke dimenzije ovise o postavkama projekta.

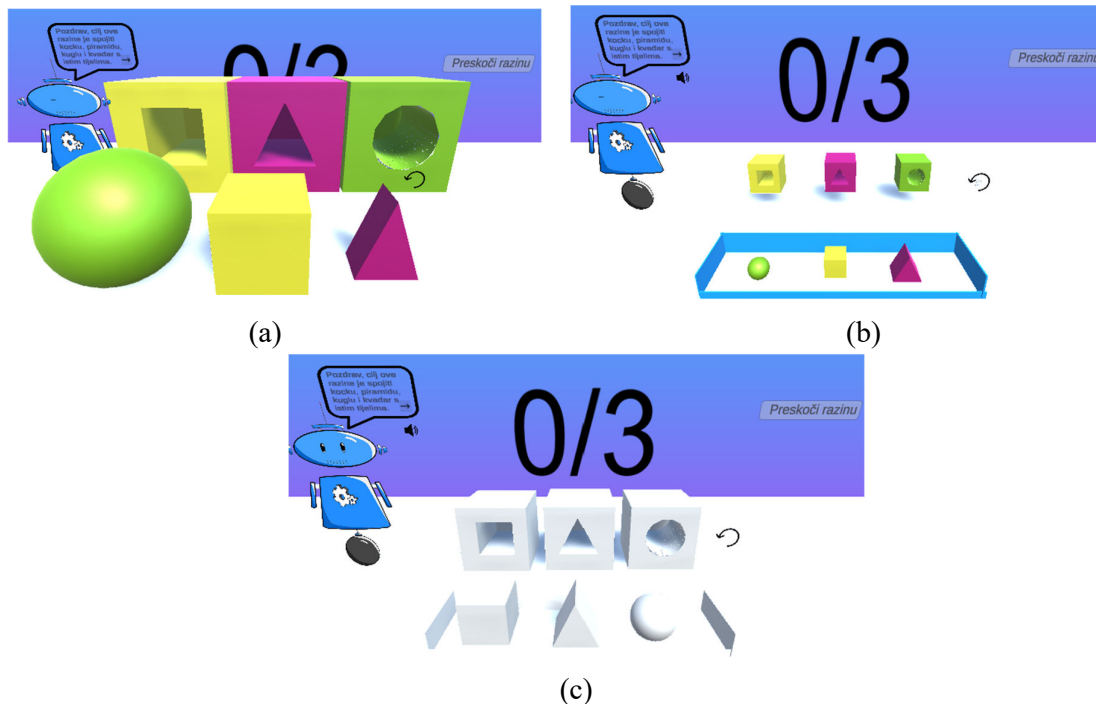
Primjerice, vrijednost 1 komponente *transform* u Unityu može predstavljati jedan milimetar, jedan metar ili 1 kilometar unutar projekta Unity. Međutim, stvarna fizička udaljenost koju ta jedinica predstavlja varira ovisno o postavkama projekta, a ove udaljenosti promatraju se kroz perspektivu odabranih postavki. U okviru ovog istraživanja, vrijednost 1 *transform* komponente predstavljala je 1 metar.

Svi su izračuni vezani uz veličinu virtualne šake i objekta izraženi u obliku omjera. Svaka podrazina koristi različit omjer veličine virtualne šake i objekta kako bi se utvrdilo koji omjer korisnicima najviše odgovara u smislu pristupačnosti i interakcije. Odabrani omjeri temelje se na veličini virtualne šake korisnika, uključujući objekte koji su 50% manji od virtualne šake, iste veličine kao virtualna šaka te 100% veći od virtualne šake. Na posljednjoj razini, *P_kontrast*, ponovno je korišten omjer gdje su objekt i virtualna šaka iste veličine. Različite veličine u svim podrazinama omogućuju analizu u smislu određivanja optimalnih početnih omjera u programskim rješenjima koja koriste ovu vrstu interakcije.

Tablica 2.1 Podrazine i implementirani odnosi veličine šake i objekta

Podrazina	Omjer veličine virtualne šake i veličine objekta
<i>P_osnovna</i>	1:1
<i>P_uvećanje</i>	1:2
<i>P_smanjenje</i>	1:0,50
<i>P_kontrast</i>	1:1

P_kontrast specifičan je po implementiranju smanjenog kontrasta boje pozadine i 3D objekata, a zadržao se isti odnos veličine šake i veličine objekta kao na prvoj podrazini. Time se željela procijeniti korisnička interakcija u uvjetima smanjenog vizualnog kontrasta, uz održavanje istog omjera veličine objekata kao podrazini *P_osnovna*, kako bi se omogućila usporedba rezultata u različitim kontrastnim okruženjima. *P_uvećanje*, *P_smanjenje* i *P_kontrast* prikazani su na slici 2.2, s oznakama (a), (b) i (c).

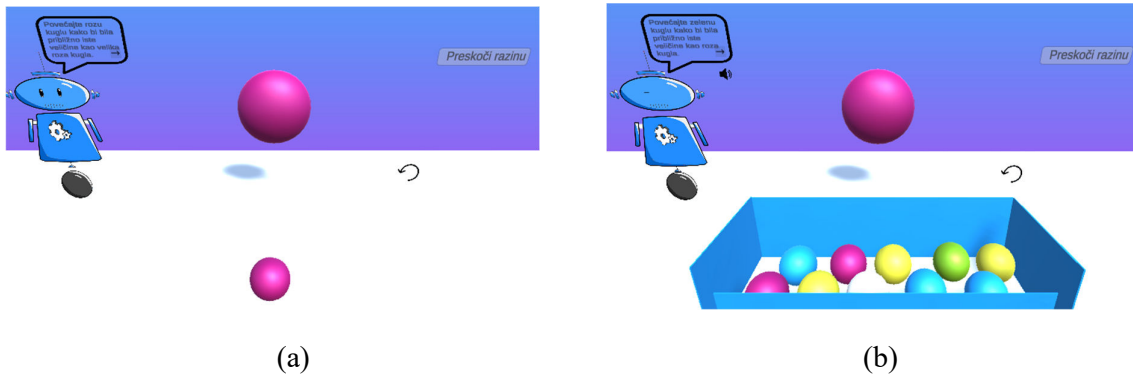


Slika 2.2 a) prikaz $P_{uvećanje}$, b) prikaz $P_{smanjenje}$, c) prikaz $P_{kontrast}$
(Izvor: snimka zaslona)

U drugoj razini, odnosno R_{prsti} , implementirane su interakcije s 3D objektom, koje uključuju dohvatanje geometrijskog tijela i povećavanje istog putem interakcije primicanja prstiju obje šake (engl. *pinch*). R_{prsti} bila je dizajnirana kako bi se istražilo koliko distraktori prilikom interakcije, poput pojavljivanja drugih kugli, utječu na izvedbu ispitanika tijekom zadatka povećanja kugle na veličinu ružičaste kugle. Razina R_{prsti} podijeljena je na dvije podrazine, nazvane s obzirom na prisustvo distraktora unutar svake podrazine:

1. Prva podrazina - $P_{bez_distraktora}$,
2. Druga podrazina - $P_{distraktori}$.

Cilj $P_{bez_distraktora}$ bio je dohvatiti kuglu i povećati je kako bi bila približno iste veličine kao velika ružičasta kugla, a ta podrazina je vizualno predstavljena na slici 2.3 (a). $P_{bez_distraktora}$ bila je dizajnirana bez distraktora kako bi se procijenila sposobnost korisnika u izvršavanju zadatka bez prisustva distraktora. Druga podrazina $P_{distraktori}$ bila je izazovnija, gdje je ispitanik trebao odabrati određenu kuglu, u ovom slučaju zelenu kuglu, te ju povećati kako bi postigla istu veličinu kao ružičasta kugla. U ovom scenariju postavljeni su distraktori (druge kugle) kako bi se istražilo kako takvi elementi utječu na izvedbu ispitanika tijekom obavljanja interakcije. Ovim pristupom željelo se povezati dobivene rezultate s razinom složenosti interakcije i evaluirati kako se distraktori tj. ometajući elementi odražavaju na uspješnost izvođenja. Slika 2.3. (b) prikazuje izgled $P_{distraktori}$.

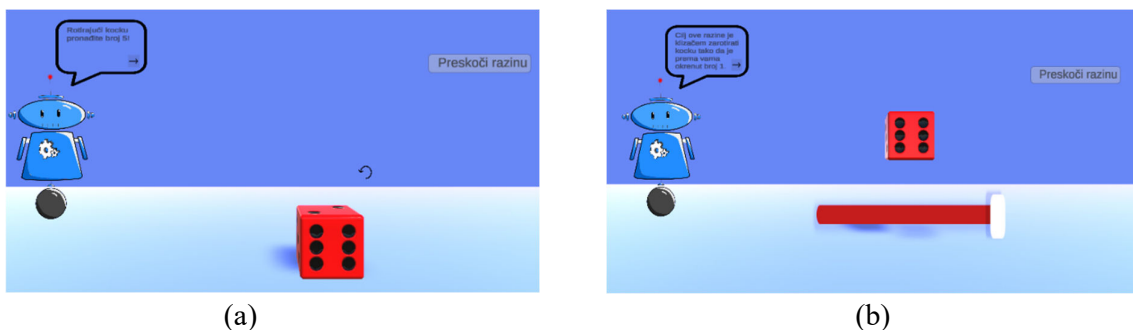


Slika 2.3 Prikaz R_prsti , izgled $P_bez_distraktora$ (a) i $P_distraktori$ (b)
(Izvor: snimka zaslona)

Treća razina, $R_šaka$, je podijeljena na dvije podrazine kako bi dodatno obogatila korisničko iskustvo te istražilo odgovaraju li korisnicima više izravne interakcije s 3D objektom ili neizravne interakcije s 3D objektom putem elementa korisničkog sučelja poput klizača. Podrazine su nazvane po uzoru na implementirani tip interakcije koji u ovom slučaju može biti izravan ili neizravan:

1. Prva podrazina – $P_izravna$,
2. Druga podrazina – $P_neizravna$.

U okviru $P_izravna$ (Slika 2.4 (a)), ispitanicima je postavljen zadatak da preuzmu igraću kockicu, drže je u rukama te izvode rotacije putem pokreta ruku. Implementirana je interakcija *dohvati i pusti* koja zajedno s rotacijom ima za cilj potaknuti istraživanje kockice, pružajući ispitanicima trodimenzijsku percepciju prostora tražeći specifičan broj na kockici, u ovom slučaju, broj 5. U okviru $P_neizravna$ (Slika 2.4 (b)), ispitanicima je postavljen izazov kroz implementaciju elementa korisničkog sučelja, odnosno klizača. U ovom scenariju, ispitanici su trebali koristiti klizač kako bi rotirali igraću kockicu sve dok ne postignu položaj s jasno vidljivim brojem 1. Implementirana interakcija je prijelaz šakom u jednu stranu (engl. *swipe*).

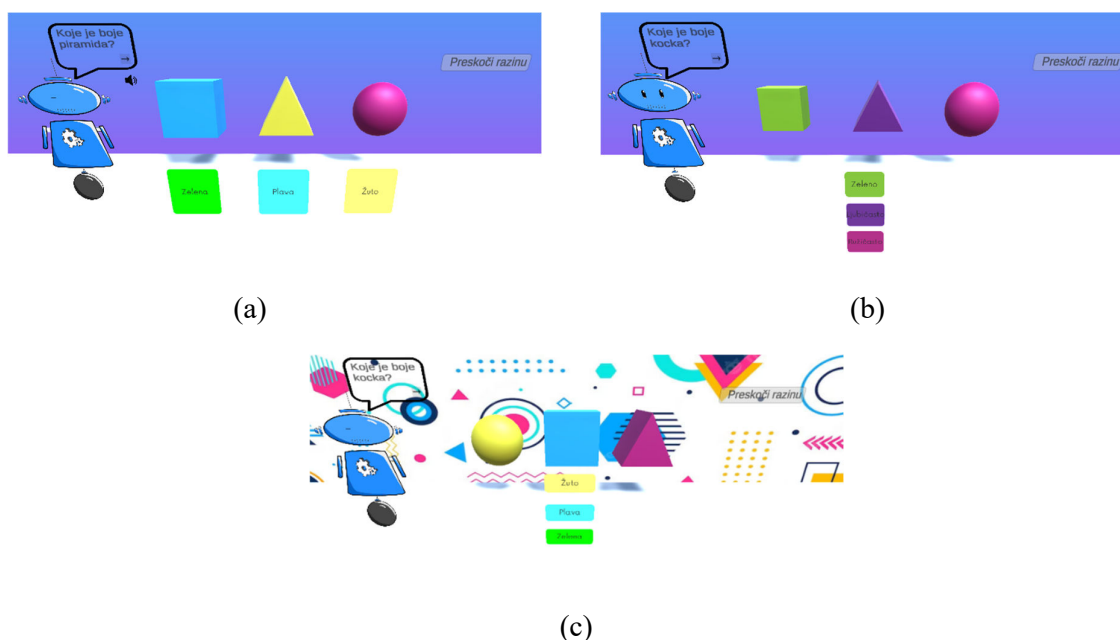


Slika 2.4 (a) prikaz $P_izravna$, (b) prikaz $P_neizravna$
(Izvor: snimka zaslona)

Četvrta razina, $R_virtualni_prst$, slična kvizu *trivia*, podijeljena je na tri podrazine, pri čemu se na svakoj razini održava isti koncept, ali se razlikuju veličina gumba i udaljenost gumba od korisnikove virtualne ruke. Ova struktura omogućuje konzistentno iskustvo kviza, istražujući kako varijacije u veličini objekata i udaljenosti gumba mogu utjecati na korisničku interakciju. Podrazine su nazvane s obzirom na specifični dizajn svake podrazine:

1. Prva podrazina – $P_horizontalno$,
2. Druga podrazina – $P_vertikalno$,
3. Treća podrazina – $P_ometajuća_pozadina$.

$P_horizontalno$ i $P_vertikalno$ slične su dizajnom (Slika 2.5. (a) i (b)), dok se $P_ometajuća_pozadina$ ističe po implementaciji ometajuće pozadine (Slika 2.5.(c)).



Slika 2.5 (a) Prikaz $P_horizontalno$, (b) Prikaz $P_vertikalno$, (c) Prikaz $P_ometajuća_pozadina$
(Izvor: snimka zaslona)

Interakcija se ostvaruje putem pritiska virtualnim prstom (engl. *finger tap*) na gumba. Veličine gumba te udaljenosti istih i virtualnih ruka prikazane su u tablici 2.2. Veličina gumba je prikazana u odnosu na dimenzije scene u Unityu, pri čemu su dimenzije gumba odabrane nasumično eksperimentiranjem s različitim veličinama i primjenom Fittsovog zakona. Fittsov zakon je prediktivni model ljudskog pokreta koji se koristi u interakciji čovjek-računalo. Zakon predviđa da je vrijeme potrebno za brzo kretanje do ciljanog područja funkcija omjera između udaljenosti do cilja i širine cilja. Ovaj zakon se često koristi u dizajnu korisničkih

sučelja za optimizaciju veličine i položaja elemenata, kako bi se poboljšala brzina i točnost korisničkih interakcija [83].

Tablica 2.2 Veličina gumba te udaljenosti gumba i virtualne ruke po podrazina

R_virtualni_prst

Podrazina	Veličina gumba (visina x širina)	Udaljenost gumba i virtualne šake
<i>P_horizontalno</i>	0.24 × 0.17	-10
<i>P_vertikalno</i>	0.14 × 0.13	-15
<i>P_ometajuća_pozadina</i>	0.12 × 0.17	-5

S ciljem objektivne analize podataka prikupljenih tijekom interakcije korisnika s istraživačkim instrumentom, relevantne informacije su sustavno zabilježene i pohranjene u bazu podataka. U tablici 2.3. prikazani su aktivnosti ispitanika po svakoj razini i vrsti interakcije te rezultat pripadne metrike za navedene aktivnosti koje se spremaju u bazu.

Tablica 2.3 Razine u istraživačkom instrumentu i pripadne metrike

Aktivnost ispitanika	Rezultat aktivnosti spremljen u bazu podataka
<i>R_dohvat</i> – interakcija dohvati i pusti	
Pritisak na gumb za povratak objekta	Broj pritiskanja gumba za povratak objekta u scenu
Pritisak na gumb za preskakanje razine	1 označava "Da" (preskočeno), a 0 označava "Ne"
Pritisak na gumb za početak izvršavanja aktivnosti razine	Vrijeme izvršavanja aktivnosti razine, izraženo u milisekundama (ms)
Ubacivanje pogrešnih objekata	Broj pogrešno ubačenih objekata
Ubacivanje točnih objekata	Broj točno ubačenih objekata
<i>R_prsti</i> – interakcija primicanja prstiju obje šake	
Pritisak na gumb za početak izvršavanja aktivnosti razine	Vrijeme izvršavanja aktivnosti razine, izraženo u milisekundama (ms)
Pritisak na gumb za povratak objekta u scenu	Broj pritiskanja na gumba za povratak objekta u scenu
Pritisak na gumb za preskakanje razine	1 označava "Da" (preskočeno), a 0 označava "Ne"
<i>R_šaka</i> – interakcija prijelaza šake u jednu stranu i rotacija	
Pritisak na gumb za početak izvršavanja aktivnosti razine	Vrijeme izvršavanja aktivnosti razine, izraženo u milisekundama (ms)
Pritisak na gumb za preskakanje razine	1 označava "Da" (preskočeno), a 0 označava "Ne"
<i>R_virtualni_prst</i> – interakcija pritiska 3D gumba pomoću virtualnog prsta	
Pritisak na gumb za početak razine	Vrijeme rješavanja razine, izraženo u milisekundama (ms)

Pritisak na gumb kao odgovor na pitanje	Oznaka odgovor na postavljeno pitanje koju je korisnik izabrao
Provjera točnosti odgovora	1 označava točan odgovor, a 0 netočan

Vrste interakcija korištene na svakoj razini opisane su Tablicom 2.4. Interakcije su opisane kroz tri aspekta koje su opisane u dokumentaciji proizvođača Leap Motiona [84]. Uporabivost opisuje lakoću učenja, razumijevanja i pamćenja interakcija, pri čemu visoka uporabivost označava jednostavnost u usporedbi s drugim interakcijama. Pouzdanost označava vjerojatnost točnog tumačenja interakcija od strane uređaja za praćenje ruku, a interakcije s visokom pouzdanošću očekuje se da će biti prepoznate većinu vremena. Udobnost opisuje fizički napor i nelagodu tijekom izvođenja gesti, pri čemu se interakcija s visokom udobnošću može izvoditi s lakoćom i minimalnim naporom.

Interakcije su opisane koristeći kvalitativne opise "visoko", "srednje" i "nisko", odnosno numeričke vrijednosti 2, 1 i 0. Odabrane su interakcije koje su visoko ili/i srednje uporabive i udobne.

Tablica 2.4 Opis interakcija po proizvođaču Leap Motiona

Razina	Opis interakcije	Uporabivost	Pouzdanost	Udobnost
<i>R_dohvat</i> – dohvaćanje geometrijskih tijela	Dohvaćanje objekta pomoću <i>dohvati i pusti</i> interakcije	2	0	2
<i>R_prsti</i> – povećavanje geometrijskih tijela	Dohvaćanje geometrijskog tijela pomoću te povećavanje pomoću <i>primicanja prstiju obje šake</i>	1	2	2
<i>P_neizravna</i> – rotacija geometrijskog tijela	Rotacija tijela pomoću <i>prijelaza šake u jednu stranu</i>	2	0	1
<i>R_virtualni_prst</i> – pritiskanje gumba	Pritisak 3D gumba pomoću <i>virtualnog prsta</i>	1	1	1

Osim interakcija navedenih u tablici 2.4, postoje i interakcije koje nisu implementirane u ovu aplikaciju, a to su:

- Pritiskanje virtualnom šakom (engl. *Hand Tap*) – uporabivost 1, pouzdanost 1, udobnost 2,
- Promjena položaja prstiju (engl. *Finger Poses*) – uporabivost 2, pouzdanost 2, udobnost 2,
- Okretanje dlana (engl. *Hand Twist*) – uporabivost 2, pouzdanost 1, udobnost 2.

U razvoju istraživačkog instrumenta, primijenjene su postojeće smjernice i metodologije s naglaskom na pristupačnost. Definicija parametara pristupačnosti zasnovana na vrednovanju 3D korisničkih interakcija usmjerena je na detaljnu analizu sljedećih elemenata:

- veličine objekta u odnosu na virtualnu šaku korisnika, analizirane kroz interakciju *dohvati i pusti*,
- prisustvo ometajućih 3D elemenata prilikom tijekom interakcije *primicanja prstiju obje šake*,
- intuitivnosti korištenja elemenata korisničkog sučelja analizirane kroz interakciju *prijelaza šake u jednu stranu i rotacije*,
- veličina elemenata korisničkog sučelja i njihova udaljenost od korisnikove virtualne šake analizirane kroz interakciju pritiska 3D gumba *pomoću virtualnog prsta*.

Ove interakcije omogućuju jednostavnije i prirodnije rukovanje objektima u virtualnom prostoru, odnosno što sličnije prirodnim pokretima korisnika. Time se osigurava da interakcije budu pristupačne i jednostavne za sve korisnike, čime se promiče univerzalnost i inkluzivnost u digitalnom okruženju. Kroz prilagodbu smjernica pristupačnosti za specifične potrebe 3D interakcija, težilo se stvaranju sučelja koja ne samo da zadovoljavaju osnovne zahtjeve pristupačnosti, već i poboljšavaju korisničko iskustvo. Integracija grafičkih sučelja, poput klizača za kontrolu rotacije, razvijena je s ciljem precizne manipulacije objektima bez nepotrebnog napora ili frustracije korisnika. Ovim pristupom, nastojalo se ne samo uskladiti s postojećim standardima pristupačnosti već i proširiti te standarde uvođenjem novih parametara relevantnih za 3D interakcije.

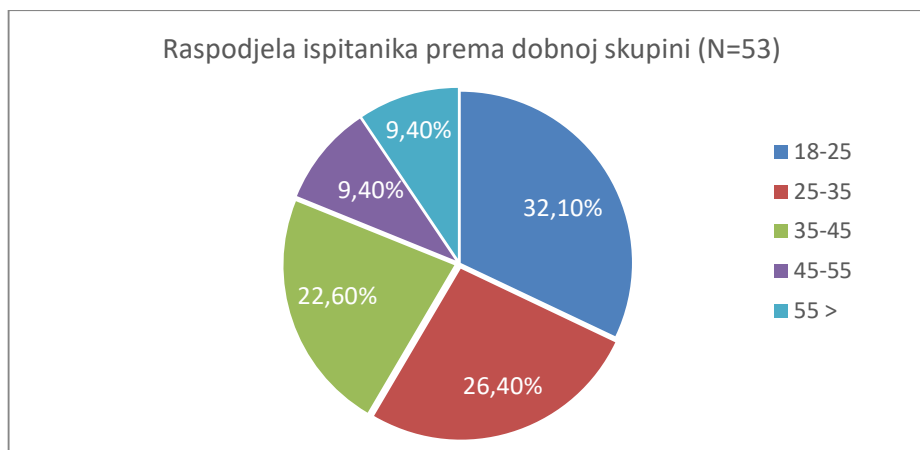
2.3. Rezultati i analiza prikupljenih podataka

Kako bi se na temelju trodimenzijskih korisničkih interakcija odredili parametre pristupačnosti, prikupljena je kvantitativna i kvalitativna metrika. Kvantitativna metrika pruža osnovu za analizu učinkovitosti, pristupačnosti i zadovoljstva korisnika tijekom interakcija unutar istraživačkog instrumenta. S druge strane, kvalitativna metrika pruža uvid u zadovoljstvo korisnika postignutom preciznošću, jednostavnošću interakcije te ukupnim subjektivnim dojmom tijekom interakcije poput frustracije korisnika. U sljedećim potpoglavljima prikazani su rezultati analize parametara, obuhvaćajući aspekte poput vremena provedenog u izvršavanju zadataka, korištenja opcije preskakanja zadataka i vraćanja objekta u scenu te subjektivne ocjene samih interakcija po razinama istraživačkog instrumenta. Ostali

prikupljeni podaci ovise o svakoj razini istraživačkog instrumenta. Podaci o interakcijama ispitanika tijekom korisničkog testiranja su pohranjeni su u bazu podataka u CSV formatu, omogućujući temeljitu daljnju analizu.

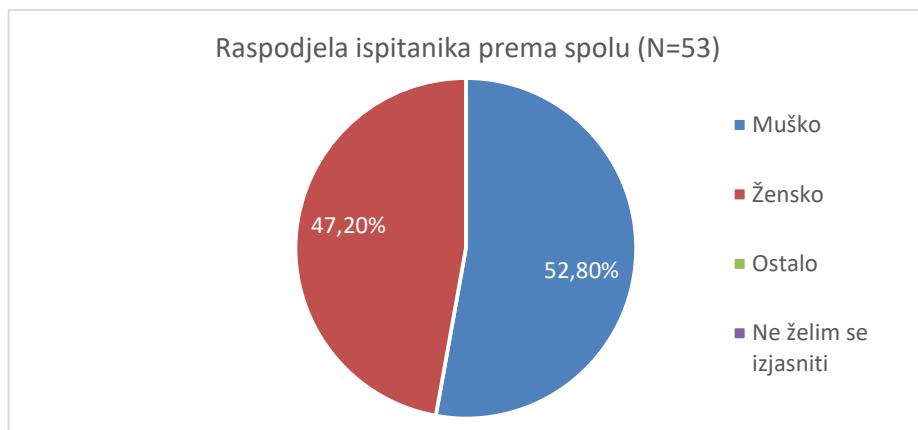
2.3.1. Analiza demografskih karakteristika ispitanika iz upitnika

Analiza dobivenih rezultata ispitanika omogućuje uvid u demografske karakteristike ispitanika istraživanja. Navedeni podaci dobiveni su analizom korisničke ankete iz druge aktivnosti korisničkog istraživanja. U korisničkom testiranju sudjelovalo je 53 (N=53). Prvo pitanje je istraživalo dobne skupine, pri čemu je 32,10% ispitanika bilo u dobi od 18 do 25 godina, što čini 17 od ukupno 53 ispitanika. Dobna skupina od 25 do 35 godina zauzima 26,40% ukupnog broja, što je predstavljeno s 14 osoba. Slijedi dobna skupina od 35 do 45 godina s udjelom od 22,60%, dok su skupine od 45 do 55 godina i stariji od 55 godina zastupljene s jednakih 9,40%. Grafički prikaz raspodjele ispitanika prema dobnoj skupini prikazan je na Slici 2.6.



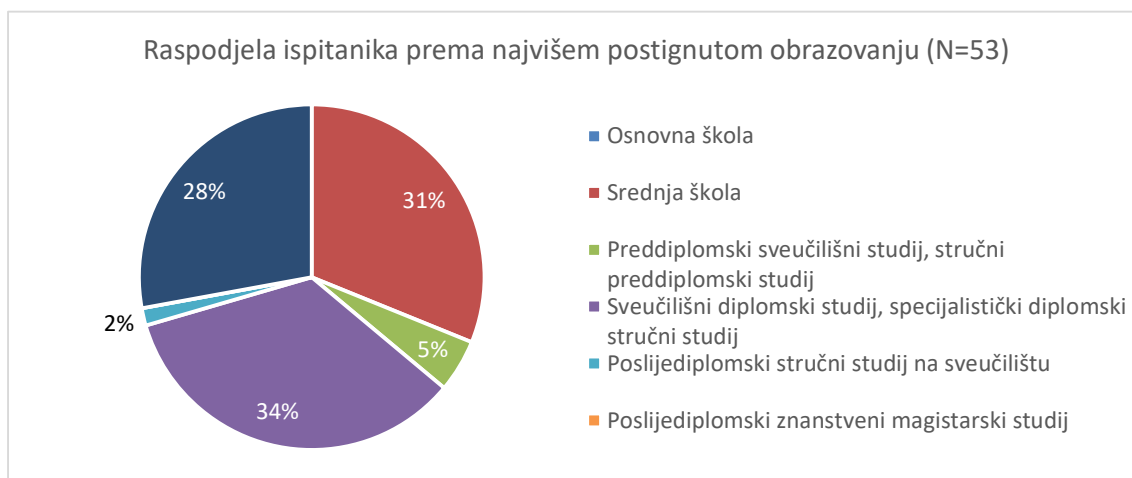
Slika 2.6 Raspodjela ispitanika prema dobnoj skupini

Slika 2.7. prikazuje raspodjelu ispitanika prema spolu. 47,20% ispitanika identificiralo se kao žensko, dok je 52,80% navelo muški spol. Ostali izbori, kao što su "ostalo" i "ne želim se izjasniti", nisu bili odabrani od strane nijednog ispitanika.



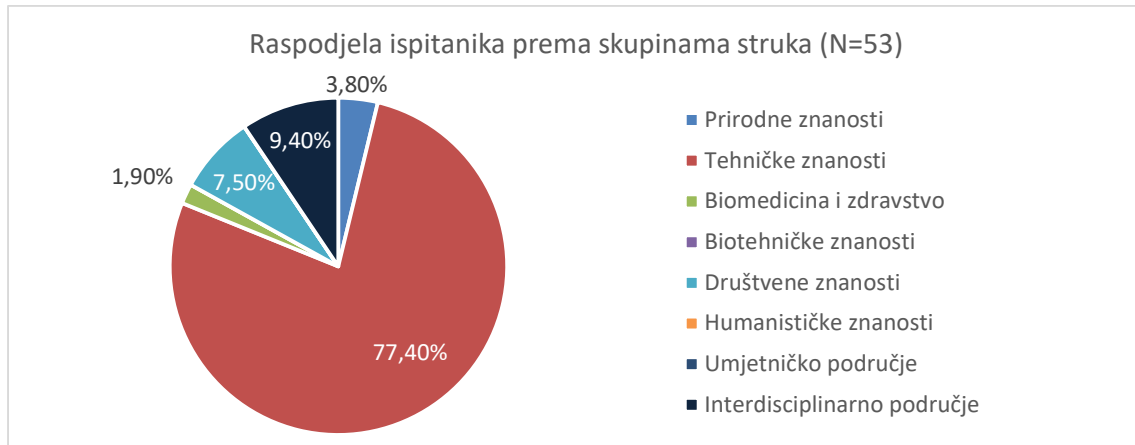
Slika 2.7 Raspodjela ispitanika prema spolu

Sljedeće pitanje je bilo vezano uz najviše postignuto obrazovanje ispitanika (Slika 2.8). S obzirom na to da su većina ispitanika bili studenti preddiplomskog ili diplomskog studija, očekivano je da je veći udio ispitanika završio srednju školu, što iznosi 35,80%, odnosno preddiplomski sveučilišni studij ili stručni preddiplomski studij činili su 5,70%. Sveučilišni diplomski studij ili specijalistički diplomski stručni studij ima 39,60% ispitanika. Poslijediplomski stručni studij zabilježen je kod 1,90% ispitanika, dok nitko od njih nije imao poslijediplomski znanstveni magistarski studij. Značajan udio, od 17%, ispitanika posjeduje doktorat znanosti.



Slika 2.8 Raspodjela ispitanika prema najvišem postignutom obrazovanju

U pogledu struke, 77,40% ispitanika pripada tehničkom području, dok je interdisciplinarno područje zastupljeno s 9,40%. Društvene znanosti čini 7,50% ispitanika, prirodne znanosti 3,8%, dok biomedicina i zdravstvo čine 1,90% ukupnog broja ispitanika. Slika 2.9. prikazuje raspodjelu ispitanika prema skupinama struka,



Slika 2.9 Raspodjela ispitanika prema skupinama struka

Osim demografskih pitanja, anketa je sadržavala tvrdnje koje su se ponavljale za svaku podrazinu, a ispitanici su ocjenjivali svoje stajalište prema tim tvrdnjama koristeći Likertovu skalu od 1 do 5, gdje je 1 označavao potpuno neslaganje, a 5 potpuno slaganje. Tvrdnje su bile sljedeće:

1. Bilo mi je vrlo jednostavno dohvatiti objekt.
2. Smatram da je preciznost vrlo bitna u dohvaćanju objekta.
3. Interakcija s objektom mi je bila intuitivna.
4. Tijekom dohvaćanja objekta, osjećao/la sam se frustrirano.
5. Zadovoljan/na sam razinom preciznosti koju sam postigao/la tijekom dohvaćanja objekta.
6. S lakoćom sam dohvaćao/la objekte.

Tim tvrdnjama se provjerava subjektivno iskustvo ispitanika tijekom interakcije s trodimenzijskim objektima, s fokusom na razumijevanje njihovog doživljaja lakoće, preciznosti, intuitivnosti i frustracije tijekom manipulacije objektima. Tvrdnje su se minimalno razlikovale s obzirom na razine i zadatke koje ispitanici su izvršavali, pri čemu je osnovna struktura tvrdnji ostala konstantna, a jedina promjena bila je u vrsti interakcije nad objektom, bilo da se radilo o dohvaćanju, rotiranju, pritiskanju ili sl.

2.3.2. Analiza interakcije *dohvati i pusti*

Analiza **vremena** potrebnog za izvršavanje zadataka važan je aspekt u procjeni uporabljivosti i efikasnosti korisničkog sučelja unutar edukacijskih programskih rješenja. *R_dohvat* fokusirana je na interakciju *dohvati i pusti* s kojom se želi odrediti **parametar veličine objekta u odnosu na virtualnu šaku korisnika**. Svaka podrazina je koncipirana tako da

ispitanik mora izvršiti točno određenu interakciju kako bi mogao napredovati kroz igru, bez obzira na ishod ubacivanja geometrijskih tijela. U situacijama kada ispitanik ne može izvršiti traženu interakciju, alternativna opcija je preskakanje zadatka.

Tablica 2.5. prikazuje statističku analizu vremena potrebnog za izvršavanje zadataka četiri podrazine koja obuhvaća srednju vrijednost (m), medijan (md), standardnu devijaciju (σ), minimalnu (min) i maksimalnu (max) vrijednost, raspon (R), donji ($Q1$) i gornji ($Q3$) kvartil te interkvartilni raspon (IQR), indeks simetričnosti (S) i indeks spljoštenosti distribucije (K).

Srednja vrijednost pokazuje prosječno vrijeme izvršavanja zadataka, dok medijan označava centralnu točku u distribuciji vremena kada su podaci poredani po veličini, od najmanjeg do najvećeg. Kombinacija ovih mjera omogućuje dublji uvid u raznolikost trajanja zadataka, uzimajući u obzir kako mjere srednje vrijednosti tako i mjere položaja, što je važno za bolje razumijevanje interakcije ispitanika sa zadatkom. Minimalno i maksimalno vrijeme koje korisnici provode na zadacima pružaju uvid u raspon vremenskih vrijednosti. $Q1$ (prvi kvartil) i $Q3$ (treći kvartil) su koncepti u statistici koji se koriste za razumijevanje raspodjele podataka poredanih po veličini. $Q1$ predstavlja vrijednost ispod koje se nalazi 25% najmanjih podataka, dok je $Q3$ vrijednost iznad koje se nalazi 25% najvećih podataka. Interkvartilni raspon (IQR) definiran je kao razlika između $Q3$ i $Q1$ te obuhvaća srednjih 50% podataka. Veći IQR ukazuje na veću raspršenost podataka, dok manji IQR sugerira koncentraciju podataka oko srednje vrijednosti. Analiza rasprostranjenosti podataka između $Q1$ i $Q3$ omogućuje bolje razumijevanje varijabilnosti podataka. Indeks simetričnosti i indeks spljoštenosti su statistički pokazatelji koji pružaju informacije o obliku distribucije podataka. Indeks simetričnosti omogućuje procjenu asimetrije distribucije podataka. Ako je indeks simetričnosti blizu nule, distribucija je simetrična, što znači da su vrijednosti ravnomjerno raspoređene s obje strane vrijednosti medijana vremena potrebnog za izvršavanje zadatka. Ako je indeks simetričnosti veći od nule, distribucija je pozitivno asimetrična, što znači da su ekstremne vrijednosti pretežno na desnoj strani medijana. S druge strane, ako je indeks simetričnosti manji od nule, distribucija je negativno asimetrična, što znači da su ekstremne vrijednosti pretežno na lijevoj strani središnje vrijednosti. Indeks spljoštenosti distribucije mjera je spljoštenosti krivulje distribucije u odnosu na normalnu distribuciju. Ako je indeks spljoštenosti blizu nule, distribucija je normalna (tj. zvonolikog oblika). Veće vrijednosti indeksa spljoštenosti ukazuju na postojanje više ekstremnih vrijednosti u distribuciji u usporedbi s normalnom distribucijom.

Tablica 2.5 Statistička analiza za vrijeme potrebno za izvršavanje zadataka prve razine

	<i>P_osnovna</i>	<i>P_uvećanje</i>	<i>P_smanjenje</i>	<i>P_kontrast</i>
m [s]	42,57	39,13	52,90	28,72
md [s]	34,22	33,69	40,72	23,25
σ [s]	28,48	23,99	44,17	21,36
Min [s]	10,52	11,25	7,16	5,70
Max [s]	153,25	134,06	248,27	127,73
R [s]	142,74	122,80	241,12	122,03
Q1 [s]	22,74	23,16	23,77	15,36
Q3 [s]	56,49	47,87	68,87	34,30
IQR [s]	33,75	24,71	45,10	18,93
S [s]	1,64	1,89	2,12	2,55
K [s]	3,59	4,66	6,35	8,47

Analizirajući podatke za četiri podrazine, primijećene su značajne razlike u vremenu provedenom na zadacima. Srednje vrijednosti i medijani variraju između podrazina što sugerira kako su ispitanicima zadaci bili različite težine ili zahtjevnosti. Budući da je ista interakcija bila implementirana u svim podrazina, veličina 3D objekta kojeg su ispitanici trebali dohvatiti imala je značaj utjecaj na težinu zadatka. Korisnici su najbrže izvršavali zadatke u *P_kontrast*, gdje je srednje vrijeme izvršavanja zadatka bilo 28,72 s, dok su najsporiše izvršavali zadatke u *P_smanjenje*, gdje je prosječno vrijeme iznosilo 52,90 s.

U *P_osnovna*, gdje je omjer veličine virtualne šake i 3D objekta bio 1:1, primijećena je veća varijabilnost vremena provedenog na zadacima, što sugerira izazovnije ili kompleksnije zadatke za ispitanike. Varijabilnost podataka vidi se u njihovom rasponu koji iznosi 142,74. S druge strane, u *P_uvećanje* s omjerom veličine virtualne šake i 3D objekta 1:2, iako su srednje vrijednosti i medijani veći, raspon i standardna devijacija pokazuje manju varijabilnost podataka u odnosu na prvu podrazinu. To bi moglo ukazivati na bolje usklađivanje između ispitanikovih pokreta i veličine 3D objekta. *P_smanjenje* s omjerom 1:0,5 pokazuje najveću varijabilnost u vremenu izvršavanja zadataka, što sugerira kako je ispitanicima bilo izazovno dohvatiti male 3D objekte. Zanimljivo je primijetiti da su ispitanici bili 1,4819 puta brži u izvršavanju zadataka u *P_kontrast* u usporedbi s *P_osnovna*. Ova razlika u brzini dogodila se unatoč tome što su u obje podrazine 3D oblici, odnosno

geometrijska tijela bila iste veličine, a jedina je razlika bila u implementaciji lošeg kontrasta u *P_kontrast* podrazini. Ovaj rezultat sugerira da je važno prvo upoznati ispitanika s interakcijama koje će koristiti u aplikaciji. Upoznavanje interakcija može ispitanicima pružiti potrebno samopouzdanje i razumijevanje interakcija, što im može pomoći u lakšem savladavanju izazova čak i u uvjetima s lošijim kontrastom. Stoga, osim aspekata dizajna, važno je razmotriti i proces učenja ispitanika kako bi se osiguralo optimalno korisničko iskustvo. Distribucija vremena unutar svake podrazine pokazuje varijabilnost, pri čemu su podaci relativno gusto grupirani oko središnjih vrijednosti. To sugerira kako većina ispitanika dijeli slična iskustva u brzini izvršavanja zadataka unutar svake podrazine. Međutim, postoje pojedinci koji zahtijevaju značajno više vremena za izvršavanje istih zadataka, što može biti rezultat različitih razina vještine ili osobnih preferencija ispitanika.

Sljedeći parametar u analizi je ***korištenje opcije vraćanja objekta u zadatku***. Analizirajući broj povrataka 3D objekata po podrazini, u kontekstu veličine 3D objekta koji su ispitanici pokušavali dohvatiti, primjećujemo značajnu povezanost između ova dva parametra. Na primjer, u podrazini *P_dohvat* gdje je odnos veličine šake i 3D objekta bio 1:1, broj povrataka 3D objekta je bio značajan te je iznosio 73, a tu je opciju iskoristilo 66,04% ili 35 ispitanika. U *P_uvećanje*, gdje je omjer između virtualne šake i 3D objekta bio 1:2, niti jedan ispitanik nije koristio opciju vraćanja objekta. Međutim, daljnja analiza podataka otkrila je da je ovaj rezultat zapravo rezultat poteškoća u preciznom hvatanju 3D objekta. To je vidljivo po povećanom broju pogrešno ubačenih objekata, što sugerira kako su zadaci bili riješeni s manje preciznosti zbog poteškoća u manipulaciji većim trodimenzijskim objektima u odnosu na veličinu šake. To će detaljnije biti opisano u daljnjoj analizi podataka. U podrazini *P_smanjenje* zabilježen je najveći broj vraćanja 3D objekta koji je iznosio što sugerira da je preciznost i manipulacija malim 3D objektima bila izazovna za ispitanike. U podrazini *P_kontrast* zabilježen je ukupno 51 vraćanja 3D objekta, a tu je opciju iskoristilo 47,17% ili 25 ispitanika. Tablica 2.6. prikazuje broj korištenja opcije vraćanja objekta po podrazinama.

Tablica 2.6 Broj korištenja opcije vraćanja objekta po podrazinama.

Podrazina	Ukupan broj korištenja opcije vraćanja 3D objekta	Maksimalan broj vraćanja 3D objekta po ispitaniku	Postotak ispitanika koji je koristio opciju vraćanja 3D objekata (N=53)
<i>P_osnovna</i>	73	8	66,04%
<i>P_uvećanje</i>	0	0	0%

<i>P_smanjenje</i>	100	11	60,38%
<i>P_kontrast</i>	51	6	47,17%

Analizom broja točno i netočno ubačenih 3D objekata po podrazinama, prikazana je *preciznost* ispitanika tijekom izvršavanja zadataka na razini *R_dohvat*. Zadaci su bili jednostavni i nisu zahtijevali prethodno znanje ispitanika.

Identificirana su četiri moguća ishoda rješavanja zadatka koja su kategorizirana prema broju točno ubačenih objekata:

- ispitanik je točno ubacio 3 objekta, a 0 je netočnih, kategorizirano kao *Točno*,
- ispitanik je točno ubacio 2 objekta, a 1 netočno, kategorizirano kao *Većinom točno*,
- ispitanik je točno ubacio 1 objekt, a 2 netočno, kategorizirano kao *Većinom netočno*,
- ispitanik nije nijedan objekt točno ubacio, a 3 je ubacio netočno, kategorizirano kao *Netočno*.

Tablica 2.7. prikazuje različite ishode rješavanja zadataka u svakoj podrazini uz navedeni broj ispitanika koji su postigli svaki od tih ishoda.

U podrazini *P_osnovna*, 62,26% ili 33 ispitanika uspjelo je točno ubaciti sva tri 3D objekta, dok je manji broj ispitanika, odnosno 30,19% ili 16 ispitanika imalo jedan netočno ubačen 3D objekt, a vrlo mali broj, 7,55% ili 4 ispitanika je imalo dva netočno ubačena 3D objekta. Ovo ukazuje na to kako je podrazina *P_osnovna* relativno pristupačna s veličinom objekta većini ispitanika, s visokim postotkom uspješnosti. S druge strane, podrazina *P_uvećanje* pokazuje značajno veći broj ispitanika, tj 43.39% (23 ispitanika) koji su imali dva netočno ubačena 3D objekta i devet ispitanika koji nisu uspjeli točno ubaciti nijedan 3D objekt. Rezultat sugerira povećanu težinu podrazine *P_uvećanje* u usporedbi s *P_osnovna*, što je rezultat veličine 3D objekta koja je bila 2 puta veća od veličine virtualne šake. Podrazina *P_smanjenje* pokazuje poboljšanje s većim brojem ispitanika (83,02% ili 44 ispitanika) koji su točno ubacili sva tri 3D objekta što ukazuje na važnost proces prilagodbe ispitanika na interakcije implementirane u igru, omogućujući im bolje rezultate kroz ponavljanje interakcija. Ovo poboljšanje također sugerira kako je zadatak unutar ove podrazine bio bolje usklađen s očekivanjima i sposobnostima ispitanika. U podrazini *P_kontrast*, većina ispitanika (64,15% ili 34 ispitanika) je uspjela točno ubaciti sva tri 3D objekta, dok je manji broj (35,85% ili 19 ispitanika) imao jedan netočno ubačen 3D objekt. Podrazine *P_uvećanje* i *P_smanjenje* izazovnije su za

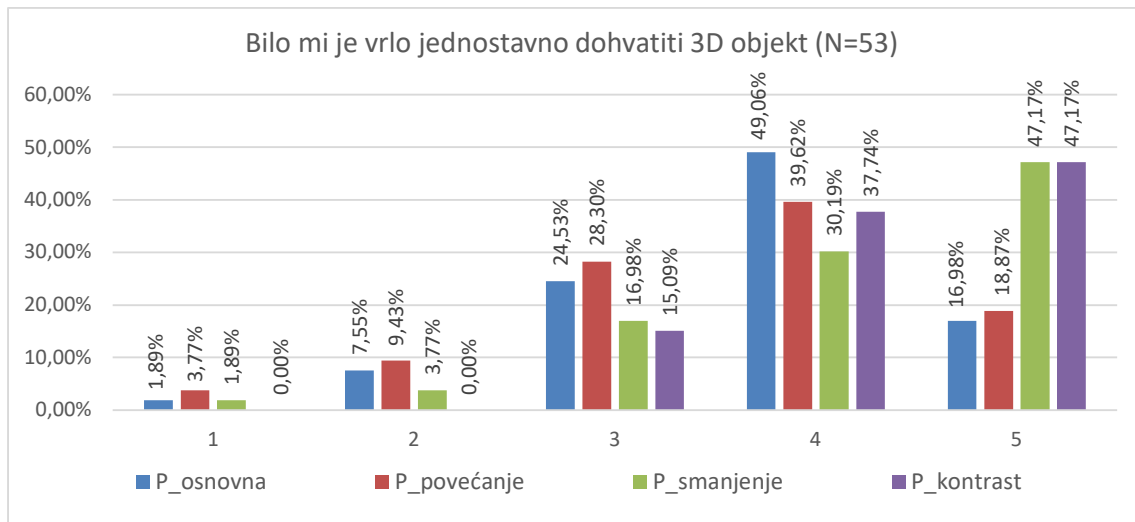
ispitanike u usporedbi s podrazinama $P_osnovna$ i $P_kontrast$, što se odražava kroz varijacije u broju točno i netočno ubačenih 3D objekata.

Tablica 2.7 Broj točno i netočno ubačenih objekata te broj ispitanika po podrazinama

Podrazina	Kategorija	Broj ispitanika (N=53)
<i>P_osnovna</i>	<i>Točno</i>	62,26%
	<i>Većinom točno</i>	30,19%
	<i>Većinom netočno</i>	7,55%
	<i>Netočno</i>	0%
<i>P_uvećanje</i>	<i>Točno</i>	3,77%
	<i>Većinom točno</i>	35,85%
	<i>Većinom netočno</i>	43,40%
	<i>Netočno</i>	16,98%
<i>P_smanjenje</i>	<i>Točno</i>	83,02%
	<i>Većinom točno</i>	16,98%
	<i>Većinom netočno</i>	0%
	<i>Netočno</i>	0%
<i>P_kontrast</i>	<i>Točno</i>	64,15%
	<i>Većinom točno</i>	35,85%
	<i>Većinom netočno</i>	0%
	<i>Netočno</i>	0%

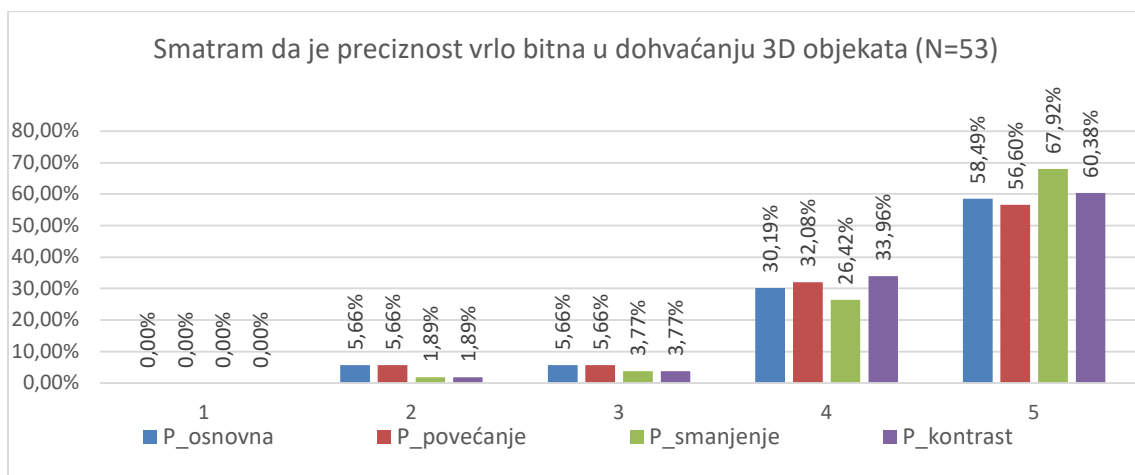
Sljedeća opcija koja se nudila ispitanicima je bila ***moгуćnost preskakanja razine***. Jedina podrazina u kojoj je ispitanik iskoristio tu opciju te odustao nakon 28,96 s je podrazina *P_uvećanje*.

Subjektivnom analizom ankete putem Google Forms platforme, istraženo je zadovoljstvo preciznosti i jednostavnosti implementirane interakcije *dohvati i pusti* u razini R_dohvat . Prva tvrdnja *Bilo mi je vrlo jednostavno dohvatiti objekt* pokazuje tendenciju rasta po pokazuje tendenciju rasta po podrazinama (Slika 2.10).



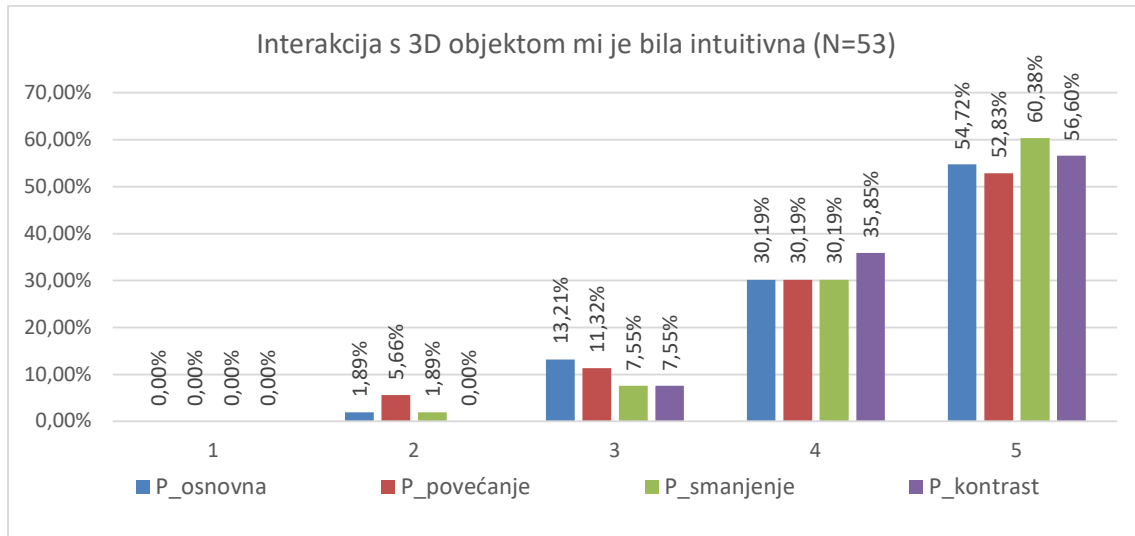
Slika 2.10 Stupčasti dijagram s ocjenama jednostavnosti dohvaćanja 3D objekta po podrazinama R_{dohvat} razine

Sljedeća tvrdnja odnosila se na preciznost prilikom dohvaćanja 3D objekata. Na temelju Slike 2.11 se može zaključiti da ispitanici generalno smatraju preciznost prilikom dohvaćanja 3D objekata bitnom. Podrazina $P_{smanjenje}$ zahtijeva najveći stupanj preciznosti, sudeći po najvećem broju ispitanika koji su dali ocjenu 5. Ovo implicira kako je $P_{smanjenje}$ bila najzahtjevnija ispitanicima.



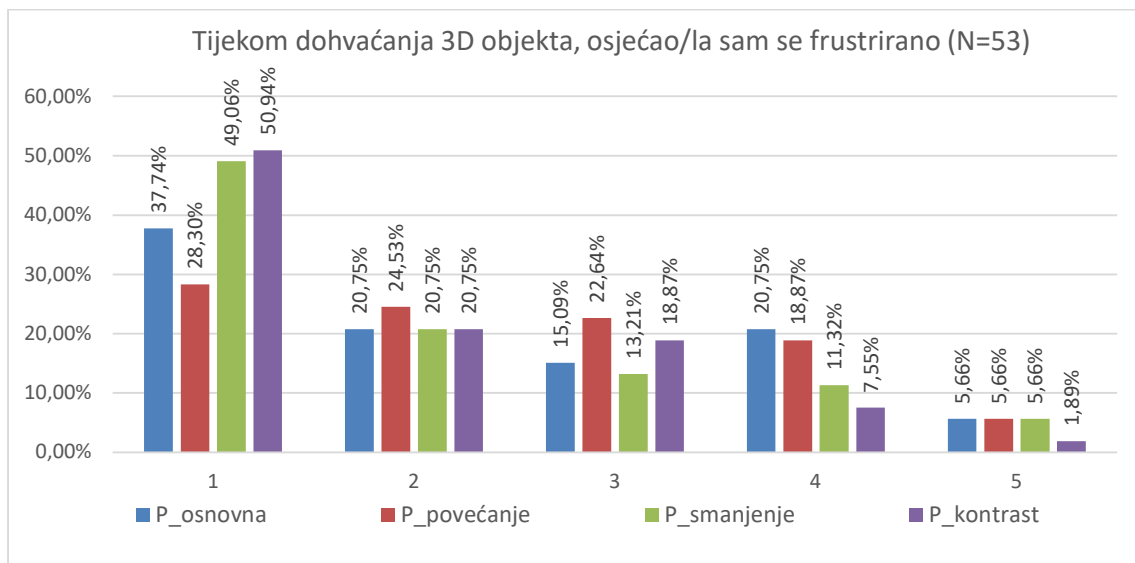
Slika 2.11 Stupčasti dijagram s ocjenama preciznosti dohvaćanja objekta po podrazinama R_{dohvat} razine

Sljedeća tvrdnja odnosila se na intuitivnost interakcije s 3D objektom (Slika 2.12). Rezultat sugerira kako ispitanici općenito smatraju interakciju *zgrabi i pusti* intuitivnom kroz sve podrazine s laganim variranjima u percepciji između podrazina.



Slika 2.12 Stupčasti dijagram s ocjenama intuitivnosti interakcije zgrabi i pusti

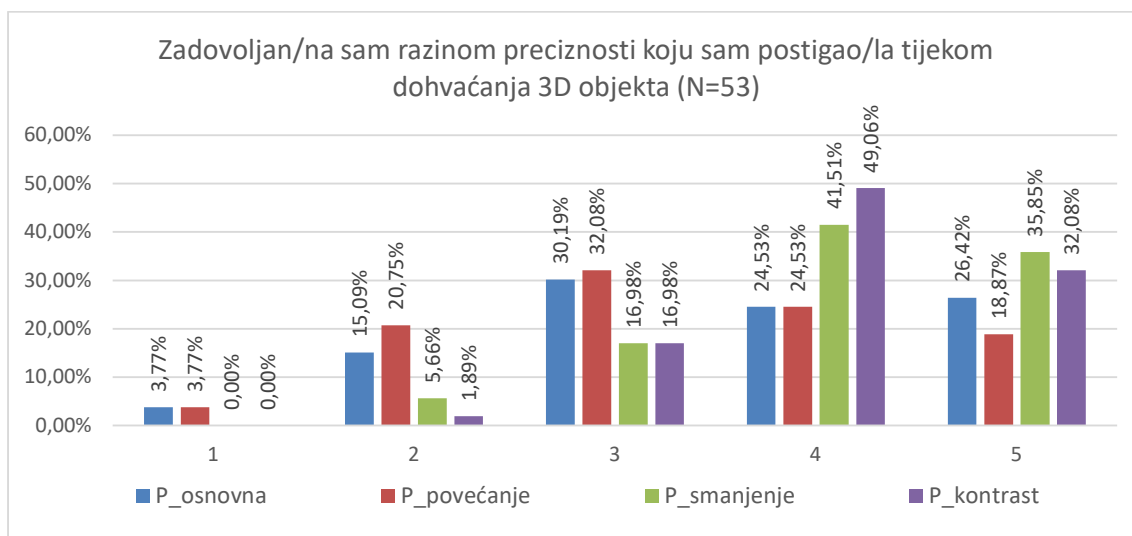
Slika 2.13. prikazuje stupčasti graf koji prikazuje ocjene frustracije ispitanika tijekom interakcije s 3D objektom po podrazinama. Iz slike je vidljivo da je većina ispitanika doživjela nisku do umjerenu razinu frustracije tijekom interakcije s razinom R_{dohvat} . Postoji blagi trend poboljšanja, odnosno smanjenja osjećaja frustracije kako ispitanici napreduju kroz podrazine.



Slika 2.13 Stupčasti dijagram s ocjenama frustracija ispitanika po podrazinama

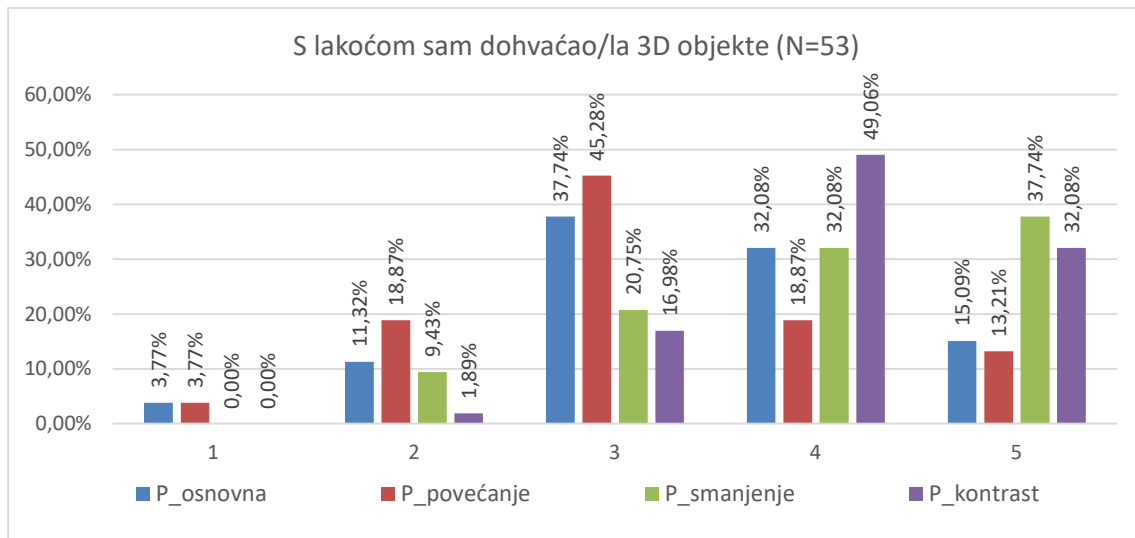
Sljedeća tvrdnja odnosila se na zadovoljstvo postignutom razinom preciznosti koju su ispitanici ostvarili tijekom interakcije *zgrabi i pusti* s trodimenzijskim objektom. Graf na slici 2.14 prikazuje da su ispitanici općenito bili zadovoljni razinom preciznosti koju su postizali tijekom razine R_{dohvat} , s posebno visokim zadovoljstvom u podrazinama $P_{smanjenje}$ i

P_kontrast. Izazovne aktivnosti, poput dohvaćanja manjih 3D objekata u slučaju, često su povezane s većim osjećajem postignuća kada se uspješno savladaju, što može pridonijeti većem zadovoljstvu ispitanika.



Slika 2.14 Stupčasti dijagram s ocjenama zadovoljstva ispitanika s postignutom preciznošću po podrazinama *R_dohvat* razine

Posljednja tvrdnja *S lakoćom sam dohvaćao/la trodimenzijske objekte* odnosila se na subjektivni osjećaj ispitanika o lakoći korištenja interakcije *dohvati i pusti* prilikom dohvaćanja objekata. Podaci (Slika 2.15) sugeriraju da su ispitanici bili zadovoljni s lakoćom dohvaćanja 3D objekata kroz sve podrazine aplikacije, s naglaskom na podrazine *P_smanjenje* i *P_kontrast* gdje je 69,81% ispitanika, odnosno 37 ispitanika od 53, dalo ocjenu 4 i 5.



Slika 2.15 Stupčasti dijagram s ocjenama ispitanika s lakoćom dohvata geometrijskog tijela po podrazinama R_{dohvat} razine

Na temelju analiziranih podataka (objektivnih mjerenja i subjektivnih ocjena ispitanika), napravljena je tablica 2.8.

Tablica 2.8 Zastupljenost pojedinih metrika istraživačkog instrumenta po podrazinama R_{dohvat} razine

Metrika	P_osnovna	P_uvećanje	P_smanjenje	P_kontrast
Najkraće prosječno vrijeme izvršavanja zadatka	×	×	×	✓
Najmanji broj vraćanja 3D objekata	×	✓	×	✓
Najveća ostvarena preciznost prilikom dohvaćanja 3D objekta	×	×	✓	×
Nije preskočena razina	✓	×	✓	✓
Jednostavnost dohvaćanja 3D objekta	×	×	✓	✓
Važnost preciznosti prilikom dohvaćanja 3D objekta	×	×	✓	×
Zadovoljstvo preciznosti prilikom dohvaćanja 3D objekta	×	×	✓	×
Frustriranost ispitanika prilikom dohvaćanja 3D objekta	✓	✓	✓	×

Uzimajući u obzir prethodno navedene rezultate, zaključuje se da podrazina $P_{smanjenje}$, s omjerom veličine virtualne šake i 3D objekta 1:0,5, pruža ispitanicima najbolje iskustvo, usklađujući izazovnost interakcije i zadovoljstvo ispitanika. Ovaj uspjeh upućuje na to da je

primjena manjih 3D objekata, omjera virtualne šake i 3D objekta 1:0,5, korisna kod zadataka koji zahtijevaju preciznost. Ona omogućava ispitanicima razvijanje i primjenu preciznosti, što dovodi do većeg osjećaja zadovoljstva i postignuća. S druge strane, za zadatke gdje je ključno vrijeme izvršavanja, preporučuje se primjena omjera 1:1 između virtualne šake i 3D objekta. Ovaj omjer omogućuje brže i efikasnije izvršavanje zadataka, smanjujući vjerojatnost frustracije i omogućavajući ispitanicima bolju usredotočenost na brzinu izvršavanja i veću vjerojatnost točnosti i preciznosti interakcije s 3D objektom.

Preporuka za budući dizajn i razvoj programskih rješenja sličnog tipa jest da se prvo pažljivo razmotri namjena i cilj pojedinih zadataka. Za one zadatke koji ciljaju na poboljšanje preciznosti interakcija ispitanika, preporučuje se da **parametar veličine objekta u odnosu na virtualnu šaku korisnika** iznosi 1:0,5, dok bi zadaci koji se odnose na brzinu interakcija ispitanika trebali koristiti omjer 1:1, čime se osigurava ravnoteža između složenosti zadatka i sposobnosti ispitanika u uspješnom izvršavanju zadane aktivnosti.

2.3.3. Analiza interakcije primicanja prstiju obje šake

U razini *R_prsti* implementirane su interakcije s 3D objektom, koje uključuju dohvaćanje geometrijskog tijela i povećavanje istog putem interakcije *primicanja prstiju obje šake* (engl. pinch). Razina se sastoji od dvije podrazine, *P_bez_distraktora* i *P_distraktori*. Cilj podrazine *P_bez_distraktora* bio je dohvatiti zelenu kuglu i povećati je kako bi bila približno iste veličine kao velika ružičasta kugla. Podrazina *P_distraktori* bila je izazovnija, gdje je ispitanik trebao odabrati određenu kuglu, u ovom slučaju zelenu kuglu, te ju povećati kako bi postigla istu veličinu kao ružičasta kugla. U ovom scenariju postavljeni su ometajući elementi (druge kugle) kako bi se istražilo kako ometajući elementi utječu na izvedbu ispitanika tijekom izvršavanja zadatka. Prvi parametar koji se analiza je **vrijeme** provedeno na *R_prsti* razini aplikacije, koja zahtijeva od ispitanika korištenje geste primicanja prstiju obje šake za upravljanje 3D objektima.

Tablica 2.9 prikazuje statističku analizu vremena potrebnog za izvršavanje zadataka unutar podrazina *P_bez_distraktora* i *P_distraktori* koja obuhvaća srednju vrijednost (m), medijan (md), standardnu devijaciju (σ), minimalnu (min) i maksimalnu (max) vrijednost, raspon (R), donji ($Q1$) i gornji ($Q3$) kvartil te interkvartilni raspon (IQR), indeks simetričnosti (S) i indeks spljoštenosti distribucije (K).

Tablica 2.9 Statistička analiza za vrijeme potrebno za izvršavanje zadataka druge razine

	<i>P_bez_distraktora</i>	<i>P_distraktori</i>
m [s]	31,35	42,80
md [s]	21,54	25,86
σ [s]	29,59	37,98
Min [s]	3,02	4,24
Max [s]	156,12	171,99
R [s]	153,10	167,76
Q1 [s]	12,14	17,39
Q3 [s]	36,00	62,21
IQR [s]	23,86	44,82
S [s]	2,13	1,54
K [s]	5,52	2,20

Iz statističke analize vremena izvođenja zadataka za podrazine *P_bez_distraktora* i *P_distraktori*, primjećuje se razlika u performansama ispitanika koja se očituje kroz različite statističke mjere. Srednje vrijeme izvršavanja zadatka u *P_bez_distraktora* iznosilo je 31,35 s, dok je u *P_distraktori* bilo značajno veće, 42,80 s, što upućuje na povećanu složenost zadataka zbog prisutnosti ometajućih trodimenzijskih elemenata. Medijan iznosi 21,54 s za *P_bez_distraktora* i 25,86 s za *P_distraktori*. To ukazuje kako je većina ispitanika provela više vremena na zadacima u *P_distraktori*. Standardna devijacija je veća u *P_distraktori* (37,98 s) u usporedbi s *P_bez_distraktora* (29,59 s), što sugerira veću varijabilnost u vremenima izvršavanja među ispitanicima. To može biti rezultat različitih metoda koje ispitanici primjenjuju kako bi prevladali izazove postavljene ometajućim elementima. Minimalno i maksimalno vrijeme potvrđuju ovu varijabilnost, s minimalnim vremenima od 3,02 s u podrazini *P_bez_distraktora* i 4,24 s u *P_distraktori*, te maksimalnim vremenima od 156,12 s u *P_bez_distraktora* naspram 171,99 s u *P_distraktori*. Ovi ekstremi ukazuju na širok raspon iskustava među ispitanicima, od kraćih do dužih vremenskih intervala izvršavanja zadatka. Interkvartilni raspon (IQR), koji pokazuje raspon između prvog i trećeg kvartila, bio je znatno veći u *P_distraktori* (44,82 s) nego u *P_bez_distraktora* (23,86 s), što dodatno potvrđuje kako je bilo više varijabilnosti u tome kako su ispitanici pristupali i rješavali zadatke. Indeksi simetričnosti (S) i spljoštenosti (K) odražavaju distribuciju vremena

izvršavanja, s većim vrijednostima u prvoj podrazini, što ukazuje na prisutnost ekstremnijih vrijednosti.

Ukupno, ovi podaci pokazuju da su ometajući elementi u *P_distraktori* imali značajan utjecaj na iskustvo ispitanika, povećavajući vrijeme potrebno za izvršavanje zadataka i stvarajući širu varijabilnost u performansama. Ovo sugerira kako prisutnost ometajućih 3D elemenata dodaje složenost i izazov, zahtijevajući od ispitanika veću koncentraciju i napor za uspješno dovršavanje zadataka.

Analiza korištenja opcije vraćanja 3D objekta između podrazina *P_bez_distraktora* i *P_distraktori* otkriva značajnu razliku, koja se može objasniti prisutnošću trodimenzijskih ometajućih elemenata u podrazini *P_distraktori* koji su međusobno interagirali. U *P_bez_distraktora* zabilježena su 56 vraćanja 3D objekata od strane 41,50% ili 22 ispitanika, gdje je najviše vraćanja po pojedinom ispitaniku bilo 6. Nasuprot tome, podrazina *P_distraktori* pokazala je povećanje na 111 vraćanja s maksimalno 10 vraćanja po ispitaniku, uz 64,15% ili 34 ispitanika koji su koristili ovu opciju. Ovaj značajan skok u broju vraćanja 3D objekata ukazuje na veće izazove koje su ometajući 3D elementi, odnosno druge kugle, predstavljali ispitanicima. Takvi elementi su dodali dodatnu razinu složenosti zadatku, čineći interakciju težom i potičući ispitanike na češće korištenje opcije vraćanja objekta kao metodu za suočavanje s povećanim izazovima. Tablica 2.10 prikazuje broj korištenja opcije vraćanja objekta po podrazinama.

Tablica 2.10 Broj korištenja opcije vraćanja objekta po podrazinama

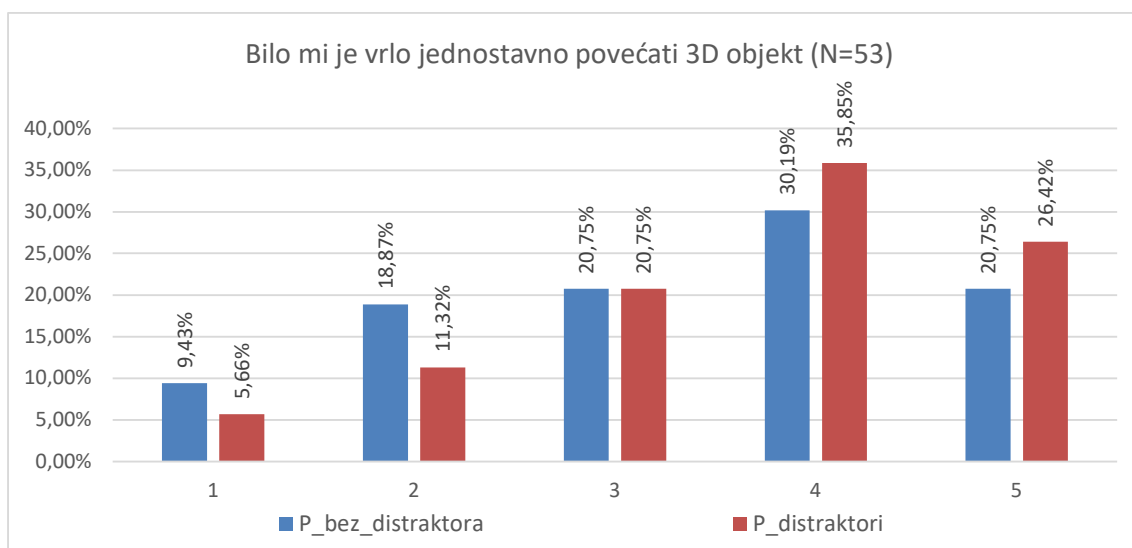
Podrazina	Ukupan broj korištenja opcije vraćanja objekta	Maksimalan broj vraćanja objekta po ispitaniku	Postotak ispitanika koji je koristio opciju vraćanja objekata (N=53)
<i>P_bez_distraktora</i>	56	6	41,51%
<i>P_distraktori</i>	111	10	64,15%

Sljedeća opcija koja se nudila ispitanicima je bila ***mogućnost preskakanja razine***. Opcija je iskorištena u *P_bez_distraktora*, a ispitanik je odustao nakon 64,81 ms.

Daljnja analiza je obuhvatila ocjene vezane za drugu razinu, prikupljene od ispitanika putem ankete na Google Forms.

Prva tvrdnja "Bilo mi je vrlo jednostavno povećati kuglu" pokazuje kako su ispitanici u prvoj podrazini općenito osjećali da je povećavanje 3D objekta bilo jednostavno. Podrazini

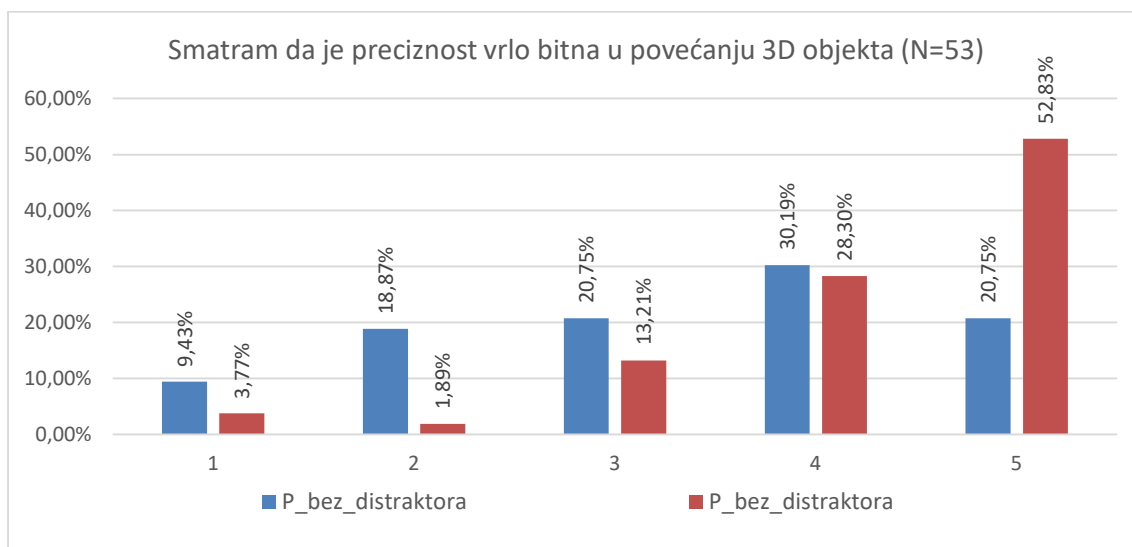
P_bez_distratora ocjenu 4 i 5 dalo je 50,94% ili 27 ispitanika, a podrazini *P_distratori* 62,26% ili 33 ispitanika. U *P_distratori* vidi se pad ocjena 1 i 2. Ovaj uzorak može implicirati kako su ispitanici, kroz iskustvo stečeno u *P_bez_distratora*, razvili vještine koje su im pomogle da lakše izvršavaju zadatke u *P_distratori*, unatoč prisutnosti ometajućih elemenata. Takav trend sugerira kako je, slično kao i u razini *R_dohvat*, proces učenja imao pozitivan učinak na sposobnost ispitanika da se prilagodi interakciji i uspješno riješi zadatke kroz podrazine. Slika 2.16 prikazuje stupčasti dijagram s ocjenama jednostavnosti povećavanja 3D objekta po podrazinama *R_prsti*.



Slika 2.16 Stupčasti dijagram s ocjenama jednostavnosti povećavanja 3D objekta po podrazinama *R_prsti*

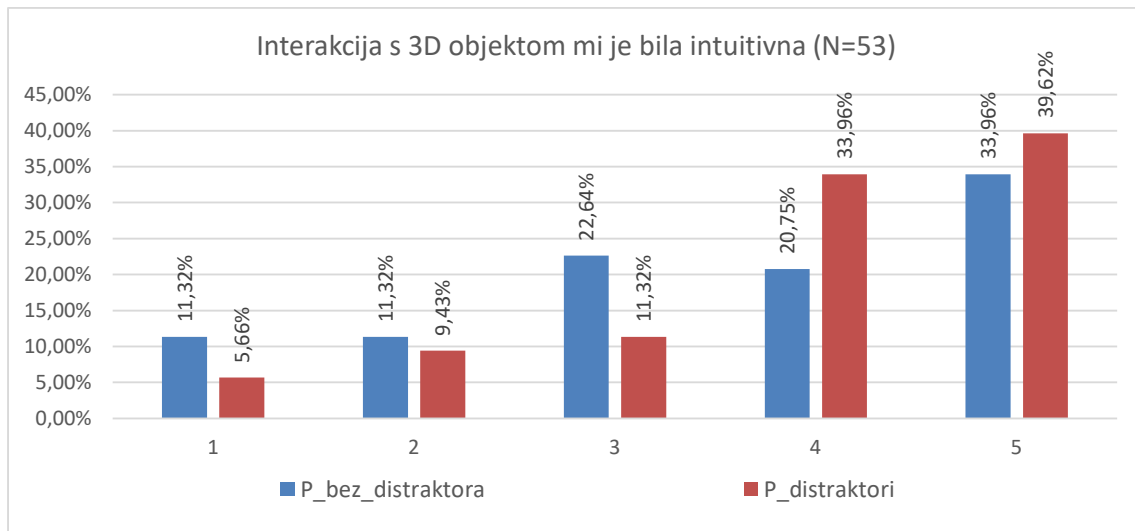
Slika 2.17 prikazuje stupčasti graf s ocjenama ispitanika o važnosti preciznosti u procesu povećavanja 3D objekta u *R_prsti*. Analiza ocjena iz ankete za podrazine *P_bez_distratora* i *P_distratori* pokazuje različite percepcije ispitanika o važnosti preciznosti pri povećanju 3D objekta. U *P_bez_distratora*, ispitanici su dali podijeljene ocjene o važnosti preciznosti za povećanje 3D objekta. Ocjene 1 i 2 dalo je 38,30% ili 15 ispitanika, a 20,75% ili 11 ispitanika je dalo najvišu ocjenu 5. Ocjene 3 i 4 bile su zastupljene s 20,75% i 30,19% (11 i 16 odgovora respektivno), što pokazuje širok raspon mišljenja među ispitanicima o važnosti preciznosti. U *P_distratori*, znatno veći broj ispitanika, njih 52,83% ili 28 ispitanika, dalo je najvišu ocjenu 5, ističući visoku važnost preciznosti u toj podrazini. Nasuprot tome, najniže ocjene 1 i 2 zabilježene su samo 5,66% ili 3 puta, što implicira kako su ispitanici općenito osjećali veću potrebu za preciznosti u toj podrazini. Ovi rezultati sugeriraju da je *P_distratori* možda predstavljala izazovniji zadatak u kojem je preciznost bila važna. Također, moguće je da su

ispitanici kroz interakciju i iskustvo stečeno u *P_bez_distraktora* stekli bolje razumijevanje i vještine potrebne za precizno povećanje 3D objekta, što se odrazilo u većem broju visokih ocjena za podrazinu *P_distraktori*.



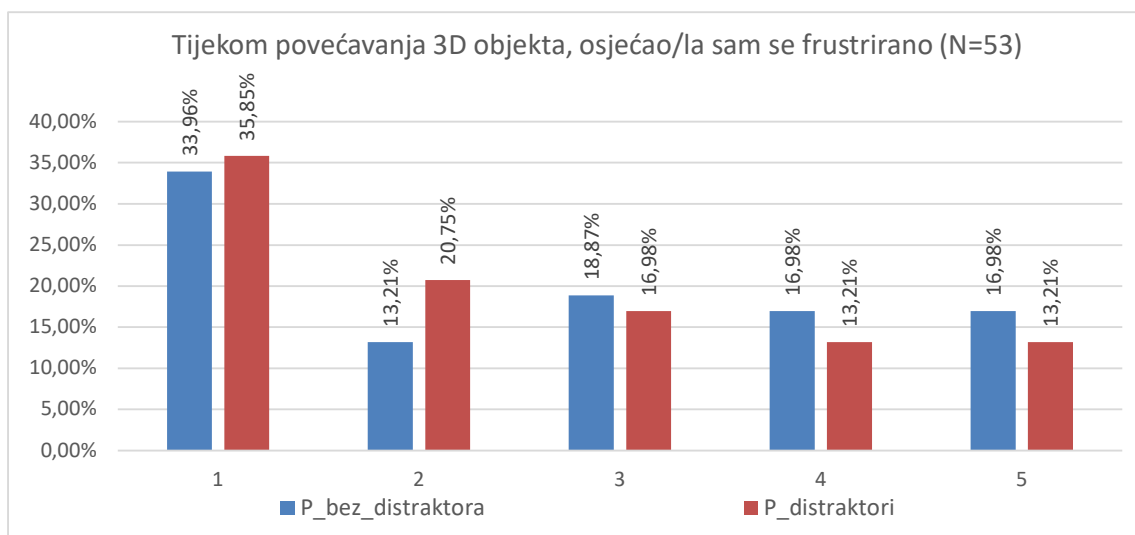
Slika 2.17 Stupčasti dijagram s ocjenama preciznosti povećavanja 3D objekta po podrazinama *R_prsti*

Sljedeća tvrdnja u anketi odnosila se na to koliko je ispitanicima interakcija s 3D objektom bila intuitivna (Slika 2.18). U *P_bez_distraktora*, značajan broj ispitanika ocijenio je interakciju visoko intuitivnom, dajući 33,96% ili 18 ocjena 5 i 20,75% ili 11 ocjena 4. *P_distraktori* dobila je bolje ocjene, s 39,62% ili 21 ocjenom 5 i 33,96% ili 18 ocjenama 4, što pokazuje kako su ispitanici interakciju s 3D objektom smatrali još jednostavnijom i prirodnijom. Manji broj niskih ocjena u obje podrazine sugerira kako ispitanici lako usvajaju mehanizme interakcije, a povećanje visokih ocjena u *P_distraktori* pokaziva efektivnost procesa učenja i adaptacije ispitanika na interakciju tijekom druge razine.



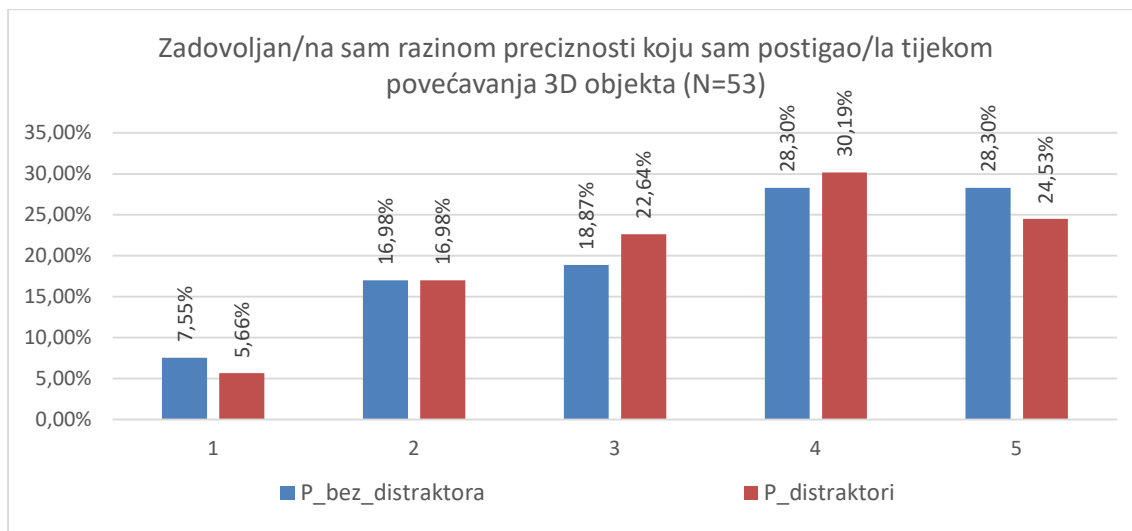
Slika 2.18 Stupčasti dijagram s ocjenama intuitivnosti interakcije *primicanje prstiju obje šake*

Slika 2.19 prikazuje stupčasti graf s ocjenama ispitanika o osjećaju frustracije tijekom povećavanja 3D objekta u podrazinama *P_bez_distraktora* i *P_distraktori*. U *P_bez_distraktora*, većina ispitanika je osjećala malo ili nimalo frustracije, s 33,96% ili 18 ocjena 1. Ocjene 5, koje ukazuju na visoku razinu frustracije, dobile su manje zastupljenost s 16,98% ili 9 odgovora, isto kao i ocjene 3 i 4. U *P_distraktori*, broj ocjena 1 je sličan prvoj podrazini, ali se povećavao broj ocjena 2, što pokazuje blagi porast frustracije među ispitanicima, s tim da je broj ocjena 5 i 4 nešto manji. Ovo povećanje frustracije u *P_distraktori* je posljedica prisutnosti dodatnih 3D objekata, odnosno kugli koje su otežavale zadatak, povećavajući time osjećaj frustracije među ispitanicima.



Slika 2.19 Stupčasti dijagram s ocjenama frustracija ispitanika po podrazinama *R_prsti*

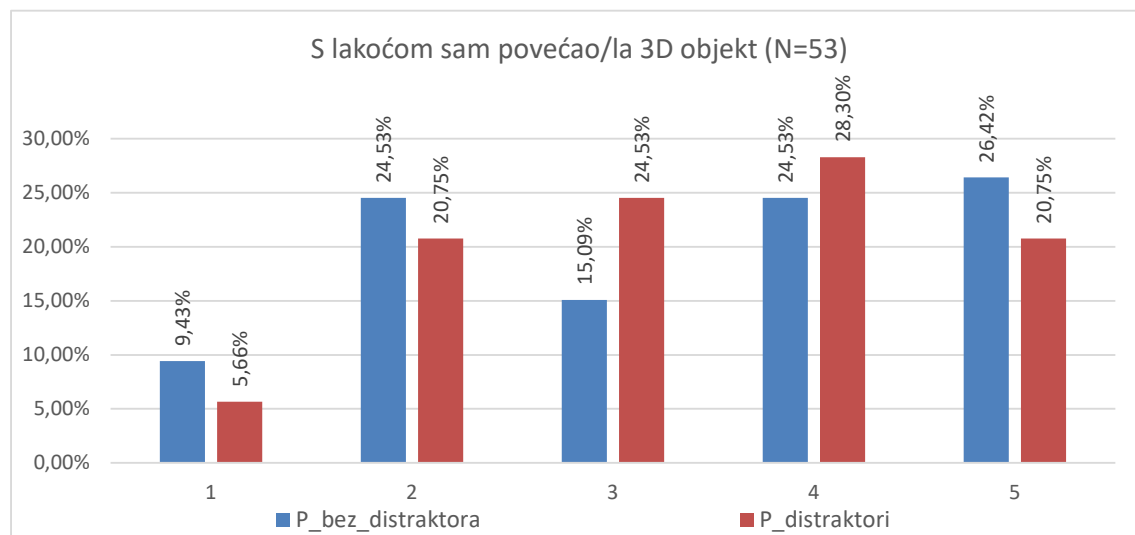
Sljedeća tvrdnja odnosila se na zadovoljstvo postignutom razinom preciznosti koju su ispitanici ostvarili tijekom interakcije *primicanje prstiju obje šake*. Graf na slici 2.20 prikazuje kako ispitanici procjenjuju svoje zadovoljstvo preciznošću koje su postigli dok su povećavali 3D objekte u dvije različite podrazine. U *P_bez_distratora*, 56,60% ili 30 od 53 ispitanika dalo ocjene 4 i 5. Rezultat sugerira na općenito visoko zadovoljstvo među ispitanicima u vezi s postignutom preciznošću prilikom povećavanja 3D objekta. Manji broj ispitanika je dao niže ocjene subjektivnom osjećaju s ostvarenom preciznosti što potvrđuje pozitivnu percepciju preciznosti koja je bila potrebna za uspješno povećanje 3D objekta. U *P_distratori*, iako je broj ocjena 5 nešto manji, s 24,53% ili 13 glasova, ocjena 4 je zabilježena 30,19% ili 16 puta. Ispitanici su i dalje bili relativno zadovoljni svojom preciznošću, unatoč većem izazovu kojeg je podrazina uključivala. Ocjene 2 i 3 su također nešto više zastupljene u odnosu na *P_bez_distratora*, što implicira kako su neki ispitanici osjetili poteškoće zbog dodatnih 3D elemenata u *P_distratori*. Ukupno gledano, ispitanici su pokazali zadovoljavajuću razinu preciznosti u obavljanju zadataka u obje podrazine.



Slika 2.20 Stupčasti dijagram s ocjenama zadovoljstva ispitanika s postignutom preciznošću po podrazinama *R_prsti*

Posljednja tvrdnja *S lakoćom sam dohvaćao/la geometrijska tijela* se odnosila na subjektivni osjećaj ispitanika o lakoći korištenja interakcije *primicanja prstiju obje šake* prilikom povećavanja kugle (Slika 2.21). U *P_bez_distratora* je većina ispitanika (50,95% ili 27 ispitanika) dala ocjene 4 i 5, što znači da je većina ispitanika smatrala kako su povećali 3D objekt s lakoćom. Niže ocjene 1 i 2 dobile su manji broj glasova, 33,96% ili 18, što ukazuje kako je manji broj ispitanika naišao na teškoće prilikom povećavanja 3D objekta. U *P_distratori*, ocjene 4 i 5 su također česte, s 49,05% ili 26 glasova, dok je zastupljenost

ocjene 3 nešto veća, što sugerira veće izazove koje su ispitanici susretali zbog prisutnosti ometajućih 3D elemenata.



Slika 2.21 Stupčasti dijagram s ocjenama ispitanika s ocjena za lakoću povećavanja 3D objekta po podrazinama *R_prsti*

Na temelju analiziranih podataka (objektivnih mjerenja i subjektivnih ocjena ispitanika), kreirana je tablica 2.11.

Tablica 2.11 Zastupljenost pojedinih metrika istraživačkog instrumenta po podrazinama *R_prsti*

Metrika	<i>P_bez_distraktora</i>	<i>P_distraktori</i>
Najkraće prosječno vrijeme izvršavanja zadatka	✓	✗
Najmanji broj vraćanja 3D objekata	✓	✗
Nije preskočena razina	✗	✓
Jednostavnost povećavanja 3D objekta	✗	✓
Važnost preciznosti prilikom povećavanja kugle	✗	✓
Zadovoljstvo preciznosti prilikom povećavanja 3D objekta	✓	✗
Frustriranost prilikom povećavanja 3D objekta	✗	✓

Analiza prikupljenih podataka iz *P_bez_distraktora* i *P_distraktori* ukazuje na različite aspekte koji mogu utjecati na budući dizajn i razvoj sličnih programskih rješenja.

P_bez_distratora, s najkraćim vremenom izvršavanja zadataka, idealna je za vremenski ograničene zadatke gdje se naglasak stavlja na brzinu i efikasnost. S druge strane, iako *P_distratori* uključuje ometajuće 3D elemente, pokazuje veći angažman ispitanika - nijedan ispitanik nije preskočio razinu. To sugerira kako ometajući 3D elementi, iako izazovni, nisu prevelika prepreka te potiču ispitanike na veću usredotočenost i uključenost u zadatak.

P_distratori se ističe i većim zadovoljstvom ispitanika u pogledu jednostavnosti izvođenja zadatka i važnosti preciznosti. Ovakav pristup mogao bi biti koristan u zadržavanju pažnje ispitanika i poboljšanju njihovih vještina. Na temelju ovih rezultata, preporučuje se korištenje strukture slične *P_bez_distratora* za vremenski osjetljive zadatke. S druge strane, *P_distratori* koja sadrži ometajuće elemente pokazala se kao dobar izbor za situacije gdje je cilj potaknuti veći angažman ispitanika. Ovi elementi pružaju dodatne izazove koji mogu motivirati ispitanike na interakciju i koncentraciju tijekom izvršavanja zadataka.

Preporuka je da se u opcijama pristupačnosti korisnicima ponudi **moćnost izmjene interaktivnosti ometajućih elemenata (distratora)** na način da ti elementi postanu statični ili da se potpuno uklone iz zadatka.

2.3.4. Analiza interakcija prijelaz šake u stranu i rotacije

Treća razina igre, *R_šaka*, podijeljena na podrazine *P_izravna* i *P_neizravna*, fokusira se na interakcije s 3D objektima, nudeći ispitanicima izazove kao što su dohvat i rotacija virtualne kocke. U *P_izravna*, ispitanici koriste *dohvati i pusti* interakciju s rotacijom kako bi pronašli broj 5, dok druga podrazina uvodi klizač na sučelju za rotiranje kocke do broja 1, koristeći gestu *prijelaz šake u jednu stranu*. *P_izravna* podrazumijeva korištenje izravne interakcije, gdje je ispitanik u izravnoj interakciji s kockom, dok se u *P_neizravna* koristi klizač, odnosno indirektnu interakciju, kako bi pronašao odgovarajući broj.

Prvi parametar analize, isto kao i u *R_dohvat* i *R_prsti*, je bilo *vrijeme* izvršavanja zadatka u *P_izravna* i *P_neizravna*. Tablica 2.12 prikazuje statističku analizu vremena potrebnog za izvršavanje zadataka unutar podrazina *P_izravna* i *P_neizravna* koja obuhvaća srednju vrijednost (m), medijan (md), standardnu devijaciju (σ), minimalnu (min) i maksimalnu (max) vrijednost, raspon (R), donji ($Q1$) i gornji ($Q3$) kvartil te interkvartilni raspon (IQR), indeks simetričnosti (S) i indeks spljoštenosti distribucije (K).

Tablica 2.12 Statistička analiza za vrijeme potrebno za izvršavanje zadataka razine *R_šaka*

	<i>P_izravna</i>	<i>P_neizravna</i>
m [s]	17,83	7,83
md [s]	13,08	6,19
σ [s]	13,82	6,20
Min [s]	2,09	0,66
Max [s]	59,13	40,66
R [s]	57,04	40,00
Q1 [s]	9,39	4,42
Q3 [s]	24,81	9,64
IQR [s]	15,43	5,22
S [s]	1,47	3,29
K [s]	1,84	15,13

Analizirajući statističke podatke za podrazine *P_izravna* i *P_neizravna*, primijeti se kako se performanse ispitanika razlikuju, djelomično zbog razlika u interakcijama koje su implementirane u svakoj podrazini. U *P_izravna* ispitanici su se susreli s kombinacijom interakcija, uključujući *dohvati i pusti* te rotaciju 3D objekta, što je rezultiralo prosječnim vremenom izvršavanja zadatka od 17,83 s. Složenost koju donosi ovakva kombinacija interakcija objašnjava zašto je ispitanicima bilo potrebno više vremena za izvršavanje zadataka u *P_izravna*. S druge strane, u *P_neizravna* fokus je bio na pojednostavljenom pristupu koristeći samo jednu vrstu interakcije – *prijelaz šakom u jednu stranu*, uz pomoć grafičkog elementa klizača za rotaciju 3D objekta. Ovo je olakšalo izvršavanje zadatka ispitanicima, što se odražava u znatno kraćem srednjem vremenu izvršavanja od 7,83 s. Medijan vremena, standardna devijacija, te minimalna i maksimalna vremena izvršavanja potvrđuju ovaj zaključak, ukazujući na veću konzistentnost u vremenu izvršavanja zadatka među ispitanicima u *P_neizravna*. Manja varijabilnost u *P_neizravna* sugerira kako je pojednostavljeni pristup s jednom vrstom interakcije omogućio ispitanicima lakše i brže rješavanje zadatka. *P_izravna* pokazuje veći IQR, što implicira na širu rasprostranjenost vremena, *P_neizravna* ima manji IQR, sugerirajući konzistentnije performanse u izvođenju zadataka kod ispitanika. Indeksi simetričnosti i spljoštenosti pokazuju razlike između podrazina. U *P_neizravna* veće vrijednosti ovih indeksa ukazuju na prisutnost nekoliko

ekstremnih vrijednosti, sugerirajući varijabilnost u teškoći prilikom izvršavanja zadatka među ispitanicima.

U *P_izravna*, zabilježen je manji broj korištenja opcije vraćanja 3D objekta u usporedbi s prethodnim razinama istraživačkog instrumenta. Ukupno 24 puta korištena je opcija vraćanja, s maksimalno 4 vraćanja po ispitaniku i 28,30% ili 15 ispitanika koji su koristili ovu opciju. Rezultat ukazuje na relativno visoku razinu uspješnosti i prilagodljivosti ispitanika pri rješavanju zadatka unutar *P_izravna*, implicirajući kako su se ispitanici uspjeli efikasno nositi s kombinacijom interakcija u ovoj podrazini. Za *P_neizravna*, opcija vraćanja 3D objekta nije bila primjenjiva. Razlog za to je specifična interakcija u ovoj podrazini koja je uključivala korištenje klizača. Klizač, kao alat za interakciju, dizajniran je tako da ne može otići izvan dohvata virtualne šake ispitanika, što eliminira potrebu za vraćanjem 3D objekta

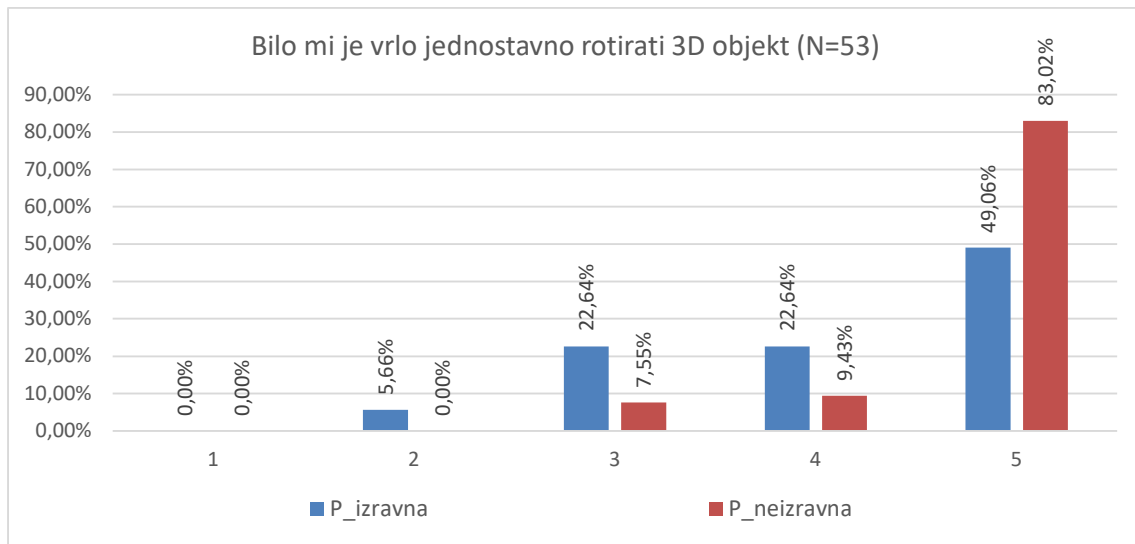
Tablica 2.13 prikazuje broj korištenja opcije vraćanja objekta po podrazinama.

Tablica 2.13 Broj korištenja opcije vraćanja objekta unutar *R_šaka*

Podrazina	Ukupan broj korištenja opcije vraćanja objekta	Maksimalan broj vraćanja objekta po ispitaniku	Postotak ispitanika koji je koristio opciju vraćanja objekata (N=53)
<i>P_izravna</i>	24	4	28,30%
<i>P_neizravna</i>	Nije primjenjivo za ovu podrazinu		

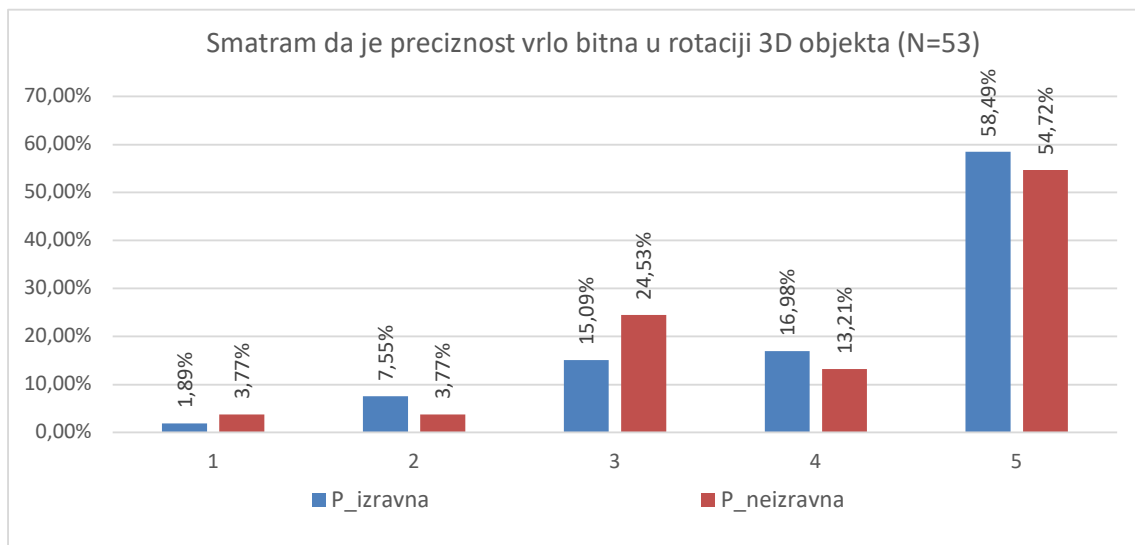
Sljedeća opcija koja se nudila ispitanicima je bila ***mogućnost preskakanja razine***. Opcija je iskorištena pet puta u *P_izravna*, a u prosjeku su ispitanici odustajali nakon 17.690 ms.

Daljnja analiza je obuhvatila ocjene vezane za *R_šaka*, prikupljene od ispitanika putem ankete na Google Forms. Slika 2.22 prikazuje stupčasti dijagram s ocjenama jednostavni dohvaćanja objekta po podrazinama. Subjektivne ocjene ispitanika o jednostavnosti rotiranja 3D objekta u trećoj razini igre pokazuju značajnu razliku između dvije podrazine. U *P_izravna*, većina ispitanika (49,05% ili 26) dala je ocjenu 5, što ukazuje na to da su ispitanici smatrali rotiranje 3D objekta vrlo jednostavnim. Ostatak raspodjele ocjena pokazuje uravnotežen broj ispitanika s ocjenama 3 i 4, dok je vrlo mali broj dao ocjenu 2 i nijedan ocjenu 1. Za *P_neizravna*, većina ispitanika (83,01% ili 44) dala je ocjenu 5, što pokazuje visoku razinu jednostavnosti rotiranja 3D objekta. Manji broj ispitanika dao je ocjene 3 i 4 (16,98% ili 9), a ni jedan ispitanik nije dao ocjene 1 i 2.



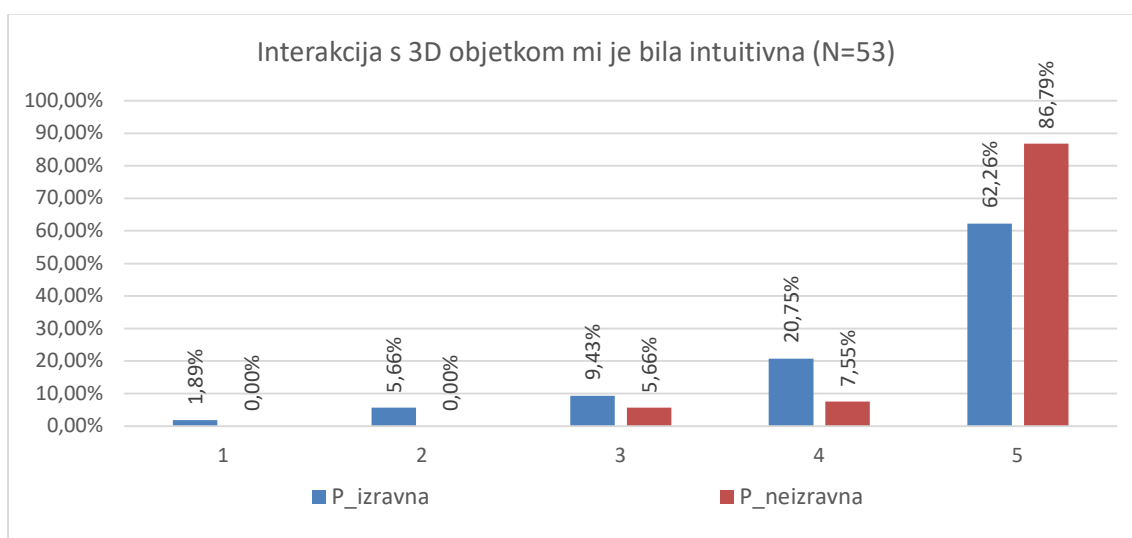
Slika 2.22 Stupčasti dijagram s ocjenama jednostavnosti rotiranja 3D objekta po podrazinama *R_ška*

Slika 2.23 prikazuje stupčasti graf s ocjenama ispitanika o važnosti preciznosti u rotaciji 3D objekta u *R_ška*. U *P_izravna*, gdje je korištena kombinacija interakcija, 31 ispitanik je dao najvišu ocjenu, što implicira kako je većina ispitanika smatrala preciznost vrlo bitnom za uspješno izvršenje zadatka. Za *P_neizravna*, gdje je interakcija s 3D objektom posredovana korištenjem grafičkog klizača, sličan broj ispitanika, 54,71% (29 od 53 ispitanika) smatra preciznost važnom. Ovakav rezultat sugerira kako neovisno o interakciji i grafičkim elementima, ispitanici preciznost smatraju izrazito bitnom u trodimenzijskim interakcijama.



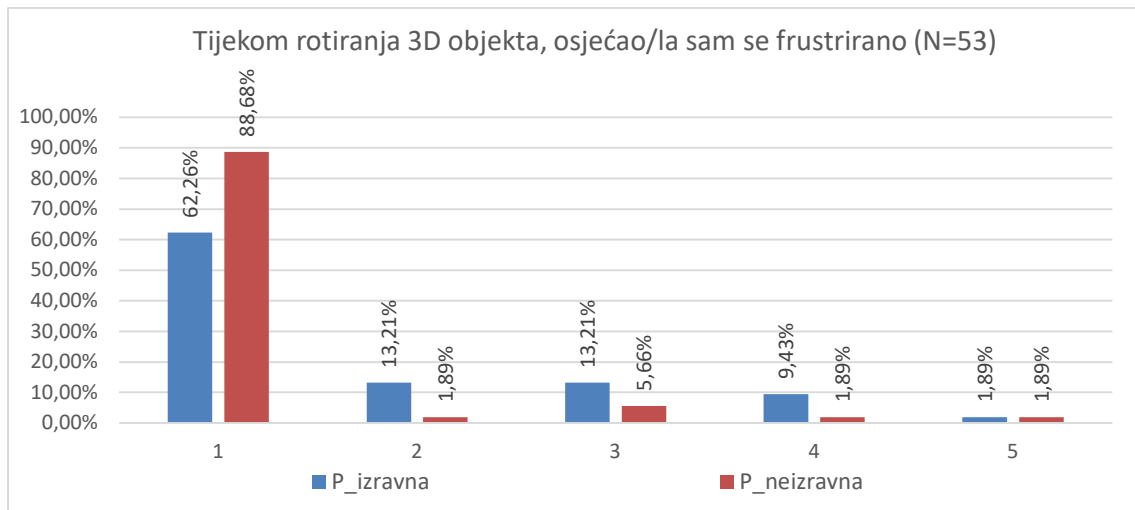
Slika 2.23 Stupčasti dijagram s ocjenama preciznosti u rotaciji 3D objekta po podrazinama *R_ška*

U analizi odgovora ispitanika o intuitivnosti interakcije s 3D objektom u *R_ška* prikazanoj stupčastim grafom na Slici 2.24, zapaža se značajna preferencija prema interakciji implementiranoj u *P_neizravna*. Prema prikupljenim podacima, 86,79% ili 46 ispitanika, što je znatna većina, ocijenilo je interakciju s klizačem za rotaciju 3D objekta kao vrlo intuitivnu, dajući joj najvišu ocjenu 5. To implicira kako je uvođenje grafičkog elementa klizača pozitivno utjecalo na percepciju ispitanika o intuitivnosti interakcije. S druge strane, u *P_izravna*, gdje je bila implementirana kombinacija interakcija - *dohvati i pusti* te rotacija - također se uočava sklonost prema višim ocjenama, s 62,26% ili 33 ispitanika koji su ocijenili interakciju kao izuzetno intuitivnu. Ovaj rezultat pokazuje kako ispitanici, unatoč potencijalnoj složenosti kombinacije interakcija, iste doživjeli kao intuitivne.



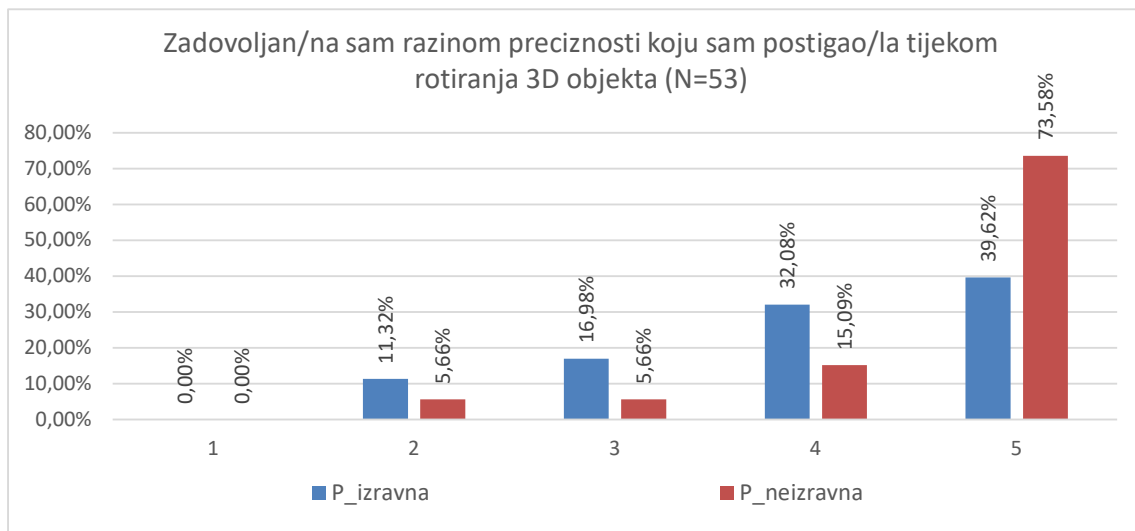
Slika 2.24 Stupčasti dijagram s ocjenama intuitivnosti interakcija implementiranih u *R_ška*

Slika 2.25 prikazuje stupčasti graf s ocjenama ispitanika o osjećaju frustracije tijekom rotacije 3D objekta u podrazinama *P_izravna* i *P_neizravna*. Analiza ovih podataka pokazala je kako su ispitanici u obje podrazine generalno izvještavali o niskim razinama frustracije. U *P_izravna*, gdje je zadatak uključivao kombinaciju dohvatanja i rotiranja 3D objekta, većina ispitanika (33) dala je ocjenu koja ukazuje na nizak stupanj frustracije. S obzirom na ove rezultate, može se pretpostaviti kako su ispitanici zadatke uspješno izvršavali bez većih poteškoća. Sličan trend zabilježen je i u *P_neizravna*, gdje je 88,68% ili 47 ispitanika dalo ocjene koje odražavaju nisku razinu frustracije prilikom korištenja klizača za rotiranje kockice. Ove ocjene sugeriraju kako su ispitanici vjerojatno smatrali zadatke izvedivima unutar postavljenih očekivanja i zahtjeva unutar razine *R_ška*.



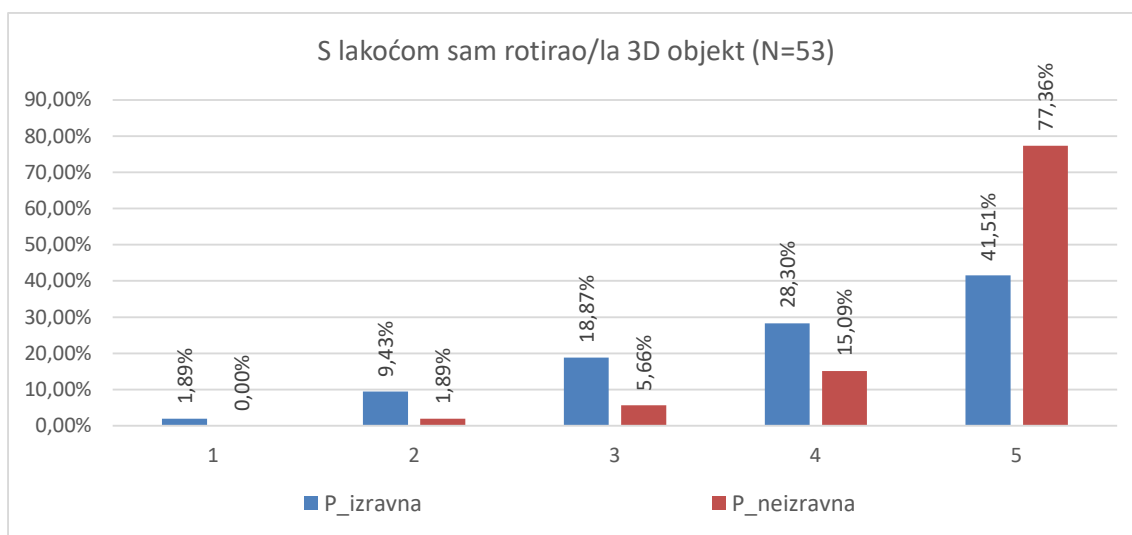
Slika 2.25 Stupčasti dijagram s ocjenama frustracija ispitanika po podrazinama *R_ška*

Sljedeća tvrdnja odnosila se na zadovoljstvo postignutom razinom preciznosti koju su ispitanici ostvarili tijekom rotacije 3D objekta. Graf na slici 2.26 prikazuje kako ispitanici procjenjuju svoje zadovoljstvo preciznošću koje su postigli dok su rotirali 3D objekt u dvije različite podrazine. U *P_izravna*, najviše ispitanika, odnosno 39,62% ili 21 ispitanik dalo je najvišu ocjenu, a slijede ih one s ocjenom 4 (32,07% ili 17 ispitanika), što ukazuje na općenito visoku razinu zadovoljstva s preciznošću koju su mogli postići. U *P_neizravna*, značajno veći broj ispitanika (73,58% ili 39 ispitanika) izrazio je visoku razinu zadovoljstva (ocjena 5), što potvrđuje visoke ocjene ispitanika o intuitivnosti i preciznosti tijekom korištenja klizača za rotaciju 3D objekta.



Slika 2.26 Stupčasti dijagram s ocjenama zadovoljstva ispitanika s postignutom preciznošću po podrazinama *R_ška*

Analiza subjektivnih dojmova ispitanika o lakoći rotiranja 3D objekta prikazana na grafu na Slici 2.27 pokazuje da većina ispitanika smatra kako je implementirana interakcija bili intuitivni i jednostavni za izvršavanje. U *P_izravna*, najveći broj ispitanika (41,51%, tj. 22 ispitanika od njih 53) dao je najvišu ocjenu 5, što implicira na to kako su zadaci s kombinacijom interakcija dohvata i rotacije bili lako izvedivi. U *P_neizravna*, gdje je korišten klizač za rotaciju 3D objekta, 77,36% ili 41 ispitanik dao je ocjenu 5, što pokazuje kako je korištenje klizača kao grafičkog elementa sučelja bilo još intuitivnije, omogućujući ispitanicima jednostavniju interakciju s 3D objektom.



Slika 2.27 Stupčasti dijagram s ocjenama ispitanika s ocjena za lakoću rotiranja 3D objekta po podrazinama *R_ška*

Na temelju analiziranih podataka (objektivnih mjerenja i subjektivnih ocjena ispitanika), kreirana je Tablica 2.14.

Tablica 2.14 Zastupljenost pojedinih metrika istraživačkog instrumenta po podrazinama *R_ška*

Metrika	<i>P_izravna</i>	<i>P_neizravna</i>
Najkraće prosječno vrijeme izvršavanja zadatka	×	✓
Nije preskočena razina	×	✓
Jednostavnost rotiranja 3D objekta	×	✓
Važnost preciznosti prilikom rotacije 3D objekta	✓	×
Zadovoljstvo preciznosti prilikom rotacije 3D objekta	×	✓

Frustriranost ispitanika prilikom rotacije 3D objekta	✓	✗
---	---	---

Uzimajući u obzir objektivne i subjektivne metrike, može se zaključiti kako $P_{neizravna}$ pruža bolje iskustvo ispitanika u odnosu na $P_{izravna}$. Najkraće prosječno vrijeme izvršavanja zadatka i manji broj ispitanika koji su preskakali razinu sugerira kako je interakcija implementirana u $P_{neizravna}$ bila intuitivnija i pristupačnija. Ocjene ispitanika u vezi s jednostavnošću rotiranja 3D objekta i zadovoljstvom preciznošću koje su postigli su visoke u obje podrazine, ali su ipak nešto više u $P_{neizravna}$. To implicira da je interakcija s klizačem ispitanicima omogućila precizniju i efikasniju manipulaciju 3D objektom. Iako su ispitanici smatrali da je preciznost važna u obavljanju zadataka, visoke ocjene zadovoljstva preciznošću i niske ocjene frustracije pokazuju da su zadaci bili dobro usklađeni s njihovim sposobnostima. $P_{neizravna}$, odnosno podrazina s klizačem se istaknula kao posebno efikasna, s minimalnom razinom frustracije kod ispitanika. Ovo upućuje na to kako bi uključivanje jasnih i intuitivnih elemenata korisničkog sučelja moglo biti važno za 3D interakcije, posebno kada se uči novi set vještina ili se susreće s novom vrstom zadatka.

Preporuka je da se korisnicima **omogući korištenje elemenata korisničkog sučelja** prema njihovim preferencijama, tj. da imaju mogućnost dodavanja ili uklanjanja tih elemenata putem opcija pristupačnosti. Daljnja analiza podataka prikupljenih iz razine $R_{virtualni_prst}$ će omogućiti identificiranje optimalne udaljenosti i veličine korisničkog sučelja (UI) u kontekstu specifičnih interakcija koje se koriste u aplikaciji.

2.3.5. Analiza interakcije pritiska gumba pomoću *virtualnog prsta*

Četvrta razina igre, $R_{virtualni_prst}$, koja se sastoji od tri podrazine $P_{horizontalno}$, $P_{vertikalno}$ i $P_{ometajuća_pozadina}$. Razina je koncipirana tako da testira interakciju ispitanika s virtualnim 3D sučeljem u različitim kontekstima. Svaka podrazina zadržava osnovni koncept *trivia* kviza, no varira u dimenzijama i razmještanju interaktivnih grafičkih elemenata, odnosno gumbova. Analiza podataka u $R_{virtualni_prst}$, poput prethodnih, započinje s *vremenom* koje je ispitaniku potrebno za završavanje zadatka, uzimajući u obzir varijacije u veličini gumba i njihovoj udaljenosti, kao i prisutnost ometajućih elemenata.

Tablica 2.15 prikazuje statističku analizu vremena potrebnog za izvršavanje zadataka četiri podrazine koja obuhvaća srednju vrijednost (m), medijan (md), standardnu devijaciju (σ),

minimalnu (min) i maksimalnu (max) vrijednost, raspon (R), donji (Q1) i gornji (Q3) kvartil te interkvartilni raspon (IQR), indeks simetričnosti (S) i indeks spljoštenosti distribucije (K).

Tablica 2.15 Statistička analiza za vrijeme potrebno za izvršavanje zadataka unutar *R_virtualni_prst*

	<i>P_horizontalno</i>	<i>P_vertikalno</i>	<i>P_ometajuća_pozadina</i>
m [s]	7,06	16,81	7,24
md [s]	5,98	12,31	6,55
σ [s]	2,99	13,09	3,39
Min [s]	1,86	1,93	1,01
Max [s]	15,20	61,77	20,38
R [s]	13,34	59,84	19,37
Q1 [s]	4,79	8,01	4,90
Q3 [s]	8,92	21,89	8,58
IQR [s]	4,13	13,88	3,67
S [s]	0,84	1,65	1,48
K [s]	0,11	2,60	3,56

U *P_horizontalno* gumbi su bili veličine 0,24×0,17 postavljene na prostornu udaljenost -10. Rezultati pokazuju srednje vrijeme izvršavanja zadatka od 7,06 s, sa standardnom devijacijom od 2,99 s. Ovo pokazuje kako su se ispitanici relativno brzo prilagodili na zadatak. Medijan od 5,98 s i relativno mali IQR od 4,13 s pokazuju konzistentnost u performansama izvođenja zadataka ispitanika. *P_vertikalno* smanjuje veličinu gumba (0,14×0,13) i povećava prostornu udaljenost (-15) gumba i virtualne ruke, što rezultira značajno većim srednjim vremenom izvršavanja od 16,81 s. Velika standardna devijacija od 13,09 s i veći IQR od 13,88 s pokazuje varijabilnost u performansama ispitanika što sugerira teškoće s rješavanjem zadatka. Ovo je posljedica povećane složenosti zadatka uzrokovane manjim gumbima i većom prostornom udaljenošću, što zahtjeva veću preciznost od ispitanika. *P_ometajuća_pozadina*, iako koristi najmanje gumbe (0,12×0,17), postavlja ih bliže ispitanicima (-5), čime se potencijalno olakšava interakcija. Srednje vrijeme izvršavanja zadatka je slično prvoj podrazini i iznosi 7,24 s, uz standardnu devijaciju od 3,39 s. Manji IQR koji iznosi 3,67 s ukazuje na konzistentne performanse izvođenja zadataka kod ispitanika, unatoč izazovu koji predstavljaju manji gumbi. Ovo implicira kako manja udaljenost može kompenzirati manju veličinu gumba, omogućujući uspješniju interakciju ispitanika s gumbima. Indeksi

simetričnosti (S) i spljoštenosti (K) za sve podrazine ukazuju na distribuciju vremena izvršavanja. U *P_vertikalno*, veće vrijednosti indeksa spljoštenosti upućuju na prisutnost nekoliko ekstremnih vrijednosti, odražavajući izazove s kojima su se ispitanici suočavali.

Analizom broja točnih i netočnih riješenih zadataka po podrazinama, prikazana je **preciznost** ispitanika tijekom izvršavanja zadataka unutar razine *R_virtualni_prst*. Zadaci su bili jednostavni i nisu zahtijevali prethodno znanje ispitanika. Podrazine s točno riješenim zadacima i postotkom točnosti prikazane su u Tablici 2.16.

Tablica 2.16 Broj točnih odgovora po podrazinama *R_virtualni_prst*

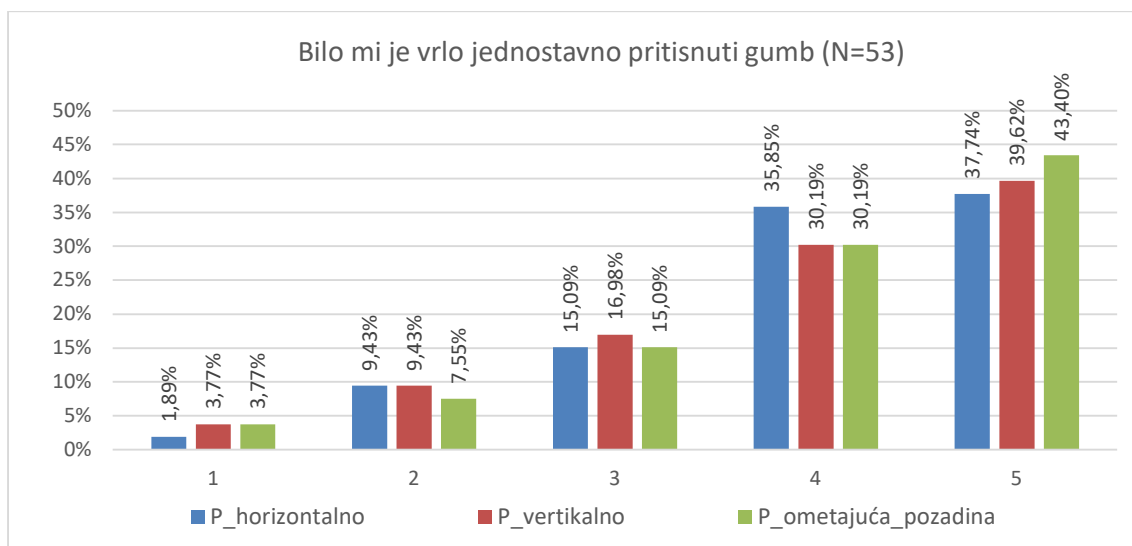
Podrazina	Točno riješeni zadaci (N=53)	Postotak točnosti
<i>P_horizontalno</i>	52	98%
<i>P_vertikalno</i>	49	92%
<i>P_ometajuća_pozadina</i>	33	62%

U *P_horizontalno*, većina ispitanika, točnije 98,11% ili 52 ispitanika, ostvarila je visok postotak točnosti od 98%, što znači da je ovu podrazinu bilo relativno lako riješiti. Visoki postotak uspješnosti sugerira kako su veličina objekata i udaljenost bili optimalno prilagođeni sposobnostima većine ispitanika, omogućujući im preciznu interakciju. *P_vertikalno* pokazuje neznatno smanjenje uspješnosti s 92,45% ili 49 točno riješenih zadataka i postotkom točnosti od 92%. Iako je ova razina još uvijek visoko uspješna, manji pad u postotku točnosti ukazuje na nešto veću težinu zadatka u usporedbi s prvim zbog malih promjena u veličini objekata i udaljenosti. *P_ometajuća_pozadina* pokazuje znatan pad u uspješnosti s 33 točno riješena zadatka i postotkom točnosti od samo 62%. Ovaj značajan pad sugerira da su uvjeti zadatka u ovoj podrazini bili znatno teži za ispitanike, što je rezultiralo izazovnijom interakcijom zbog manje veličine objekata, veće udaljenosti i uvođenja distraktora koji su utjecali na ispitanikovu sposobnost koncentracije i preciznosti. Analizirajući sve tri podrazine, jasno je kako varijacije u dizajnu zadataka, poput promjena u veličini i udaljenosti objekata, imaju izravan utjecaj na ispitanikovu uspješnost i zadovoljstvo.

Sljedeća opcija koja se nudila ispitanicima je bila **moгуćnost preskakanja razine**. Ovu opciju nije iskoristio niti jedna ispitanik.

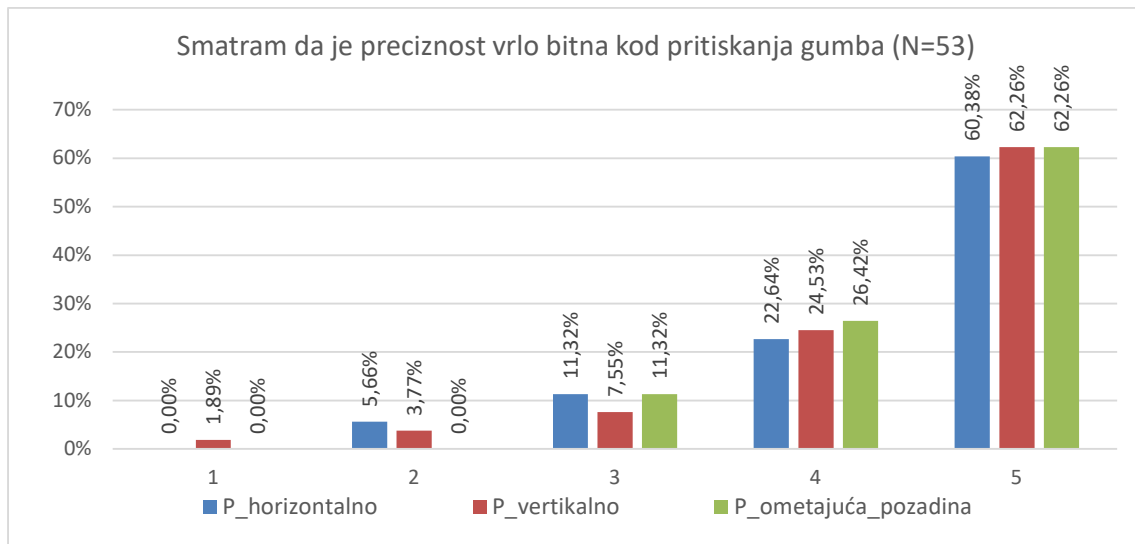
Na temelju subjektivne analize ankete provedene preko Google Forms platforme, istražena su mišljenja ispitanika o postignutoj preciznosti i jednostavnosti implementirane interakcije *pritiska gumba pomoću virtualnog prsta*. Rezultati prve tvrdnje, "Bilo mi je vrlo jednostavno

pritisnuti gumb" (Slika 2.28), pokazuje tendenciju porasta pozitivnih ocjena s napredovanjem kroz podrazine. Ovaj trend sugerira postupno poboljšanje doživljaja jednostavnosti interakcije među ispitanicima tijekom njihova napredovanja kroz podrazine igre. Ovakav rezultat naglašava važnost procesa učenja i prilagodbe ispitanika na interakciju unutar virtualnog prostora, što je sukladno s prethodnim zapažanjima o drugim vrstama interakcija obuhvaćenim ovim istraživanjem.



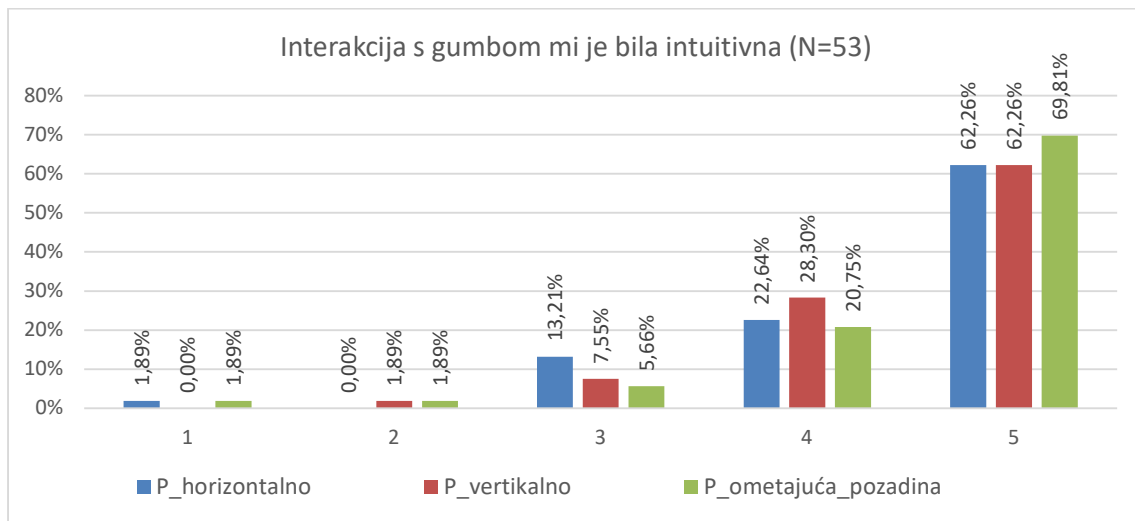
Slika 2.28 Stupčasti dijagram s ocjenama jednostavnosti *pritisaka gumba s virtualnim prstom* u razini *R_virtualni_prst*

Pitanje o važnosti preciznosti kod pritiskanja gumba ukazuje na visoku svijest ispitanika o značaju precizne interakcije u virtualnom okruženju. Analiza podataka iz grafa sa Slike 2.29 pokazuje kako je većina ispitanika u sve tri podrazine, 60,37% ili 32 ispitanika i 62,26% ili 53 ispitanika potvrdila važnost preciznosti u interakciji s gumbima, dajući joj najvišu ocjenu.



Slika 2.29 Stupčasti dijagram s ocjenama preciznosti *pritiska gumba s virtualnim prstom* u razini *R_virtualni_prst*

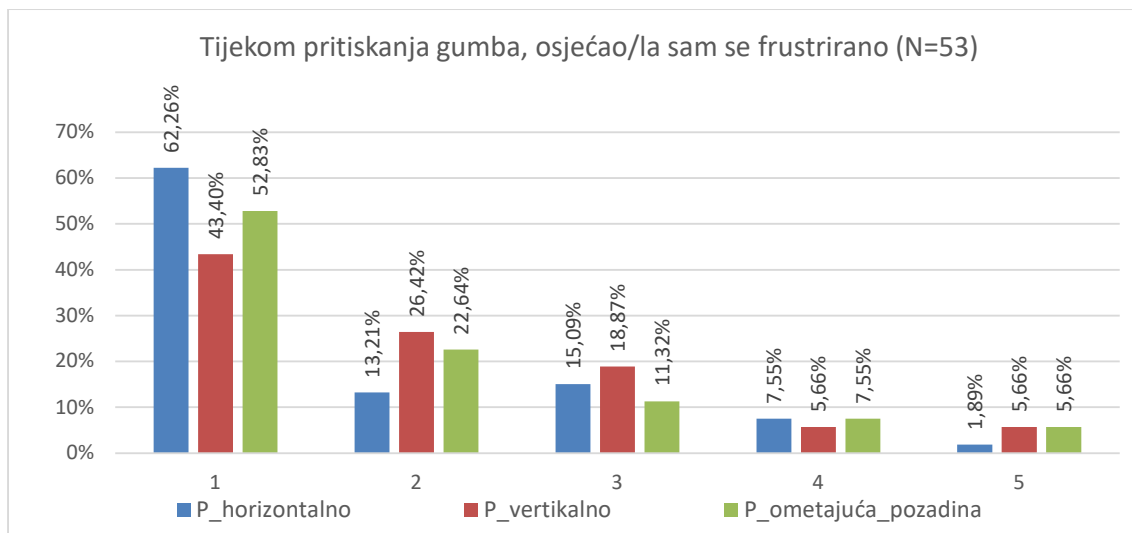
Analizirajući subjektivne dojmove ispitanika o intuitivnosti interakcije s 3D gumbom, podaci iz grafa na Slici 2.30 pokazuju da je najveći broj ispitanika u *P_ometajuća_pozadina*, 69,81% ili 37 ispitanika je ocijenilo interakciju kao vrlo intuitivnu, dajući ocjenu 5. *P_horizontalno* i *P_vertikalno* također su ocijenjene kao intuitivne, s 62,26% ili 33 ispitanika koji su dali ocjenu 5, što ukazuje na to da je interakcija s 3D gumbom generalno dobro prihvaćena među ispitanicima u sve tri podrazine.



Slika 2.30 Stupčasti dijagram s ocjenama intuitivnosti interakcije *pritiska gumba s virtualnim prstom*

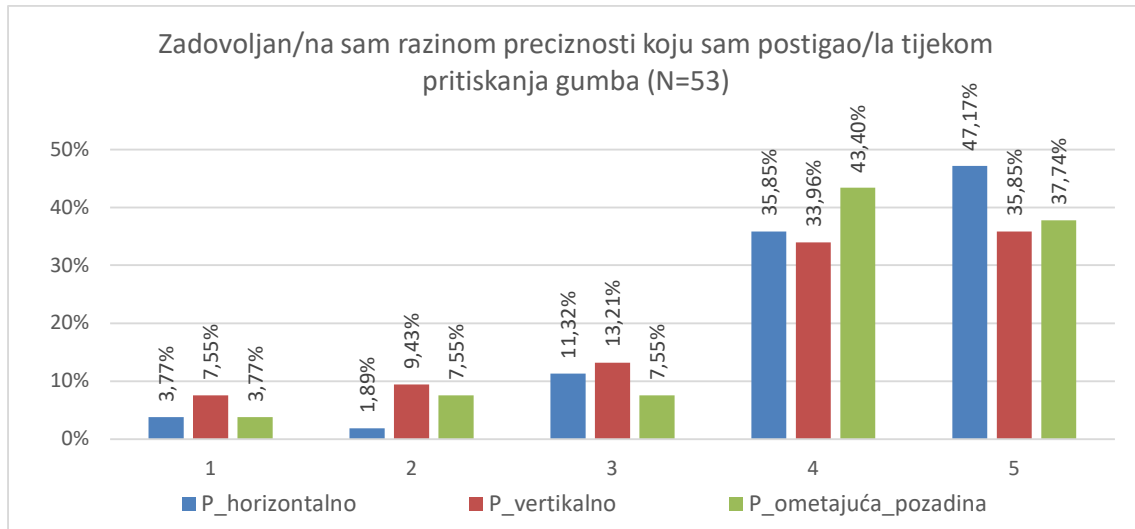
Slika 2.31 prikazuje stupčasti graf koji prikazuje ocjene frustracije ispitanika tijekom interakcije s gumbima u razini *R_virtualni_prst*. Iz podataka je vidljivo kako su ispitanici

osjećali najmanju frustraciju prilikom pritiskanja gumba u *P_horizontalno*, što sugerira kako je kombinacija veće veličine gumba i manje udaljenosti od virtualne šake bila najprihvatljivija. *P_ometajuća_pozadina* pokazuje sličan broj ispitanika koji doživljavaju frustraciju kao i u *P_horizontalno*, unatoč manjoj veličini gumba. To implicira kako je manja udaljenost gumba kompenzirala manju veličinu, olakšavajući interakciju. S druge strane, povećana frustracija u *P_vertikalno* može biti posljedica manjih gumba i veće udaljenosti virtualne šake.



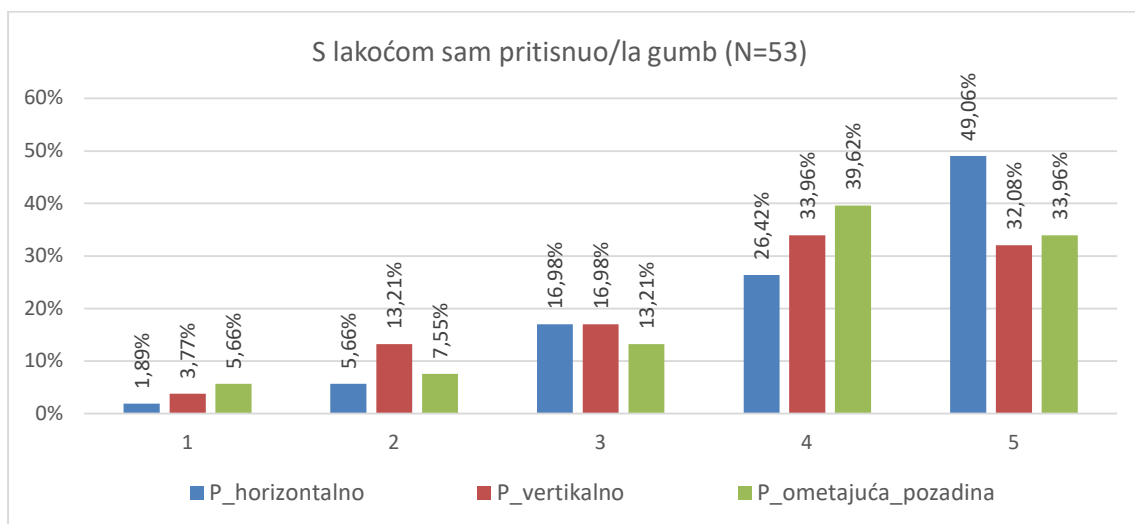
Slika 2.31 Stupčasti dijagram s ocjenama frustracija ispitanika u razini *R_virtualni_prst*

Sljedeća tvrdnja odnosila se na zadovoljstvo postignutom razinom preciznosti koju su ispitanici ostvarili tijekom interakcije *pritiskanja gumba pomoću virtualnog prsta*. Iz grafa na Slici 2.32 vidljivo kako je većina ispitanika davala visoke ocjene kroz sve podrazine. To ukazuje na efikasnost interakcije s gumbima i sposobnost ispitanika u postizanja preciznosti unatoč promjenama u dizajnu sučelja.



Slika 2.32 Stupčasti dijagram s ocjenama zadovoljstva ispitanika s postignutom preciznošću u razini *R_virtualni_prst*

Posljednja tvrdnja *S lakoćom sam pritisnuo/la gumb* se odnosila subjektivni osjećaj ispitanika o lakoći korištenja interakcije *pritiska gumba s virtualnim prstom*. Analizirajući percepciju ispitanika u pritiskanja gumba u tri različite podrazine, primjećuje se pad zadovoljstva sa smanjenjem veličine gumba. Dok *P_horizontalno* s najvećim gumbima bilježi najveći broj najpozitivnijih ocjena, slijedi umjereni pad u *P_vertikalno*. *P_ometajuća_pozadina*, unatoč najmanjim gumbima, pokazuje sličan broj visokih ocjena kao *P_vertikalno*, zbog toga što je gumb dosta bliži virtualnoj šaki. Ipak, jasno je kako veličina gumba igra ulogu u intuitivnosti i efikasnosti interakcije, s obzirom na vidljivu razliku u broju visokih ocjena između *P_horizontalno* i ostalih podrazina.



Slika 2.33 Stupčasti dijagram s ocjenama ispitanika o lakoći *pritiska gumba s virtualnim prstom*

Na temelju analiziranih podataka (objektivnih mjerenja i subjektivnih ocjena ispitanika), kreirana je Tablica 2.17.

Tablica 2.17 Zastupljenost pojedinih metrika istraživačkog instrumenta istraživanja po podrazinama četvrte razine

Metrika	<i>P_horizontalno</i>	<i>P_vertikalno</i>	<i>P_ometajuća_pozadina</i>
Najkraće prosječno vrijeme izvršavanja zadatka	✓	✗	✗
Najveća ostvarena preciznost prilikom pritiskanja gumba	✓	✗	✗
Nije preskočena razina	✓	✓	✓
Jednostavnost pritiskanja gumba	✓	✗	✗
Važnost preciznosti prilikom pritiskanja gumba	✓	✓	✗
Zadovoljstvo preciznosti ispitanika prilikom pritiskanja gumba	✓	✗	✗
Frustriranost ispitanika prilikom pritiskanja gumba	✗	✓	✓

Analiza podataka pokazuje kako *P_horizontalno*, s najvećim gumbima i prostornom udaljenošću od -10 od virtualne šake, omogućava ispitanicima najefikasnije izvršavanje zadatka s najvišom ostvarenom preciznošću. Ovo ukazuje na to da veće dimenzije gumba i optimalna udaljenost pružaju ravnotežu između lakoće pritiskanja i preciznosti, smanjujući frustraciju ispitanika. U *P_vertikalno* smanjenje veličine gumba i povećanje udaljenosti izazvalo je povećanje frustracije među ispitanicima, što sugerira kako manji gumbi na većoj udaljenosti predstavljaju veći izazov za ispitanike. *P_ometajuća_pozadina*, unatoč najmanjim gumbima, pokazuje poboljšanje u percepciji lakoće pritiskanja, što može biti rezultat manje udaljenosti gumba od virtualne šake. Ovaj podatak sugerira kako blizina gumba može kompenzirati njihovu manju veličinu, omogućavajući ispitanicima lakšu interakciju.

Zaključno, za zadatke koji zahtijevaju brzinu i efikasnost, preporučuje se korištenje većih gumba s optimalnom udaljenošću. Za zadatke usmjerene na preciznost, važno je naći balans između veličine gumba i njihove udaljenosti od virtualne šake, pri čemu manja udaljenost može ublažiti izazove manjih gumba.

2.4. Diskusija ostvarenih rezultata istraživanja

Kako bi se na temelju trodimenzijskih korisničkih interakcija odredili parametri pristupačnosti, napravljeno je istraživanje koje se sastojalo od dvije faze - prva faza koja je uključivala testiranje istraživačkog instrumenta nazvanog GeometryGame tijekom kojeg se prikupljala objektivna metrika te druge faze koja je uključivala prikupljanje subjektivnih metrika, odnosno stavova ispitanika o pojedinim aspektima pristupačnosti i interakcija koji su implementirani u korišteni istraživački instrument GeometryGame.

GeometryGame predstavlja prototip programskog rješenja za edukaciju korisnika o geometrijskim tijelima, s implementiranim sljedećim 3D interakcijama:

1. Interakcija *dohvati i pusti*,
2. Interakcija *primicanja prstiju obje šake*,
3. Interakcija *prijelaz šake u jednu stranu*,
4. Interakcija *pritiska 3D gumba pomoću virtualnog prsta*.

Definicija parametara pristupačnosti zasnovana na vrednovanju 3D korisničkih interakcija usmjerena je na detaljnu analizu elemenata poput veličine objekta, njegove udaljenosti od korisnika te intuitivnosti korištenja grafičkih sučelja. Ovim pristupom težilo se osigurati učinkovitu i intuitivnu manipulaciju objektima u virtualnom okruženju, pri čemu su interakcije dizajnirane tako da budu pristupačne i jednostavne za sve korisnike, promovirajući tako univerzalnost i inkluzivnost. Prilagođene smjernice pristupačnosti posebno su oblikovane za potrebe 3D interakcija, stvarajući sučelja koja ne samo da ispunjavaju osnovne zahtjeve pristupačnosti, već i značajno poboljšavaju korisničko iskustvo. Implementacija grafičkih elemenata, poput klizača za kontrolu rotacije, omogućuje preciznu manipulaciju objektima uz minimalan napor i frustraciju korisnika. Ovaj pristup ne samo da se pridržava postojećih standarda pristupačnosti, već ih i proširuje uvođenjem novih parametara specifičnih za 3D interakcije.

Preporuka implementacija opcija pristupačnosti u slična programska rješenja je taj da se prvo razmotri cilj i namjena programskog rješenja.

Prvi parametar pristupačnosti je *veličina objekta* s kojim je korisnik u izravnoj 3D interakciji. Za programska rješenja koji ciljaju na poboljšanje preciznosti ispitanika, manji 3D objekti s omjerom 1:0,5 naspram virtualne ruke korisnika su temeljem provedenog istraživanja pokazali najbolji rezultat. Za programska rješenja gdje je bitna brzina izvođenja određenih

interakcija, preporučuje se korištenje omjera objekta i virtualne ruke za interakciju korisnika s objektom u omjeru 1:1, čime se osigurava ravnoteža između složenosti zadatka i mogućnosti ispitanika u uspješnom izvršavanju zadane aktivnosti.

Drugi parametar pristupačnosti su *distraktori* prilikom interakcije u obliku ostalih 3D objekata. Preporuka je temeljem rezultata istraživanja da dizajn 3D sučelja bude bez potencijalnih distraktora kod programskih rješenja osjetljivih na vrijeme (npr. kviz), dok ometajući elementi mogu biti korisni za povećanje angažmana korisnika u interakciji s objektima. Podrazine bez distraktora, odnosno *P_bez_distraktora*, pokazale su kraće vrijeme izvršavanja zadatka u usporedbi s podrazinama s distraktorima. Međutim, u *P_distraktori* nijedan ispitanik nije preskočio razinu, što sugerira kako distraktori, odnosno ometajući 3D elementi, iako izazovni, nisu prevelika prepreka te potiču veću usredotočenost i uključenost u zadatak. *P_distraktori* se također istaknula većim zadovoljstvom ispitanika u pogledu jednostavnosti izvođenja zadatka i važnosti preciznosti. Ovakav pristup može pomoći u zadržavanju pažnje ispitanika i poboljšanju njihovih vještina.

Treći parametar pristupačnosti odnosio se na intuitivnost korištenja elemenata korisničkog sučelja, odnosno analiza *izravne i neizravne interakcije s 3D objektima*. Rezultati provedenog istraživanja upućuju kako je neizravna interakcija, poput one s klizačem, intuitivnija i pristupačnija, omogućujući precizniju i efikasniju manipulaciju 3D objektima. Podrazina s neizravnom interakcijom *P_neizravno* putem klizača ima kraće vrijeme izvršavanja zadatka u usporedbi s podrazinom s izravnom interakcijom s 3D objektom. Iako se očekuje kako bi izravne interakcije bile učinkovitije i „prirodnije“ ispitanicima, rezultati sugeriraju suprotno. Ispitanici su ocijenili jednostavnost rotiranja 3D objekta i zadovoljstvo postignutom preciznošću nešto višim u podrazini s neizravnom interakcijom putem klizača. Ovaj rezultat može se objasniti činjenicom da većina ispitanika nema iskustva s 3D interakcijama te trenutna tehnologija prepoznavanja pokreta koja je korištena nije dovoljno sofisticirana za osiguranje prirodne i intuitivne izravne interakcije. Ovo upućuje na važnost jasnih i intuitivnih elemenata korisničkog sučelja za 3D interakcije, posebno pri učenju novih vještina ili zadataka, te sugerira kako bi unapređenje tehnologije prepoznavanja pokreta moglo poboljšati učinkovitost izravnih interakcija u budućnosti. Preporučuje se omogućavanje korisnicima da prema svojim preferencijama koriste elemente korisničkog sučelja, s opcijom dodavanja ili uklanjanja tih elemenata putem postavki pristupačnosti.

Četvrti analizirani parametar odnosio se na *veličinu i udaljenost elemenata za interakciju na korisničkom sučelju*, poput gumba. Analiza podataka u provedenom istraživanju pokazala je da veće dimenzije gumba i odgovarajuća udaljenost omogućuju postizanje ravnoteže između lakoće pritiskanja i preciznosti, smanjujući frustraciju korisnika. Ovo je u skladu s Fittsovim zakonom [83], koji predviđa da vrijeme potrebno za ciljanu akciju ovisi o udaljenosti do cilja i veličini cilja. Dimenzije gumba (0.24 x 0.1676) i udaljenost od -10 prostornih jedinica omogućile su korisnicima jednostavnije i preciznije interakcije, što je rezultiralo manjom frustracijom i većim zadovoljstvom korisnika. Dimenzije gumba i udaljenost gumba od virtualne ruke izražene u relativnim jedinicama unutar virtualnog prostora programskog rješenja detaljnije opisanog u potpoglavlju 2.2.

Vrijeme izvršavanja zadataka u sve četiri razine pokazuje sličan trend - vrijeme izvršavanja zadatka je dulje prilikom prvog korištenja nove interakcije. Ovaj rezultat naglašava važnost osiguravanja konzistentnosti u implementaciji mehanizama interakcije kroz različite razine i zadatke, čime se korisnicima olakšava prilagodba i povećava učinkovitost prilikom izvršavanja zadataka.

3. Prilagodba prikaza trodimenzijskog objekta i trodimenzijskih interakcija s ciljem povećanja pristupačnosti

U ovom poglavlju fokus je na prilagodbi prikaza 3D objekata i 3D interakcija u programskim rješenjima s ciljem optimizacije pristupačnosti. Istraživanje vezano uz određivanje parametara pristupačnosti opisano u prethodnom poglavlju potvrdilo je važnost konzistentnosti implementacije mehanizama interakcija kroz različite razine i zadatke, što implicira kako je za daljnje istraživanje važno ograničavanje interakcija na jednu ili dvije po zadatku. Promjenjive postavke prikaza u svakoj razini ili zadatku, kao što su veličina objekta, brzina rotacije i boja pozadine, omogućavaju ispitanicima modifikaciju prikazanog objekata i interakcije prema svojim potrebama. Praćenjem tih prilagodbi unutar aplikacije, moguće je dobiti uvid u načine koje ispitanici koriste kako bi uspješno savladali zadane izazove.

Za istraživanje prilagodbe trodimenzijskog objekta i trodimenzijskih interakcija s ciljem povećavanja pristupačnosti, razvijen je programski sustav zasnovan na piramidalnom hologramu u kojem ispitanici mogu samostalno prilagođavati parametre 3D objekta i interakcija kako bi se olakšalo rješavanje zadataka. Implementirane prilagodbe obuhvaćaju promjenu veličine objekta, boje pozadine te uključivanje ili isključivanje animacija u 3D prikazu. Nadalje, unutar opcija prilagodbe 3D prikaza, uključen je i 2D prikaz objekta na pokretnom uređaju, posebno prilagođen ispitanicima za koje 3D prikaz nije bio dovoljno jasan ili vidljiv. Kada je riječ o prilagodbi 3D interakcija, istražena je mogućnost prilagođavanja brzine rotacije objekta pomoću uređaja Leap Motion. Za ispitanike koji su imali poteškoća s 3D interakcijama, implementirane su 2D interakcije putem klizača na

pokretnom uređaju. Ove interakcije odnose se na 2D prikaz na mobilnom uređaju, a automatski se prenose na 3D prikaz objekta. Također, razvijena je opcija pretvaranja klizača u gumbe kako bi se olakšala upotreba ovih interakcija.

Sve promjene i preferencije kontinuirano pohranjuju unutar programskog sustava. Takav pristup ne samo da poboljšava funkcionalnost i pristupačnost za krajnje korisnike, već i omogućava empirijsko prikupljanje podataka za daljnje unaprjeđenje programskog sustava. Zaključno, ovo poglavlje definira granice parametara predloženih opcija pristupačnosti opisanih u potpoglavlju 3.2.2. Temeljem ovog istraživanja i parametara pristupačnosti, u sljedećem poglavlju (4.5.) definirat će se smjernice za razvoj pristupačnih programskih sustava zasnovanih na trodimenzijskim korisničkim interakcijama i potpomognutom prikazu trodimenzijskog objekta.

3.1. Opis istraživanja

Tijekom svibnja 2024. godine provedeno je istraživanje u Dubrovniku i Zagrebu. Skupina ispitanika sudjelovala je u evaluaciji aplikacije na Sveučilištu u Dubrovniku, dok se preostali dio istraživanja odvijao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, kao i u prostorijama relevantnih udruga i institucija posjećenih u svrhu testiranja ispitanika s različitim vrstama invaliditeta. Posjećene su udruge CeDePe⁹, gdje se istraživanje odvijalo u prostorijama udruge, i Arka Korablja¹⁰, gdje se istraživanje odvijalo u kući u kojoj borave korisnici udruge. U istraživanju je sudjelovala i udruga Up2Date¹¹, kroz raspravu o modalitetima koji bi mogli biti alternativne opcije za slijepe korisnike. Taj dio istraživanja opisan je u poglavlju 3.3.4.

Istraživanje je provedeno na laptopu Acer, model Nitro AN515-46, procesora AMD Ryzen 7 6800H 3.20 GHz, grafička kartica NVIDIA GeForce RTX 3050, 16GB radne memorije te uređaj Leap Motion 2 generacije. Korišteni tablet uređaj je Galaxy Tab A8, procesora ARM Cortex-A55 s 3GB radne memorije.

S obzirom na to da je istraživački instrument programski sustav HoloZoo, isti podrazumijeva korištenje tablet uređaja i laptopa određenih specifikacija te uređaja Leap Motion. Istraživanje je provedeno na način da ga je istraživač proveo individualno sa svakim ispitanikom.

⁹ Društvo osoba s cerebralnom i dječjom paralizom Zagreb (CeDePe), <https://cedepe.hr> [Pristup: 12. svibnja 2024.]

¹⁰ Arka Korablja – L'Arche Zagreb, <https://korablja-arka.hr> [Pristup: 12. svibnja 2024.]

¹¹ Up2Date, <https://up2date.hr/home/> [Pristup: 12. svibnja 2024.]

Razvijeni istraživački instrument koji je ugrađen u postojeću aplikaciju HoloZoo, uz opis implementiranih opcija pristupačnosti te popis pitanja za ispitanike, bit će detaljnije opisan u potpoglavlju 3.2.1. Istraživački instrument razvijen je u obliku interaktivne digitalne ozbiljne igre koja se sastoji od dvije razine, nazvane *Demo* i *Kviz*. Igra je dizajnirana tako da korisnik rotira modele životinja, pri čemu može koristiti dvodimenzijske interakcije na tabletu ili trodimenzijske interakcije putem uređaja Leap Motion. Dvodimenzijske interakcije na tabletu omogućuju ispitanik interakciju putem klasičnog dvodimenzijskog sučelja, dok trodimenzijske interakcije preko Leap Motion uređaja omogućuju interakciju s hologramom. Interakcije se međusobno preslikavaju, odnosno svaka rotacija životinje na tabletu preslikava se na njen holografski prikaz i obrnuto. Ispitanik odabire hoće li određenu životinju gledati na hologramu dobivenom trodimenzijskom projekcijom na računalo ili kao dvodimenzijski prikaz na tabletu, a kasnije kroz korisničku anketu daje povratnu informaciju što mu je bilo atraktivnije, intuitivnije i jednostavnije.

Istraživanje je podijeljeno u tri aktivnosti koje su opisane aktivnostima ispitanika i aktivnostima unutar istraživačkog instrumenta.

U prvoj aktivnosti istraživanja, svaki ispitanik prethodno je potpisao obrazac za informirani pristanak prije nego što je pristupio korisničkom testiranju. U obrascu su detaljno opisani kontekst istraživanja, vrsta podataka koji se prikupljaju, postupak testiranja i način osiguranja privatnosti ispitanika. Važne informacije su istaknute u obrascu, a istraživač je odgovorio na eventualna dodatna pitanja ispitanika. U situacijama gdje ispitanici s invaliditetom nisu mogli samostalno potpisati obrazac, roditelji ili skrbnici su to potpisali umjesto njih.

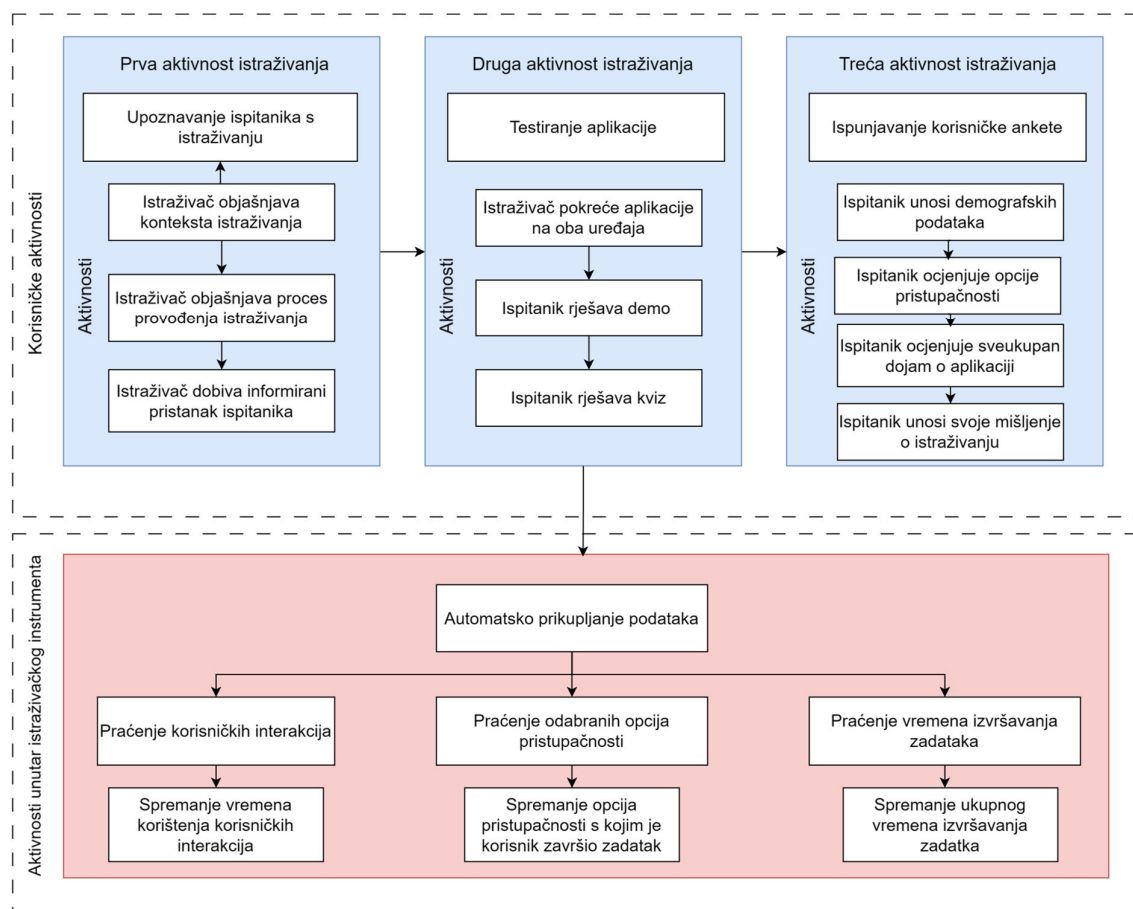
Tijekom druge aktivnosti istraživanja, istraživač pokreće programski sustav, u daljnjem tekstu je nazvano aplikacija HoloZoo, na tabletu i laptopu te daje ispitaniku informacije o istraživanju i kratku uputu o tome kako koristiti aplikaciju i integrirani istraživački instrument u obliku igre. U ovoj fazi od ispitanika se očekuje aktivno sudjelovanje u rješavanju postavljenih zadataka kroz dvije osnovne razine igre sadržane u aplikaciji HoloZoo: *Demo* i *Kviz*. *Demo* razina igre je dizajnirana kako bi ispitanik stekao početno znanje i ovladao osnovnom vještinom za korištenje funkcionalnosti, odnosno od njega zahtijevanih interakcija s objektima implementiranim u igri. Ispitanik rješava pet zadataka koji zahtijevaju primjenu specifičnih interakcija, poput povećanja trodimenzijskog objekta (model životinje), promjene boja pozadine i sl. uz rotacije objekta duž x i y osi. Za rotiranje modela životinje korisnik može koristiti klizače ili gumbe na tabletu ili rotiranje može izvesti pokretima šake koristeći uređaj Leap Motion koji je spojen na računalo. Interakcije koje se izvode na tabletu

reflektiraju se u stvarnom vremenu na hologram i obrnuto. Osim interakcija, preslikavaju se i implementirane opcije pristupačnosti, npr. promjena veličine životinje na tabletu utječe na veličinu prikazane životinje na hologramu. Nakon *Demo* razine igre, koja je osmišljena za upoznavanje ispitanika s opcijama pristupačnosti i mogućim dvodimenzijskim i trodimenzijskim interakcijama unutar aplikacije, ispitanik prelazi na razinu *Kviz* koja se sastoji od pet zadataka. Za razliku od razine *Demo*, koja ispitanicima daje upute i prijedloge za rješavanje zadataka, razina *Kviz* zahtijeva od ispitanika da samostalno primijene naučene funkcionalnosti bez dodatnih uputa. Složenost zadataka u kvizu proizlazi iz promjena parametara objekta koje su programski implementirane u samu razinu igre — specifično, veličinu modela životinje i brzinu njezine rotacije, koje su unaprijed određene po svakom zadatku. U ovoj fazi istraživanja, od ispitanika se ne zahtijeva strogo pridržavanje prethodno naučenih funkcionalnosti aplikacije. Umjesto toga, od ispitanika se očekuje samostalna primjena dostupnih opcija pristupačnosti kako bi prilagodili prikaz i interakcije koje koriste te time uspješno riješili svaki zadatak. Ako ispitanik tijekom razine *Kviz* ne modificira programski zadane parametre pristupačnosti, to može sugerirati da su mu početne postavke bile prikladne i da su odgovarale njegovim potrebama za uspješno rješavanje zadatak s obzirom na to da je upoznat da postoje i da se poticao da ih koristi u razini *Demo*. Ovaj koji se temelji na samostalnoj primjeni dostupnih opcija pristupačnosti, daje uvid u potrebne prilagodbe trodimenzijskih objekata i interakcija koje programski sustav mora podržati kako bi bila učinkovitija i pristupačnija.

U trećoj aktivnosti istraživanja, ispitanik ispunjava anketu na platformi Google Forms. Korisnička anketa uključuje ocjenjivanje pojedinih interakcija te potpomognutih interakcija pomoću Likertove skale, s ocjenama koje variraju od 1 do 5. Korisnička anketa i njeni elementi detaljnije su opisani u potpoglavlju 3.1.1.

Proces istraživanja prilagodbe trodimenzijskog prikaza i trodimenzijskih interakcija s ciljem povećavanja pristupačnosti s aktivnostima prikazan je na slici 3.1. Predviđeno trajanje testiranja po ispitaniku iznosilo je oko 10 minuta, s iznimkom situacija u kojima su ispitanici s različitim tipovima invaliditeta zahtijevali dulje vrijeme, od 15 do 20 minuta, ovisno o izazovima koje su imali prilikom interakcije s aplikacijom (detaljnije opisano u poglavlju 3.3.2). S nekim ispitanicima s invaliditetom ili njihovim skrbnicima/pratiteljima nakon ispunjavanja ankete održana je diskusija o prijedlozima rješenja za specifične probleme pristupačnosti, što je rezultiralo produljenjem trajanja testiranja (do 30 minuta).

Istraživački instrument automatski bilježi vrstu interakcije koja je korištena, vrijeme trajanja svake pojedine interakcije (izraženo u sekundama), informacije o opcijama pristupačnosti koje je ispitanik primijenio kroz korisničke aktivnosti tijekom druge faze istraživanja te ukupno vrijeme od trenutka prikazivanja zadatka ispitaniku do njegovog prelaska na sljedeći zadatak. U kontekstu vrsta interakcije, analiziraju se dvodimenzijske, odnosno trodimenzijske interakcije koje ispitanik koristi za interakciju s dvodimenzijskim i/ili trodimenzijskim objektom, uključujući korištenje klizača, gumba ili uređaja Leap Motion. Usporedno s identifikacijom ovih interakcija, mjeri se i pohranjuje trajanje svake pojedinačne interakcije, bilo da se radi o 2D interakcijama putem klizača i gumba ili 3D interakcijama korištenjem Leap Motiona.



Slika 3.1 Aktivnosti procesa provođenja istraživanja prilagodbe prikaza trodimenzijskog objekta i trodimenzijskih interakcija s ciljem povećanja pristupačnosti

Korisnička anketa

Korisnička anketa osmišljena je kako bi se prikupili podaci o iskustvima i percepcijama korisnika nakon rješavanja razine *Kviz* unutar aplikacije HoloZoo. Cilj ankete bio je istražiti koliko su korisnicima bile važne dostupne opcije pristupačnosti u prilagodbi 3D prikaza i interakcija unutar aplikacije s ciljem lakšeg prelaženja razina.

Analiza podataka kao što su dob i spol, vrsta invaliditeta ili privremene teškoće, omogućila je identifikaciju različitih potreba i preferencija korisnika, što izravno utječe na optimizaciju opcija pristupačnosti i funkcionalnosti aplikacije. Segment ankete usmjeren na osobe s invaliditetom ili privremenim teškoćama omogućio je dodatne uvide u potrebe prilagodbe i parametre i smjernice za implementaciju pristupačnosti sličnih programskih rješenja, čime se osigurava da budu inkluzivna i dostupna širokom spektru korisnika. Dio ankete koji ocjenjuje različite modalitete prikaza modela životinja, poput hologrfskog prikaza u odnosu na dvodimenzijski prikaz na prijenosnom uređaju, omogućio je dragocjene informacije o tome kako različiti prikazi utječu na percepciju, interakciju i korisničko iskustvo. Završni dio ankete, fokusiran na sveukupni dojam igre, zanimljivost zadataka i korisnost uputa, omogućuje procjenu praktične primjene aplikacije HoloZoo i njezina edukacijskog potencijala. Povratne informacije korisnika omogućuju bolje razumijevanje kako ovakvi programski sustavi s implementiranim hologrfskim prikazom te njegovim potpomognutim prikazom na pokretnom uređaju može poboljšati angažman i učenje. Potpomognuti prikaz 3D objekta definiran je u potpoglavlju 1.3. Pitanja iz ankete prikazana su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Pitanja iz korisničke ankete

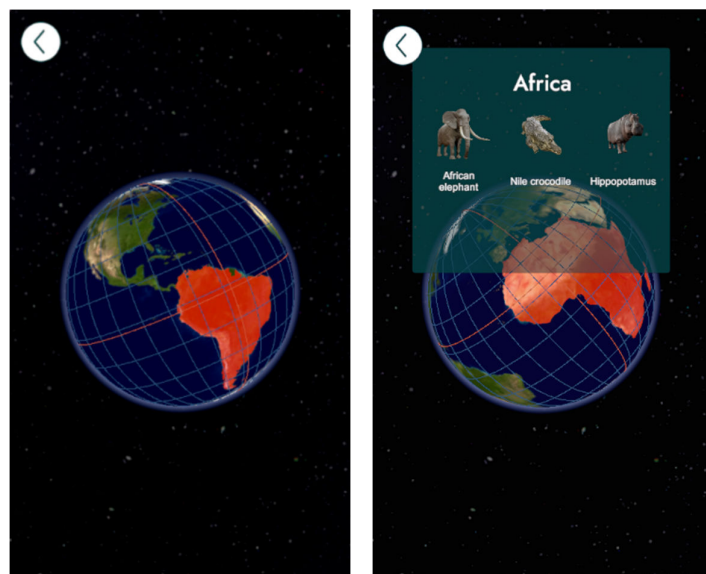
Pitanje	Mogući odgovori
Upitnik o ispitanicima	
Vaša dob	18-25 25-35 35-45 45-55 55>
Spol	Muško Žensko Ostalo Ne želim se izjasniti
Koliko često igrate igre na pokretnom uređaju, računalu, igraćoj konzoli i sl?	Svaki dan Nekoliko puta tjedno Nekoliko puta mjesečno Nekoliko puta godišnje

	Ne igram igre
Imate li iskustva s korištenjem sljedećih tehnologija: holografska tehnologija, Leap Motion	Da Ne
Imate li neku vrstu invaliditeta ili privremene teškoće?	Da (Potvrdni odgovor vodi na novi odjeljak pitanja) Ne
Upitnik o vrsti invaliditeta ili privremene teškoće	
Koju vrstu teškoće imate?	Oštećenje vida Oštećenje sluha Motoričke teškoće Kognitivni i neurološki poremećaji i/ili specifične teškoće u učenju
Usporedba holografskog prikaza i prikaza na pokretnom uređaju	
Za prikaz životinje koristio sam:	Holografski prikaz Prikaz na pokretnom uređaju Koristio/la sam oboje
Usporedba holografskog prikaza i prikaza na pokretnom uređaju	
Atraktivniji mi je bio prikaz životinje na:	Hologramu Pokretnom uređaju
Lakše mi je bilo koristiti prikaz životinje na:	Hologramu Pokretnom uređaju
Intuitivnije mi je bilo koristiti prikaz životinje na:	Hologramu Pokretnom uređaju
Pitanja o pristupačnosti	
Mogao/la sam prepoznati prikazanu životinju.	1 – 5
Promjena boje pozadine mi je pomogla za rješavanje zadataka.	1 – 5
Promjena brzine rotacije mi pomogla za rješavanje zadataka.	1 – 5
Promjena klizača u gumb mi je pomogla za rješavanje zadataka.	1 – 5
Promjena veličine životinje mi je pomogla za rješavanje zadataka.	1 – 5
Mogućnost isključivanja animacija mi je pomogla za rješavanje zadataka.	1 – 5
Pitanja o sveukupnom dojmu igre	
Zadaci su mi bili zanimljivi	1 – 5
Uspješno sam rješavao/la zadatke.	1 – 5
Teško sam razumio/la zadatke.	1 – 5
Osjećao/la sam dosadu tijekom rješavanja zadataka.	1 – 5

Osjećao/la sam se frustrirano dok sam rješavao/la zadatke.	1 – 5
Demo zadaci su mi bili korisni.	1 – 5
Koristile su mi upute istraživača kod rješavanja zadatka.	1 – 5
Dodatna pitanja – neobavezna	
Opišete svoje opće dojmove o iskustvu s ovom igrom. Što vam se posebno svidjelo, a što mislite da bi se moglo poboljšati?	
Smatrate li da bi ovakav tip igre, odnosno aplikacije mogla doprinijeti procesu učenja? Podijelite svoje mišljenje i eventualne primjere kako biste je koristili u edukacijske svrhe.	
Po vašem mišljenju, kakav će utjecaj imati potpomognuti prikaz i holografška tehnologija na edukaciju?	
Ako imate kakav prijedlog ili komentar, slobodno da napišite ovdje.	

3.2. Opis ideje i prve verzije programskog rješenja za 3D interakcije i 3D prikaz HoloZoo

Ozbiljna igra HoloZoo usmjerena je na školski uzrast s ciljem edukacije učenika putem 3D interakcija, holograma i pokretnog uređaja poput tableta. Igra nastoji podići svijest o važnosti zaštite okoliša fokusirajući se na ugrožene životinjske vrste. Programski sustav HoloZoo je razvijen u suradnji sa studentima [85], [86], [87] u sklopu diplomskog projekta i zadatka na diplomskom studiju Primijenjenog/poslovnog računarstva na Odjelu za elektrotehniku i računarstvo Sveučilišta u Dubrovniku. Razvijena je s ciljem omogućavanja mogućnost jednake uporabe programskog rješenja svim korisnicima, neovisno o njihovim mogućnostima, potičući pritom interes za jednostavan i pristupačan sadržaj djeci ciljane dobi. Dizajn aplikacije počiva na načelima univerzalnog dizajna kako bi omogućio najširu moguću upotrebu bez potrebe za dodatnim prilagodbama. Struktura igre temelji se na tipu *trivia*, sastavljenoj od dvije osnovne razine: kviza i učenja. Korisnici započinju igru stvaranjem ili prijavom na svoj korisnički račun, a prilikom prve registracije dobivaju kratke upute za izradu svoje hologramske piramide. Razina učenja nudi dva načina pristupa informacijama - putem popisa dostupnih životinja ili trodimenzijskog globusa. Globus, prilagođen holografskom prikazu, omogućuje korisnicima da dodiruju ekran pokretnog uređaja i manipuliraju njime kako bi istraživali kontinente, kao što je prikazao na Slici 3.2.

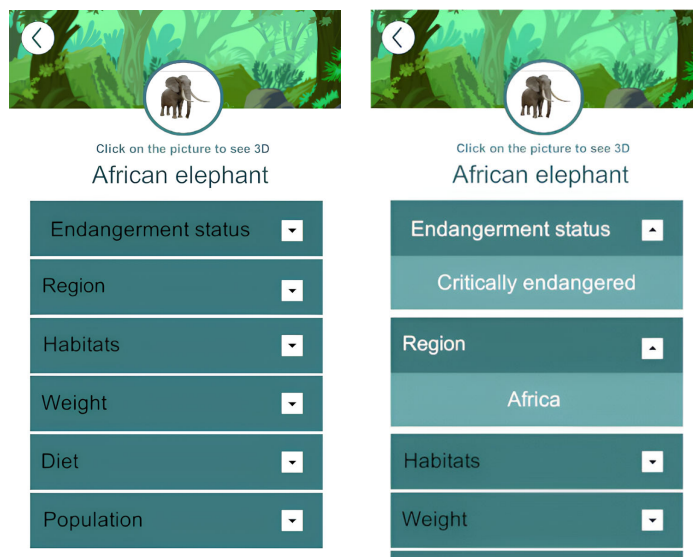


(a)

(b)

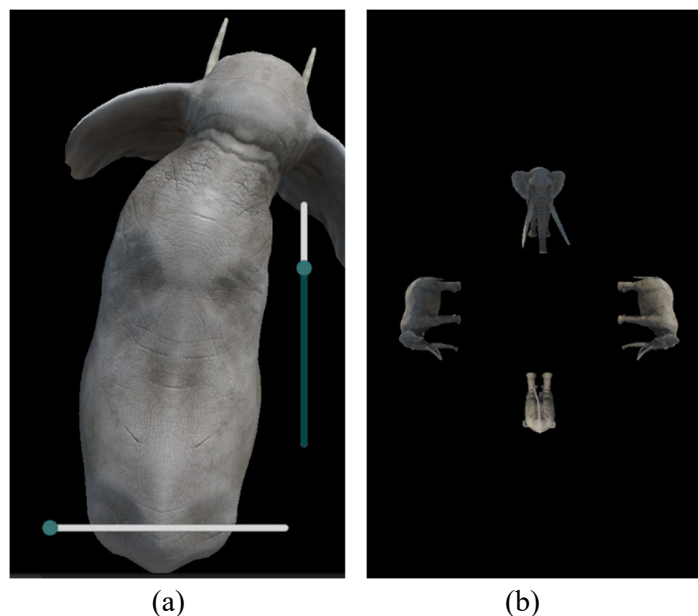
Slika 3.2 (a) Model globusa na pokretnom uređaju, (b) prozor za pregled životinja u odabranom području
(Izvor: snimka zaslona)

Klikom na određeni kontinent, prikazuje se popis životinja koje nastanjuju to područje. Po odabiru životinje, otvara se ekran s prikazom slike životinje i osnovnim informacijama o njoj, uključujući stanište, prehrambene navike, stupanj ugroženosti i važnost za očuvanje (Slika 3.3).



Slika 3.3 Profil životinje i interakcija s kućicama s informacijama
(Izvor: snimka zaslona)

Igra se odvija putem dva uređaja, pri čemu jedan služi kao pokretni uređaj s interaktivnim sučeljem, dok drugi, bilo pokretni uređaj, tablet ili računalo, koristi se isključivo za projekciju holograma (Slika 3.4).



Slika 3.4 (a) Prikaz modela životinje na pokretnom uređaju, (b) prikaz na hologramu
(Izvor: snimka zaslona)

U skladu s načelima univerzalnog dizajna, programski sustav je pažljivo oblikovan kako bi pružio optimalno korisničko iskustvo za različite korisnike. Aspekti poput kontrasta pažljivo su prilagođeni unutar programskog sustava kako bi se osigurala jasnoća i vidljivost prikazanih 2D i 3D objekata. Interaktivni gumbi unutar aplikacije imaju font veličine 24px. Veličina fonta postavljena je na 16px, a odabrani su fontovi tipa *sans-serif*, koji se sukladno smjernicama pristupačnosti smatraju čitljivijima na zaslonima uređaja od *serif* fontova.

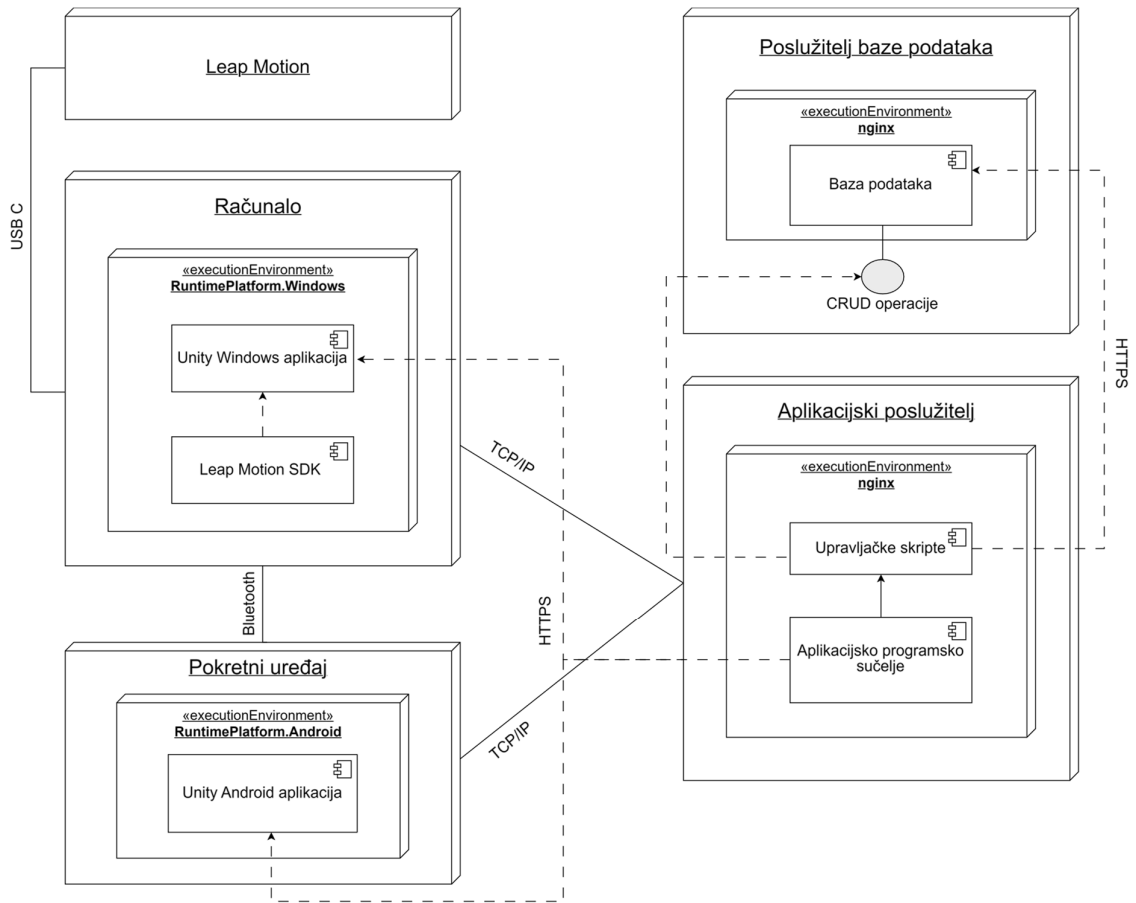
Prateći načelo univerzalnog dizajna koje se odnosi na jednostavnosti korištenja, HoloZoo ima opcije pristupačnosti koje su jasno označene standardnim ikonama. U postavkama pristupačnosti, korisnicima je omogućeno prilagođavanje veličine fonta prema vlastitim preferencijama - mala (16px), srednja (18px) i velika (20px). Također, dostupna je opcija povećanja kontrasta radi lakšeg čitanja. Zadani kontrast je 4,9:1, a može se prilagoditi na omjer 21:1.

Opcije pristupačnosti uključuje opciju fonta za disleksiju, pružajući korisnicima mogućnost promjene fonta u onaj koji im je čitljiviji. Dodatno, implementirana je opcija pretvaranja teksta u govor, omogućujući korisnicima slušanje tekstualnog sadržaja (npr. opis životinje).

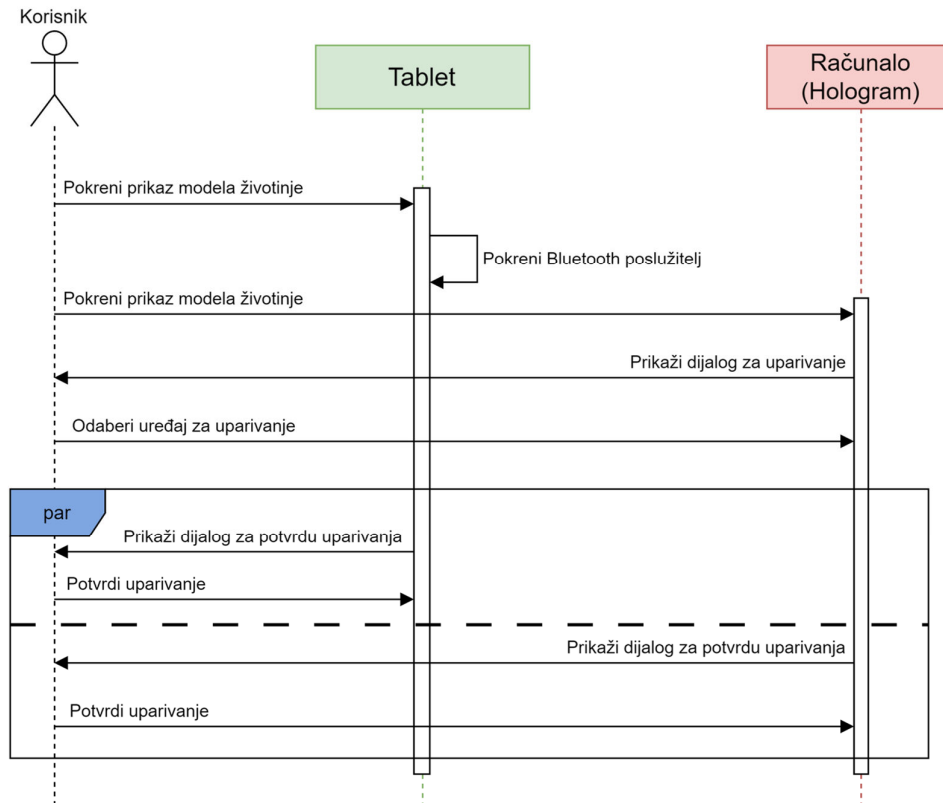
3.2.1. Razvoj istraživačkog instrumenta za analizu prilagodbe trodimenzijskog prikaza i interakcija

Za potrebe istraživanja prilagodbe trodimenzijskog objekta i interakcija razvijen je istraživački instrument u obliku igre implementiran unutar aplikacije HoloZoo. Instrument je razvijen u programskoj tehnologiji Unity 2021.3.34.f1. Budući da je HoloZoo izvorno razvijen za operacijski sustav Android koji ne podržava uređaj Leap Motion, neophodno je bilo razviti novu arhitekturu sustava za omogućavanje trodimenzijskih interakcija koje su ključne za ovo istraživanje. S tim ciljem, razvijene su dvije inačice igre: jedna za operacijski sustav Windows, koja podržava holografski prikaz uz integraciju uređaja Leap Motion te druga za operacijski sustav Android namijenjena pokretanju na tablet uređaju.

U Windows inačicu, koja predstavlja holografski prikaz, integriran je uređaj Leap Motion koji omogućava trodimenzijske interakcije. Kao što je ranije spomenuto, dvodimenzijske i trodimenzijske interakcije se međusobno preslikavaju u stvarnom vremenu, odnosno svaka rotacija modela životinje na tabletu preslikava se na njen holografski prikaz i obrnuto. Kako bi to bilo moguće, implementirana je *Bluetooth* komunikacija između Windows i Android klijenata. S obzirom na složenost sustava, stvoren je i aplikacijski poslužitelj koji služi za komunikaciju i pripremu podataka za pohranjivanje u bazu podataka na web poslužitelju. Model arhitekture istraživačkog instrumenta za analizu prilagodbe trodimenzijskog prikaza i interakcija prikazan je na Slici 3.5.



Slika 3.5 Model arhitekture istraživačkog instrumenta za analizu prilagodbe trodimenzijskog prikaza i interakcija



Slika 3.6 Dijagram slijeda uparivanja tableta i računala

Implementacija komunikacije je uključivala uspostavu različitih tipova poruka kako bi se efikasno upravljalo ograničenjima povezanim s veličinom Bluetooth paketa, koja ne smiju premašiti 1024 bajta. Poruke su napisane u JSON formatu, a veličina JSON poruka dodatno se smanjuju korištenjem biblioteke Newtonsoft JSON [89]. Definirani tipovi poruka su prilagođeni različitim aspektima igre i komunikacije unutar aplikacije, a osmišljene su kako bi se optimizirao prijenos podataka i smanjio potencijal za prekide i zasićenje mreže, osiguravajući tako stabilnost i pouzdanost u stvarnom vremenu.

Definirane su sljedeće poruke u navedenom kontekstu:

1. *StateMsg*: sadrži parametre vezane za opcije pristupačnosti čime se omogućava sinkronizaciju prilagodbi koje korisnik napravi na dvodimenzijском prikazu životinje na tabletu, kao što su promjene veličine objekata ili brzine rotacije, s trodimenzijским holografskim prikazom. Svaka izmjena koju korisnik izvrši automatski se šalje putem *StateMsg* kako bi se osiguralo da se promjene odražavaju na oba prikaza.
2. *RotationMsg*: sadrži koordinate x , y i z , koje određuju položaj objekta u dvodimenzijском, odnosno trodimenzijском prostoru. Kada korisnik rotira modelom

životinje na tabletu ili koristi geste putem Leap Motion uređaja, *RotationMsg* bilježi te akcije i šalje ih, primjerice, s tableta na računalno, ako bi se osiguralo da se svaka promjena u dvodimenzijском prikazu odražava na trodimenzijski holografski prikaz.

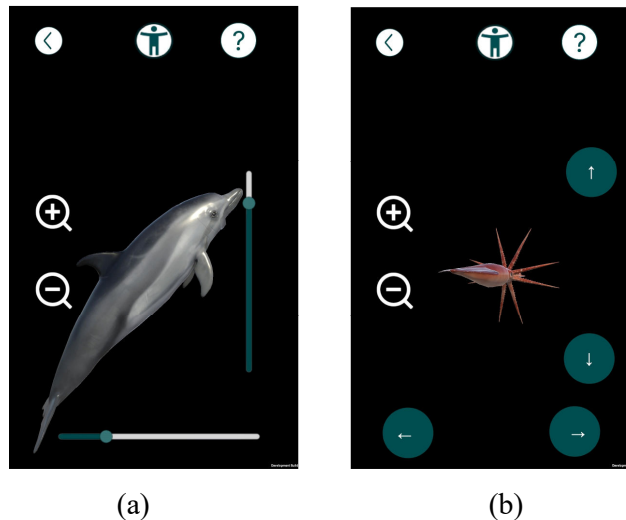
3. *AnimalIdMsg*: sadrži identifikator trenutno aktivnog modela životinje u dvodimenzijском prikazu na tabletu i trodimenzijskom prikazu na hologramu. Kada korisnik uspješno završi zadatak, *AnimalIdMsg* se koristi za slanje novog identifikatora životinje. Ovo osigurava da se promjene koje korisnik izvrši na tabletu u stvarnom vremenu odražavaju na hologramu, ažurirajući prikaz kako bi se novi model životinje prikazao u trodimenzijskom prikazu u stvarnom vremenu.
4. *LeapTimeMsg*: sadrži podatke o tome je li korisnik koristio uređaj Leap Motion i koliko dugo ga je koristio tijekom interakcije s modelom životinje. Ova poruka šalje se s holograma, točnije računala na prijenosni uređaj, u ovom slučaju tablet.

Veličine trodimenzijskih objekata u istraživačkom instrumentu predstavljale su izazov, s obzirom na to da su modeli dolazili u različitim proporcijama. Modeli životinja su definirani preko tri Unity komponente: x, y i z. Veličine modela životinja varirale su u veličini od 4 do 17 jedinica po najvećoj komponenti u Unityu. Ovakva varijacija rezultirala je neadekvatnim prikazom nekih modela, poput modela dupina koji je zbog velike z-komponente prikazan premalen ili modela vrane koji je zbog male x-komponente bio gotovo neprimjetan na ekranu. Kao što je ranije objašnjeno, 1 jedinica u Unityu je relativna jedinica koja ovisi o postavkama projekta. Kako bi se riješio ovaj problem, implementirana je skripta koja automatski prilagođava veličinu prikazanog modela po duljini najveće komponente modela životinje. Nakon skaliranja, životinje su u rasponu veličine između 7 i 13 jedinica, što zauzima između 35% i 55% dijagonale ekrana s omjerom stranica 1:1,66. Ova funkcionalnost osigurava usklađenost prikaza modela životinja u skladu s unaprijed definiranim razmjerima.

3.2.2. Interakcije i scenariji istraživačkog instrumenta

U istraživački instrument su implementirane trodimenzijske interakcije putem uređaja Leap Motion uređaja, odnosno dvodimenzijske interakcije putem klizača i gumba. Leap Motion je povezan s računalom, tj. hologramom, omogućavajući ispitanicima izravno rotiranje 3D prikaz, pri čemu se tijekom interakcije šalje *LeapTimeMsg* poruka na pokretni uređaj kako bi se u stvarnom vremenu rotirao i 2D prikaz. Klizači i gumbi, s druge strane, implementirani su na pokretnom uređaju za izravno rotiranje 2D prikaza, dok se za 3D prikaz na računalu šalju poruke *RotationMsg* koje kontroliraju rotaciju. Implementirana 3D interakcija je bila *prijelaz*

šake u stranu. Sukladno prethodnom istraživanju (potpoglavlje 2.3.4), ova vrsta interakcije percipirana kao jednostavna i intuitivna od strane korisnika. Također, ova interakcija je bila najbolja po rezultatima mjerenja vremena potrebnog za izvršenja zadatka, izdvoje li se interakcije za koje nije bilo potrebno grafičko sučelje (poput interakcije *pritisak gumba pomoću virtualnog prsta*). Za preciznu kontrolu, rotacija po x i y komponenti je odvojena pomoću dva klizača, jedan na X, drugi za Y os (Slika 3.7 (a)). U slučaju korištenja gumba, za X os su implementirana dva gumb te dva gumba za Y os (Slika 3.7 (b)). Svaki ispitanik ima mogućnost izbora interakcije koja mu najviše odgovara i koju smatra najlakšom za korištenje.

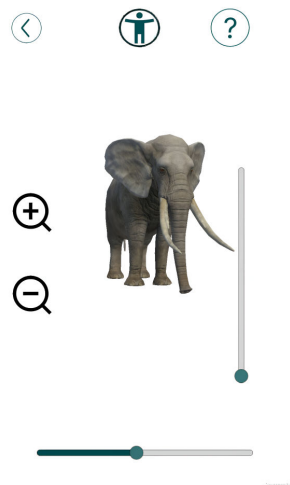


Slika 3.7 (a) 2D interakcija putem klizača, (b) 2D interakcija putem gumbi
(Izvor: snimka zaslona)

Razvijene su specifične prilagodbe koje su usmjerene na poboljšanje korisničkog iskustva i pristupačnosti trodimenzijskog objekta i interakcija. Implementirane prilagodbe su:

1. **Prilagodba brzine rotacije:** ispitanici mogu prilagoditi brzinu rotiranja modela životinje prilikom korištenja uređaja Leap Motion. Dostupne su opcije za sporo, srednje i brzo rotiranje.
2. **Transformacija klizača u gumb:** ova funkcionalnost omogućava ispitanicima da klizače, koji se koriste za rotiranje životinja duž komponenti x i y, pretvore u gumb. Ova opcija može biti korisna za ispitanike koji preferiraju diskretne, stepenaste promjene rotacije umjesto kontinuiranog pomicanja.
3. **Promjena boje pozadine:** ispitanici imaju mogućnost mijenjanja boje pozadine na kojoj se životinja prikazuje. Izbor između crne i bijele pozadine omogućava ispitanicima bolji kontrast ili željeni estetski učinak, što može olakšati percepciju detalja ili jednostavno poboljšati vizualni dojam.

4. **Upravljanje animacijama:** mogućnost uključivanja ili isključivanja animacija životinja za dinamičniji ili statičniji prikaz. Modeli životinje dolaze s različitim animacijama poput trčanja, letenja, plivanja i sl.
5. **Promjena veličine objekta:** ispitanici mogu prilagođavati veličinu modela životinje na tabletu što neizravno utječe na veličinu trodimenzijskog prikaza na hologramu (Slika 3.8).



Slika 3.8 Primjer promjene veličine objekta
(Izvor: snimka zaslona)

Prve dvije stavke vezane su uz prilagodbe interakcija dok su stavke 3, 4 i 5 vezane uz prilagodbu prikaza.

Prilagodba brzine rotacije implementirana je na sljedeći način:

objekt.RotirajOko(točka, os, zadanaBrzina faktor)*

gdje *objekt* predstavlja objekt koji se rotira, *točka* je točka oko koje se vrši rotacija, *os* je os oko koje se objekt rotira. Faktor predstavlja prilagodbu brzine rotacije te se množi sa zadanom brzinom koja iznosi 25. Zadana brzina je relativna jedinica unutar prostora Unity. Parametri prilagodbe brzine su 0,50, 1 i 1,50. Parametri prilagodbe brzine omogućuju kontrolu nad brzinom rotacije na način da:

- 0,50: Smanjuje brzinu rotacije 50%, čime se postiže sporija i preciznija rotacija,
- 1: Održava zadanu brzinu rotacije bez promjene,
- 1,50: Povećava brzinu rotacije za 50%, omogućujući bržu interakciju.

Zadana brzina je dobivena eksperimentiranjem s različitim brzinama, gdje je zaključeno kako je 25 optimalna vrijednost. Pri određivanju brzine uzeta su u obzir ograničenja uređaja Leap Motion, koji ima ograničenja u brzini i preciznosti detekcije pokreta.

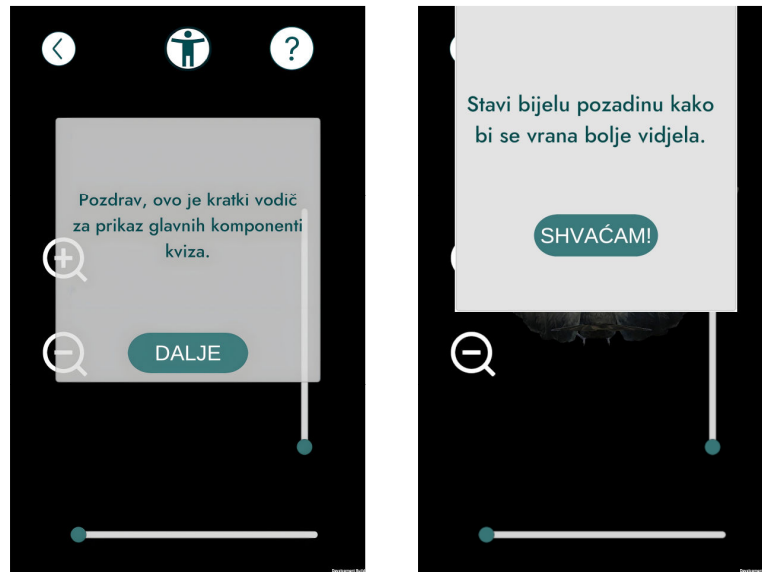
Prilagodba veličine objekta, odnosno modela životinje, implementirana je tako što veličina objekta (životinje) počinje sa skalom 1, što odgovara izvornim dimenzijama modela životinje. Koraci smanjivanja ili povećavanja veličine objekta iznose 0,10. Raspon veličine kreće se od minimalne vrijednosti 0,50 do maksimalne vrijednosti 1,50. Time se omogućava fleksibilna promjena veličine objekta, uz održavanje proporcionalnosti i realističnog prikaza modela životinje.

Animacije, osobito u edukacijskim programskim sustavima, za većinu korisnika mogu biti zanimljive jer vizualni sadržaj može olakšati razumijevanje složeni lekcija [90]. Implementirana prilagodba upravljanja animacijama važna je iz nekoliko razloga:

1. Animacije mogu biti distrakcija za određene korisnike [91]. Isključivanje animacija može pomoći u održavanju fokusa i poboljšanju izvedbe zadataka.
2. Animacije mogu povećati kognitivno opterećenje korisnika [92]. Isključivanje animacija može smanjiti ovo opterećenje.

Istraživački instrument razvijen je u obliku interaktivne igre koja se sastoji od dvije razine, nazvane *Demo* i *Kviz. Demo*, kako i samo ime sugerira, napravljen je kako bi se demonstrirale funkcionalnosti implementiranih opcija pristupačnosti te različitih načina interakcija unutar igre (Slika 3.9 (a)). U igru su implementirane upute formulirane tako da se od korisnika, osim rotiranja modela životinja, traži i primjena određenih opcija pristupačnosti kako bi uspješno prešli na sljedeći zadatak (Slika 3.9 (b)). Modelima životinja je promijenjena veličina te brzina rotacija za rotiranje pomoću Leap Motiona. Upute korisniku iz razine *Demo* su sljedeće:

1. Okreni dupina tako da bude okrenut prema tebi i koristi Leap Motion.
2. Stavi bijelu pozadinu kako bi se vrana bolje vidjela.
3. Promijeni brzinu rotacije tako da se slon okreće brže, povećaj slona te ga okreni naglavačke.
4. Rotiraj s gumbima tako da lignja pliva ulijevo.
5. Povećaj zeca i okreni ga tako da stoji naglavačke.



(a)

(b)

Slika 3.9 (a) Prikaz početka demo razine istraživačkog instrumenta, (b) Izgled upute korisniku u istraživačkom instrumentu
(Izvor: snimka zaslona)

Razina *Kviz* strukturirana je s istim vizualnim i funkcionalnim dizajnom kao i razina *Demo*, osiguravajući dosljednost korisničkog iskustva. Pri prelasku na razinu *Kviz*, ispitanicima se prikazuje skočna poruka s opcijama za započinjanje kviza ili mogućnošću ponavljanja demo faze za dodatnu pripremu. U *Kvizu*, upute korisnicima su usmjerene na zadatke koji zahtijevaju rotaciju prikaza modela životinje, gdje korisnici mogu odlučiti žele li koristiti opcije pristupačnosti ili ne. Upute iz razine *Kviz* su:

1. Okreni orla tako da gleda u lijevu stranu.
2. Okreni morskog psa tako da pliva prema tebi.
3. Okreni lava tako da stoji naglavačke.
4. Okreni vuka tako da gleda u desnu stranu.
5. Okreni jelena prema sebi.

Struktura istraživačkog instrumenta koja obuhvaća razine *Demo* i *Kviz* omogućava ispitanicima samostalno prilagođavanje 3D objekata i interakcija. Znanje i interakcijama i opcijama pristupačnosti koje je stečeno u razini *Demo* osposobljava ispitanika da u razini *Kviz* eksperimentiraju i prilagode sučelje prema svojim preferencijama. Implementacijom mjerenja i metrika u istraživački instrument omogućena je analiza mehanizama interakcija s kojima ispitanici manipuliraju 3D objektima te je rezultatima te analize moguće unaprijediti dizajn i funkcionalnost sličnih korisničkih sučelja novih programskih sustava zasnovanih na 3D

prikazu i interakcijama kako bi se bolje odgovorilo na individualne potrebe korisnika, što dovodi do povećanja učinkovitosti korištenja i pristupačnosti tih rješenja.

3.2.3. Ograničenja istraživanja

Istraživanje ima nekoliko ograničenja. Korištenje specifične sklopovske opreme, uključujući uređaj Leap Motion, laptop Acer Nitro i tablet Galaxy Tab A8, istraživanje je individualno provođeno sa svakim ispitanikom, što je ograničilo vrijeme i broj ispitanika. Specifikacije korištene opreme, posebno zaslona za prikaz holograma, imale su utjecaj na trodimenzijski prikaz, no nisu bile uključene u analizu jer izlaze izvan opsega istraživanja. Istraživanje nije obuhvaćalo ni analizu ambijentalnih parametara, poput osvjetljenja, a oni su značajno utjecali na holografski prikaz, pa je tijekom istraživanja unaprijed osigurano zatamnjenje prostorije kako bi se smanjio ovaj utjecaj. Vezano uz sudionike istraživanja, iako je obuhvaćeno nekoliko udruga koje zastupaju osobe s invaliditetom, vrijedi istaknuti kako istraživanje zbog ograničene raspoloživosti dionika nije u potpunosti obuhvatilo sve vrste teškoća. Istraživački instrument, odnosno HoloZoo aplikacija, zahtijeva internetsku vezu. Tijekom istraživanja, koje je provedeno u različitim prostorima udruga koje su sudjelovale u istraživanju, a koje nisu imale fiksnu mrežu, laptop i tablet su se spajali na mobilni internet istraživača. Ovo se pokazalo otežavajućom okolnošću s obzirom na provođenje istraživanja te se predlaže u sličnim budućim istraživanjima osigurati vlastiti pristup Internetu.

3.3. Rezultati i analiza podataka prikupljenih tijekom istraživanja

U svrhu istraživanja optimalnih prilagodbi za povećanje pristupačnosti trodimenzijskog prikaza i interakcija, prikupljena su kvantitativna i kvalitativna mjerenja. Kvantitativna metrika obuhvaća detaljnu procjenu implementiranih opcija pristupačnosti unutar istraživačkog instrumenta, kako je opisano u prethodnom potpoglavlju 3.2.1. Podaci o prilagodbi 3D prikaza i 3D interakcija koje su ispitanici koristili tijekom korisničkog testiranja su pohranjeni su u bazu podataka u formatu CSV. Ove prilagodbe uključuju promjenu veličine objekta, boje pozadine te uključivanje/isključivanje animacija u 3D prikazu. Nadalje, unutar prilagodbi 3D prikaza, uključen je i 2D prikaz objekta na pokretnom uređaju, posebno prilagođen ispitanicima kojima 3D prikaz nije bio dovoljno jasan ili vidljiv. Kada je riječ o prilagodbi 3D interakcija, istražena je mogućnost prilagođavanja brzine rotacije objekta pomoću uređaja Leap Motion. Za ispitanike koji su imali poteškoća s 3D interakcijama ili im one nisu bile dostupne, implementirane su 2D interakcije putem klizača

na pokretnom uređaju. Ove interakcije odnose se na 2D prikaz na mobilnom uređaju, a automatski se prenose na 3D prikaz objekta. Također, razvijena je opcija pretvaranja klizača u gumbe kako bi se olakšala upotreba ovih interakcija.

Kvalitativna analiza pruža uvid u subjektivni doživljaj ispitanika poput raspodjele korištenja prikaza, procjenu korisnika o korisnosti implementiranih opcija pristupačnosti te opći dojam o istraživačkom instrumentu.

U sljedećim potpoglavljima prikazat će se rezultati analize parametara, uključujući aspekte poput vremena provedenog u izvršavanju zadataka ovisno o vrsti interakcija, korištenja različitih implementiranih opcija pristupačnosti i sl.

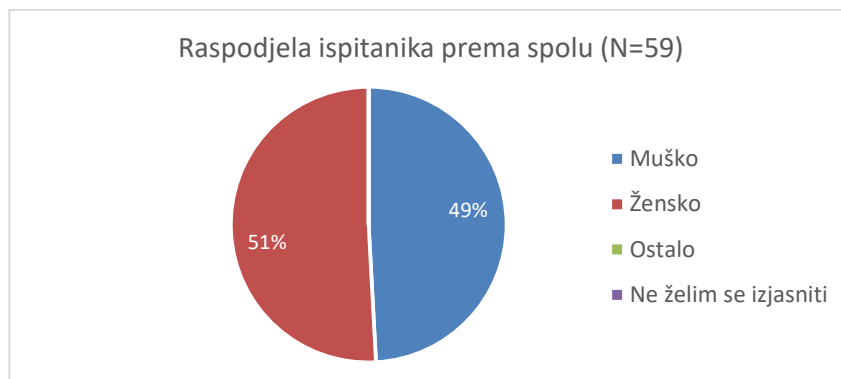
3.3.1. Analiza odgovora ispitanika iz korisničke ankete

Prvo će se analizirati demografske karakteristike ispitanika. Navedeni podaci dobiveni su analizom ankete iz treće aktivnosti korisničkog istraživanja. U korisničkom testiranju sudjelovalo je 65 ispitanika. S obzirom na to da od šestoro ispitanika nisu dobiveni potpuni odgovori, izostavljeni su iz daljnje analize, stoga je završni broj ispitanika kojih je bio analiziran 59 (N=59). Prvo pitanje je istraživalo dobne skupine, pri čemu je 29% ispitanika bilo u dobi od 18 do 25 godina, što čini 17 od ukupno 59 ispitanika. Dobna skupina od 25 do 35 godina zauzima 42% ukupnog broja ispitanika, što je predstavljeno s 25 osoba. Slijedi dobna skupina od 35 do 45 godina s udjelom od 15%, dok su skupine od 45 do 55 godina i stariji od 55 godina zastupljene s jednakih 15%. Grafički prikaz raspodjele ispitanika prema dobnoj skupini prikazan je na Slici 3.10.



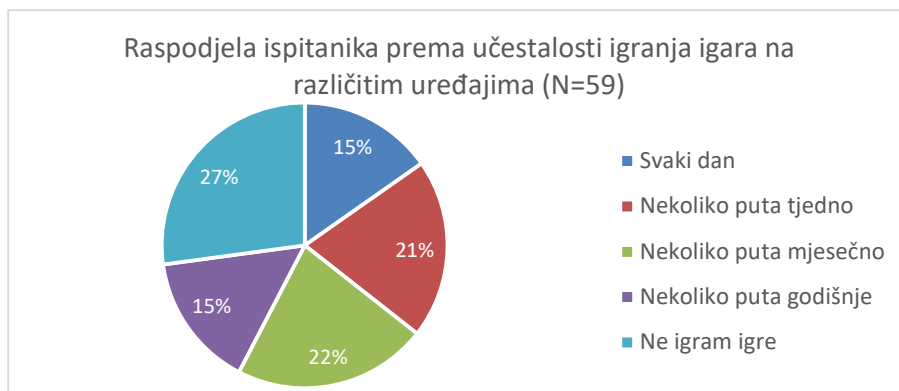
Slika 3.10 Raspodjela ispitanika prema dobnoj skupini

Slika 3.11. prikazuje raspodjelu ispitanika prema spolu. Od 59 ispitanika, njih 30, odnosno 51% identificiralo se kao žensko, dok je 49% navelo da su muškog spola. Ostale mogućnosti, poput 'ostalo' i 'ne želim se izjasniti', nisu odabrane od strane nijednog ispitanika."



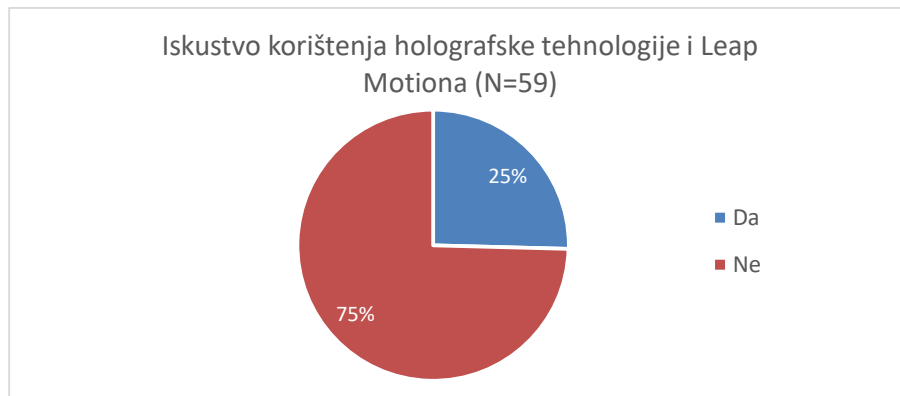
Slika 3.11 Raspodjela ispitanika prema spolu

Slika 3.12 prikazuje učestalost igranja igara na pokretnom uređaju, računalu, igraćoj konzoli ili sl. među ispitanicima. Od ukupno 60 ispitanika, njih 9, odnosno 15%, izjavilo je da igre igra svaki dan. Nekoliko puta tjedno igre igra 12 ispitanika, što čini 20% od ukupnog broja ispitanika. Nekoliko puta mjesečno igre igra 13 ispitanika, odnosno 21,67%. Isti broj ispitanika, njih 9, ili 15%, igre igra nekoliko puta godišnje. Najveći broj ispitanika, njih 16, ili 26,67%, izjavilo je da uopće ne igra igre.



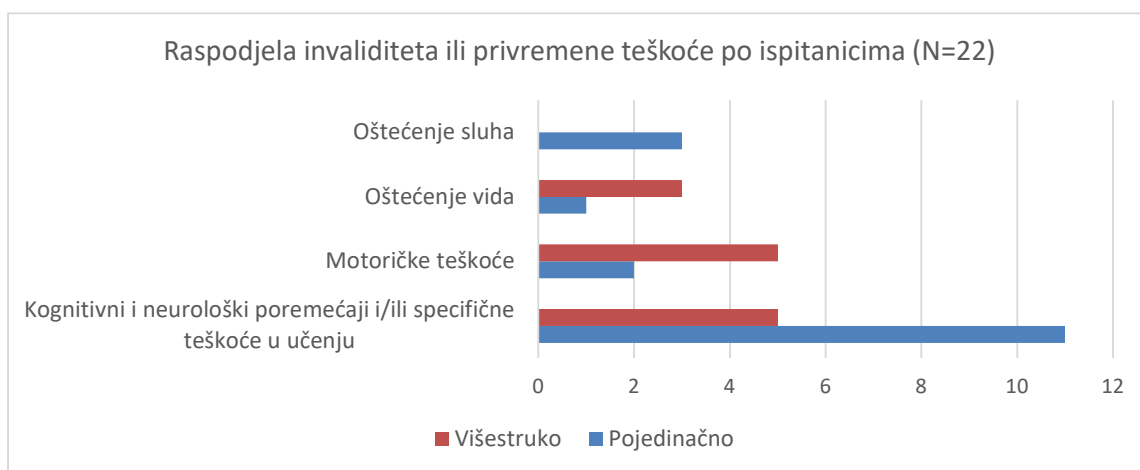
Slika 3.12 Raspodjela ispitanika prema učestalosti igranja igara na igara na pokretnom uređaju, računalu, igraćoj konzoli ili sl.

Slika 3.13 prikazuje iskustvo korištenja holografske tehnologije i Leap Motiona među ispitanicima. Od ukupno 59 ispitanika, njih 15, odnosno 25%, izjavilo je da imaju iskustvo s korištenjem tih tehnologija. Preostalih 44 ispitanika, odnosno 75%, izjavilo je da nemaju takvo iskustvo.



Slika 3.13 Iskustvo korištenja holografske tehnologije i Leap Motiona

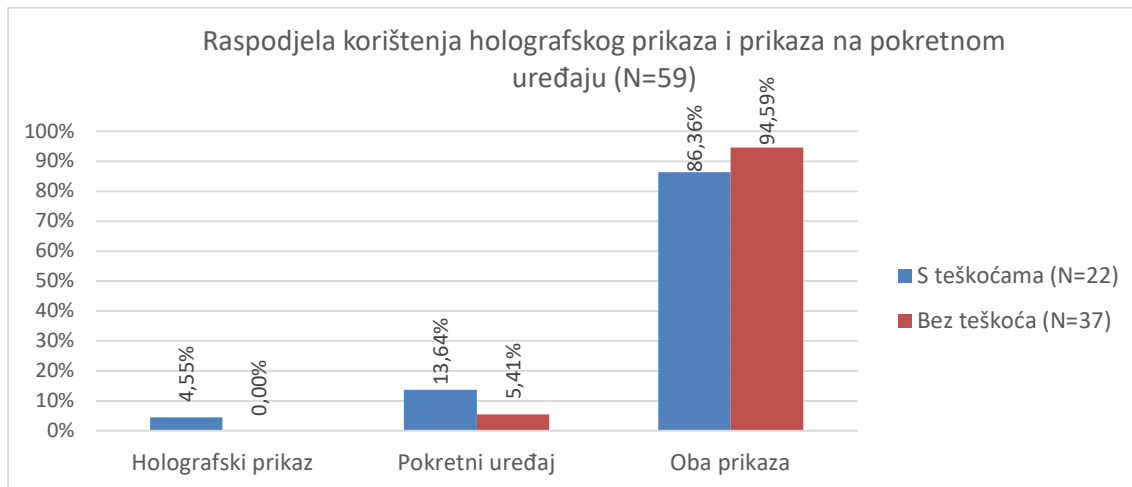
U korisničkom testiranju sudjelovalo je 22 osobe s invaliditetom ili privremenim teškoćama, što čini 37% od ukupnog broja ispitanika (N=22). Sljedeća slika (Slika 3.14) prikazuje raspodjelu pojedinih vrsta teškoća među ispitanicima koji su se u anketi izjasnili da imaju jednu ili više vrsta oštećenja ili teškoća. Najzastupljenija kategorija su ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju. Ukupno 72,72% ispitanika ima ove teškoće, od čega 68,75% ispitanika ima kognitivne teškoće, dok 31,25% ispitanika ima kognitivne teškoće u kombinaciji s drugim vrstama teškoća. Motoričke teškoće su sljedeće po zastupljenosti s 31,81%. Od toga, 28,57% ispitanika imaju motoričke teškoće, dok 71,43% ispitanika ima motoričke teškoće u kombinaciji s drugim teškoćama. Oštećenje vida ima 18,18% ispitanika. Od toga, 25%, odnosno 1 ispitanik ima oštećenje vida, dok 75% ispitanika imaju višestruke teškoće koje uključuju oštećenje vida. Nijedan od tih ispitanika nije potpuno slijep. Oštećenje sluha je zabilježeno kod 13,63% ispitanika.



Slika 3.14 Raspodjela invaliditeta ili privremene teškoće po ispitanicima

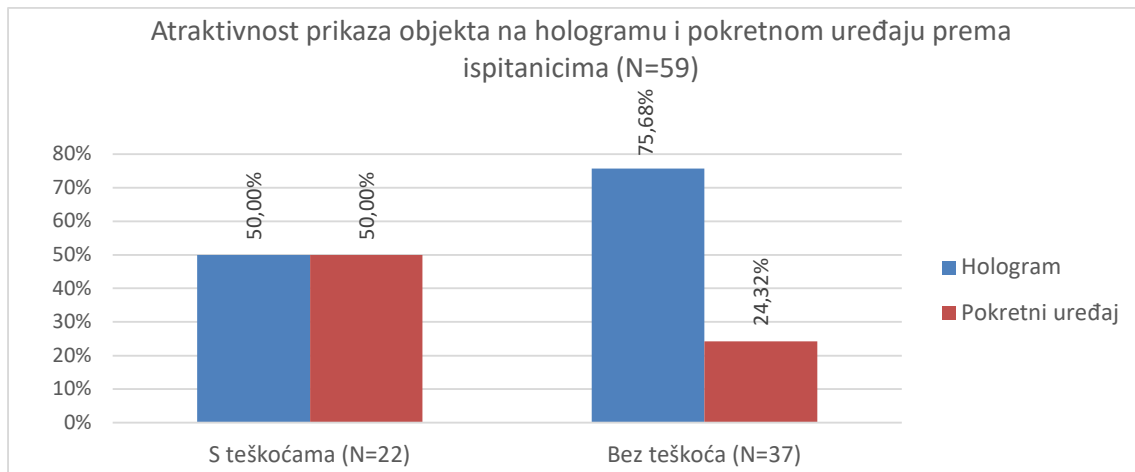
Sljedeća pitanja odnosila su se na korištenje 2D prikaza objekta (prikaz na pokretnom uređaju) ili 3D prikaza objekta (holografski prikaz). Ispitanici su trebali procijeniti koji su prikaz objekta koristili više za rješavanje zadataka, kao i koji im je prikaz bio jednostavniji, lakši i intuitivniji.

Prvo pitanje se odnosilo raspodjelom korištenja prikaza među ispitanicima. Prema rezultatima prikazanim na Slici 3.15, među osobama s invaliditetom ili privremenim teškoćama (N=22), jedan ispitanik (4,55%) koristio je holografski prikaz, troje (13,64%) je koristilo pokretni uređaj, dok je 19 ispitanika (86,36%) koristilo oba prikaza (holografski prikaz i prikaz na pokretnom uređaju). Među ostalim ispitanicima (N=37), nitko nije koristio samo holografski prikaz, dva ispitanika (5,41%) koristila su pokretni uređaj, a 35 ispitanika (94,59%) koristilo je oba prikaza.



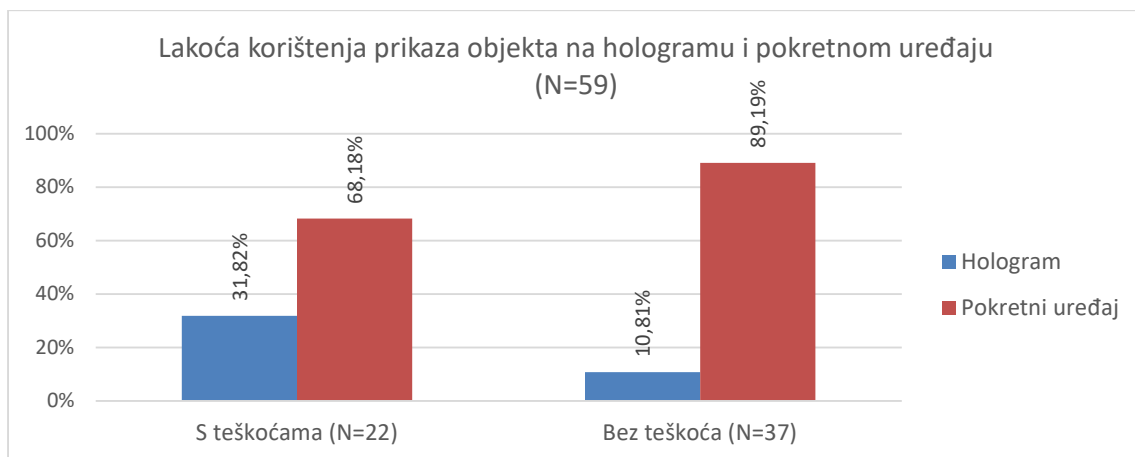
Slika 3.15 Raspodjela korištenja prikaza holografskog prikaza i prikaza na pokretnom uređaju

Sljedeće pitanje odnosilo se na atraktivnost prikaza objekta, što je prikazano na Slici 3.16. Među osobama s invaliditetom ili privremenim teškoćama (N=22), jednak broj ispitanika, njih 11 (50%), smatrao je atraktivnima prikaz objekta i na hologramu i na pokretnom uređaju. Među ostalim ispitanicima (N=37), holografski prikaz objekta smatralo je atraktivnim 75,68% ispitanika, dok je prikaz objekta na pokretnom uređaju smatralo atraktivnim 24,32% ispitanika.



Slika 3.16 Raspodjela atraktivnosti prikaza objekta na hologramu i pokretnom uređaju

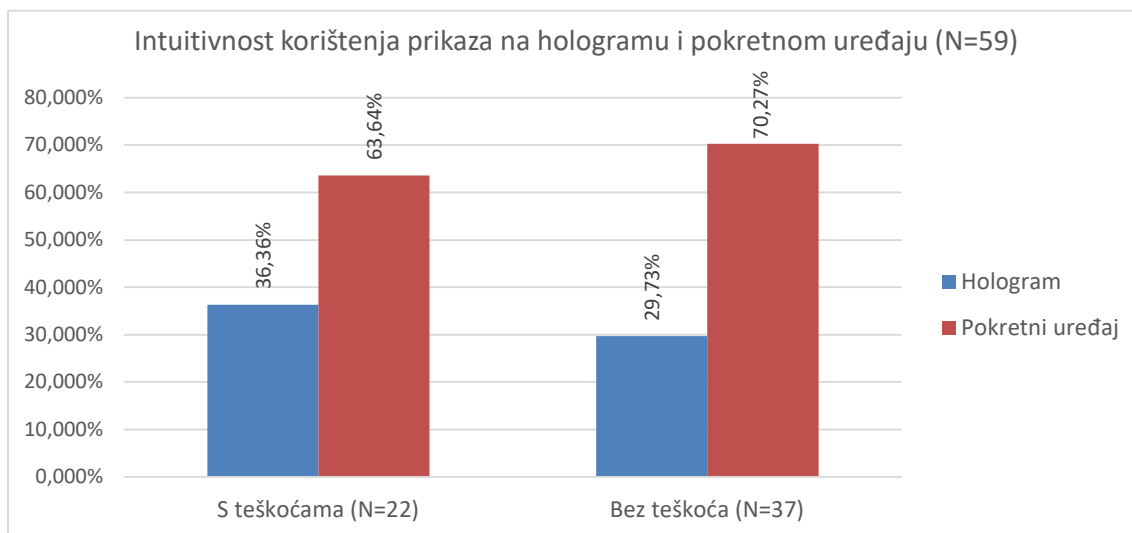
Sljedeće pitanje odnosilo se na to koji im je prikaz bilo lakše koristiti. Rezultati su prikazani na Slici 3.17. Među osobama s invaliditetom ili privremenim teškoćama (N=22), 31,81% ispitanika navelo je da im je lakše koristiti prikaz objekta na hologramu, dok je 68,18% ispitanika izjavilo da im je lakše koristiti prikaz objekta na pokretnom uređaju. Među ostalim ispitanicima (N=37), 10,81% ispitanika navelo je da im je lakše koristiti holografski prikaz objekta, dok je 89,19% ispitanika izjavilo da im je lakše koristiti prikaz na pokretnom uređaju.



Slika 3.17 Raspodjela ispitanika prema lakoći korištenja prikaza na hologramu i pokretnom uređaju

Sljedeće pitanje odnosilo se na intuitivnost prikaza objekta na hologramu i pokretnom uređaju, što je prikazano na Slici 3.18. Među osobama s invaliditetom ili privremenim teškoćama (N=22), 36,36% ispitanika smatra da je prikaz objekta na hologramu intuitivniji, dok 63,63% ispitanika smatra da je prikaz na pokretnom uređaju intuitivniji. Među ostalim

ispitanicima (N=37), 29,73% ispitanika smatra da je prikaz objekta na hologramu intuitivniji, dok 70,27% ispitanika smatra da je prikaz objekta na pokretnom uređaju intuitivniji.



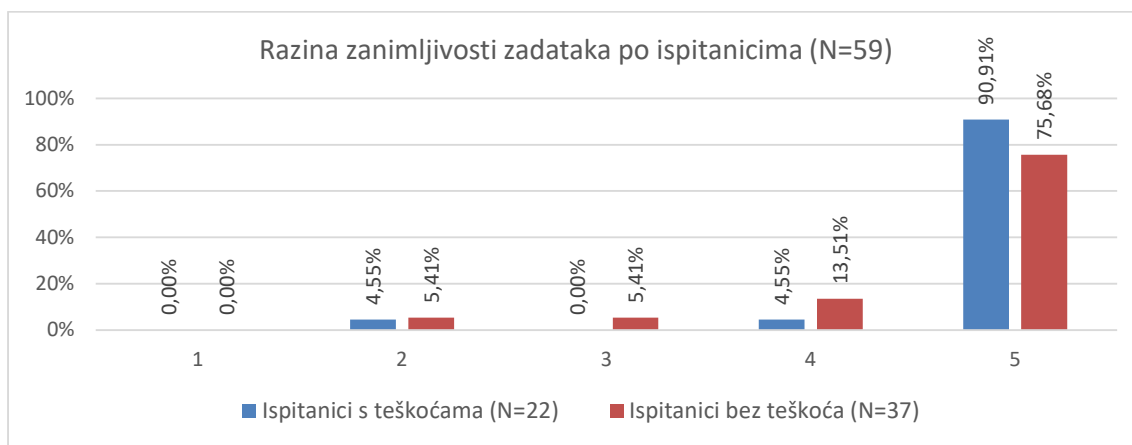
Slika 3.18 Raspodjela intuitivnosti korištenja prikaza objekta na hologramu i pokretnom uređaju

S obzirom na to da se iz Slike 3.15 vidi kako je većina ispitanika, bez obzira na teškoće, koristila oba prikaza, a iz Slike 3.16 kako je holografski prikaz bio atraktivniji, ali je pokretni uređaj jednostavniji i intuitivniji za korištenje, zaključuje se kako je potrebno korisnicima ponuditi oba prikaza objekta. Jedan prikaz je 3D holografski, a drugi 2D bi služi za potpomognuti prikaz holografskog 3D objekta. U daljnjoj analizi interakcija i prikaza objekta, definirat će se kako ih optimalno prilagoditi korisnicima te koje opcije prilagodbe treba implementirati u slične programske sustave kako bi se poboljšala pristupačnost. Cilj je identificirati najefikasnije prilagodbe veličine, boje i animacija objekata, kao i razumjeti koje kombinacije 3D i 2D interakcija najbolje odgovaraju potrebama korisnika s različitim vrstama teškoća.

Sljedeća skupina pitanja odnosila se na sveukupan dojam o istraživačkom instrumentu, odnosno igri.

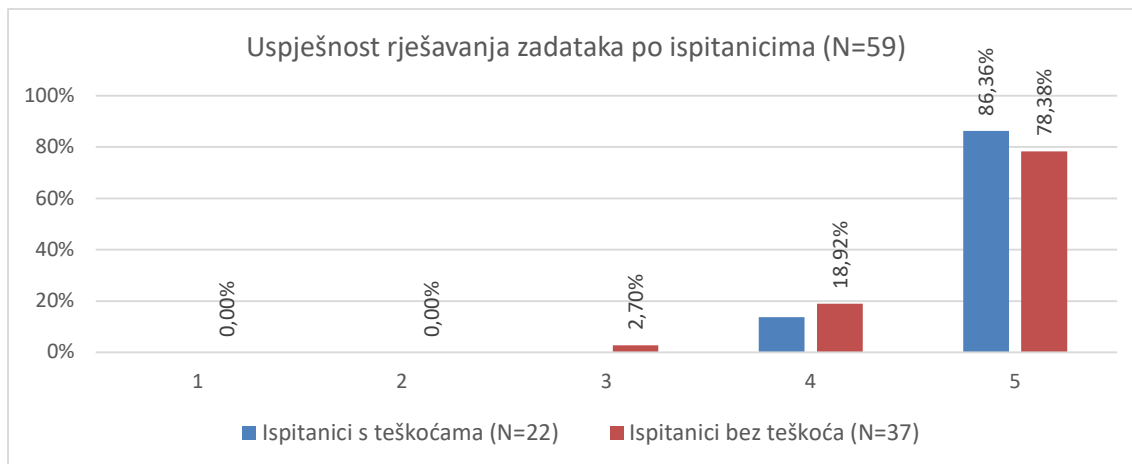
Prvo pitanje iz te skupine se odnosilo na to koliko su ispitanici zadatke iz istraživačkog instrumenta smatrali zanimljiv, a rezultati su prikazani na Slici 3.19. Među osobama s invaliditetom ili privremenim teškoćama (N=22), 20 ili 90,91% je ocijenilo zadatke najvišom ocjenom (5), dok je 4,55% ispitanika (tj. 1 ispitanik) dao ocjenu 4, odnosno ocjenu 2. Nijedan ispitanik nije dao ocjene 1 i 3. Među ostalim ispitanicima (N=37), većina, 28 ili 75,68%

ispitanika je dalo ocjenu 5. 5 ili 13,51% ispitanika ocijenilo je zadatke ocjenom 4, 2 ili 5,41% ocjenom 3, a 2 ili 5,41% ocjenom 2. Nijedan ispitanik iz ove skupine nije dao ocjenu 1. Rezultati sugeriraju kako su zadaci, iako jednostavni, bili dovoljno zanimljivi ispitanicima.



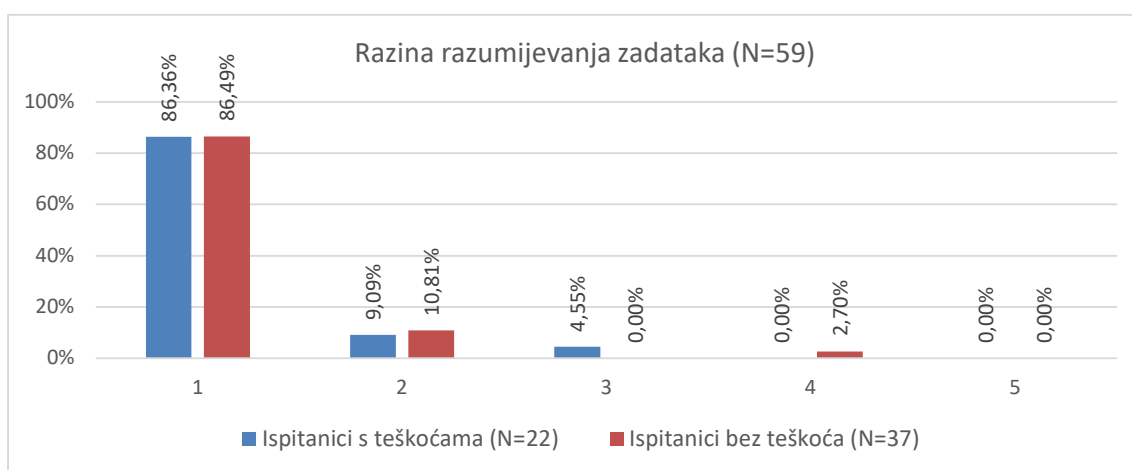
Slika 3.19 Raspodjela ocjena o zanimljivosti zadataka po ispitanicima

Sljedeće pitanje odnosilo se na uspješnost rješavanja zadataka, prikazano na Slici 3.20. Među osobama s invaliditetom ili privremenim teškoćama, ukupno 22 ispitanika, 19 ili 86,36% ih je svoju uspješnost ocijenilo najvišom ocjenom 5, a 3 ili 13,64% ocjenom 4. Nijedan ispitanik iz ove skupine nije dao ocjene 1, 2 ili 3, što sugerira visok stupanj uspješnosti pri rješavanju zadataka. U skupini ostalih ispitanika, od njih 37, 29 ili 78,38% je ocijenilo uspješnost rješavanja zadataka ocjenom 5, 7 ili 18,92% ocjenom 4, a 1 ili 2,7% ocjenom 3, bez ijedne ocjene 1 ili 2. Ovo ukazuje na sličan trend visoke uspješnosti u rješavanju zadataka među svim ispitanicima.



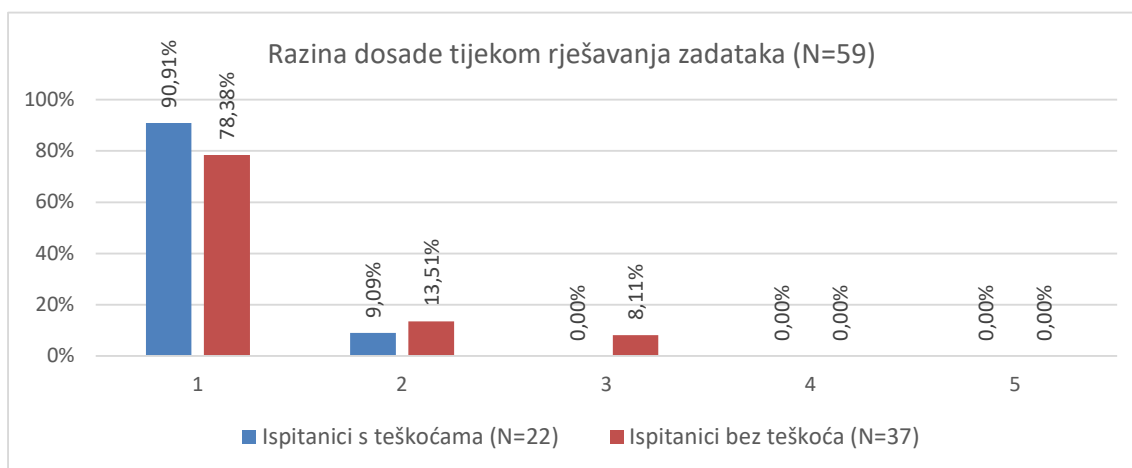
Slika 3.20 Ocjene uspješnosti rješavanja zadataka

Sljedeće pitanje odnosilo se na razinu razumijevanja zadatka pri čemu ocjena 1 označava vrlo lako razumijevanje zadatka, a ocjena 5 označava teškoću u razumijevanju zadatka. Rezultati su prikazani na Slici 3.21. Analizirajući podatke o tome koliko je ispitanicima bilo teško razumjeti zadatak, većina ispitanika u obje skupine ocijenila je zadatak kao vrlo lagan za razumijevanje (ocjena 1). Konkretno, 86,36% ili 19 ispitanika s invaliditetom ili privremenim teškoćama i 86,49% ili 32 ostalih ispitanika dali su ovu ocjenu. Manji broj ispitanika, 9,09% ili 2 ispitanika, dao je ocjenu 2, dok je samo jedan ispitanik, odnosno 4,55% iz skupine s invaliditetom dao ocjenu 3. Ocjena 4 je dodijeljena samo jednom u skupini ostalih ispitanika što čini 2,7%, dok ocjene 5 nisu dodijeljene uopće.



Slika 3.21 Razina razumijevanja zadataka među ispitanicima

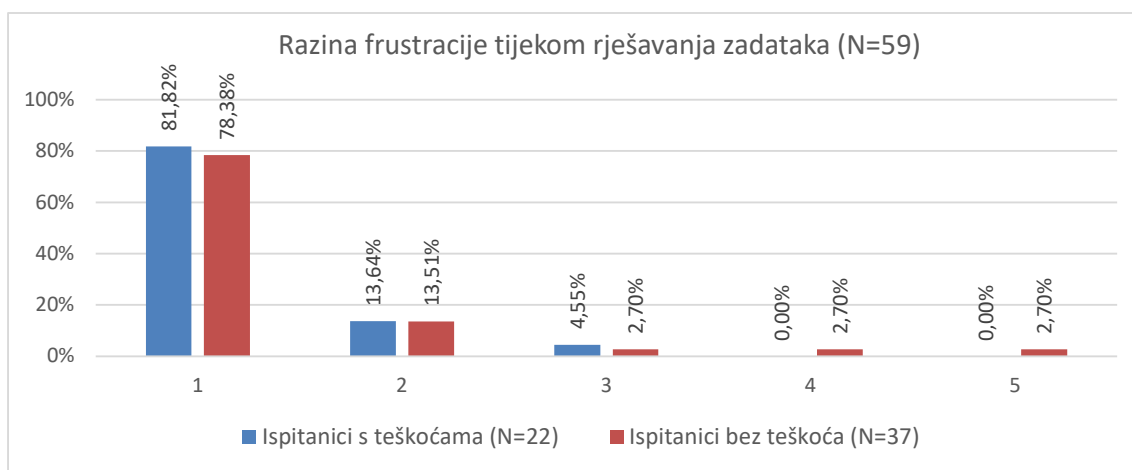
Sljedeće pitanje odnosilo se na osjećaj dosade koji su ispitanici iskusili tijekom rješavanja zadataka, pri čemu je ocjena 1 značila da ispitanici nisu osjećali dosadu, a ocjena 5 da su je osjećali u velikoj mjeri. Rezultati su prikazani na Slici 3.22.



Slika 3.22 Razina dosade tijekom rješavanja zadataka

Većina ispitanika u obje skupine ocijenila je da nisu osjećali dosadu tijekom rješavanja zadataka, ocijenivši zadatke s ocjenom 1. Konkretno, 20 ili 90,91% ispitanika s teškoćama i 29 ili 78,38% ispitanika bez teškoća dali su ovu ocjenu. Manji broj ispitanika dao je ocjenu 2, pri čemu su to bile 2 ili 9,09% ispitanika s teškoćama i 5 ili 13,51% ispitanika bez teškoća. Ocjena 3 je dodijeljena samo u skupini ispitanika bez teškoća, od kojih su 3 ili 8,11% ispitanika tako ocijenila zadatke. Ocjene 4 i 5 nisu dodijeljene ni u jednoj skupini. Rezultati sugeriraju kako su zadaci općenito dobro prihvaćeni te nisu izazvali osjećaj dosade kod većine ispitanika, što ukazuje na adekvatno dizajnirane zadatke unutar istraživačkog instrumenta.

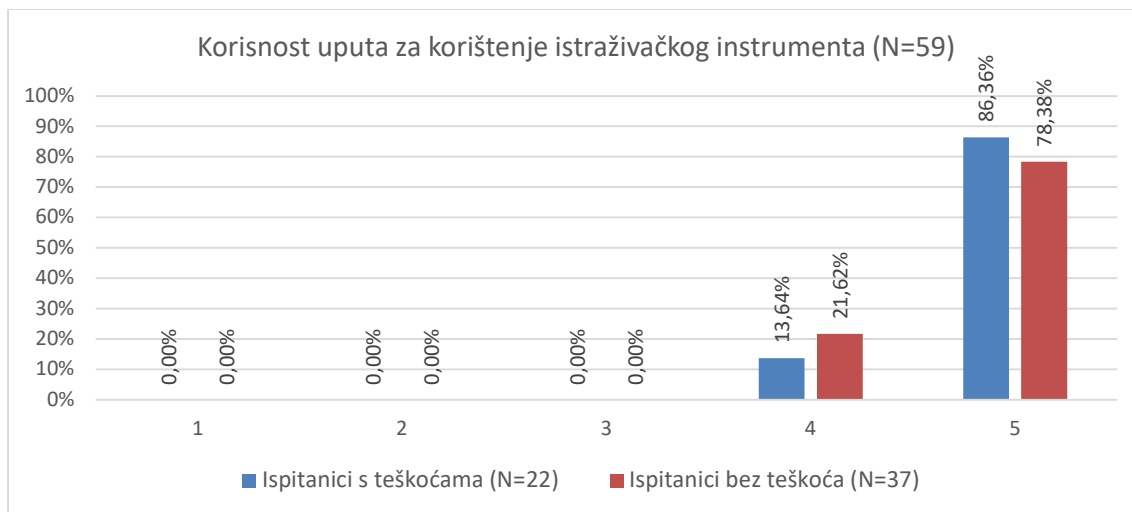
Sljedeće pitanje u istraživanju odnosilo se na razinu frustracije koju su ispitanici doživjeli prilikom rješavanja zadataka, pri čemu ocjena 1 ukazuje na minimalnu, a ocjena 5 na maksimalnu frustraciju. Analiza rezultata (Slika 3.23) pokazuje da je većina ispitanika, 18 ili 81,82% ispitanika s teškoćama i 29 ili 78,38% ispitanika bez, dala ocjenu 1. Ocjenu 4 dalo je 13,64% (3 od 22) ispitanika s teškoćama, odnosno 13,51% (5 od 37) ispitanika bez teškoća. Manji broj ispitanika iz obje skupine, 1 ili 4,55% ispitanika s teškoćama te 1 ili 2,70% ispitanika bez teškoća dao je ocjenu 3, dok je ocjenu 4 dalo 2,79%, odnosno jedan ispitanik bez teškoća. Rezultati impliciraju kako su zadaci generalno dobro prilagođeni i da većina ispitanika nije doživjela značajnu frustraciju tijekom rješavanja. Ovo sugerira kako su upute bile jasne, zadaci primjereno teški, te da je interakcija s istraživačkim instrumentom bila intuitivna i pristupačna.



Slika 3.23 Razina frustracije tijekom rješavanja zadataka

Rezultati analize korisnosti demo zadataka prikazani su na Slici 3.24. Ocjena 5 označava najvišu korisnost, dok ocjena 1 označava najmanju korisnost.

Među ispitanicima s teškoćama (N=22), 86,36% ili 19 ispitanika ocijenilo je *demo* razinu kao izuzetno korisnu (ocjena 5), dok su preostalih 13,64%, odnosno 3 ispitanika dala ocjenu 4. Slično tome, među ispitanicima bez teškoća (N=37), 78,38% ili 29 ispitanika dodijelilo je ocjenu 5, dok je 21,62% tj. 8 ispitanika *demo* razinu ocijenilo s ocjenom 4. Niti jedan ispitanik u obje skupine nije dao ocjene niže od 4, što sugerira na visoku korisnost uputa, odnosno *demo* razina istraživačkog instrumenta. Ovi rezultati impliciraju kako je *demo* razina učinkovito ispunili svoju svrhu u edukaciji i pripremi ispitanika.



Slika 3.24 Procjena korisnosti razine *Demo* sukladno odgovorima ispitanika

3.3.2. Analiza interakcija i prilagodbi interakcija

Analiza interakcija iz istraživačkog instrumenta odnosi se na analizu 3D i 2D interakcija koje su bile implementirane. Analizirano je vrijeme izvršavanja interakcije unutar zadataka s obzirom na vrstu interakcije, preferencije ispitanika s obzirom na vrstu interakcije po zadacima, te preferencije ispitanika s teškoćama iz četiri različite kategorije teškoća u odnosu na vrste interakcija. Analiziran je i subjektivni doživljaj ispitanika koliko im je promjena klizača u gumbе pomogla prilikom rješavanja zadataka. Također je analizirana implementirana opcija pristupačnosti, konkretno prilagodba brzine rotacije za 3D interakcije putem Leap Motiona, kao i subjektivni doživljaj ispitanika u vezi s time koliko im je promjena brzine rotacije pomogla prilikom rješavanja zadataka.

Sljedeća analiza odnosi se samo na interakcije implementirane u specifični programski sustav s implementiranim potpomognutim prikazom u kojem se istovremeno koriste 2D i 3D prikazi objekata.

Prva analizirana varijabla je **vrijeme izvršavanja interakcije unutar zadataka s obzirom na vrstu interakcije**, kako u kontekstu 3D interakcija, tako i u kontekstu 2D interakcija putem klizača i gumbi. Potrebno je napomenuti kako se interakcija putem gumbi aktivira u postavkama pristupačnosti.

U Tablici 3.2. prikazana je statistička analiza vremena izvršavanje interakcije unutar zadatka s obzirom na vrstu interakcije te ima li ispitanik teškoće ili ne. Analiza obuhvaća srednju vrijednost (m), medijan (md), standardnu devijaciju (σ), minimalnu (min) i maksimalnu (max) vrijednost, raspon (R), donji ($Q1$) i gornji ($Q3$) kvartil, te interkvartilni raspon (IQR), indeks simetričnosti (S) i indeks spljoštenosti distribucije (K).

Iz rezultata prikazanih u Tablici 3.2, primijećene su značajne razlike u vremenu utrošenom na izvršavanje interakcija unutar zadataka ovisno o korištenoj metodi interakcije. Srednje vrijednosti i medijani variraju između skupina ispitanika i metoda interakcije, što sugerira da su određene metode interakcije bile zahtjevnije ili jednostavnije za različite skupine ispitanika.

Za ispitanike s teškoćama, srednje vrijeme 3D interakcija pomoću Leap Motiona iznosilo je 28,75 s, dok je medijan bio 13,00 s. Velika varijaciju u vremenu provedenom na zadacima je najvjerojatnije posljedica različitih razina vještina i sposobnosti među ispitanicima s obzirom na to da je nekim ispitanicima s teškoćama trebala dodatna pomoću u rješavanju zadataka. Standardna devijacija (48,86 s) i najveće vrijeme interakcije (285,00 s) dodatno potvrđuju prisutnost značajnih odstupanja u vremenu. Visoka vrijednost indeksa spljoštenosti distribucije (14,04 s) ukazuje na prisutnost ekstremnih vrijednosti. Kod ispitanika bez teškoća, prosječno vrijeme 3D interakcija iznosilo je 22,01 s, dok je medijan bio 14 s. Varijacije su bile manje u usporedbi s ispitanicima s teškoćama, s manjom standardnom devijacijom (21,17 s) i maksimalnim vremenom interakcije od 98,8 sekundi. Indeks simetričnosti (1,65 s) i indeks spljoštenosti (2,35 s) sugeriraju prisutnost manje ekstremnih vrijednosti što ukazuje na sličnije sposobnosti ispitanika tijekom korištenja 3D interakcija putem Leap Motiona.

Prosječno vrijeme 2D interakcije s klizačem među ispitanicima s teškoćama iznosilo je 24,05 sekundi, dok je medijan bio 13 sekundi. Standardna devijacija je bila 28,25 s, s najvećim vremenom od 199 s, što ukazuje na značajne varijacije u vremenu izvršavanja ove vrste interakcije, iako su manje izražene nego kod Leap Motiona. Indeks simetričnosti (2,38 s) i indeks spljoštenosti distribucije (9,36 s) ukazuju na prisutnost ekstremnih vrijednosti. Kod

ispitanika bez teškoća, srednje vrijeme 2D interakcije putem klizača iznosilo je 18,5385 sekundi, dok je medijan bio 11,90 s. Varijacije su bile manje u usporedbi s ispitanicima s teškoćama, s manjom standardnom devijacijom (20,59 s) i najvećim vremenom izvršavanja interakcije od 99 s. Indeks simetričnosti (1,75 s) i indeks spljoštenosti distribucije (3,06 s) prisutnost manje ekstremnih vrijednosti. To ukazuje na veću konzistentnost u korištenju klizača među ispitanicima bez teškoća.

Za ispitanike s teškoćama, prosječno vrijeme 2D interakcije s gumbima iznosilo je 36,26 sekundi, dok je medijan bio 27,00 sekundi. Varijacije u vremenu izvršavanja interakcija su također bile značajne, s standardnom devijacijom od 29,81 sekundi i najvećem vremenom izvršavanja zadatka od 136,00 s. Kod ispitanika bez teškoća, prosječno vrijeme interakcije iznosilo je 12,76 s, dok je medijan bio 8,00 s. Standardna devijacija (12,33 s) i maksimalno vrijeme interakcije (50,00 s) ukazuju na znatno manju varijabilnost u vremenu izvršavanja zadataka i veću konzistentnost u korištenju gumba. Indeks spljoštenosti distribucije (1,13 s) sugeriraju manje prisutnih ekstremnih vrijednosti, slično kao i kod ispitanika s teškoćama.

Tablica 3.2 Statistička analiza vremena izvršavanja interakcije unutar zadataka s obzirom na vrstu interakcije po ispitanicima

	3D interakcije pomoću Leap Motiona		2D interakcije pomoću klizača		2D interakcije pomoću gumba	
	Ispitanici s teškoćama	Ispitanici bez teškoća	Ispitanici s teškoćama	Ispitanici bez teškoća	Ispitanici s teškoćama	Ispitanici bez teškoća
m [s]	28,75	22,01	24,05	18,54	36,26	12,76
md [s]	13,00	14,00	13,00	11,90	27,00	8,00
σ [s]	48,86	21,17	28,25	20,59	29,81	12,33
Min [s]	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Max [s]	285,00	98,80	199,00	99,00	136,00	50,00
R [s]	284,00	97,80	198,00	98,00	134,00	49,00
Q1 [s]	3,00	8,00	4,00	3,00	15,00	3,00
Q3 [s]	29,00	30,35	34,75	25,00	47,00	17,25
IQR [s]	26,00	22,35	30,75	22,00	32,00	14,25
S [s]	3,57	1,65	2,39	1,75	1,37	1,38
K [s]	14,04	2,35	9,36	3,06	1,72	1,13

Sljedeća analizirana varijabla je **preferencija ispitanika s obzirom na vrstu interakcije po zadatku**. Tablica 3.3. prikazuje preferencije dviju kategorija ispitanika, ispitanika s teškoćama i ispitanika bez teškoća, u korištenju tri tipa interakcija: 3D interakcije, 2D interakcije putem klizača i 2D interakcije putem gumba. Podaci su organizirani prema pitanjima, pri čemu oznaka „1“ znači da je ispitanik koristio određenu vrstu interakcije, dok „0“ označava da nije. Ispitanici su mogli kombinirati različite vrste interakcija kako bi uspješno prešli na sljedeći zadatak.

Tablica 3.3 Preferencija ispitanika s obzirom na vrste interakcija

Sveukupno ispitanika (N=59)		Ispitanici s teškoćama (N=22)			Ispitanici bez teškoća (N=37)		
Zadatak		3D interakcije	2D interakcije putem klizača	2D interakcije putem gumba	3D interakcije	2D interakcije putem klizača	2D interakcije putem gumba
1	0	27,27%	36,36%	68,18%	16,22%	29,73%	75,68%
	1	72,73%	63,64%	31,82%	83,78%	70,27%	24,32%
2	0	59,09%	31,82%	72,73%	43,24%	40,54%	94,59%
	1	40,91%	68,18%	27,27%	56,76%	59,46%	5,41%
3	0	50,00%	31,82%	59,09%	32,43%	0,00%	91,89%
	1	50,00%	68,18%	40,91%	67,57%	100,00%	8,11%
4	0	50,00%	50,00%	0,00%	56,76%	5,41%	0,00%
	1	50,00%	50,00%	100,00%	43,24%	94,59%	100,00%
5	0	45,45%	31,82%	63,64%	72,97%	2,70%	91,89%
	1	54,55%	68,18%	36,36%	27,03%	97,30%	8,11%
6	0	59,09%	31,82%	72,73%	62,16%	18,92%	86,49%
	1	40,91%	68,18%	27,27%	37,84%	81,08%	13,51%
7	0	72,73%	40,91%	68,18%	64,86%	5,41%	91,89%
	1	27,27%	59,09%	31,82%	35,14%	94,59%	8,11%
8	0	63,64%	22,73%	68,18%	72,97%	0,00%	91,89%
	1	36,36%	77,27%	31,82%	27,03%	100,00%	8,11%
9	0	68,18%	27,27%	72,73%	72,97%	13,51%	91,89%
	1	31,82%	72,73%	27,27%	27,03%	86,49%	8,11%
10	0	81,82%	36,36%	63,64%	75,68%	5,41%	89,19%
	1	18,18%	63,64%	36,36%	24,32%	94,59%	10,81%

Za ispitanike s teškoćama (N=22), 3D interakcija putem Leap Motiona korištena je 42,27% ili 93 puta u 220 zadataka. 2D interakcija putem klizača korištena je 42,27%, ili 145 puta, a putem gumba 39,09% ili 86 puta. Ovi rezultati pokazuju kako tradicionalne 2D interakcije poput klizača i gumba su i dalje najjednostavnije za korištenje ovoj skupini ispitanika. Za ispitanike bez teškoća (N=37), 3D interakcije putem Leap Motiona korištene su 42,97% ili 159 puta, klizači 87,84% ili 325 puta, a gumbi 19,46% ili 72 puta. Ispitanici bez teškoća pokazali su veću fleksibilnost i prilagodljivost u korištenju različitih metoda interakcije, uz veću konzistentnost i preferenciju za 2D interakcije putem klizače i gumbe.

S obzirom na veliku varijabilnost u srednjem vremenu izvođenja 3D i 2D interakcija među različitim kategorijama ispitanika, provedena je detaljna analiza preferencija ispitanika s obzirom na vrstu teškoće. Također, dodatno je analizirano vrijeme izvršavanja interakcija kako bi se dobio dublji uvid u učinkovitost i preferencije različitih metoda interakcije.

Tablica 3.4 pokazuje rezultate koji odražavaju preferencije ispitanika s teškoćama iz četiri različite kategorije teškoća (kognitivni i neurološki poremećaji i/ili specifične teškoće u učenju, motoričke teškoće, oštećenje vida, i oštećenje sluha) s obzirom na tri tipa interakcija: 3D interakcije, 2D interakcije putem klizača, i 2D interakcije putem gumba. Isto kao i u tablici 3.3., podaci su kategorizirani po pitanjima, a „1“ u tablici označava da je ispitanik koristio tu vrstu interakcije, odnosno „0“ da nije te su ispitanici mogli kombinirati različite vrste interakcija za uspješno prelazak na sljedeći zadatak.

Za ispitanike s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (N=16), 3D interakcija putem Leap Motiona je korištena 52,50% ili 76 puta. 2D interakcija putem klizača je iskorištena 44,38% ili 89 puta, dok su gumbi korišteni 51,25% ili 78 puta, što pokazuje kako tradicionalnije metode interakcije poput klizača i gumba i dalje imaju značajnu ulogu.

Za ispitanike s motoričkim teškoćama, 2D interakcije putem gumba su najčešće korištena metoda interakcije s 62,86% ili 44 korištenja u 70 zadataka. Leap Motion je korišten 27,14%, odnosno u 19 zadataka, a klizači 40%, odnosno u 28 od 70 zadataka, što sugerira da su gumbi intuitivniji i lakši za korištenje za ove ispitanike.

Za ispitanike s oštećenjem vida, zabilježeno je da su u prva četiri zadatka koristili 3D interakcije pomoću Leap Motiona, dok su 2D interakcije putem klizača i gumba bili izbor u kasnijim zadacima, s 50% ili 20, odnosno 55% ili 22 korištenja u 40 zadataka. Ovaj rezultat

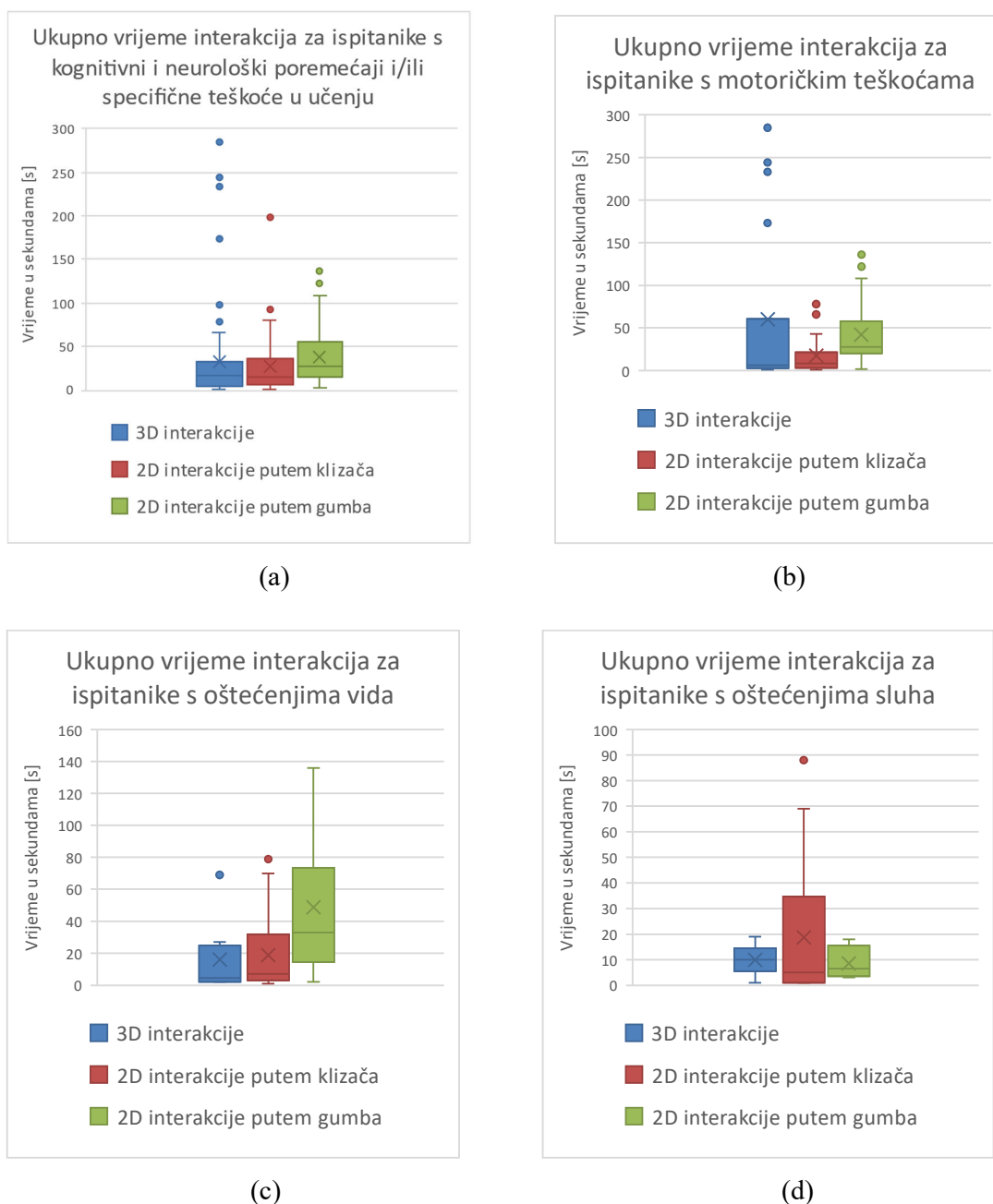
sugerira kako ispitanici s oštećenjem vida preferiraju taktilne i manje zahtjevne metode interakcije.

Ispitanici s oštećenjem sluha koristili su 3D interakcije putem Leap Motiona 36,67% ili 11 puta, dok su 2D interakcije putem klizača korištene u svakom zadatku, što ukazuje na njihovu konzistentnost u korištenju ovih interakcija. 2D interakcije putem gumba su korištenje u svih 10 zadataka.

Tablica 3.4 Preferencije ispitanika s teškoćama iz četiri različite kategorije teškoća s obzirom na vrste interakcija

		Kognitivni i neurološki poremećaji i/ili specifične teškoće u učenju (N=16)			Motoričke teškoće (N=7)			Oštećenje vida (N=4)			Oštećenje sluha (N=3)		
Zadatak		3D interakcije	2D interakcije putem klizača	2D interakcije putem gumba	3D interakcije	2D interakcije putem klizača	2D interakcije putem gumba	3D interakcije	2D interakcije putem klizača	2D interakcije putem gumba	3D interakcije	2D interakcije putem klizača	2D interakcije putem gumba
1	0	3	8	9	3	4	3	3	2	2	2	0	3
	1	13	8	7	4	3	4	1	2	2	1	3	0
2	0	10	6	10	4	3	5	3	3	2	2	0	0
	1	6	10	6	3	4	2	1	1	2	1	3	3
3	0	7	6	8	4	5	1	3	2	2	3	0	0
	1	9	10	8	3	2	6	1	2	2	0	3	3
4	0	7	10	0	5	6	0	3	2	0	3	0	0
	1	9	6	16	2	1	7	1	2	4	0	3	3
5	0	7	7	9	4	4	3	3	2	2	2	0	2
	1	9	9	7	3	3	4	1	2	2	1	3	1
6	0	8	7	10	6	4	3	3	2	2	0	0	3
	1	8	9	6	1	3	4	1	2	2	3	3	0
7	0	11	9	9	6	5	2	3	2	2	0	0	3
	1	5	7	7	1	2	5	1	2	2	3	3	0
8	0	9	5	9	5	3	3	3	1	2	2	0	3
	1	7	11	7	2	4	4	1	3	2	1	3	0
9	0	10	5	10	7	4	3	4	2	2	2	0	3
	1	6	11	6	0	3	4	0	2	2	1	3	0
10	0	12	8	8	7	4	3	4	2	2	3	0	3
	1	4	8	8	0	3	4	0	2	2	0	3	0

Analiza ukupnog vremena izvršavanja interakcija u sekundama za svaku vrstu interakcije (3D interakcije putem Leap Motiona, 2D interakcije putem klizača i 2D interakcije putem gumba) za ispitanike iz četiri kategorije teškoća. prikazane su pomoću dijagrama brkatih kutija na Slici 3.25.



Slika 3.25 Analiza ukupnog vremena interakcije u sekundama za svaku vrstu interakcije za ispitanike iz četiri kategorije teškoća

Na dijagramu brkate kutije za ispitanike s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (Slika 3.25 (a)) ističu se netipične vrijednosti vremena korištenja 3D interakcija putem Leap Motiona. Ovi podaci pokazuju velika odstupanja u vremenu potrebnom za ovu vrstu interakcije. To se može vidjeti iz podatka o srednjem vremenu potrebnom za izvršavanje ove interakcije koji je veći od vrijednosti gornjeg (trećeg) kvartila. Brkata kutija 2D interakcije putem klizača pokazuje kako je 75% ispitanika provelo manje od srednje vrijednosti vremena potrebnog za izvršavanje interakcije. 2D interakcije putem gumba pokazuju manje varijabilnosti unutar podataka, što sugerira kako su ove metode interakcije konzistentnije i jednostavnije za korištenje među ovom skupinom ispitanika.

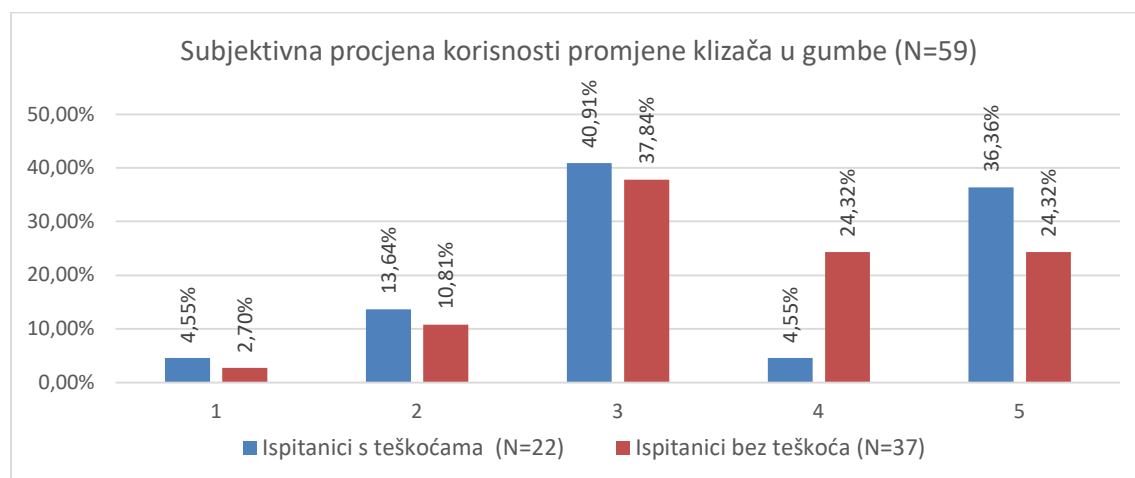
Dijagram brkate kutije za 3D interakcije kod ispitanika s motoričkim poteškoćama (Slika 3.25 (b)) pokazuju veliki raspon vrijednosti vremena potrebnog za izvršavanje 3D interakcija. Razmak između medijana i trećeg kvartila ukazuje na znatnu varijabilnost u gornjoj polovici vremena potrebnog za izvršavanje 3D interakcija među ispitanicima s motoričkim teškoćama. Kod 2D interakcije putem klizača razmak između medijana i gornjeg (trećeg) kvartila je manji što sugerira na manju varijabilnost u vremenu potrebnom za izvršavanje ove interakcije u gornjoj polovici podataka. Brkata kutija koja prikazuje 2D interakcije putem gumba pokazuje kako su pojedini intervali između najmanje vrijednosti, kvartila, medijana i najveće vrijednosti nešto manji nego kod 3D interakcija. Veći razmak između medijana i gornjeg (trećeg) kvartila znači veću varijabilnost u gornjoj polovici podataka u usporedbi s 2D interakcijama putem klizača. Ovo implicira kako su vremena izvršavanja 2D interakcija putem gumba manje konzistentna nego za interakcije putem klizača, ali ujednačenija nego za 3D interakcije. Ispitanici s motoričkim teškoćama imali su najdosljednije rezultate pri korištenju 2D interakcija putem klizača, dok su 3D interakcije pokazale najveću varijabilnost, što sugerira da je ovaj tip interakcije bio zahtjevniji za ispitanike.

Kod ispitanika s oštećenjima vida, dijagram brkate kutije (Slika 3.25 (c)) pokazuje veliki raspon vrijednosti vremena potrebnog za izvršavanje 3D interakcija. Razmak između medijana i gornjeg (trećeg) kvartila je znatno veći prema ostalim četvrtinama podataka koji su određeni medijanama i kvartilima. 2D interakcije putem klizača pokazuju manju varijabilnost unutar polovice svih podataka koja obuhvaća po vrijednosti manje podatke. To podrazumijeva vremena izvršavanja interakcija iz skupa podataka manjih od medijana. Brkata kutija koja prikazuje 2D interakcije putem gumba ima slične karakteristike kao brkata kutija 2D interakcija putem klizača, samo su pojedini intervali između najmanje vrijednosti, kvartila,

medijana i najveće vrijednosti su znatno veći. Za ovu skupinu ispitanika, 3D interakcije su se pokazale kao najbolje kada se u obzir uzme vrijeme potrebno za izvršavanje interakcije.

Za ispitanike s oštećenjem sluha, dijagram brkate kutije (Slika 3.25 (d)) pokazuje kako su svi podaci vrlo ujednačeni, bez varijacije između medijana i gornjeg (trećeg) kvartila. To znači da su ispitanici imali slično vrijeme izvršavanja 3D interakcija. Kod 2D interakcije putem klizača vidi se veliki razmak između medijana i gornjeg (trećeg) kvartila što sugerira kako je dio vremena izvršavanja ove interakcije bio znatno dulji od vrijednosti medijana. Na dijagramu brkate kutije koja predstavlja vremena izvršavanja 2D interakcija putem gumba raspon između medijana i gornjeg (trećeg) kvartila je malen, a manji raspon ukazuje na veću konzistentnost u vremenu potrebnom za izvršavanje 2D interakcija putem gumba u usporedbi s 2D interakcijama putem klizača. Rezultat implicira kako su 2D interakcije putem gumba bile manje zahtjevne za ispitanike u usporedbi s 2D interakcijama putem klizača, ali s nešto većom varijabilnošću nego kod 3D interakcija.

Sljedeća varijabla u analizi je **subjektivni doživljaj ispitanika koliko im je promjena klizača u gumbu pomogla prilikom rješavanja zadataka**, prikazan na Slici 3.27.



Slika 3.26 Subjektivna procjena korisnosti promjene klizača u gumbu

Mali broj ispitanika, 4,55%, odnosno jedan ispitanik s teškoćama te 2,7%, tj. jedan ispitanik bez teškoća, ocijenio je s ocjenom 1. S ocjenom 2 ocijenilo je 13,64% ili 3 ispitanika s teškoćama, a 10,81% ili 4 ispitanika bez teškoća. Najveći broj ispitanika bez teškoća, 40,91% ili 9 ispitanika, dao je ocjenu 3. Ispitanici s teškoćama dali su ocjenu 4 u 4,55% ili 1 put, dok je 24,32% ili 9 ispitanika bez teškoća dalo tu ocjenu. Ocjenu 5 dalo je 36,36% ili 8 ispitanika s teškoćama, odnosno 24,32% ili 9 ispitanika bez teškoća. Na temelju ovih rezultata, može se

zaključiti kako je većina ispitanika ocijenila promjenu klizača u gumbе kao korisnu. Ovi rezultati sugeriraju kako implementacija gumba umjesto klizača poboljšava pristupačnost i olakšava rješavanje zadataka za širu populaciju korisnika.

Nadalje, analizirana je implementirana opcija pristupačnosti, odnosno opcija prilagodbe brzine rotacije koja se odnosila na 3D interakcije putem Leap Motiona.

U Tablici 3.5 prikazani su zadaci s inicijalnim postavkama brzine rotacije te odabranim brzinama rotacije koje su ispitanici birali. Tablica također sadrži broj ispitanika s obzirom na vrstu teškoće koju imaju i ispitanike bez teškoća. U tablici su istaknuti oni redci u kojima su ispitanici iskoristili promjenu brzine rotacije. Iz daljnje analize izbačen je treći zadatak kojim je bilo zadano promijeniti brzina rotacije na višu te četvrti zadatak gdje je zadana interakcija bila pomoću gumba te je očekivano da ispitanici neće mijenjati brzinu rotacije objekta vezanih uz 3D interakcije. Ti su redci u tablici označeni crvenom bojom.

Tablica 3.5 Postavke brzine rotacije po ispitanicima

Pitanje	Postavljena brzina rotacije	Rotacija	Ispitanici s teškoćama (N=22)				Ispitanici bez teškoća (N=37)
			Ispitanici s kognitivnim teškoćama (N=16)	Ispitanici s motoričkim teškoćama (N=7)	Ispitanici s teškoćama vida (N=4)	Ispitanici s oštećenjima sluha (N=3)	
1	1,00	0,50	0%	0%	0%	0%	0%
		1,00	100%	100%	100%	100%	100%
		1,50	0%	0%	0%	0%	0%
2	1,00	0,50	87,50%	71,42%	50%	100%	75,68%
		1,00	12,50%	14,29%	25%	0%	21,62%
		1,50	0%	14,29%	25%	0%	2,70%
3	0,50	0,50	0%	0%	0%	0%	0%
		1,00	100%	100%	100%	100%	100%
		1,50	0%	0%	0%	0%	0%
4	1,00	0,50	0%	0%	0%	0%	0%
		1,00	100%	100%	100%	100%	100%
		1,50	0%	0%	0%	0%	0%
5	1,00	0,50	0%	0%	0%	0%	0%
		1,00	100%	100%	100%	100%	97,30%
		1,50	0%	0%	0%	0%	2,70%
6	0,50	0,50	100%	100%	100%	100%	100%
		1,00	0%	0%	0%	0%	0%
		1,50	0%	0%	0%	0%	0%
7	1,50	0,50	0%	0%	0%	0%	0%

		1,00	0%	0%	0%	0%	0%
		1,50	100%	100%	100%	100%	100%
8	1,00	0,50	0%	0%	0%	0%	0%
		1,00	100%	100%	100%	100%	100%
		1,50	0%	0%	0%	0%	0%
9	1,00	0,50	100%	85,71%	75%	66,67%	0%
		1,00	0%	14,29%	25%	33,33%	100%
		1,50	0%	0%	0%	0%	0%
10	0,05	0,50	87,50%	85,71%	0%	100%	89,19%
		1,00	12,50%	14,29%	100%	0%	2,70%
		1,50	0%	0%	0%	0%	8,11%

Ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (N=16) mijenjali su brzinu rotacije u 2 i 9 zadatku, pri čemu su svi ispitanici smanjili smanjilo brzinu rotacije objekta s pomoću 3D interakcije s 1,00 na 0,50 u 2 zadatku, dok je 87,50% ili 14 ispitanika smanjilo brzinu s 1,00 na 0,50 u 9 zadatku. Ova konzistentna potreba za sporijom rotacijom s pomoću 3D interakcija ukazuje na to kako sporija brzina rotacije pomaže ispitanicima s kognitivnim teškoćama u lakšem rotiranju 3D objekata.

Ispitanici s motoričkim teškoćama (N=7) promijenili su brzinu rotacije u zadacima 2 i 9, gdje je 71,42% ili 5 ispitanika smanjilo brzinu rotacije objekta pomoću 3D interakcije s 1,00 na 0,50, a 14,29%. odnosno 1 ispitanik povećao brzinu na 1,50 u 2 zadatku. U 9 zadatku, 85,71% ili 6 ispitanika smanjilo je smanjilo brzinu rotacije objekta s pomoću 3D interakcije s 1,00 na 0,50. Ovakve promjene brzine rotacije sugeriraju kako većina ispitanika s motoričkim teškoćama preferira sporiju rotaciju.

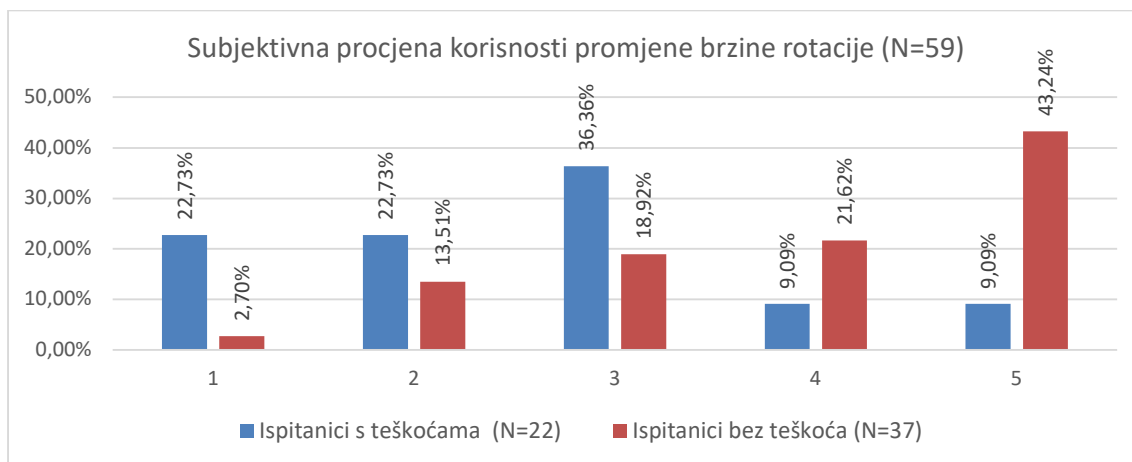
Kod ispitanika s oštećenjem vida (N=4), brzina rotacije objekta s pomoću 3D interakcije promijenjena je u 2 i 8 zadatku. U 2 zadatku, 50% ili 2 ispitanika smanjila su brzinu na 0,50, a 25%, tj. 1 ispitanik povećao brzinu na 1,50. U 9 zadatku, 75% ili 3 ispitanika smanjila su brzinu rotacije na 0,50. Ovi rezultati ukazuju na preferenciju za sporiju brzinu rotacije među ispitanicima s oštećenjem vida.

Ispitanici s oštećenjem sluha (N=3) zabilježili su promjenu brzine rotacije objekta s pomoću 3D interakcija samo u zadatku 9, gdje je 66,67% ili 2 ispitanika smanjilo brzinu s 1,00 na 0,50.

Kod ispitanika bez teškoća (N=37), promjene brzine rotacije zabilježene su u zadacima 2, 5 i 10. U 2 zadatku, 75,68% ili 28 ispitanika smanjilo je brzinu rotacije s 1,00 na 0,50, dok je

2,70%, tj. 1 ispitanik povećao brzinu na 1,50. U 5 zadatku zabilježena je jedna promjena, gdje je ispitanik povećao brzinu s 1,00 na 1,50. U 10 zadatku, 2,70% ispitanika, odnosno jedan ispitanik povećao je brzinu s 0,50 na 1,00, dok su 8,11% ili 3 ispitanika povećala brzinu na 1,50. Primijećeno je kako su u kasnijim zadacima ispitanici obično zadržali zadanu brzinu rotacije.

Sljedeći parametar u analizi je subjektivni doživljaj ispitanika koliko im je promjena brzine rotacije pomogla prilikom rješavanja zadataka, prikazan na Slici 3.27. 22,73% ili 5 ispitanika s teškoćama te 2,70% ili 1 ispitanik bez teškoća ocijenili su promjenu brzine rotacije s ocjenom 1. S ocjenom 2 ocijenilo je 22,73% ili 5 ispitanika s teškoćama te 13,51% ili 5 ispitanika bez teškoća. Ocjenu 3 dalo je 36,36% ili 8 ispitanika s teškoćama te 18,92% ili 7 ispitanika bez teškoća. 9,09% ili 2 ispitanika s teškoćama dali su ocjene 4, dok je 21,62% ili 8 ispitanika bez teškoća dalo istu ocjenu. Ocjenu 5 dalo je 9,09% ili 2 ispitanika s teškoćama, dok je 43,24% ili 16 ispitanika bez teškoća dalo najvišu ocjenu. Na temelju ovih rezultata može se zaključiti kako ispitanici s teškoćama opciju promjene brzine rotacije ne smatraju pretjerano korisnom, dok osobe bez teškoća smatraju da je vrlo korisna.



Slika 3.27 Subjektivna procjena korisnosti promjene brzine rotacije

3.3.3. Analiza prilagodbe prikaza 3D objekta

Analiza prilagodbe prikaza iz istraživačkog instrumenta odnosi se na analizu opcija korištenih za prilagodbu objekta koje su bile implementirane unutar tog programskog sustava. Implementirane prilagodbe prikaza su:

1. Promjena veličine objekta,
2. Promjena boje pozadine objekta,
3. Upravljanje animacijama objekta.

Prva analizirana opcija prilagodbe je promjena veličine objekta. Za ovu prilagodbu prikaza objekta analizirana je učestalost korištenja različitih veličina objekta, uzimajući u obzir ispitanike s teškoćama i bez njih. Ova analiza omogućila je razumijevanje preferencije korisnika i kako različite skupine koriste mogućnost prilagodbe veličine objekta prema svojim potrebama. Također, istražene su razlike u odabiru veličina između ispitanika s teškoćama i onih bez teškoća, čime su definirani specifični zahtjevi i izazovi s kojima se suočavaju ispitanici u svakoj skupini.

Analizirana je učestalost korištenja različitih veličina objekta s obzirom na različite skupine ispitanika: ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (N=16), ispitanici s motoričkim teškoćama (N=7), ispitanici s oštećenjima vida (N=4), ispitanici s oštećenjima sluha (N=3) te ispitanici bez teškoća (N=37). U ovoj analizi sumirane su sve korištene veličine objekta s obzirom na sve zadatke koje je riješila svaka od ovih skupina ispitanika. Uključeni su i oni zadaci u kojima ispitanici nisu mijenjali veličinu objekta jer to implicira da im je zadana veličina objekta odgovarala. Broj riješenih zadataka po ispitanicima s različitim teškoćama i bez teškoća je sljedeći:

1. Ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju su riješili ukupno 160 zadataka,
2. Ispitanici s motoričkim teškoćama riješili su ukupno 70 zadataka,
3. Ispitanici s oštećenjima vida riješili su ukupno 40 zadataka,
4. Ispitanici s oštećenjima sluha su riješili ukupno 30 zadataka,
5. Ispitanici bez teškoća riješili su ukupno 370 zadataka.

Ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (Slika 3.28 (a)) preferiraju najveću veličinu objekta (1,50), koja je korištena u 29,38% zadataka, odnosno 47 zadataka od 160. Druga najčešće korištena veličina je 1,20, a korištena

je u 11,25% ili 18 zadataka. Ostale veličine su korištene ravnomjernije, s dosta manjim brojem ispitanika koji su ih koristili, što implicira kako ova skupina ispitanika preferira veće veličine objekta.

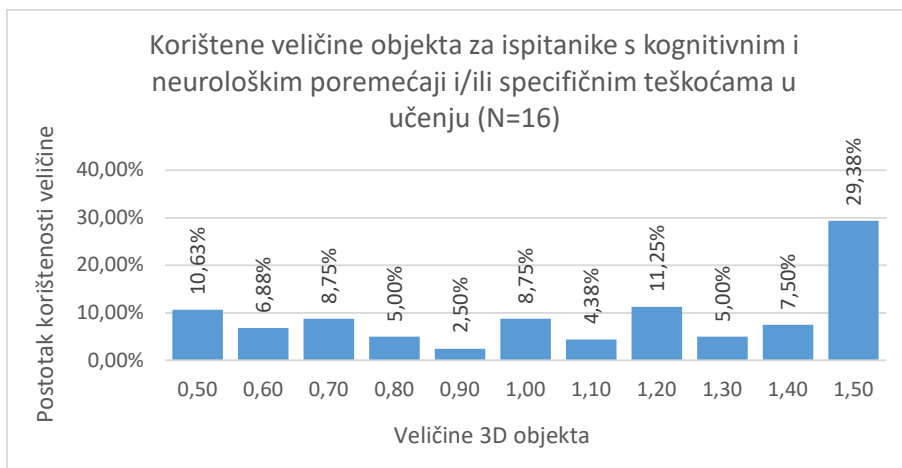
Slika 3.28 (b) prikazuje graf učestalosti korištenja različitih veličina objekata za ispitanike s motoričkim teškoćama. gdje se vidi preferenciju za najveću veličinu objekta (1,50), koja korištena u 41,43% ili 29 zadataka od 70. Ostale veličine su korištene ravnomjernije, s dosta manjim brojem ispitanika koji su ih koristili.

Ispitanici s oštećenjima vida (Slika 3.28 (c)) pokazuju jasnu preferenciju za najveću veličinu objekta (1,50), koju je korištena u 50% ili 20 od 40 zadataka. Ostale veličine su korištene u znatno manjoj mjeri.

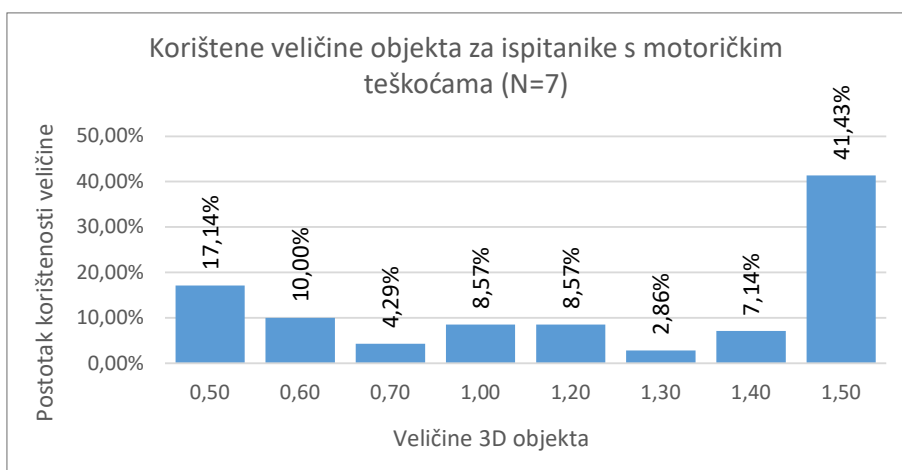
Kod ispitanika s oštećenjima sluha (Slika 3.28 (d)) primjećuje se preferencija za najveću veličinu objekta (1,50), koja je korištena u 70% zadataka, odnosno 20 od 30 zadataka. Ostale veličine objekta korištene su značajno rjeđe.

Graf ispitanika bez teškoća (Slika 3.28 (e)) prikazuje sličan uzorak, gdje je najveća veličina objekta (1,50) najčešće korištena, 38,65% ili u 140 od 370 zadataka. Druga najčešće korištena veličina je 1,00 koja je korištena u 17,57% ili 65 zadataka. Ostale veličine su korištene ravnomjernije, što ukazuje na širu distribuciju korištenih veličina u ovoj skupini.

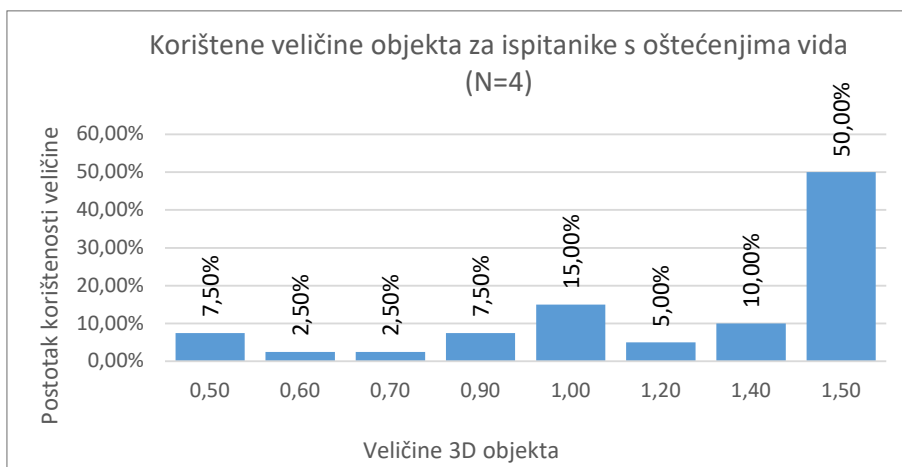
Podaci ukazuju na to da sve skupine ispitanika, bez obzira na vrste teškoća, preferiraju korištenje najveće veličine objekta (1,50). Ovo je posebno izraženo kod ispitanika s različitim vrstama oštećenja,. Ispitanici bez teškoća također preferiraju veću veličinu objekta, ali pokazuju veću varijabilnost u odabiru različitih veličina. Ovi rezultati sugeriraju kako bi implementacija opcija za prilagodbu veličine objekta trebala uključivati mogućnosti za veće dimenzije kako bi se zadovoljile potrebe svih korisnika, a početna postavka veličine objekta bi također trebala biti veća.



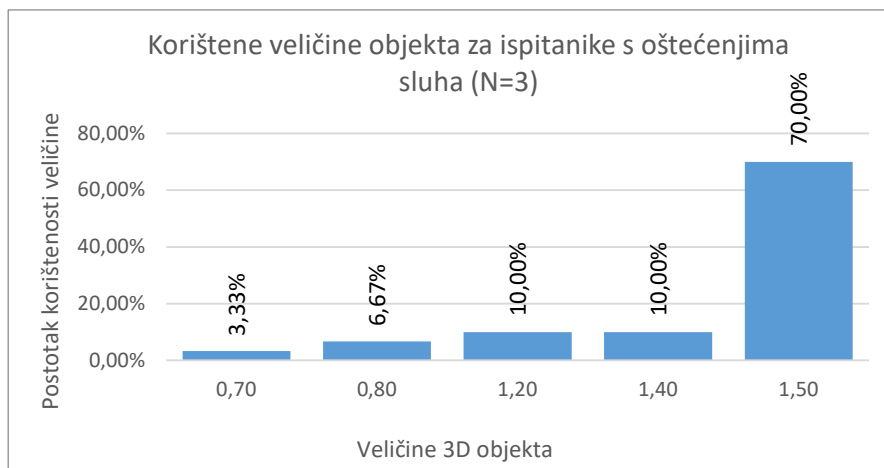
(a)



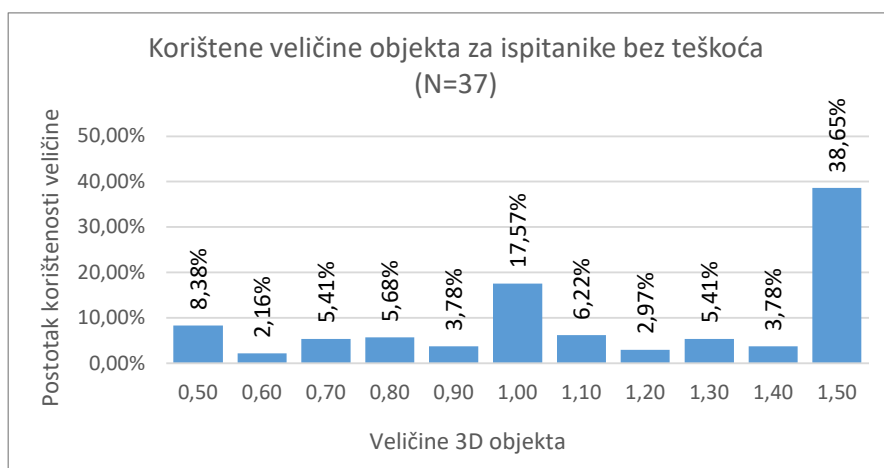
(b)



(c)



(d)



(e)

Slika 3.28 Učestalost korištenja različitih veličina prikaza 3D objekta

Sljedeće analizirane prilagodbe su promjena boje pozadine 3D objekta i upravljanje animacijom 3D objekta. Slično kao i u analizi veličine objekta, u analizi promjene boje pozadine 3D objekta obzir su se uzimale različite skupine ispitanika s obzirom na sve zadatke koje je riješila svaka od ovih skupina ispitanika. Iz analize su isključeni odgovori na drugi zadatak gdje se od ispitanika tražila promjena boje pozadine. Ispitanici su imali opciju odabira između crne i bijele pozadine. Sume zadataka po kategorijama ispitanika su sljedeće:

1. Ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju riješili su ukupno 144 zadatka,
2. Ispitanici s motoričkim teškoćama riješili su ukupno 63 zadatka,
3. Ispitanici s oštećenjima vida riješili su ukupno 36 zadatka,
4. Ispitanici s oštećenjima sluha riješili su ukupno 27 zadatka,
5. Ispitanici bez teškoća riješili su ukupno 333 zadatka.

U analizi upravljanja animacijama 3D objekta, u obzir su uzete različite skupine ispitanika s obzirom na sve zadatke koje je riješila svaka od ovih skupina. Ispitanici su imali opciju isključivanja animacija tijekom zadataka, pri čemu su animacije bile zadano uključene.

Rezultati su prikazani u tablici 3.6.

Tablica 3.6 Preferencije korisnika po boji pozadine i animacijama

Skupina	Pozadina		Animacija	
	Crna	Bijela	Uključena	Isključena
Ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (N=16)	92,36%	7,64%	85,63%	14,38%
Ispitanici s motoričkim teškoćama (N=7)	93,65%	6,35%	88,57%	11,43%
Ispitanici s oštećenjima vida (N=4)	94,44%	5,56%	77,50%	22,50%
Ispitanici s oštećenjima sluha (N=3)	66,67%	33,33%	56,67%	43,33%
Ispitanici bez teškoća (N=37)	87,69%	12,31%	74,32%	25,68%
UKUPNO (N=59)	88,89%	11,11%	77,91%	22,09%

Ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju pokazali su jasnu preferenciju za crnu pozadinu, koristeći je 92,36%, odnosno u 133 od 144 zadatka, dok je bijela pozadina korištena u 7,64% ili 11 zadataka. Ova skupina ispitanika pokazala je jasnu preferenciju za isključene animacije, koristeći ovu opciju 85,63%, dok su animacije bile uključene u 14,38%.

Slično je i s ispitanicima s motoričkim teškoćama. Ova skupina ispitanika također je preferirala crnu pozadinu, koristeći je u 93,65%, dok je bijela pozadina korištena u 6,34%. Ova skupina ispitanika je preferirala isključene animacije, koristeći ovu opciju 88,57%, dok su animacije bile uključene u 11,43%.

Ispitanici s oštećenjima vida koristili su crnu pozadinu u 94,44%, dok je bijela pozadina korištena svega 5,56%. Ispitanici s oštećenjima vida koristili su isključene animacije u 77,50%, dok su animacije bile uključene u 22,50%.

Ispitanici s oštećenjima sluha pokazali su nešto manju, ali i dalje značajnu preferenciju za crnu pozadinu, koristeći je u 66,67%, dok je bijela pozadina korištena u 33,33%. Ispitanici s

oštećenjima sluha pokazali su manju, ali i dalje značajnu preferenciju za isključene animacije, koristeći ovu opciju u 56,67%, dok su animacije bile uključene u 43,33% .

Ispitanici bez teškoća također su pokazali značajnu preferenciju za crnu pozadinu, koristeći je u 96,37% ili 292 od 303 zadatka, dok je bijela pozadina korištena u 13,53%. Ispitanici bez teškoća također su pokazali preferenciju za isključene animacije, koristeći ovu opciju u 74,32%, dok su animacije bile uključene u 25,68%.

Rezultati analize impliciraju jasnu preferenciju za crnu pozadinu među svim skupinama ispitanika. Ovo je posebno izraženo kod ispitanika s oštećenjima vida gdje je crna boja korištena u 94,44% zadataka.

Prilagodba boje pozadine trebala bi uključivati mogućnost korištenja crne pozadine kao zadane opcije, s mogućnošću promjene prema individualnim preferencijama korisnika. Također, podaci jasno ukazuju na preferenciju za isključene animacije među svim skupinama ispitanika. Ovo je posebno izraženo kod ispitanika s kognitivnim i neurološkim poremećajima, kao i kod ispitanika s motoričkim teškoćama, gdje isključene animacije omogućuju bolji fokus i smanjuju potencijalne distrakcije. Ispitanici bez teškoća također preferiraju isključene animacije, iako u manjoj mjeri nego ispitanici s teškoćama.

Ovi rezultati sugeriraju kako bi prilagodba prikaza trebala uključivati mogućnost isključivanja animacija kao zadane opcije, s mogućnošću uključivanja prema individualnim preferencijama korisnika.

Tijekom provođenja istraživanja, primijećeno je kako su ispitanici imali poteškoće s praćenjem ili interakcijom s animiranim objektima te su animacije otežavale vizualnu percepciju objekata.

3.3.4. Prilagodba rješenja za ispitanike s oštećenjima vida

Tijekom sastanka s predstavnicima slijepih i visoko slabovidnih korisnika iz udruge Up2Date, razmatrane su nove prilagodbe programskog sustava namijenjene slijepim korisnicima. Glavni fokus bio je na istraživanju tehnoloških inovacija koje bi mogle poboljšati interakciju slijepih i slabovidnih osoba s programskim sustavom opisanim u poglavlju 3.2.

Prva tema razgovora bila je upotreba holograma s taktilnom povratnom informacijom. Ova tehnologija omogućuje korisnicima da "osjete" holografske objekte u zraku, što može biti korisno za vizualizaciju u 3D prostoru. Međutim, izneseni su važni izazovi:

- Dostupnost i troškovi: ovi sustavi nisu široko dostupni i često su financijski nepristupačni, što ih čini manje izvedivim za implementaciju na širokoj skali.
- Razumijevanje koncepta holograma: za osobe koje su slijepe od rođenja, koncept holograma može biti teško shvatljiv. Bez prethodnog vizualnog iskustva, tehnologija koja se oslanja na vizualnu percepciju može biti manje efektivna.
- Prilagodbe za visoko slabovidne korisnike: slabovidni korisnici bi mogli imati koristi od taktilne povratne informacije ako je kombinirana s jarkim bojama i jednobojnom pozadinom koja minimizira vizualne smetnje. Važno je uzeti u obzir individualne preference korisnika prilikom dizajniranja ovih rješenja.

Drugi prijedlog obuhvaćao je korištenje 3D printanih modela koji bi se koristili u kombinaciji s hologramima ili kao samostalni edukacijski alati. Kao prednost navedena je upravo „opipljivost“ samog 3D printanog modela. 3D modeli bi trebali biti isti kao 3D prikaz na hologramu. Ako su u pitanju 3D modeli životinja, 3D printani modeli moraju imati visoku razinu vjerodostojnosti pravoj životinji, npr. 3D model ovce bi trebao imati runo kako bi na dodir korisnici mogli osjetiti sve karakteristike te životinje.

Na temelju rasprave i povratnih informacija od ispitanika, odlučeno je kako bi se u budućim istraživanjima naglasak trebao staviti na mogućnosti implementacije 3D printanih modela, uz usporedno razmatranje prilagodbi za taktilnu povratnu informaciju za korisnike koji bi od toga mogli imati koristi.

Za slabovidne korisnike potrebno je implementirati opciju promjene boje 3D objekta i pozadine, pri čemu kontrast 3D objekta i pozadine mora biti minimalno 1:7. Također, treba omogućiti izbor jarkih boja za 3D objekt. Bilo bi dobro koristiti više boja na istom objektu kako bi se bojama mogla vizualizirati trodimenzionalnost objekta. Za postizanje toga, koristile bi se **mapa normala** (engl. *normal mapping*). Mape normala su komponenta u području 3D modeliranja i teksturiranja koje nude pristup simulaciji detalja površine bez dodavanja dodatne geometrije modelu koristeći RGB informacije za predstavljanje x, y i z osi u 3D prostoru [93].

Ove prilagodbe bi trebale biti razvijene u suradnji s ciljanom populacijom kako bi se osiguralo da su rješenja uistinu korisna i pristupačna svim korisnicima.

3.3.5. Dodatna zapažanja istraživača i povratne informacije ispitanika

Ovo poglavlje obuhvaća dodatna zapažanja istraživača tijekom provedenog istraživanja, kao i povratne informacije dobivene od ispitanika tijekom treće faze istraživanja.

Tijekom provođenja istraživanja i razgovora s ispitanicima s oštećenjem vida, zaključeno je kako ova skupina ispitanika preferira prostorije s boljim osvjetljenjem. S obzirom na to da vanjski (ambijentalni) utjecaji na 3D prikaz nisu mjerili, istraživanje je provedeno u prostorijama koje su se mogle zamračiti. Ispitanici su predložili nabavu ekrana boljih performansi kako bi se poboljšali uvjeti za prikaz 3D objekta.

Na kraju korisničke ankete tijekom treće faze provođenja istraživanja, ispitanicima su ponuđena dodatna pitanja koja nisu bila obavezna.

Prvo pitanje je bilo: *Opišete svoje opće dojmove o iskustvu s ovom igrom. Što vam se posebno svidjelo, a što mislite da bi se moglo poboljšati?* Na pitanje je odgovorilo 33 od 59 ispitanika, a neki od odgovora su:

1. *Mogućnosti pristupačnosti su prilično korisne i intuitivne. Posebno mi se svidio hologramski prikaz jer daje novu dimenziju klasičnim prikazima sličnih kvizova. Malo bi se mogao poboljšati sam ekran koji prikazuje hologram koristeći moderniji monitor s većom maksimalnom svjetlinom.*
2. *Hologram je jako zanimljiv, ja bih da su životinje odmah malo veće i da nemaju animaciju, svidjelo mi se rotiranje životinja s rukama.*
3. *Bolja grafika da se bolje vide 3d životinje. Bilo je fora što su bile životinje.*
4. *Čini se zanimljivo i inovativno, prvi puta se susrećem s takvim principom igre.*
5. *Možda bi se moglo poboljšati to da se životinje pomiču s „joystickom“.*

Sljedeće pitanje je bilo: *Smatrate li da bi ovakav tip igre, odnosno aplikacije mogla doprinijeti procesu učenja? Podijelite svoje mišljenje i eventualne primjere kako biste je koristili u edukacijske svrhe.* Na to pitanje, 27 ispitanika je podijelilo svoje mišljenje, a izdvojeno ih je pet:

1. *Mislim da bi djeca bila zainteresirana za hologram i interakciju s njime jer bi mogli bolje vidjeti i doživjeti životinju nego u knjigama. Puno je lakše učiti ako npr. možeš vidjeti hologram lava i zumirati ga, rotirati, vidjeti iz različitih kutova.*

2. *Ovakav tip aplikacije bi se mogao koristiti za poboljšavanje uključenosti pri učenju, osobito za mlade učenike. Također bi mogao poboljšati interes učenika kroz veću interaktivnost.*
3. *Mislim da bi mogla pridonijeti procesu učenja jer je zanimljiv i interaktivna što je upravo ono što današnju djecu više privlači.*
4. *Mislim da je ova aplikacija izvrsna za učenje i vrlo interaktivna. Mogla bi pomoći studentima/učenicima u poteškoćama s učenjem ili napraviti temu još boljom za učenje.*
5. *Svakako, interaktivnim učenjem se najbolje i najlakše svladava novo gradivo.*

Nadalje, 26 ispitanika je odgovorilo i na sljedeće pitanje koje je bilo: *Po vašem mišljenju, kakav će utjecaj imati potpomognuti prikaz i holografška tehnologija na edukaciju?* Neki od odgovora su:

1. *S time smo obuhvatili i djecu s teškoćama u razvoju, a osim toga, vjerujem da će nekima biti jednostavnije koristiti tablet, a nekome hologram, pa im ovo pruža više mogućnosti.*
2. *Potpomognuti prikaz holograma svakako podiže kvalitetu holograma na novu razinu jer se sve ono s tableta preslikava na hologram, pa onima kojima više odgovara tablet mogu koristiti njega, dok ostali mogu gledati i koristiti hologram.*
3. *Mislim da bi potpomognuti prikaz mogao pomoći djeci koja imaju neke teškoće da bolje vide hologram, npr. promjena boje pozadine da se životinja bolje vidi.*

Kao zadnje pitanje, ispitanicima je ponuđena opcija da napišu prijedlog ili ostave komentar. Izdvojeni komentari su:

1. *Prijedlog je umjesto klizača koristiti swipe s mobitela (kad dodirneš životinju i povučeš, ona se rotira u tom pravcu)*
2. *Koristite i simbole, ne samo tekst, nekim osobama s oštećenjima sluha teško je razumjeti tekst koji pročitaju.*

3.4. Diskusija ostvarenih rezultata istraživanja

U trećem poglavlju analizirani su rezultati istraživanja vezani uz prilagodbu prikaza 3D objekata i interakcija s ciljem optimizacije pristupačnosti. Za potrebe istraživanja prilagodbe trodimenzijskog objekta i interakcija razvijen je istraživački instrument u obliku igre implementiran unutar aplikacije HoloZoo.

Istraživanje se provelo u 3 aktivnosti. Prva aktivnost podrazumijevala je upoznavanje ispitanika s istraživanjem, druga testiranje istraživačkog instrumenta, a treća ispunjavanje korisničke ankete. U istraživanju je sudjelovalo ukupno 65 ispitanika. S obzirom na to da od šestero ispitanika nisu dobiveni potpuni odgovori, izostavljeni su iz daljnje analize, stoga je završni broj ispitanika kojih je bio analiziran 59. Od 59 ispitanika, 22 ispitanika su osobe s invaliditetom ili privremenim teškoćama, što čini 37% ukupnog broja ispitanika.

Analiza interakcija iz istraživačkog instrumenta odnosi se na analizu 3D i 2D interakcija koje su bile implementirane unutar tog programskog sustava.

Za ispitanike s teškoćama (N=22), 2D interakcije poput klizača i gumba su i dalje najjednostavnije za korištenje ovoj skupini ispitanika. Ispitanici bez teškoća pokazali su veću fleksibilnost i prilagodljivost u korištenju različitih metoda interakcije, uz veću konzistentnost i preferenciju za 2D interakcije putem klizača i gumba.

S obzirom na veliku varijabilnost u srednjem vremenu izvođenja 3D i 2D interakcija među različitim kategorijama ispitanika, provedena je detaljna analiza preferencija ispitanika s obzirom na vrstu teškoće. Daljnja analiza je pokazala kako za ispitanike s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju najjednostavnija metoda interakcije je 2D interakcije putem gumba koja je pokazala najmanje varijacije unutar podataka. Ispitanici s motoričkim teškoćama imali su najdosljednije rezultate pri korištenju 2D interakcija putem klizača, dok su 3D interakcije pokazale najveću varijabilnost, što sugerira da je ovaj tip interakcije bio zahtjevniji za ispitanike. Kod ispitanika s oštećenjima vida, 3D interakcije su se pokazale kao najbolje kada se u obzir uzme vrijeme potrebno za izvršavanje interakcije. Za ispitanike s oštećenjem sluha, rezultat je pokazao kako su 2D interakcije putem gumba bile manje zahtjevne za ispitanike u usporedbi s 2D interakcijama putem klizača, ali s nešto većom varijabilnošću nego kod 3D interakcija.

Sljedeći parametar u analizi prilagodbe interakcije je subjektivni doživljaj ispitanika koliko im je promjena klizača u gumba pomogla prilikom rješavanja zadataka. Mali broj ispitanika ocijenio je s ocjenom 1: 4,55% (jedan ispitanik s teškoćama) i 2,70% (jedan ispitanik bez teškoća). S ocjenom 2, 13,64% (tri ispitanika s teškoćama) i 10,81% (četiri ispitanika bez teškoća). Najveći broj ispitanika bez teškoća, 40,91% (devet ispitanika), dao je ocjenu 3. Ocjenu 4 dali su 4,55% (jedan ispitanik s teškoćama) i 24,32% (devet ispitanika bez teškoća). Ocjenu 5 dali su 36,36% (osam ispitanika s teškoćama) i 24,32% (devet ispitanika bez

teškoća). Ovi rezultati sugeriraju kako većina ispitanika ocjenjuje promjenu klizača u gumbе kao korisnu. Implementacija gumba umjesto klizača poboljšava pristupačnost i olakšava rješavanje zadataka.

Analiza prilagodbe prikaza iz istraživačkog instrumenta obuhvaća tri opcije: promjenu veličine objekta, promjenu boje pozadine i upravljanje animacijama objekta. Prva analizirana opcija, promjena veličine objekta, ispituje učestalost korištenja različitih veličina među ispitanicima s teškoćama i bez njih, identificirajući njihove preferencije i izazove. U ovoj analizi sumirane su sve korištene veličine objekta s obzirom na sve zadatke koje je riješila svaka od skupina ispitanika. Skupine ispitanika su: ispitanici s kognitivnim i neurološkim poremećajima i/ili specifičnim teškoćama u učenju (N=16), ispitanici s motoričkim teškoćama (N=7), ispitanici s oštećenjima vida (N=4), ispitanici s oštećenjima sluha (N=3) te ispitanici bez teškoća (N=37).

Podaci istraživanja pokazala su kako sve skupine ispitanika, bez obzira na vrste teškoća, preferiraju korištenje **najveće veličine objekta**. Ovo je posebno izraženo kod ispitanika s različitim vrstama oštećenja. Ispitanici bez teškoća također preferiraju veću veličinu objekta, ali pokazuju veću varijabilnost u odabiru različitih veličina. Ovi rezultati sugeriraju kako bi implementacija opcija za prilagodbu veličine objekta trebala uključivati mogućnosti za veće dimenzije kako bi se zadovoljile potrebe svih korisnika, a početna postavka veličine objekta bi također trebala biti veća.

Sljedeća analizirana prilagodba je promjena boje pozadine 3D objekta. Ispitanici su imali opciju odabira između crne i bijele pozadine pri čemu je crna boja pozadine bila zadana boja. Rezultati analize impliciraju jasnu **preferenciju za crnu pozadinu** među svim skupinama ispitanika, a posebice je izraženo kod ispitanika s oštećenjima vida gdje je crna boja korištena u 85%. tj. 36 zadataka od njih 40. Prilagodba boje pozadine trebala bi uključivati mogućnost korištenja crne pozadine kao zadane opcije, s mogućnošću promjene prema individualnim preferencijama korisnika.

Sljedeća analizirana prilagodba je upravljanje animacijama objekta. U obzir su uzete različite skupine ispitanika s obzirom na sve zadatke koje je riješila svaka od ovih skupina. Ispitanici su imali opciju isključivanja animacija tijekom zadataka, pri čemu su animacije bile zadano uključene. Rezultati istraživanja ukazuju na **preferenciju za isključene animacije** među svim skupinama ispitanika. Ovo je posebno izraženo kod ispitanika s kognitivnim i

neurološkim poremećajima, kao i kod ispitanika s motoričkim teškoćama, gdje isključene animacije omogućuju bolji fokus i smanjuju potencijalne distrakcije. Ispitanici bez teškoća također preferiraju isključene animacije, iako u manjoj mjeri nego ispitanici s teškoćama. Ovi rezultati sugeriraju kako bi prilagodba prikaza trebala uključivati mogućnost isključivanja animacija kao zadane opcije, s mogućnošću uključivanja prema individualnim preferencijama korisnika.

4. Konceptualni model pristupačnoga programskoga sustava zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma

Sljedeće poglavlje predstavlja specifikaciju konceptualnog modela pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologiji proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Model je razvijen na temelju rezultata dvaju prethodnih provedenih i opisanih istraživanja, koja su istaknula važnost prilagodbe 3D prikaza i 3D interakcija i optimizaciju pristupačnosti, osobito u programskim sustavima za edukaciju.

Karakteristična značajka programskog sustava iz 3. poglavlja je prikaz edukacijskog sadržaja u 3D obliku, kao što je 3D model životinje, uz mogućnost prikaza u 2D obliku na pokretnom uređaju. Sustav omogućuje korisnicima interakciju s edukacijskim sadržajem kroz 3D interakcije, kao i 2D interakcije putem standardnih sučelja pokretnih uređaja. Definirat će se ključni elementi konceptualnog modela koji uključuju trodimenzijska i dvodimenzijska okruženja, komponente tog programskog sustava, objasniti će se model komunikacije između ta dva okruženja te će se prikazati dijagram toka procesa korištenja 2D i 3D prikaza i interakcija.

Zaključno, ovo poglavlje definira smjernice za razvoj pristupačnih programskih sustava zasnovanih na tehnologiji proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Edukacijski sadržaj

prikazan u 3D i 2D formatu te omogućavanje interakcije u oba oblika pružaju temelj za razvoj inkluzivnih obrazovnih rješenja, omogućujući svim učenicima istovremeni pristup u stvarnom vremenu istom edukacijskom sadržaju koji se obrađuje, neovisno o njihovim individualnim potrebama i sposobnostima.

4.1. Opis modela

Ovo poglavlje detaljno opisuje konceptualni model pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju, temeljenog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Model je razvijen kako bi se optimizirala pristupačnost edukacijskog sadržaja za sve korisnike, omogućujući im interakciju s edukacijskim sadržajem u 3D i 2D okruženjima. Konceptualni model prikazan je na Slici 4.1.

Svrha konceptualnog modela je praktična primjena rezultata provedenih istraživanja i identificiranih zaključaka vezanih uz prilagodbe i pristupačnost trodimenzijskih interakcija i potpomognutog prikaza 3D objekata u razvoju programskih sustava zasnovanih na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Sadržaj koji će se u okviru ovih programskih sustava implementirati nije ograničen, ali s obzirom da su ove tehnologije potencijalno korisne u području obrazovanja, konceptualni model je prvenstveno namijenjen za razvoj ozbiljnih igara zasnovanih na navedenim tehnologijama. Cilj je modela omogućiti prikaz sadržaja i interakciju sa sadržajem svim korisnicima, uključujući i osobe s invaliditetom te stvoriti inkluzivno, imerzivno i interaktivno digitalno okruženje. Primjenom modela želi se poboljšati korisničko iskustvo i pristupačnost.

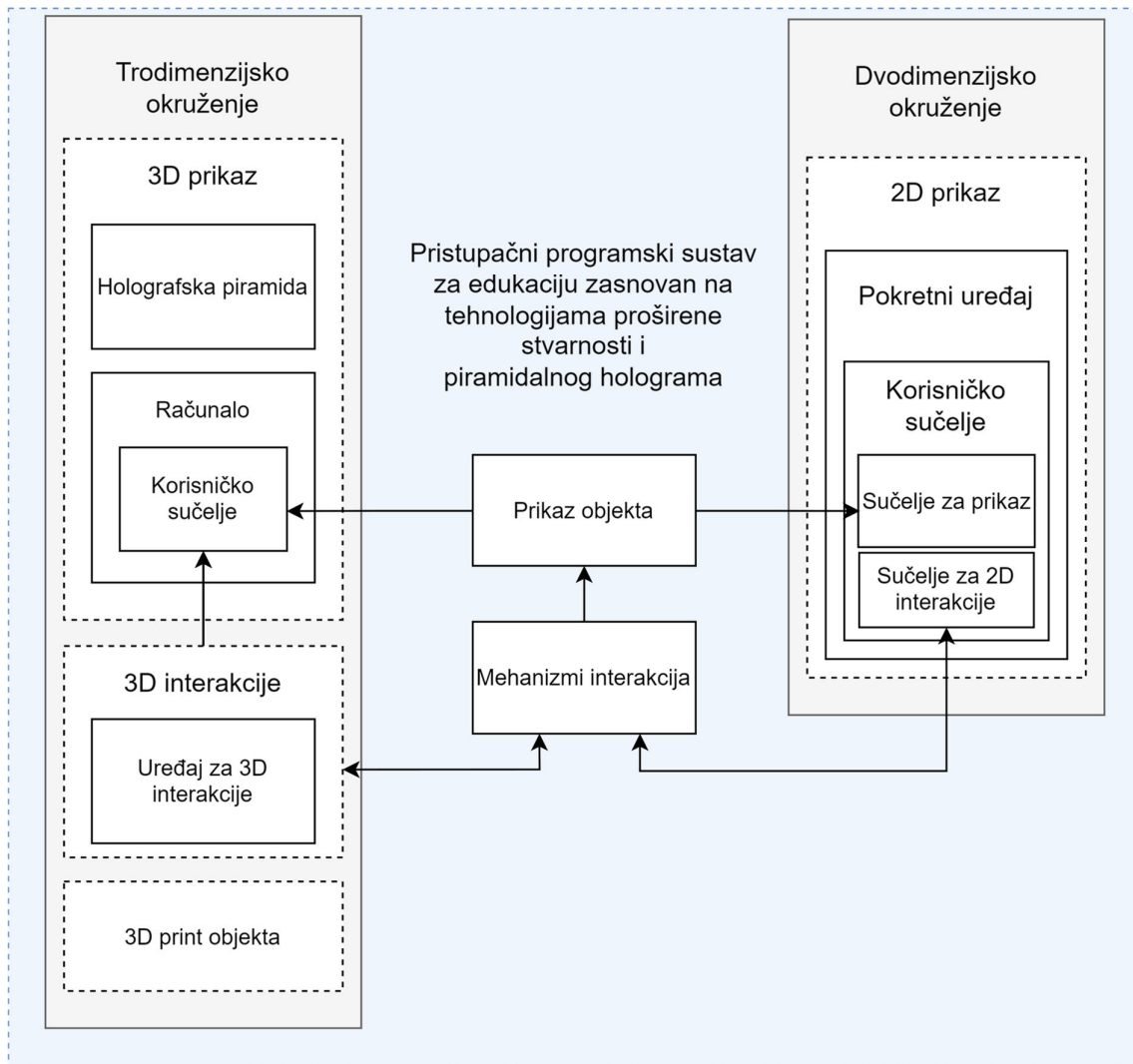
Konceptualni model pretpostavlja korištenje 3D objekata i njihov prikaz pomoću piramidalnog holograma pri čemu korisnici mogu doživjeti prirodnu i zanimljiviju interakciju s digitalnim sadržajem koji simulira okruženja i interakcije iz stvarnog svijeta. Potpomognuti prikaz trodimenzijskog sadržaja omogućuje alternativni 2D prikaz i dvodimenzijske interakcije bilo s trodimenzijskim, bilo s dvodimenzijskim objektom. Model implementira načela univerzalnog dizajna s obzirom na jednostavnost korištenja te višeplatformnost, odnosno programski sustav koji će nastati temeljem konceptualnog modela trebaju omogućiti istovremeni prikaz i unakrsne interakcije između 3D holografskih prezentacija i 2D zaslona te interakcije prirodnim gestama i korištenjem upravljala na korisničkom sučelju. Konceptualni model je tehnološki fleksibilan te se vremenom može prilagoditi tehnološkom napretku u pogledu uređaja na kojima će se implementirati i programskih razvojnih platformi.

Konceptualni model sastoji se od dvije glavne komponente: trodimenzijskog (3D) okruženja i dvodimenzijskog (2D) okruženja. Svaka od ovih komponenti uključuje specifične elemente za prikaz i interakciju s edukacijskim sadržajem. Središnja komponenta modela je *Prikaz objekta* koja povezuje trodimenzijsko i dvodimenzijsko okruženje. Ova komponenta osigurava konzistentan prikaz edukacijskog sadržaja u 2D i 3D okruženju, omogućujući korisnicima istu informaciju o prikazanom objektu bez obzira na korišteni uređaj ili preferirani oblik prikaza. Mehanizmi interakcija omogućuju korisnicima interakciju s edukacijskim sadržajem koristeći 2D ili 3D interakcije. Važno je da su obje vrste interakcija sinkronizirane u oba prikaza, omogućujući konzistentno i koherentno korisničko iskustvo bez obzira na korišteni format prikaza ili interakcije. To znači da korisnik može koristiti, primjerice, 3D interakcije s 2D prikazom ako je to najpogodnije za njegove potrebe, osiguravajući fleksibilnost i prilagodljivost sustava za različite korisničke preferencije i zahtjeve.

Trodimenzijsko okruženje sastoji se od nekoliko ključnih komponenti koje omogućuju vizualizaciju i interakciju s edukacijskim sadržajem u trodimenzijskom obliku. Te komponente uključuju:

- Holografsku piramidu: ova komponenta omogućuje prikaz 3D modela u stvarnom prostoru, stvarajući iluziju lebdećih objekata unutar piramide.
- Računalo: računalo je ključno za pokretanje programskog sustava te omogućuje 3D prikaz na korisničkom sučelju, koji se gleda kroz holografsku piramidu. Također, računalo obrađuje informacije dobivene putem 3D uređaja koji sadrži različite senzore i kamere, omogućujući postizanje 3D interakcija.
- Korisničko sučelje: intuitivno sučelje na računalu koje omogućuje korisnicima pregled i interakciju s 3D objektima.

Osim ovih osnovnih komponenti, trodimenzijsko okruženje uključuje i 3D interakcije koje omogućuju korisnicima izravnu komunikaciju s 3D objektima putem specijaliziranih uređaja. Ovi uređaji, koji sadrže različite senzore i kamere, šalju informacije računalu koje ih obrađuje kako bi omogućilo preciznu manipulaciju 3D objektima.



Slika 4.1 Konceptualni model pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju, temeljenog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma

Posebna komponenta ovog konceptualnog modela je 3D print objekta. Iz istraživanja opisanog u poglavlju 3.3. zaključeno je da bi stvaranje fizičkih replika 3D modela bilo izuzetno korisno za korisnike s oštećenjima vida. Ova komponenta omogućava taktilno istraživanje i interakciju s modelima, čime se značajno poboljšava razumijevanje i pristupačnost edukacijskih sadržaja za ovu skupinu korisnika.

Komponente dvodimenzijskog prikaza uključuju pokretni uređaj, poput tableta ili pametnih telefona, koji omogućuju prikaz i interakciju sa sadržajem u dvodimenzijskom obliku. Korisničko sučelje uključuje prikaz 2D objekta, koji omogućuje korisnicima pregled i interakciju s 2D prikazom edukacijskog sadržaja. Nadalje, sučelje za interakcije je dio korisničkog sučelja te sadrži interaktivne elemente, poput klizača i gumba, koji omogućuju

korisnicima interakciju s 2D, odnosno 3D prikazom. U tom dijelu sučelja nalaze se i gumbi za povećavanje i smanjivanje oba prikaza. Na tom sučelju nalazi se i gumb u kojem se nalaze opcije pristupačnosti koji sadrži sljedeće opcije: (i) Prilagodba brzine rotacije, (ii) Transformacija klizača u gumbe, (iii) Promjena boje pozadine te (iv) Upravljanje animacijama. To su opcije pristupačnosti karakteristične samo za 2D/3D prikaz te interakcije.

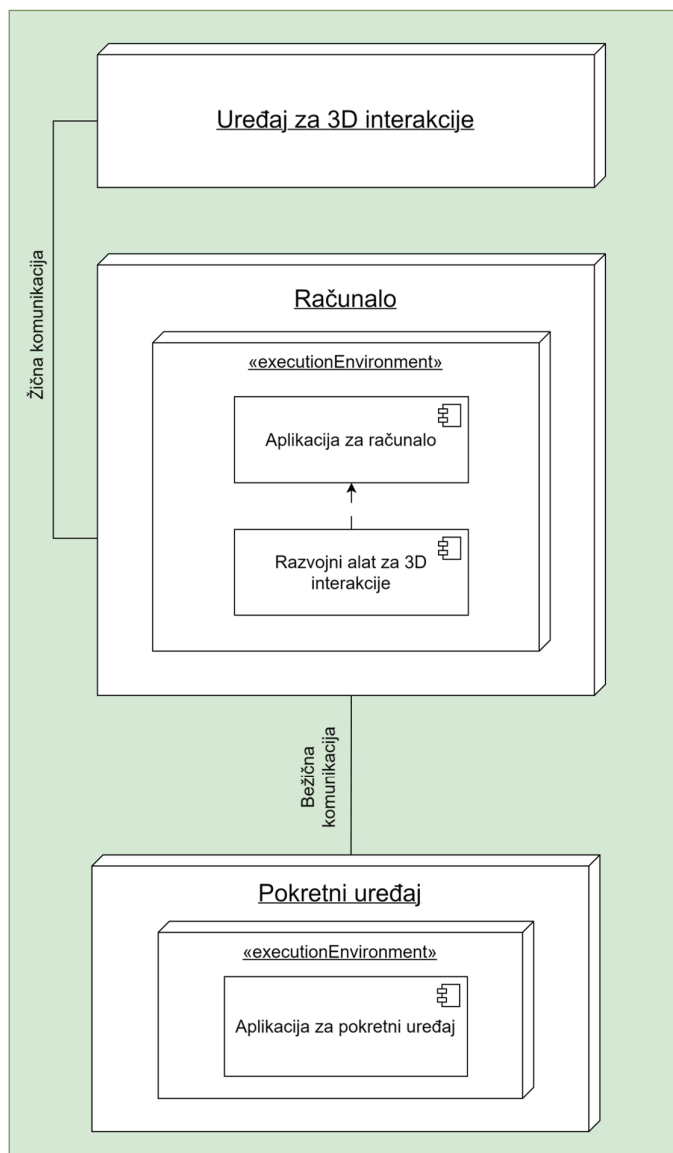
Specifičnost ovog programskog sustava je činjenica da su 2D i 3D prikaz sinkronizirani, tj. 2D i 3D prikaz kontinuirano izmjenjuju poruke o različitim aspektima, kao što su interakcije, pristupačnost i druge relevantne informacije. Ova sinkronizacija osigurava konzistentno i koherentno korisničko iskustvo, omogućujući korisnicima da koriste bilo koji format prikaza ili interakcije prema svojim potrebama i preferencijama, a detaljnije je opisana u poglavlju 4.3.

4.2. Komponente pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju

Dijagram na Slici 4.2. prikazuje komponente pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Glavne komponente uključuju pokretni uređaj, računalo i uređaj za 3D interakcije.

Na pokretnom uređaju, poput tableta ili pametnog telefona, nalazi se programski sustav za pokretni uređaj koja pruža dvodimenzijski prikaz objekata i omogućuje korisnicima interakciju putem sučelja prilagođenog za 2D interakcije. Komunikacija između pokretnog uređaja i računala odvija se bežično, omogućujući sinkronizaciju podataka o prikazu i interakcijama u stvarnom vremenu. Računalo, na kojem se nalazi programski sustav, upravlja trodimenzijskim prikazom objekata putem holografske piramide. Računalo je povezano s uređajem za 3D interakcije putem žične komunikacije, osiguravajući brzu i pouzdanu razmjenu podataka. Unutar računala se nalazi razvojni alat za 3D interakcije koji omogućuje korištenje 3D interakcija u aplikaciji. Uređaj za 3D interakcije, poput uređaja Leap Motion ili drugih specijaliziranih uređaja, omogućuje korisnicima interakciju s trodimenzijskim objektima, bilježeći pokrete i geste korisnika te prenoseći te podatke računalu za obradu. U ovoj arhitekturi, pokretni uređaj djeluje kao središnji sustav za upravljanje dvodimenzijskim prikazom, dok računalo upravlja trodimenzijskim prikazom. Korisnik ima mogućnost odabira između 2D i 3D prikaza, a može koristiti bilo koju kombinaciju prikaza i interakcija prema svojim potrebama i preferencijama. Podaci o interakcijama i prilagodbi pristupačnosti

kontinuirano se sinkroniziraju između pokretnog uređaja i računala, osiguravajući konzistentno korisničko iskustvo. Ovaj sustav omogućuje fleksibilnost i prilagodbu aplikacije prema individualnim potrebama korisnika, povećavajući pristupačnost i učinkovitost edukacijskog sadržaja.

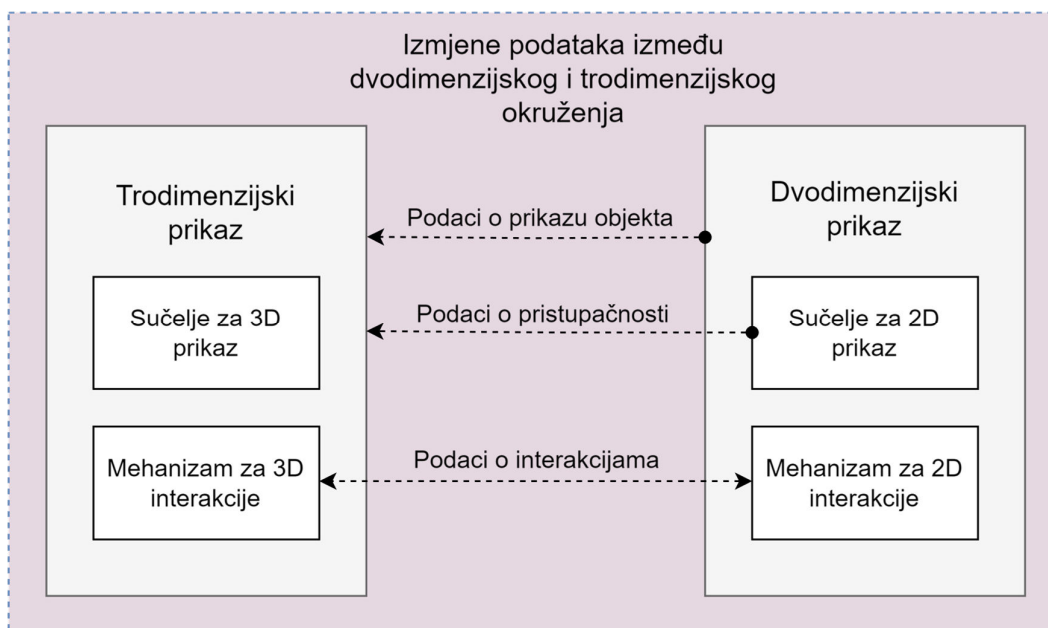


Slika 4.2 Komponente pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju

4.3. Model komunikacije između 2D i 3D prikaza

Dijagram na Slici 4.3. prikazuje detalje izmjene podataka između dvodimenzijskog (2D) prikaza na pokretnom uređaju, koji upravlja cijelim sustavom, te trodimenzijskog (3D) prikaza. Vrste podataka koji se kontinuirano razmjenjuju između 2D i 3D prikaza uključuju podatke o pristupačnosti, podatke o interakciji i podatke o prikazu objekta.

Podaci o pristupačnosti sadrže parametre vezane za opcije pristupačnosti, omogućujući sinkronizaciju prilagodbi koje korisnik napravi na dvodimenzijском prikazu objekta na tabletu, poput promjena veličine objekata ili brzine rotacije, s trodimenzijским holografskim prikazom. Ovi podaci također uključuju prilagodbe za 3D interakcije, kao i promjene klizača u gumbе koji se odnose na 2D sučelje i 2D interakcije. Svaka izmjena koju korisnik izvrši automatski se šalje putem specifičnih poruka kako bi se osiguralo da se promjene odražavaju na oba prikaza.



Slika 4.3 Izmjene podataka između 2D i 3D okruženja

Podaci o interakciji uključuju komponente x , y i z , koje određuju položaj objekta u dvodimenzijском, odnosno trodimenzijском prostoru. Kada korisnik rotira objekt na tabletu ili koristi geste putem uređaja za 3D interakcije, bilježe se podaci o toj interakciji i šalju ih, primjerice, s tableta na računalo kako bi se osiguralo da se svaka promjena u dvodimenzijском prikazu odražava na trodimenzijски holografски prikaz. Također, 3D sučelje šalje podatke na 2D sučelje o tome je li korisnik koristio uređaj za 3D interakcije i koliko dugo ga je koristio tijekom interakcije s objektom. Ova poruka šalje se s holograma, točnije računala, na prijenosni uređaj.

Podaci o prikazu objekta sadrže identifikator trenutno aktivnog modela objekta u dvodimenzijском prikazu na pokretnom uređaju i trodimenzijском prikazu na hologramu. Kada korisnik izvrši promjenu, poruka s identifikatorom se koristi za slanje novog

identifikatora objekta, osiguravajući da se promjene koje korisnik izvrši na pokretnom uređaju u stvarnom vremenu odražavaju na hologramu.

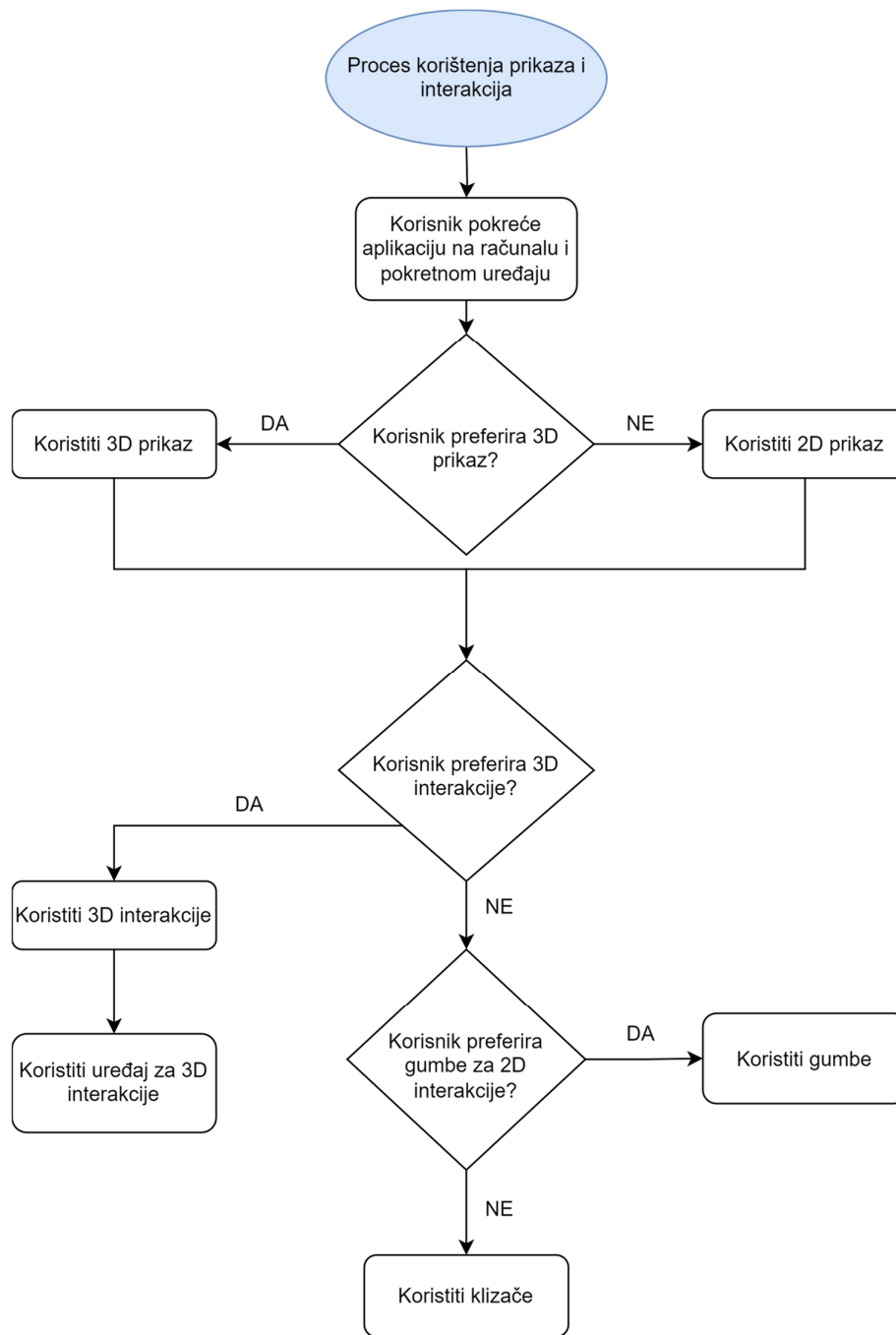
Kako bi se spriječilo preopterećenje komunikacijskih kanala tijekom izmjene podataka, preporučuje se koristiti mehanizme za upravljanje događajima ili akcijama u programiranju (engl. *event handling*). Ovi mehanizmi omogućuju učinkovito upravljanje porukama i optimizaciju prijenosa podataka, smanjujući rizik od prekida i zasićenja komunikacijskog kanala te osiguravajući stabilnost i pouzdanost sustava u stvarnom vremenu.

4.4. Proces korištenja interakcija i prikaza

Dijagram toka (Slika 4.4) prikazuje detaljan proces korištenja prikaza i interakcija unutar pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologiji proširene stvarnosti i piramidalnog holograma, omogućujući korisnicima fleksibilnost u odabiru između dvodimenzijskog (2D) i trodimenzijskog (3D) prikaza te različitih tipova interakcija.

Proces započinje kada korisnik pokrene aplikaciju na pokretnom uređaju i na računalu. Na računalu, odnosno u holografskoj piramidi, korisnik vidi 3D prikaz objekta, dok na pokretnom uređaju korisnik vidi 2D prikaz. Korisnik tada bira koji prikaz preferira, iako su oba prikaza dostupna.

Nakon odabira prikaza, korisnik također može birati između različitih tipova interakcija, neovisno o odabranom prikazu. To znači da korisnik može koristiti 3D interakcije s 2D prikazom ili 2D interakcije s 3D prikazom, ovisno o tome što mu je intuitivnije i prikladnije. Na primjer, za interakciju s trodimenzijskim objektima korisnik može koristiti uređaj za 3D interakcije, dok za dvodimenzijski prikaz može koristiti različite elemente sučelja na pokretnom uređaju, što uključuje klizače ili gumbe.



Slika 4.4 Dijagram toka korištenja prikaza i interakcija u pristupačnom programskom sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologiji proširene stvarnosti i piramidalnog holograma

4.5. Smjernice za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma

Ovo potpoglavlje sadrži smjernice za razvoj pristupačnih programskih sustava temeljenih na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnih holograma. Ove smjernice proizlaze iz analize aspekata pristupačnosti vezanih uz 3D interakcije te prilagodbe prikaza i interakcija s 3D objektima, kako je opisano u prethodnim poglavljima.

Različite komponente programskog sustava, osobito one koje uključuju 2D prikaz na mobilnim uređajima, razvijene su prema načelima pristupačnosti iz smjernica WCAG [94] te prema istraživanjima iz potpoglavlja 1.3 i 1.4. Smjernice WCAG su prvenstveno namijenjene web i mobilnim aplikacijama te internetskim preglednicima. Budući da je dio sustava dizajniran za mobilne uređaje poput pametnih telefona i tableta, relevantni dijelovi smjernica WCAG mogli su biti primijenjeni.

Smjernice koje su proizašle iz analize podataka prikupljenih tijekom istraživanja provedenih svrhu definiranja parametara pristupačnosti zasnovanih na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija te prilagodbe 3D prikaza i interakcija naglašavaju neke od najboljih praksi u dizajnu interakcija i općenito dizajnu ovakvih rješenja. Ove smjernice također unose nova saznanja u razvoj pristupačnih edukacijskih programskih sustava koji koriste tehnologije proširene stvarnosti i piramidalnog holograma.

Preporuka za dizajn i razvoj sličnih programskih sustava jest da se najprije pažljivo razmotre namjena i ciljevi pojedinih programskih sustava kako bi se osigurala optimalna prilagodba i korisničko iskustvo. Ove smjernice pružaju okvir za razvoj pristupačnih programskih sustava za edukaciju zasnovanih na naprednim tehnologijama, čime se omogućuje inkluzivno i prilagodljivo učenje za sve korisnike. Smjernice su osmišljene kao dopuna postojećim preporukama i dobrim praksama u ovom području. Organizirane su prema načelima pristupačnosti iz smjernica WCAG, koje uključuju vidljivost, operabilnost i razumljivost.

4.5.1. Smjernice za vidljivost 3D prikaza

Vidljivost se odnosi na omogućavanje korisnicima da jasno vide i prepoznaju sav sadržaj i elemente sučelja. U kontekstu 3D prikaza interakcija, to znači osiguravanje da su objekti i interakcije jasno vidljivi i lako dostupni korisnicima.

Iz istraživanja prilagodbe 3D prikaza i interakcija, zaključeno je kako većina ispitanika, bez obzira na teškoće, koristi i 2D i 3D prikaz. Pritom je 3D prikaz ocijenjen atraktivnijim, dok je 2D prikaz jednostavniji i intuitivniji za korištenje. Stoga je preporučljivo, **uz svaki 3D prikaz, osigurati i potpomognuti 2D prikaz u stvarnom vremenu**. Ovim pristupom se zadovoljavaju potrebe svih korisnika, kako onih koji preferiraju 3D prikaz, tako i onih kojima više odgovara 2D prikaz, uključujući različite preferencije u interakciji. Programski sustav treba biti dizajniran tako da 2D i 3D prikazi međusobno komuniciraju i preslikavaju se. Sve što se događa na 2D prikazu mora se odraziti na 3D prikazu i obrnuto, čime se osigurava dosljedno korisničko iskustvo. Ova smjernica predstavlja ključnu specifičnost konceptualnog modela pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma.

U kontekstu same **veličine objekta koji je u izravnoj 3D interakciji s korisnikom**, smjernice preporučuju sljedeće:

- Za precizne zadatke preporučuje se korištenje manjeg 3D objekta s omjerom 1:0,5 prema virtualnoj ruci korisnika kako bi se poboljšala preciznost.
- Za zadatke koji zahtijevaju brzu interakciju preporučuje se korištenje omjera 1:1 kako bi se osigurala ravnoteža između izazova i sposobnosti korisnika pri izvođenju interakcija. Relevantnost ove preporuke potvrđena je analizom rezultata istraživanja u potpoglavlju 2.3.1. koje je pokazalo kako je čak 83% ispitanika u prvom zadatku uspješno ubacilo sva tri 3D objekta čiji je omjer veličine prema virtualnoj šaci bio 0,5:1. Prosječno vrijeme za tu razinu iznosilo je 52,90 sekundi, dok je za zadatak gdje je omjer 3D objekta prema virtualnoj šaci bio 1:1 prosječno vrijeme iznosilo 28,72 sekundi.

U kontekstu **prilagodbe veličine objekta**, smjernice preporučuju implementaciju opcija za prilagodbu veličine objekta. Ako je standardna veličina objekta predstavljena s vrijednošću 1, korisnicima bi se trebala omogućiti promjena veličine objekta u rasponu od 0,50 (što znači smanjenje na 50% svoje početne veličine) do 2,00 (što znači povećanje na 200% svoje početne veličine). Istraživanje u potpoglavlju 3.3.3. je pokazalo kako korisnici, posebno oni s različitim teškoćama, preferiraju veće objekte. Opcija veličine 1,5 iskorištena je u čak 39% svih riješenih zadataka. Kod ispitanika s motoričkim teškoćama, korištena je u 41,43% slučajeva, kod ispitanika s oštećenjima vida u čak 50% zadataka, te kod ispitanika s oštećenjima sluha u 70% slučajeva.

Početna **veličina objekta** treba biti postavljena na 1,5 (početna veličina objekta bi trebala biti 150% svoje veličine u 3D virtualnom okruženju). Veličina objekta trebala bi biti veća od nominalne jer se veličina objekta povećala u 59,40% zadataka, dok je veličina 1,5 korištena u 39% svih riješenih zadataka. Detalji istraživanja su opisana u potpoglavlju 3.3.3.

Također, važno je osigurati **mogućnost odabira boje pozadine**. Crna boja trebala bi biti zadana opcija, jer je preferirana među svim skupinama te je korištena u čak 80% zadataka. Boja pozadine bi trebala biti jednobojna, po mogućnosti s prikazima na toj pozadini jarkih boja ako za to postoji mogućnost, pri čemu kontrast 3D objekta i pozadine mora biti minimalno 1:7. Prijedlog rješenja implementacije visokog kontrasta opisan je u potpoglavlju 3.3.4.

Kao jednu od opcija prilagodbe 3D prikaza objekta, trebala bi se ugraditi **opcija poboljšanja vizualizacije trodimenzionalnosti objekta**. Ova prilagodba postiže se korištenjem mape normala koja simulira detalje površine objekta koristeći RGB informacije za predstavljanje x, y i z osi u 3D prostoru (poglavlje 3.3.4).

4.5.2. Smjernice za operabilnost

Operabilnost se odnosi na omogućavanje korisnicima da učinkovito i jednostavno upravljaju sučeljem, osiguravajući dostupnost svih funkcionalnosti putem različitih uređaja i metoda unosa podataka.

U pristupačnim programskim sustavima za edukaciju zasnovanim na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma, važno je omogućiti upravljanje 3D i 2D objektima korištenjem 2D i 3D interakcija. Dvodimenzijske interakcije omogućuju korisnicima interakciju putem klasičnog dvodimenzijskog sučelja pomoću gumba i klizača, dok trodimenzijske interakcije koriste uređaje za 3D interakciju kako bi omogućile manipulaciju 3D objektima. Ove interakcije se međusobno preslikavaju, što znači da se svaka interakcija s 2D objektom preslikava na njen 3D prikaz i obrnuto.

U kontekstu 3D prikaza, posebno je važno razmotriti **prisutnost distraktora**, odnosno elemenata koji mogu ometati korisnika. Dizajniranje sučelja bez distraktora preporučuje se kako bi se minimizirale smetnje prilikom 3D interakcije, omogućujući korisnicima fokusirano i nesmetano upravljanje 3D objektima. S druge strane, u situacijama gdje se želi povećati angažman korisnika, uključivanje određenih ometajućih elemenata može biti korisno. Ti elementi mogu potaknuti korisnike na interakciju s objektima, čime se povećava njihova

uključenost i interes. Detalji tog istraživanja opisana su u potpoglavlju 2.3.3. U zadatku u kojem nije bilo distraktora, prosječno vrijeme iznosilo je 31,35 sekundi, dok je u zadatku gdje su postojali distraktori prosječno vrijeme bilo 42,80 sekundi. Prema ispitanicima, preciznost je bila važnija u zadacima s distraktorima, s 52,83% ispitanika koji su preciznost ocijenili kao vrlo bitnu, ali je osjećaj frustriranosti ispitanika bio je nešto viši nego u zadacima bez distraktora.

Implementacija 2D metoda interakcije, poput klizača i gumba, igra važnu ulogu u upravljanju 3D objektima. Ove interakcije omogućuju precizniju i efikasniju manipulaciju, budući da su intuitivnije i pristupačnije za korisnike. U istraživanju opisanom u potpoglavlju 3.3.2, kod ispitanika s teškoćama, 3D interakcija korištena je 42,27% ili 93 puta u 220 zadataka. 2D interakcija putem klizača korištena je 42,27%, ili 145 puta, a putem gumba 39,09% ili 86 puta. Za ispitanike bez teškoća, 3D interakcije putem Leap Motiona korištene su 42,97% ili 159 puta u 370 zadataka, klizači 87,84% ili 325 puta, a gumbi 19,46% ili 72 puta. Ovi rezultati pokazuju da su tradicionalne 2D interakcije poput klizača i gumba najjednostavnije za korištenje svim skupinama ispitanika.

4.5.3. Smjernice za razumljivost

Razumljivost se odnosi na osiguravanje da korisnici mogu lako razumjeti informacije i koristiti sučelje. To uključuje jasnoću u prikazu informacija, upute i povratne informacije.

Ključne smjernice za povećanje razumljivosti **uključuju implementaciju opcije za promjenu klizača u gumbe** kako bi se povećala pristupačnost i olakšalo rješavanje zadataka. Ovu opciju promjene klizača u gumbe ocijenilo je ocjenama 4 i 5 ukupno 45,76% svih ispitanika (potpoglavlje 3.3.2). Opcija promjene klizača u gumbe omogućava korisnicima lakšu i intuitivniju interakciju, smanjujući potencijalnu frustraciju i povećavajući efikasnost prilikom interakcije.

Također, bitan aspekt razumljivosti je **upravljanje animacijama**. Početno stanje animacija treba biti **isključeno**, dok bi korisnici trebali imati opciju uključivanja animacija prema potrebi. Na taj način osigurava se optimalno korisničko iskustvo za različite skupine korisnika (poglavlje 3.3.3). Animaciju je isključilo čak 80% ispitanika s teškoćama te 74,32% ispitanika bez teškoća.

Korisnicima treba **pružiti okruženje u kojem mogu učiti i svladavati 3D interakcije**. Ovo uključuje detaljne upute, smjernice i povratne informacije koje korisnicima pomažu u

razumijevanju i učinkovitoj primjeni 3D interakcija. Preporuka je da se implementira demo razina unutar programskog sustava gdje će korisnici učiti o interakcijama. Istraživanje opisano u poglavlju 3.3.1. pokazalo je kako je demo razina učinkovito ispunila svoju svrhu u edukaciji i pripremi ispitanika.

4.5.4. Sažetak smjernica za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma

U ovom potpoglavlju sažete su smjernice za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju temeljenog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma. Smjernice obuhvaćaju preporuke za vidljivost 3D prikaza, operabilnost i razumljivost, temeljem analize prethodno provedenih istraživanja. Rezultati su prikazani u tablici .

Tablica 4.1 Tablični prikaz smjernica za razvoj pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju zasnovanog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma

Smjernica	Preporuka	Dodatno objašnjenje	Poglavlje
Smjernica za vidljivost 3D prikaza	Potpomognuti 2D prikaz	Ovim pristupom se zadovoljavaju potrebe svih korisnika, uključujući različite preferencije u prikazu i interakciji. Programski sustav treba biti dizajniran tako da 2D i 3D prikazi međusobno komuniciraju i preslikavaju se	3.33
	Veličina 3D objekta	Za precizne zadatke preporučuje se korištenje manjeg 3D objekta s omjerom 1:0,5 prema virtualnoj ruci korisnika kako bi se poboljšala preciznost. Za zadatke koji zahtijevaju brzu interakciju preporučuje se korištenje omjera 1:1 kako bi se osigurala ravnoteža između izazova i sposobnosti korisnika pri izvođenju interakcija.	2.3.1
	Prilagodba veličine 3D objekta	Ako je standardna veličina objekta predstavljena s vrijednošću 1, korisnicima bi se trebala omogućiti promjena veličine objekta u rasponu od 0,50 (što znači smanjenje na 50% svoje početne veličine) do 2,00 (što znači povećanje na 200% svoje početne veličine).	3.3.3.
	Početna veličina 3D objekta	Početna veličina objekta treba biti postavljena na 1,5 (početna veličina objekta bi trebala biti 150% svoje veličine u 3D virtualnom okruženju).	3.3.3.
	Mogućnost odabira	Crna boja trebala bi biti zadana opcija. Boja	3.3.3.

	boje pozadine	pozadine bi trebala biti jednobojna, po mogućnosti s prikazima na toj pozadini jarkih boja ako za to postoji mogućnost, pri čemu kontrast 3D objekta i pozadine mora biti minimalno 1:7.	
	Opcija poboljšanja vizualizacije trodimenzionalnosti objekta	Ova prilagodba postiže se korištenjem mape normala koja simulira detalje površine objekta koristeći RGB informacije za predstavljanje x, y i z osi u 3D prostoru.	3.3.4
Smjernice za operabilnost	Prisustvo distraktora	Dizajniranje sučelja bez distraktora preporučuje se kako bi se minimizirale smetnje prilikom 3D interakcije, omogućujući korisnicima fokusirano i nesmetano upravljanje 3D objektima. U situacijama gdje se želi povećati angažman korisnika, uključivanje određenih ometajućih elemenata može biti korisno jer se time mogu potaknuti korisnici na interakciju s objektima, čime se povećava njihova uključenost i interes	2.3.3.
	Implementacija 2D metoda interakcije	Implementacija 2D metoda interakcije, poput klizača i gumba, igra važnu ulogu u upravljanju 3D objektima. Ove interakcije omogućuju precizniju i efikasniju manipulaciju, budući da su intuitivnije i pristupačnije za korisnike.	3.3.2.
Smjernice za razumljivost	Implementacija opcije za promjenu klizača u gumba	Opcija promjene klizača u gumba omogućava korisnicima lakšu i intuitivniju interakciju, smanjujući potencijalnu frustraciju i povećavajući efikasnost prilikom interakcije.	3.3.2.
	Upravljanje animacijama	Početno stanje animacija treba biti isključeno, dok bi korisnici trebali imati opciju uključivanja animacija prema potrebi.	3.3.3.
	Omogućiti okruženje u kojem mogu učiti i svladavati 3D interakcije	Preporuka je da se implementira demo razina unutar programskog sustava gdje će korisnici učiti o interakcijama.	3.3.1.

5. Zaključak i budući rad

Upotreba vizualizacijskih tehnologija, osobito holograma, u obrazovanju donosi brojne prednosti, omogućujući učenicima učinkovitije usvajanje složenih koncepata kroz interaktivne i praktične pristupe. Tehnologije poput proširene stvarnosti, virtualne stvarnosti i holograma omogućuju dublje razumijevanje specifičnih obrazovnih sadržaja, potičući aktivno sudjelovanje učenika i olakšavajući vizualizaciju apstraktnih pojmova. Ove tehnologije posebno su korisne učenicima s teškoćama jer privlače njihov interes i pomažu im u boljem razumijevanju sadržaja kroz interaktivne i vizualno privlačne 3D objekte. S obzirom na to da su interaktivnost i pristupačnost ključne značajke iskustva učenja u tradicionalnim i virtualnim okruženjima, bilo je potrebno osmisliti rješenje koje svim učenicima nudi jednaku mogućnost korištenja programskih sustava za edukaciju.

U ovom doktorskom radu definirani su parametri pristupačnosti zasnovani na vrednovanju trodimenzijskih korisničkih interakcija u edukacijskim programskim sustavima. Analizirani su parametri poput veličine objekta, prisustva distraktora, intuitivnosti korištenja korisničkog sučelja te veličine i udaljenosti elemenata za interakciju, pri čemu su rezultati ukazali na preferencije korisnika i važnost prilagodbe sučelja kako bi se osigurala pristupačnost i učinkovitost 3D interakcija. Također, kako bi se povećala pristupačnost, definirane su prilagodbe trodimenzijskog prikaza i interakcija koji je nazvan potpomognuti prikaz 3D objekata. Uvođenjem potpomognutog prikaza 3D objekta, omogućava se upotreba u stvarnom vremenu i za korisnike koji imaju poteškoća u percepciji 3D prikaza ili 3D interakcija. Ovi rezultati poslužili su kao temelj za specifikaciju konceptualnog modela i smjernica za razvoj

pristupačnoga programskoga sustava za edukaciju temeljenog na tehnologijama proširene stvarnosti i piramidalnog holograma.

Istraživanja su pokazala kako je korisnicima potrebno osigurati okruženje koje im omogućuje učinkovito učenje i svladavanje 3D interakcija. To uključuje detaljne upute, smjernice i povratne informacije koje olakšavaju razumijevanje i primjenu 3D interakcija. Trenutno ne postoje standardizirane smjernice ni upute za podučavanje korisnika 3D interakcijama. Razvijanje učinkovitih metoda i alata za edukaciju u području 3D interakcija moglo bi značajno unaprijediti korisničko iskustvo i primjenu 3D tehnologija u različitim kontekstima. Ovo istraživanje bi se moglo fokusirati na identifikaciju najboljih praksi, razvoj edukacijskih materijala i evaluaciju njihovog utjecaja na učenje i korisničku efikasnost.

Prilagodba 3D interakcija i 3D prikaza pokazala je značajan potencijal za unapređenje pristupačnosti i učinkovitosti programskih sustava temeljenih na vizualizacijskim tehnologijama. Razvijanje automatiziranih metoda koje uključuju prilagođavanje složenosti interakcija, prilagodbu korisničkog sučelja te modifikaciju 3D prikaza prema individualnim potrebama korisnika predstavlja inovativno rješenje koje još nije dovoljno istraženo. Takav pristup mogao bi osigurati optimalno iskustvo za sve korisnike, bez obzira na njihove vještine i teškoće.

U budućem radu planira se detaljno adresirati ograničenja uočena tijekom istraživanja provedenih u ovoj doktorskoj disertaciji. Korištenje specifične sklopovske opreme, koja je zahtijevala individualni pristup svakom ispitaniku, rezultiralo je ograničenim brojem sudionika i kraćim vremenom istraživanja. U budućnosti, planira se uključivanje većeg uzorka ispitanika, što će omogućiti pouzdanije i preciznije rezultate, posebno za ispitanike s teškoćama. Nadalje, buduće istraživanje usmjerit će se na analizu utjecaja različitih sklopovskih parametara, poput rezolucije i specifikacija monitora, koji su se pokazali izazovnim u prikazu 3D objekata. Također, u obzir će se uzeti ambijentalni uvjeti, poput osvjetljenja, koji su značajno utjecali na kvalitetu 3D prikaza, a dosad nisu bili uključeni kao parametar istraživanja.

Literatura

- [1] N. W. Kim, S. C. Joyner, A. Riegelhuth, and Y. Kim, “Accessible Visualization: Design Space, Opportunities, and Challenges,” *Computer Graphics Forum*, vol. 40, no. 3, pp. 173–188, 2021, doi: 10.1111/cgf.14298.
- [2] Kešelj, A., Žubrinić, K., Miličević, M., Kuzman, M. “An Overview of 3D Holographic Visualization Technologies and Their Applications in Education”, 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO), 2023., doi: 10.23919/MIPRO57284.2023.10159973
- [3] S. Dineva, “The importance of visualization in e-learning courses,” *dalam The 14 International Conference on Virtual Learning ICVL*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [4] N. M. M. Barkhaya and N. D. A. Halim, “A review of application of 3D hologram in education: A metaanalysis,” *2016 IEEE 8th International Conference on Engineering Education: Enhancing Engineering Education Through Academia-Industry Collaboration, ICEED 2016*, pp. 257–260, 2017., doi: 10.1109/ICEED.2016.7856083.
- [5] Y. Zhao *et al.*, “Metaverse: Perspectives from graphics, interactions and visualization,” *Visual Informatics*, vol. 6, no. 1. Elsevier B.V., pp. 56–67, Mar. 01, 2022. doi: 10.1016/j.visinf.2022.03.002.
- [6] B. Y. Yenioglu, S. Yenioglu, K. Sayar, and F. Ergulec, “Using Augmented Reality Based Intervention to Teach Science to Students With Learning Disabilities,” *Journal of Special Education Technology*, Jun. 2023, doi: 10.1177/01626434231184829.
- [7] F. Alebeisat, H. Altarawneh, Z. T. Alhalhouli, A. Qatawneh, and M. Almahasne, “The Impact of Human and Computer Interaction on eLearning Quality,” *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 16, no. 4, pp. 58–69, 2022, doi: 10.3991/ijim.v16i04.27309.

- [8] F. A. Fernandes and C. M. L. Werner, "A Scoping Review of the Metaverse for Software Engineering Education: Overview, Challenges, and Opportunities," *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality*, vol. 31, pp. 107–146, Dec. 2022, doi: 10.1162/pres_a_00371.
- [9] D. M. Elmahal, A. S. Ahmad, A. T. Alomaier, R. F. Abdlfatah, and D. M. Hussein, "Comparative study between hologram technology and augmented reality," *Journal of Information Technology Management*, vol. 12, no. 2, pp. 90–106, 2020, doi: 10.22059/JITM.2020.75794.
- [10] N. Ali, S. Ullah, and Z. Musa, "The Effect of List-Liner-Based Interaction Technique in a 3D Interactive Virtual Biological Learning Environment," pp. 297–317, 2020, doi: 10.4018/978-1-7998-2521-0.ch014.
- [11] Alharthi, M. A. (2023)., "The Effectiveness of Virtual Classrooms as an Alternative to Traditional Classrooms during the Covid-19 pandemic: Problems and Solutions", *Life Sci. J.*, 18, 24-32. 2023.
- [12] S. H. Halili, N. H. A. Rahman, and R. A. Razak, "Traditional versus virtual learning: How engaged are the students in learning English literature?," *Indonesian Journal of Applied Linguistics*, vol. 8, no. 1, pp. 79–90, 2018, doi: 10.17509/ijal.v8i1.11467.
- [13] A. N. Cahyono and M. Asikin, "Hybrid learning in mathematics education: How can it work?," *J Phys Conf Ser*, vol. 1321, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1321/3/032006.
- [14] D. Sonntag, G. Albuquerque, M. Magnor, and O. Bodensiek, "Hybrid learning environments by data-driven augmented reality," *Procedia Manuf*, vol. 31, pp. 32–37, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.03.006.
- [15] M. Teófilo, J. Nascimento, J. Santos, Y. Albuquerque, A. L. Souza, and D. Nogueira, "Bringing basic accessibility features to virtual reality context," *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, vol. 2016-July, pp. 293–294, 2016, doi: 10.1109/VR.2016.7504769.
- [16] M. Pandžić, Igor Sunday; Pejša, Tomisla ; Matković, Krešimir; Benko, Hrvoje; Čereković, Aleksandra; Matijašević, *Virtualna okruženja: Interaktivna 3D grafika i njene primjene*. 2011.
- [17] T. Blum, V. Kleeberger, C. Bichlmeier, and N. Navab, "Miracle: An augmented reality magic mirror system for anatomy education," *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, pp. 115–116, 2012, doi: 10.1109/VR.2012.6180909.
- [18] W. Si, X. Liao, Q. Wang, and P. A. Heng, "Augmented Reality-Based Personalized Virtual Operative Anatomy for Neurosurgical Guidance and Training," *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings*, pp. 683–684, 2018, doi: 10.1109/VR.2018.8446450.

- [19] A. Heather, T. Chinnah, and V. Devaraj, "The Use of Virtual and Augmented Reality in Anatomy Teaching," *MedEdPublish*, vol. 8, no. 2, 2019, doi: 10.15694/mep.2019.000077.1.
- [20] D. Eckhoff, C. Sandor, D. Kalkoten, U. Eck, C. Lins, and A. Hein, "TutAR: Semi-Automatic Generation of Augmented Reality Tutorials for Medical Education," *Adjunct Proceedings - 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2018*, pp. 430–431, 2018, doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00131.
- [21] P. Moll-Khosrawi, A. Falb, H. Pinnschmidt, C. Zöllner, and M. Issleib, "Virtual reality as a teaching method for resuscitation training in undergraduate first year medical students during COVID-19 pandemic: a randomised controlled trial," *BMC Med Educ*, vol. 22, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12909-022-03533-1.
- [22] M. D. Vles, N. C. O. Terng, K. Zijlstra, M. A. M. Mureau, and E. M. L. Corten, "Virtual and augmented reality for preoperative planning in plastic surgical procedures: A systematic review," *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*, vol. 73, no. 11. Churchill Livingstone, pp. 1951–1959, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.bjps.2020.05.081.
- [23] F. M. Dinis, A. S. Guimaraes, B. R. Carvalho, and J. P. P. Martins, "Virtual and augmented reality game-based applications to civil engineering education," *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, no. April, pp. 1683–1688, 2017, doi: 10.1109/EDUCON.2017.7943075.
- [24] H. Chen, K. Feng, C. Mo, S. Cheng, Z. Guo, and Y. Huang, "Application of augmented reality in engineering graphics education," *ITME 2011 - Proceedings: 2011 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education*, vol. 2, pp. 362–365, 2011, doi: 10.1109/ITiME.2011.6132125.
- [25] N. Kommera, F. Kaleem, and S. M. S. Harooni, "Smart augmented reality glasses in cybersecurity and forensic education," *IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics: Cybersecurity and Big Data, ISI 2016*, pp. 279–281, 2016, doi: 10.1109/ISI.2016.7745489.
- [26] S. C.-Y. Yuen, G. Yaoyuneyong, and E. Johnson, "Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education," *Journal of Educational Technology Development and Exchange*, vol. 4, no. 1, 2011, doi: 10.18785/jetde.0401.10.
- [27] A. Kešelj, I. Topolovac, M. Kačić-Barišić, M. Burum, and Ž. Car, "Design and Evaluation of an Accessible Mobile AR Application for Learning about Geometry," *Proceedings of the 16th International Conference on Telecommunications, ConTEL 2021*, vol. 1, pp. 49–53, 2021, doi: 10.23919/ConTEL52528.2021.9495975.
- [28] A. Elmorshidy, "Holographic Projection Technology: The World is Changing," vol. 2, no. 2, 2010. Dostupno na: <http://arxiv.org/abs/1006.0846>

- [29] A. Jeong, T. H. Jeong, “What Are the Main Types of Holograms?”, dostupno na: <https://www.integraf.com/resources/articles/a-main-types-of-holograms>, pristup: 1. veljače 2024.
- [30] J. D. Trolinger, “The language of holography,” *Light: Advanced Manufacturing*, vol. 2, no. 4. Ji Hua Laboratory, pp. 473–481, 2021. doi: 10.37188/lam.2021.034.
- [31] *Optical Holography-Materials, Theory and Applications*. Elsevier, 2020. doi: 10.1016/C2017-0-03402-X.
- [32] R. Zhao *et al.*, “Multichannel vectorial holographic display and encryption,” *Light Sci Appl*, vol. 7, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41377-018-0091-0.
- [33] D. Blinder, T. Birnbaum, T. Ito, and T. Shimobaba, “The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display,” *Light: Advanced Manufacturing*, vol. 3, no. 3. Ji Hua Laboratory, pp. 572–600, 2022. doi: 10.37188/lam.2022.035.
- [34] I. Gonsher, P. Feng, T. McArn, and A. Christenson, “Designing for Wide Adoption: An Inexpensive and Accessible Extended Reality (XR) Device,” 2023, pp. 185–191. doi: 10.1007/978-3-031-36004-6_25.
- [35] P. Kalansooriya, A. Marasinghe, and K. M. D. N. Bandara, “Assessing the Applicability of 3D Holographic Technology as an Enhanced Technology for Distance Learning,” *IAFOR Journal of Education*, vol. 3, no. SE, 2015, doi: 10.22492/ije.3.se.03.
- [36] A. H. Awad and F. F. Kharbat, “The first design of a smart hologram for teaching,” *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ICASET.2018.8376931.
- [37] J. N. A. Silva, M. Southworth, C. Raptis, and J. Silva, “Emerging Applications of Virtual Reality in Cardiovascular Medicine,” *JACC: Basic to Translational Science*, vol. 3, no. 3. Elsevier Inc, pp. 420–430, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.jacbts.2017.11.009.
- [38] T. Thap, Y. Nam, H. W. Chung, and J. Lee, “Simplified 3D Hologram Heart Activity Monitoring Using a Smartphone,” *Proceedings - 2015 9th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS 2015*, pp. 447–451, 2015, doi: 10.1109/IMIS.2015.87.
- [39] M. Yamaguchi and R. Higashida, “Holographic 3D Touch Sensing Display,” in *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting*, Washington, D.C.: OSA, 2015, p. DM3A.1. doi: 10.1364/DH.2015.DM3A.1.
- [40] V. Cozzolino, O. Moroz, and A. Y. Ding, “The virtual factory: Hologram-enabled control and monitoring of industrial iot devices,” in *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR 2018*,

Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2019, pp. 120–123. doi: 10.1109/AIVR.2018.00024.

- [41] K. M. Grasse, E. F. Melcer, M. Kreminski, N. Junius, J. Ryan, and N. Wardrip-Fruin, “Academical: A Choice-Based Interactive Storytelling Game for Enhancing Moral Reasoning, Knowledge, and Attitudes in Responsible Conduct of Research,” 2022, pp. 173–189. doi: 10.1007/978-3-030-81538-7_12.
- [42] A. G. Picciano, C. D. Dziuban, C. R. Graham, and P. D. Moskal, *Blended Learning*. New York: Routledge, 2021. doi: 10.4324/9781003037736.
- [43] D. Bachmann, F. Weichert, and G. Rinkeauer, “Review of three-dimensional human-computer interaction with focus on the leap motion controller,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 7. MDPI AG, Jul. 07, 2018. doi: 10.3390/s18072194.
- [44] J. J. LaViola Jr., E. Kruijff, R. P. McMahan, D. A. Bowman, and I. Poipyrev, “3D User Interfaces: Theory and Practice Second Edition.”, 2017.
- [45] Y. LI, J. HUANG, F. TIAN, H. A. WANG, and G. Z. DAI, “Gesture interaction in virtual reality,” *Virtual Reality and Intelligent Hardware*, vol. 1, no. 1, pp. 84–112, 2019, doi: 10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006.
- [46] F. Ababsa, J. He, and J. R. Chardonnet, “Combining hololens and leap-motion for free hand-based 3d interaction in mr environments,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 12242 LNCS, pp. 315–327, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-58465-8_24.
- [47] R. Li, Z. Liu, and J. Tan, “A survey on 3D hand pose estimation: Cameras, methods, and datasets,” *Pattern Recognit*, vol. 93, pp. 251–272, 2019, doi: 10.1016/j.patcog.2019.04.026.
- [48] A. S. Murugana, A. Behzada, E. Kim, J. Chung, and D. Jung, “Development of webcam-based hand tracking for virtual reality interaction” *Fifth International Conference on Image, Video Processing, and Artificial Intelligence (IVPAI 2023)*, R. Su and H. Liu, Eds., SPIE, Mar. 2024, p. 20. doi: 10.1117/12.3023798.
- [49] C. V. Siang *et al.*, “Interactive holographic application using augmented reality EduCard and 3D holographic pyramid for interactive and immersive learning” *2017 IEEE Conference on e-Learning, e-Management and e-Services, IC3e 2017*, pp. 73–78, 2018, doi: 10.1109/IC3e.2017.8409241.
- [50] Raees, M., Ullah, S., “LPI: learn postures for interactions: An open posture-based system for interactions in virtual environments” 2021. *Machine Vision and Applications*, 32(6). <https://doi.org/10.1007/s00138-021-01235-0>

- [51] S. S. Rautaray and A. Agrawal, "Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: a survey," *Artif Intell Rev*, vol. 43, no. 1, pp. 1–54, 2015, doi: 10.1007/s10462-012-9356-9.
- [52] J. Aliprantis, M. Konstantakis, R. Nikopoulou, P. Mylonas, and G. Caridakis, "Natural interaction in augmented reality context," *CEUR Workshop Proc*, vol. 2320, pp. 50–61, 2019.
- [53] D. H. Mortensen, "Natural User Interfaces – What does it mean & how to design user interfaces that feel naturally." Dostupno: <https://www.interaction-design.org/literature/article/natural-user-interfaces-what-are-they-and-how-do-you-design-user-interfaces-that-feel-natural>, pristup: 23. kolovoz 2023
- [54] J. Blake, "Natural User Interface in .NET", Manning Publications, 2011.
- [55] Ž. Car, "Ergonomija računalne opreme," *Nastavni materijali*, 2020.
- [56] L. A. Weaver, E. Bingham, K. Luo, A. P. Juárez, and J. L. Taylor, "What do we really mean by 'inclusion?': The importance of terminology when discussing approaches to community engagement," *Autism*, vol. 25, no. 8, pp. 2149–2151, 2021, doi: 10.1177/13623613211046688.
- [57] K. P. Vinumol, A. Chowdhury, R. Kambam, and V. Muralidharan, "Augmented reality based interactive text book: An assistive technology for students with learning disability," *Proceedings - 2013 15th Symposium on Virtual and Augmented Reality, SVR 2013*, pp. 232–235, 2013, doi: 10.1109/SVR.2013.26.
- [58] S. Maidenbaum, S. Abboud, G. Buchs, and A. Amedi, "Blind in a virtual world: Using sensory substitution for generically increasing the accessibility of graphical virtual environments," *2015 IEEE Virtual Reality Conference, VR 2015 - Proceedings*, pp. 233–234, 2015, doi: 10.1109/VR.2015.7223381.
- [59] M. Teófilo, V. F. Lucena, J. Nascimento, T. Miyagawa, and F. MacIel, "Evaluating accessibility features designed for virtual reality context," *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ICCE.2018.8326167.
- [60] J. M. Coughlan and J. Miele, "AR4VI: AR as an Accessibility Tool for People with Visual Impairments," *Adjunct Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2017*, pp. 288–292, 2017, doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.89.
- [61] T. Gupta, M. Sisodia, S. Fazulbhoy, M. Raju, and S. Agrawal, "Improving Accessibility for Dyslexic Impairments using Augmented Reality," *2019 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ICCCI.2019.8822152.

- [62] Ž. Car *et al.*, “Metodologija za razvoj pristupacnih mobilnih programskih rješenja,” Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2020.
- [63] M. Burum, “Implementacija opcija pristupačnosti za korisničke interakcije u proširenoj stvarnosti,” Diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, 2021.
- [64] M. Kačić-Barišić, “Primjena univerzalnog dizajna u edukacijskoj mobilnoj aplikaciji zasnovanoj na tehnologiji proširene stvarnosti,” Diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, 2021.
- [65] “What is Universal Design”, dostupno na: <https://universaldesign.ie/what-is-universal-design/Phone>, pristup: 24. kolovoz 2023.
- [66] I. Galić-Jušić, “Definicija disleksije.” dostupno na: <http://hud.hr/definicije-disleksije/>, pristup: 25. kolovoz 2023
- [67] “Fine Motor Skills - Symptoms, Definition, Description, Common problems.”, dostupno na: <http://www.healthofchildren.com/E-F/Fine-Motor-Skills.html>, pristup: 25. kolovoza 2023.
- [68] A. F. Zimpel, *Trisomy 21: What we can learn from people with Down syndrome*. Vandenhoeck and Ruprecht; Aufl. ed. edition , 2016.
- [69] A. Robert, K. Potter, and L. Frank, “Machine Learning in Website Development: Enhancing User Experience and Personalization”, Computer Science Preprints, Elsevier, 2024. Dostupno: <https://www.researchgate.net/publication/377978420> , Pristup: 1. ožujak 2024.
- [70] Interaction Design Foundation, “What is User Interface (UI) Design?”, dostupno: <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ui-design>, pristup: 4. lipnja 2024.
- [71] M. Sili, M. Garschall, M. Morandell, S. Hanke, and C. Mayer, “Personalization in the user interaction design: Isn’t personalization just the adjustment according to defined user preferences?,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Springer Verlag, 2016, pp. 198–207. doi: 10.1007/978-3-319-39510-4_19.
- [72] H. Abid, M. Malik, A. Ali, A. Mohammad, and U. Mehmood, “Interactive UI for Smartphone/ Web Applications and Impact of Social Networks,” *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 22, no. 3, p. 189, 2022, doi: 10.22937/IJCSNS.2022.22.3.25.
- [73] M. H. Miraz, M. Ali, and P. S. Excell, “Adaptive user interfaces and universal usability through plasticity of user interface design,” *Computer Science Review*, vol. 40. Elsevier Ireland Ltd, May 01, 2021. doi: 10.1016/j.cosrev.2021.100363.
- [74] L. N. AlRawi, “Understanding the Relation between System Usability and End User Performance,” in *2021 2nd International Informatics and Software Engineering*

Conference (IISEC), IEEE, Dec. 2021, pp. 1–6. doi:
10.1109/IISEC54230.2021.9672429.

- [75] R. Kaur and B. Sharma, “Comparative Study for Evaluating the Usability of Web Based Applications,” in *2018 4th International Conference on Computing Sciences (ICCS)*, IEEE, Aug. 2018, pp. 94–97. doi: 10.1109/ICCS.2018.00023.
- [76] S.-F. Wang, “Research on Web Interface barrier-free Design for Elderly People,” in *2020 International Conference on Intelligent Design (ICID)*, IEEE, Dec. 2020, pp. 157–159. doi: 10.1109/ICID52250.2020.00040.
- [77] M. Bakaev and V. Khvorostov, “Case-Based Genetic Optimization of Web User Interfaces,” 2019, pp. 10–25. doi: 10.1007/978-3-030-37487-7_2.
- [78] B. Šumak, S. Brdnik, and M. Pušnik, “Sensors and Artificial Intelligence Methods and Algorithms for Human–Computer Intelligent Interaction: A Systematic Mapping Study,” *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 20, Dec. 2021, doi: 10.3390/s22010020.
- [79] A. Kešelj, M. Miličević, K. Žubrinić, and Ž. Car, “The Application of Deep Learning for the Evaluation of User Interfaces,” *Sensors*, vol. 22, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/s22239336.
- [80] Car, Željka; Rašan, Ivana; Žilak, Matea; Kešelj, Ana; “Metodologija za razvoj pristupačnog sjedišta weba”, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2019.
- [81] E. J. Stocks, “Pairing typefaces within a family & superfamily” dostupno na: https://fonts.google.com/knowledge/choosing_type/pairing_typefaces_within_a_family_superfamily, pristup: 3. svibnja 2024.
- [82] S. Komaić, “Analiza i implementacija interakcija pomoću Leap Motiona u aplikacije razvijene u razvojnom okruženju Unity”, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, 2022.
- [83] M. Goktürk, “Fitts’s Law,” Interaction Design Foundation – IxDF, dostupno na: <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-glossary-of-human-computer-interaction/fitts-s-law>, pristup: 3. lipnja 2024.
- [84] “Interaction Types in Automotive HMI Terminology”, dostupno na : <https://docs.ultraLeap.com/automotive-guidelines/interaction-types.html#>, pristup: 3. lipnja 2024.
- [85] I. Zelentović, “Pregled mogućnosti komunikacije između holograma i mobilne aplikacije na pametnom uređaju”, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, 2024.
- [86] I. Sentić, “Primjena načela univerzalnog dizajna i pristupačnosti u holografsku edukativnu igru”, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, 2024.

- [87] M. Kristić, “Primjena holografske tehnologije u edukativne igre za podizanje svijesti o zaštiti okoliša”, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, 2024.
- [88] In The Hand Ltd, “32feet.NET documentation”, dostupno na: <https://github.com/inthehand/32feet/wiki>, pristup: 1. svibnja 2024
- [89] Allie Brosh, “Json.NET dokumentacija”, dostupno na: <https://www.newtonsoft.com/json/help/html/Introduction.htm>, pristup: 1. svibnja 2024
- [90] N. Rohana Mansor *et al.*, “A Review Survey on the Use Computer Animation in Education,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Sep. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/917/1/012021.
- [91] M. Dindar, I. Kabakçi Yurdakul, and F. Inan Dönmez, “Measuring cognitive load in test items: Static graphics versus animated graphics,” *J Comput Assist Learn*, vol. 31, no. 2, pp. 148–161, Apr. 2015, doi: 10.1111/jcal.12086.
- [92] J. Sweller, P. Ayres, and S. Kalyuga, *Cognitive Load Theory*. New York, NY: Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-8126-4.
- [93] K. Qian, Y. Li, K. Su, and J. Zhang, “A measure-driven method for normal mapping and normal map design of 3D models,” *Multimed Tools Appl*, vol. 77, no. 24, pp. 31969–31989, Dec. 2018, doi: 10.1007/s11042-018-6207-y.
- [94] W3C, “Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2.”, dostupno: <https://www.w3.org/TR/2023/REC-WCAG22-20231005/>, pristup: 5. svibnja 2024

Životopis

Ana Kešelj Dilberović asistentica je na Odjelu za elektrotehniku i računarstvo Sveučilišta u Dubrovniku. Srednjoškolsko obrazovanje završila je 2013. godine u Gimnaziji Dubrovnik. Iste godine upisuje preddiplomski studij na smjeru Primijenjeno/poslovno računarstvo na Odjelu elektrotehnike i računarstva na Sveučilištu u Dubrovniku. Svoju prvostupničku diplomu stekla je 2016. godine te svoje obrazovanje nastavlja na diplomskom studiju Poslovno računarstvo gdje je diplomirala 2018. godine. Od 2018. radi kao asistentica na Odjelu za elektrotehniku i računarstvo na Sveučilištu u Dubrovniku. Od 2019. studira na doktorskom studiju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska. Glavni fokus njenog dokorskog istraživanja je razvoj rješenja temeljenih na suvremenoj informacijsko-komunikacijskoj tehnologiji u cilju poboljšanja kvalitete života osoba s invaliditetom, starijih osoba i djece te implementacija opcija pristupačnosti u novim tehnologijama. Kao članica Laboratorija za asistivnu tehnologiju i potpomognutu komunikaciju ICT-AAC, aktivno je sudjelovala u raznim istraživanjima i projektima.

Kao asistentica sudjeluje na više kolegija prijediplomskog i diplomskog studija Primijenjeno/poslovno računarstvo na Odjelu za elektrotehniku i računarstva Sveučilišta u Dubrovniku. Aktivno sudjeluje u organizaciji i realizaciji događanja i aktivnosti posvećenih popularizaciji STEM-a. Uz to, članica je Informatičkog kluba Futura.

Popis radova

Izvorni znanstveni radovi u indeksiranim časopisima

1. **Kešelj, Ana** ; Miličević, Mario ; Žubrinić, Krunoslav ; Car, Željka, „The Application of Deep Learning for the Evaluation of User Interfaces“, *Sensors*, 22 (2022), 23; 9336, 17. doi: 10.3390/s22239336
2. Mandarić, Katarina; **Kešelj Dilberović, Ana**; Ježić, Gordan, „A Multi-Agent System for Service Provisioning in an Internet-of-Things Smart Space Based on User Preferences“, *Sensors*, 24 (2024), 6; 1764, 23. doi: 10.3390/s24061764

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

1. **Kešelj, Ana** ; Žubrinić, Krunoslav ; Miličević, Mario ; Kuzman, Martin, „An Overview of 3D Holographic Visualization Technologies and Their Applications in Education“, MIPRO conference proceedings. Hrvatska udruga za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku - MIPRO, 2023
2. **Kešelj, Ana**; Bego, Petra; Žubrinić, Krunoslav; Miličević, Mario, „Comparison of Accessibility in EU Public Sector Websites“, Proceedings of the 4th International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2021), 2021. doi: 10.54941/ahfe1001114
3. **Kešelj, Ana**; Topolovac, Iva; Žilak, Mate ; Rašan, Ivana, „The impact of legislation on website accessibility: Croatian case-study“, 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO). 2021. str. 488-493
4. Mihaljević, Ante; **Kešelj, Ana**; Lipovac, Adriana, „Impact of 5G network performance on augmented reality application QoE“, The 29 th international conference on software, telecommunications and computer networks (SoftCOM 2021) / FESB, University of Split (ur.). Split: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2021. str. 200-204
5. **Kešelj, Ana**; Topolovac, Iva; Kačić-Barišić, Magdalena; Burum, Mara; Car, Željka. „Design and evaluation of an accessible mobile AR application for learning about geometry“, 2021 16th International Conference on Telecommunications (ConTEL). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2021. str. 49-54 doi: 10.23919/contel52528.2021.9495975
6. Žilak, Matea; Rašan, Ivana; **Kešelj, Ana**; Car, Željka, „Process Model for Accessible Website User Evaluation“, Smart innovation, systems and technologies, 2020. str. 57-68 doi: 10.1007/978-981-15-5764-4_6
7. Žilak, Matea; **Kešelj, Ana**; Besjedica, Toni, „Accessible Web Prototype Features from Technological Point of View“, MIPRO. 2019. str. 501-506 doi: 10.23919/MIPRO.2019.8757115
8. Miličević, Mario; Žubrinić, Krunoslav; Grbavac, Ivan; **Kešelj, Ana**, „Ensemble Transfer Learning Framework for Vessel Size Estimation from 2D Images“, Advances in Computational Intelligence. IWANN 2019. str. 258-269 doi: 10.1007/978-3-030-20518-8_22

Biography

Ana Kešelj Dilberović is a teaching assistant at the Department of Electrical Engineering and Computing University of Dubrovnik. She graduated from high school in 2013. In the same year, she enrolled in the undergraduate study in Applied/Business Computing at the Department of Electrical Engineering and Computing at the University of Dubrovnik. She received her Bachelor's degree in 2016 and continued her education in graduate study in Business Computing, which she completed in 2018. Since 2018, she has been working as a teaching assistant at the Department of Electrical Engineering and Computing University of Dubrovnik. In 2019, she started her doctoral study at the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb (FER). Her doctoral research primarily focuses on the development of solutions based on modern information and communication technology to improve the quality of life of people with disabilities, the elderly and children, as well as the implementation of accessibility options in new technologies. As a member of the Laboratory for Assistive Technologies and Augmentative and Alternative Communication (ICT-AAC), she has been actively involved in various research and projects.

As a teaching assistant, she teaches several undergraduate and graduate courses in Applied/Business Computing at the Department of Electrical Engineering and Computing at the University of Dubrovnik. She actively participates in organizing and conducting events and activities dedicated to promoting STEM. Additionally, she is a member of the Informatics club FUTURA.