

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGADNJE

Fanika Lukačević

**Utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na
razumijevanje tehničkih rješenja prilikom pregleda
konstrukcije**

Zagreb, 2018./2019.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za konstruiranje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) pod mentorstvom doc.dr.sc. Stanka Škeca te na Zavodu za poslovnu administraciju, tehnologiju i socijalne znanosti Tehničkog sveučilišta Luleå (LTU) pod mentorstvom dr. Petera Törlinda. Rad je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

Popis kratica

CAD	Računalom potpomognuto konstruiranje (<i>eng. Computer Aided Design</i>)
CAVE	Projicirani VS sustavi (<i>eng. Cave Automatic Virtual Environment</i>)
HMD	VS sustavi čiji se zaslone nose na glavi korisnika (<i>eng. Head-Mounted Display</i>)
IVE	Imerzivno virtualno okruženje (<i>eng. Immersive Virtual Environment</i>)
m	Medijan
MRT	Test mentalnih rotacija (<i>eng. Mental Rotations Test</i>)
nIVE	Neimerzivno virtualno okruženje (<i>eng. non-Immersive Virtual Environment</i>)
PDS	Tehnička specifikacija (<i>eng. Product Design Specification</i>)
PEQ	Upitnik o prijašnjem iskustvu (<i>eng. Prior Experience Questionnaire</i>)
PQ	Upitnik o prisutnosti (<i>eng. Presence Questionnaire</i>)
Std	Standardna devijacija
VS	Virtualna stvarnost (<i>eng. Virtual Reality</i>)

Sadržaj

Popis kratica	3
Sadržaj	4
Popis slika	6
Popis tablica	8
1 Uvod i motivacija	1
2 Ciljevi rada i istraživačka pitanja	3
3 Pregled literature	4
3.1 Virtualna okruženja	4
3.2 Vizualizacija proizvoda	5
3.3 Vizualna percepcija i prostorno predočavanje prikaza	6
3.4 Pregled konstrukcije	6
3.4.1 Razumijevanje konstrukcije u neimerzivnim okruženjima	7
3.5 Pregledavanje konstrukcije korištenjem tehnologije virtualne stvarnosti	7
4 Metodologija istraživanja	9
4.1 Odabir konstrukcije	9
4.2 Zadaci i pitanja	13
4.3 Upitnici i test mentalnih rotacija	13
4.3.1 Upitnik o prijašnjem iskustvu	14
4.3.2 Upitnik o prisutnosti u virtualnom okruženju (PQ)	14
4.3.3 Test mentalnih rotacija (MRT)	14
4.4 Ispitanici	15
4.5 Tijek eksperimenta	16
5 Analiza prikupljenih podataka	17
5.1 Podaci o ispitanicima i upitniku o prijašnjem iskustvu	17
5.1.1 Test mentalnih rotacija	20
5.2 Upitnik o prisutnosti u virtualnom okruženju (PQ)	21
5.3 Pregled skutera	23

5.3.1	Zadatak 1	24
5.3.2	Zadatak 2	28
5.3.3	Zadatak 3	32
5.3.4	Zadatak 4	37
5.3.5	Zadatak 5	38
5.3.6	Zadatak 6	42
5.3.7	Zadatak 7	43
5.3.8	Zadatak 8	47
6	Rasprava	51
6.1	Razumijevanje mehanizama	51
6.2	Pronalazak konstrukcijskih nedostataka	52
6.3	Prostorno razumijevanje dimenzija	54
6.4	Ograničenja	56
7	Zaključak	57
8	Zahvale	58
9	Literatura	59
10	Sažetak	65
11	Summary	66
12	Dodatak	66
12.1	Zadaci i pitanja	67

Popis slika

Slika 1. Eksperimentalna metodologija.....	9
Slika 2. Skuter u položaju za vožnju	10
Slika 3. Skuter u sklopljenom položaju.....	10
Slika 4. Model skutera u Siemens NX-u	11
Slika 5. Model skutera u VRED-u.....	12
Slika 6. Prostorija s eksperimentalnim postavom.....	12
Slika 7. Primjer zadatka MRT-a.....	15
Slika 8. Tijek eksperimenta	16
Slika 9. Distribucija ispitanika po godini starosti.....	17
Slika 10. Područje studija ispitanika	18
Slika 11. Broj pregleda konstrukcije	18
Slika 12. Iskustvo korištenja CAD alata.....	19
Slika 13. Vještine korištenja CAD alata.....	19
Slika 14. Distribucija ispitanika po vremenu korištenja VS tehnologija.....	19
Slika 15. Broj bodova MRT-a	20
Slika 16. Dijagram pravokutnika MRT-a.....	20
Slika 17. Broj bodova MRT-a u IVE.....	21
Slika 18. Broj bodova MRT-a u nIVE.....	21
Slika 19. Dijagram pravokutnika za prisutnost	22
Slika 20. Histogram prisutnosti u IVE	22
Slika 21. Histogram prisutnosti u nIVE	22
Slika 22. Ispitanik procjenjuje dimenziju skutera u IVE-u	23
Slika 23. Ispitanik pregledava grešku mehanizma u IVE-u	23
Slika 24. Broj prepoznatih mehanizama za podešavanje	24
Slika 25. Broj točno prepoznatih mehanizama u IVE	25
Slika 26. Broj točno prepoznatih mehanizama u nIVE	25
Slika 27. Dijagram pravokutnika za broj točno prepoznatih mehanizama.....	25
Slika 28. Dijagram pravokutnika sigurnosti u odgovor za zadatak 1	26
Slika 29. Regresijska analiza zavisnosti broja prepoznatih mehanizama i sigurnosti u odgovor.....	26
Slika 30. Broj netočno prepoznatih mehanizama u nIVE	27
Slika 31. Broj netočno prepoznatih mehanizama u IVE	27
Slika 32. Dijagram pravokutnika broja netočno prepoznatih mehanizama.....	27
Slika 33. Regresijska analiza zavisnosti broja netočno prepoznatih mehanizama i sigurnosti u odgovor	28
Slika 34. Regresijska analiza zavisnosti broja točno prepoznatih mehanizama i prisutnosti	28

Slika 35. Broj točno prepoznatih koraka sklapanja	29
Slika 36. Dijagram pravokutnika broja točno prepoznatih koraka sklapanja	29
Slika 37. Regresijska analiza zavisnosti broja točno prepoznatih koraka sklapanja i sigurnosti u odgovor	30
Slika 38. Regresijska analiza zavisnosti broja točno prepoznatih koraka sklapanja i rezultata MRT-a	31
Slika 39. Regresijska analiza zavisnosti broja prepoznatih koraka sklapanja i prisutnosti	31
Slika 40. Dijagram pravokutnika pogreške u procjeni dimenzija sklopljenoga skutera.....	32
Slika 41. Distribucija pogreška u procjeni visine u IVE	33
Slika 42. Distribucija pogreška u procjeni visine u nIVE	33
Slika 43. Distribucija pogreške u procjeni duljine u IVE.....	34
Slika 44. Distribucija pogreške u procjeni duljine u nVE	34
Slika 45. Distribucija pogreške u procjeni širine u nIVE	34
Slika 46. Distribucija pogreške u procjeni širine u IVE	34
Slika 47. Odnos dimenzija skutera	35
Slika 48. Greške funkcionalnosti.....	37
Slika 49. Distribucija grešaka funkcionalnosti	38
Slika 50. Distribucija prepoznatih nedostataka	39
Slika 51. Broj prepoznatih dimenzijskih nedostataka	40
Slika 52. Model skutera s označenom dimenzijom duljine držača nogu.....	42
Slika 53. Dijagram pravokutnika za pogrešku procjene visine držača nogu.....	44
Slika 54. Distribucija pogreške u procjeni visine u nIVE	44
Slika 55. Distribucija pogreške u procjeni visine u IVE	44
Slika 56. Procjena horizontalne udaljenosti u IVE.....	45
Slika 57. Procjena horizontalne udaljenosti u nIVE.....	45
Slika 58. Dijagram pravokutnika za pogrešku u procjeni horizontalne duljine	46
Slika 59. Udaljenost naslona i kraja držača nogu.....	46
Slika 60. Udaljenost naslona i početka držača nogu	46
Slika 61. Dijagram pravokutnika za horizontalnu udaljenost.....	48
Slika 62. Dijagram pravokutnika za visinu šaka	48
Slika 63. Pogreška u procjeni visine šaka u nIVE.....	49
Slika 64. Pogreška u procjeni visine šaka u IVE.....	49
Slika 65. Distribucija horizontalne udaljenosti u nIVE.....	49
Slika 66. Distribucija horizontalne udaljenosti u IVE.....	49
Slika 67. Visina upravljača.....	50
Slika 68. Udaljenost naslona sjedala i upravljača.....	50

Popis tablica

Tablica 1. Tablica broja ispitanika	15
Tablica 2. Vrijeme rješavanja zadataka.....	16
Tablica 3. Pogreška procjene odnosa dimenzija.....	36

1 Uvod i motivacija

Pregled konstrukcije (*eng. Design review*) aktivnost je unutar razvoja proizvoda, čiji je cilj provjeriti konstrukciju s obzirom na tehničke značajke elemenata konstrukcije [1] i troškove razvoja [2]. Uobičajeno se provode najmanje tri pregleda konstrukcije; pregled nakon koncipiranja, oblikovanja i detaljiranja [1]. Tehnički se pregled konstrukcije temelji na usporedbi konstrukcije s tehničkom specifikacijom (*eng. Product Design Specification, PDS*) [1], [2] proizašlom iz faze definiranja problema [3]. Tehnička specifikacija referentni je dokument kojim se definiraju ograničenja, radno okruženje [4], životni vijek, kvaliteta, troškovi i zahtjevi proizvoda [1], [2]. Mijenja se tijekom procesa te je sastavni dio prijelaza iz jedne razvojne faze u drugu, gdje služi kao izlazni dokument jedne faze i ulazni dokument u sljedeću fazu [2]. Tijekom pregleda konstrukcije, identificiraju se problemi [3], određuju sljedeći koraci te se pokreću radnje nužne za uklanjanje identificiranih problematičnih područja [1] i implementaciju odluka [3]. Pri tome je, za pregled konstrukcije, nužno njezino razumijevanje [5], [6].

Prikaz konstrukcije ima značajan utjecaj na razumijevanje iste [6], a odabir prikaza često se zasniva na iskustvu inženjera i postojećoj infrastrukturi, uslijed manjka smjernica u literaturi [7]. Konstrukcija može biti prikazana 2D crtežima, 3D modelima ili fizičkim prototipovima [8]. Danas se konstrukcije najčešće prikazuju u obliku virtualnih 3D modela [9] korištenjem 3D CAD (*eng. Computer Aided Design*) alata [6]. Pri tome je uobičajeno koristiti dvodimenzionalna sučelja; zaslon monitora za vizualizaciju te tipkovnicu i računalni miš [9] za upravljanje virtualnim modelom. Dvodimenzionalnost sučelja jedan je od nedostataka 3D CAD alata [10], koji utječe na smanjenje realističnosti prikaza [8] i učinkovitosti njihova korištenja [11]. Kako bi mogli percipirati prikazane modele [9], korisnici moraju imati razvijenu sposobnost prostornoga predočavanja [12], odnosno, moraju moći procesuirati 2D prikaz modela te ga percipirati kao 3D objekt [8], [13]. Za razumijevanje konstrukcije, potrebno je razumijevanje unutarnjih (orijentacija i razmještaj elemenata, veličina, rotacija i translacija, skaliranje) i vanjskih (položaj u odnosu na druge objekte ili reference) značajki objekta i prostora [12]. Pri tome vizualna percepcija [5] ima velik utjecaj na potrebne vještine prostornoga razumijevanja; unutarnja statička (razdioba objekta), unutarnja dinamička (prostorno predočavanje i mentalna rotacija), vanjska statička (prostorna percepcija) i vanjska dinamička (zauzimanje različite perspektive) [12]. Pozitivnim djelovanjem na vizualnu percepciju i prostorno predočavanje, unaprijedila bi se korisnost informacija sadržanih u virtualnom modelu [10] te učinkovitost korisnika [14].

Tehnologija virtualne stvarnosti (*eng. Virtual Reality*), upotrebom stereoskopskoga prikaza [15] i multimodalnosti [16], omogućuje međudjelovanje s 3D virtualnim modelom unutar virtualnoga okruženja [17]. Na taj se način smanjuje kognitivni napor nužan za vizualnu percepciju prostornih informacija [5] i omogućuje usmjeravanje pažnje na analizu proizvoda prikazanoga virtualnim modelom [18]. Upotreba VS tehnologija u području je konstruiranja poznata nekoliko desetljeća [15]. Napretkom tehnologije, razvijeni su VS sustavi znatno niže cijene te manjih prostornih zahtjeva [16], čime su VS tehnologije postale dostupnije većem broju korisnika i primjenjive za svakodnevno korištenje, a upravo je pregled konstrukcije jedna od često spominjanih primjena VS tehnologija u razvoju proizvoda [16]. Međutim, dosadašnja istraživanja primjene VS tehnologije za pregledavanje konstrukcije ne ispituju njezin utjecaj na kognitivne procese korisnika i razumijevanje konstrukcije, nego su usmjerene na učinkovitost i izvedbu pregleda [5].

Kako bi korištenje VS tehnologije postalo uobičajeno za pregled konstrukcije u realnim industrijskim okruženjima, nužno je detaljnije ispitati i odrediti njezin utjecaj na kognitivne procese korisnika [10], [14], s naglaskom na vizualnu percepciju i [5] i prostorno predočavanje [12]. S tim se motivacijom u ovom radu nastoji istražiti utjecaj VS tehnologije, u odnosu na uobičajenu tehnologiju (zaslon računala, tipkovnica i računalni miš), na razumijevanje virtualnoga modela konstrukcije. Pri tome je naglasak na razumijevanju mehanizama, prostornom razumijevanju dimenzija i prepoznavanju konstrukcijskih grešaka prilikom tehničkoga pregleda konstrukcije nakon faze koncipiranja.

2 Ciljevi rada i istraživačka pitanja

Cilj je ovoga rada istražiti utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na razumijevanje tehničkih rješenja, kada se pregled konstrukcije vrši korištenjem VS tehnologije u odnosu na uobičajeno pregledavanje konstrukcije korištenjem računalnoga monitora, tipkovnice i miša. Na temelju pregleda literature i dosadašnjih istraživanja (Poglavlje 3), postavljena su sljedeća istraživačka pitanja:

1. Kakav je utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na razumijevanje mehanizama?
2. Kakav je utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na pronalazak konstrukcijskih nedostataka?
3. Kakav je utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na prostorno razumijevanje dimenzija?

Prve tri hipoteze proizašle su izravno iz istraživačkih pitanja. S ciljem dodatnoga opisa i poboljšanja razumijevanja rezultata, dodatno su postavljene Hipoteza IV i Hipoteza V.

Hipoteza I: imerzivnost virtualnoga okruženja imat će pozitivan utjecaj na razumijevanje mehanizama.

Hipoteza II: imerzivnost virtualnoga okruženja imat će pozitivan utjecaj na pronalazak konstrukcijskih nedostataka.

Hipoteza III: imerzivnost virtualnoga okruženja imat će pozitivan utjecaj na prostorno razumijevanje dimenzija.

Hipoteza IV: veća prisutnost u virtualnom okruženju imat će pozitivan utjecaj na razumijevanje mehanizama, neovisno o imerzivnosti okruženja.

Hipoteza V: viši ostvareni rezultat testa mentalnih rotacija imat će pozitivan utjecaj na razumijevanje mehanizama u onim zadacima u kojima je mentalna rotacija nužna za njihovo rješavanje (zadatak 2), neovisno o imerzivnosti okruženja.

3 Pregled literature

Pregled literature počinje definicijom virtualne stvarnosti i virtualnih okruženja. U nastavku su objašnjeni načini vizualizacije proizvoda te njihov utjecaj na vizualnu percepciju i prostorno predočavanje korisnika. Nakon toga, definiran je pregled konstrukcije kao aktivnost razvoja proizvoda te dan pregled studija koje su provele istraživanja vezana uz pregled konstrukcija u različitim okruženjima i u okruženjima različite imerzivnosti.

3.1 Virtualna okruženja

Virtualna se stvarnost, s obzirom na iskustvo koje pruža korisniku [5], definira pojmom prisutnosti u virtualnom okruženju (*eng. presence*) [19]. Odnosi se na subjektivni doživljaj okruženja u kojem se korisnik nalazi [19], zasnovan na interpretaciji informacija primljenih podražajem osjetila [10]. Pri tome, virtualnim se okruženjem naziva svako okruženje koje je prikazano određenim medijem; na primjer videozapis stvarnoga okruženja snimljen kamerom ili u potpunosti animirani virtualni svijet [19]. Iskustvo virtualne stvarnosti na taj se način razdvaja od tehnologije virtualne stvarnosti, koja se kao pojam odnosi na specifični hardver i softver. Takva definicija virtualne stvarnosti omogućuje usporedbu različitih tehnologija s obzirom na prisutnost, pri čemu je ona funkcija individualnih karakteristika pojedinca i značajki tehnologije; poput broja senzora ili uređaja za međudjelovanje s okolinom [19], [20].

Uključenost (*eng. involvement*) i uronjenost (*eng. immersion*) u virtualno okruženje nužni su za stvaranje osjećaja prisutnost [20]. Uključenost se odnosi na količinu korisnikove pozornosti koja je usmjerena na virtualno okruženje u odnosu na stvarno, dok se uronjenost povezuje s osjetilima i mogućnostima međudjelovanja s okruženjem [20]. Uronjenost je, prema tome, u najvećoj mjeri određena mogućnostima tehnologije. Dio autora pomoću uronjenost objašnjava isključivo utjecaj specifikacija korištene tehnologije na mogućnosti doživljaja virtualne stvarnosti [21]. U ovome se radu uronjenost definira prema [20], stavljajući naglasak na mogućnosti tehnologije, ali ne zanemarujući u potpunosti subjektivni doživljaj korisnika. Imerzivna okruženja razlikuju se od neimerzivnih u stereoskopskom načinu prikaza [5], uronjenosti u virtualno okruženje iz egocentrične perspektive [21] te multimodalnosti [16], [20]. Na taj način omogućuju prirodnije i naprednije međudjelovanje s okruženjem [5], smanjenje kognitivnog napora i usmjeravanje pozornosti na stvarni zadatak, a ne na alat za vizualizaciju [13], [18]. Iako nije uobičajeno, moguća je visoka prisutnost u neimerzivnom okruženju, kao i niska prisutnost u imerzivnom (bez obzira na korištenu tehnologiju) [22], [23], ovisno o korisnikovu subjektivnom doživljaju okruženja [20], [21], [24].

Međudjelovanje s virtualnim okruženjem ima velik utjecaj na iskustvo virtualne stvarnosti, odnosno, na osjećaj prisutnosti u virtualnom okruženju [25]. Odnosi se na korisnikovu sposobnost kretanja unutar virtualnoga okruženja i postavljanja u željeni položaj, ali i na upravljanje virtualnim modelom [26], omogućujući korisniku procjenu dimenzija, ergonomskih karakteristika i oblika [27]. Prema [28], za

integraciju VS tehnologija u svakodnevno industrijsko okruženje, nužna je prilagođenost kognitivnim procesima korisnika te prirodnom načinu komunikacije i međudjelovanja [27], [29]. Hardver i softver [30] stvaraju preduvjete multimodalnosti, nužne za takvu prilagodbu [28]. Uz to, korištenje haptičkih, auditornih [26] i kinestetičkih 3D uređaja [31], pozitivno utječe na prisutnost u virtualnom okruženju [8]. Prema Lombardu i Dittonu [32], razina uronjenost (a posljedično i prisutnosti) u virtualno okruženje, može se mjeriti brojem osjetila korisnika, koja su podražena djelovanjem ulaznih uređaja i razinom do koje takvi podražaji uspješno zamjenjuju podražaje iz stvarnoga svijeta. Prisutnost se najčešće mjeri individualnim testovima procjene, kao što su; *Presence Questionnaire* (PQ) [33], *Independant Television Commission-Sense of Presence Inventory* (ITC-SOPI) [34], *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ) [35], *Temple Presence Inventory* (TPI) [36], *The Spatial Presence Experience Scale* (SPES) [37].

Analogno, u ovome se radu razlikuju dva virtualna okruženja; imerzivno virtualno okruženje (*eng. Immersive Virtual Environment, IVE*) prikazano VS tehnologijom i neimerzivno virtualno okruženje prikazano (*non-Immersive Virtual Environment, nIVE*) uobičajenom tehnologijom na zaslonu monitora.

3.2 Vizualizacija proizvoda

Vizualizacija je osnovni način međudjelovanja s virtualnim okruženjem [8]. CAD (*eng. Computer Aided Design*) koristi se kao osnovni alat za izradu i prikaz 2D i 3D modela proizvoda [2], [8]. Jedan od glavnih nedostataka CAD alata odnosi se na uobičajeni prateći hardver [8]; za prikaz se još uvijek većinom koristi zaslon računala, a za upravljanje modelom računala tipkovnica i miš kao dvodimenzionalna sučelja [6]. Zaslon računala ograničen je u mogućnosti prikazivanja 3D modela kao 2D slike, što utječe na korisnikovo razumijevanje prostornih modela; javljaju se poteškoće u predodžbi mjerila i dubine prostora [38], zbog čega korisnici moraju imati razvijenu sposobnost prostornoga predočavanja [39]. VS sustavi predstavljaju tehnologiju za prirodniju i napredniju vizualizaciju i manipulaciju s modelom, ali vjerojatno neće u potpunosti zamijeniti 3D CAD alate [40]. Razlog tome je nedostatak preciznosti potrebne za modeliranje i izradu složenih sklopova [41], [42]. Zbog toga je, za primjenu u industriji, od velike važnosti integracija 3D CAD alata i VS tehnologije [40].

Osnovna je podjela VS tehnologija na CAVE (*eng. Cave Automatic Virtual Environment*) i HMD (*eng. Head-Mounted Display*) sustave [8]. CAVE sustavi predstavljaju tehnologiju virtualne stvarnosti koja podrazumijeva zaslone postavljene na barem tri plohe prostorije [43]. Korisnici na glavi nose naočale sa zaslonima koji im omogućuju stereoskopski prikaz virtualnoga okruženja. Zamišljeni su kao VS tehnologija koja omogućuje virtualne preglede konstrukcije većem broju korisnika istovremeno [17], ali veliki nedostatak predstavlja činjenica da je samo jedan korisnik aktivni korisnik, prema čijim se kretnjama mijenja prikaz, a ostali su promatrači [44]. Osim toga, ovi su sustavi prostorno zahtjevni. HMD sustavi uređaji su čiji se stereoskopski zaslone nose na glavi korisnika i postavljeni su na malu udaljenost od oka [15]. Manjih su prostornih zahtjeva i znatno jeftiniji od CAVE sustava [16]. Njihov je

nedostatak otežana komunikacija s drugim ljudima za vrijeme korištenja [16], ali postoje aplikacije koje omogućuju preglede konstrukcije virtualnim timovima u virtualnom okruženju, pri čemu svaki korisnik nosi svoj HMD.

3.3 Vizualna percepcija i prostorno predočavanje prikaza

Nužno je stvoriti mentalnu sliku virtualnoga modela kako bismo ga percipirali na temelju vizualnoga prikaza [5]. Pri tome se mentalna slika mijenja ovisno o odabiru virtualnoga prikaza [5]. Kada je virtualni model prikazan u neimerzivnom okruženju na zaslonu monitora, ljudski ga vid prepoznaje kao dvodimenzionalnu sliku [5], [13], [45]. Za stvaranje trodimenzionalnoga prikaza, odnosno prostornoga predočavanja, zaslužna je binokularnost ljudskoga vida [46]. Mozgu se proslijeđuju vizualne informacije simultano iz dva različita pogleda; iz svakoga oka zasebno, na temelju čega rekonstruira trodimenzionalni prostor iz dvodimenzionalnih slika [13], [46]. Zaslon VS sustava razlikuje se od tradicionalnih zaslona računala u tome što radi na način analogan ljudskom oku. VS sustavi omogućuju stereoskopski prikaz slike tako što je zaslon podijeljen na lijevi i desni te svako oko prima zasebne vizualne informacije [15]. Rezultat je prikaz 2D slike virtualnoga modela kao 3D objekta uz iluziju dubine prostora virtualnoga okruženja [13], [15]. Stereoskopija poboljšava vizualnu percepciju 3D objekata i utječe na prostorno predočavanje virtualnoga okruženja [5]. Osim toga, prisutnost je u virtualnom okruženju obično veća kada se prikazuje na stereoskopskom zaslonu [47]. Prostorno je predočavanje ključno za osjećaj prisutnosti u virtualnom okruženju [47]. Omogućeno je vizualnom percepcijom prostornih informacija uz mogućnosti prostornoga međudjelovanja s vizualno percipiranim okruženjem [22], [42], pri čemu važnu ulogu ima sinkronizirano praćenje pokreta korisnika [13], [47].

3.4 Pregled konstrukcije

Pregled konstrukcije uključuje prepoznavanje, opisivanje i definiranje oblika elemenata konstrukcije i njihova položaja [12]. Obično se provodi tri do šest pregleda konstrukcije tijekom razvoja proizvoda [1], [28], ovisno o veličini i složenosti projekta [48]. Provode se nakon završetka jedne razvojne faze, a prije nastavka razvoja u sljedećoj fazi. Dieter i Schmidt [1] razlikuju tri osnovna pregleda konstrukcije; pregled nakon koncipiranja, oblikovanja i detaljiranja. Pri tome pregled nakon koncipiranja ima najveći utjecaj na daljnji razvoj proizvoda jer u toj fazi promjene uzrokuju najmanje troškove [8]. Pregled nakon oblikovanja usmjeren je prema povezanosti i međudjelovanju podsustava proizvoda, a pregled nakon detaljiranja na izvedivost konstrukcije i pripremu za proizvodnju. Svrha i način pregleda konstrukcije razlikuju se ovisno o razvojnoj fazi u kojoj se provodi [4], [48]. Najčešće se provodi radi provjere izvedivosti konstrukcije i ekonomske opravdanosti projekta [1], skraćivanja trajanja razvoja [39], održavanja ili postizanja konkurentnosti na tržištu [49], osiguravanja dovoljnoga broja ljudi, novca i vremena za izvedbu projekta [1], definiranja sljedećih koraka razvoja [28] i slično. Uobičajeno je održavanje pregleda konstrukcije u obliku sastanka na kojemu sudjeluju stručnjaci iz različitih znanstvenih i stručnih područja, bitnih za konstrukciju koja se pregledava i cijeli razvojni proces;

konstruktori, proizvodni inženjeri, dizajneri, uprava, korisnici proizvoda koji se razvija, stručnjaci zaduženi za kontrolu kvalitete, logistiku i sl [1], [48].

Literatura o pregledu konstrukcije podijeljena je na dva dijela; pregled konstrukcije korištenjem konvencionalne tehnologije i pregled konstrukcije koji uključuje VS tehnologije.

3.4.1 Razumijevanje konstrukcije u neimerzivnim okruženjima

Hannah et al. [7] proučavali su količinu informacija koju konstruktori mogu dobiti pregledavanjem konstrukcija prikazanih skicom, virtualnim modelom, jednostavnim i detaljnim fizičkim prototipima, u ovisnosti o točnosti i sigurnosti u odgovore. Ispitanici su pregled konstrukcije provodili nakon konceptualne faze, a rezultati su pokazali da realističniji prikaz omogućuje ispitanicima donošenje točnijih zaključaka o ispunjenosti zahtjeva i da su, pritom, sigurniji u svoje odgovore. Ostergaard et al. proveli su eksperiment [50] u kojem su ispitali utjecaj komunikacije na učinkovitost pregleda konstrukcije. McKenna et al. u radu [51] uspoređivali su utjecaj fizičke i virtualne razdiobe na sposobnost studenata da prepoznaju i opišu funkciju i tehnologiju proizvodnje dijelova mehaničkoga uređaja. Razlike u mogućnosti opisa funkcije i tehnologije proizvodnje su neznatne, ali rezultati su pokazali da su ispitanici prepoznali veći broj elemenata i ponudili detaljniji opisa rada uređaja kada su pregledavali virtualni model. Istraživanje nije dalo objašnjenje takvih rezultata, ali autori kao moguće razloge ne navode veće mogućnosti virtualnoga okruženja, nego razlike u metodologiji provođenja eksperimenta. Thimmaiah et al. [52] proučavali su povezanost broja prepoznatih grešaka konstrukcije s donošenjem odluka prilikom pregleda konstrukcije. Rezultati eksperimenta pokazali su da se sigurnost ispitanika u odgovore smanjuje povećanjem broja grešaka konstrukcije.

3.5 Pregledavanje konstrukcije korištenjem tehnologije virtualne stvarnosti

U literaturi se tehnologija virtualne stvarnosti istražuje većinom kao dio industrijskih projekata, pri čemu se spominje njezin utjecaj na različita područja: međudjelovanje s virtualnim okruženjem, intuitivnost korištenja, nuspojave korištenja VS tehnologije, prostornu percepciju, razumijevanje konstrukcije, komunikaciju, donošenje odluka te uključenost korisnika u ranim fazama razvoja proizvoda.

Dunson et al. [26] proveli su eksperiment u kojemu se imerzivno virtualno okruženje pokazalo korisnim za prepoznavanje grešaka prostornoga razmještaja namještaja bolničke sobe, kao što su nedovoljan prostor za prolaz između elemenata ili prevelike dimenzije određenih elemenata. Sličan su eksperiment proveli Bassanino et al. [53] kako bi provjerili pristupačnost prostorije za osobe u invalidskim kolicima. Paes et al. [5] došli su do zaključka da imerzivno virtualno okruženje dovodi do bolje prostorne percepcije i boljega razumijevanja virtualnoga modela, s obzirom na veću točnost odgovora ispitanika u tom okruženju. Freeman et al. [39] uspoređivali su imerzivno virtualno okruženje s osnovnim alatima (translacija, rotacija, povećavanje i smanjivanje modela) s okruženjem u kojem su bili dostupni i napredni alati (skrivanje elemenata, parametarsko modeliranje). Korištenje naprednih alata dovelo je boljega razumijevanja konstrukcije u slučaju zadatka s brojenjem zupčanika te do povećane sigurnosti

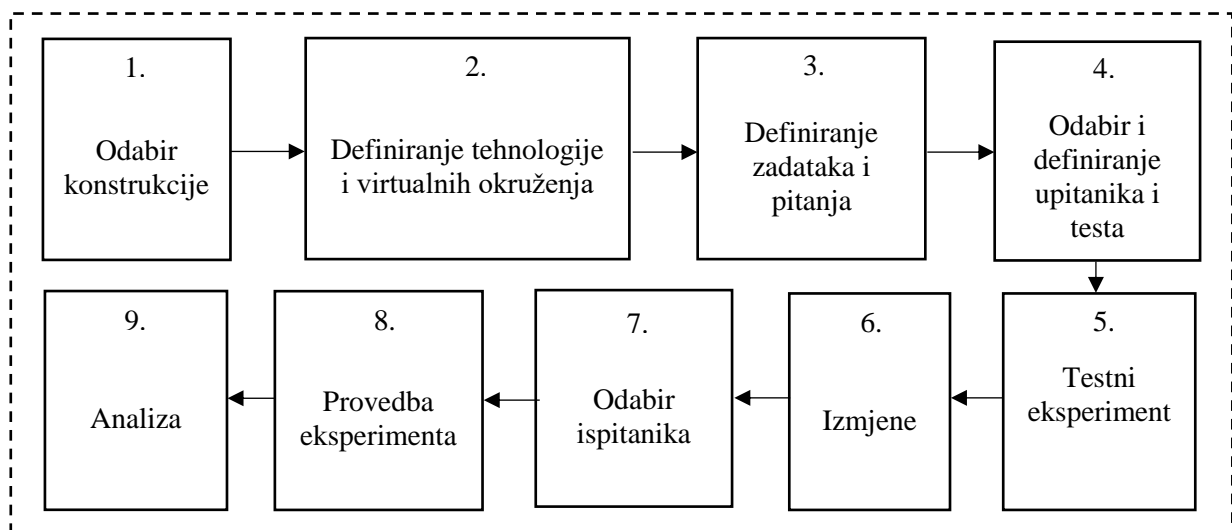
ispitanika u odgovore, bez obzira na njihovu točnost. Schabel i Kvan [54] istraživali su prostornu percepciju ispitanika u imerzivnim virtualnim okruženjima. Ispitanici su, pregledavanjem modela na zaslonu računara, postigli najtočnije rezultate u remodeliranju volumena modela, ali su ispitanici u imerzivnom virtualnom okruženju detaljnije pregledali oblik modela i odnose dimenzija te dobili bolje razumijevanje. Casenave i Lugo [8] nisu primijetili značajne razlike u sposobnosti ispitanika da prepoznaju pogreške prilikom pregledavanja virtualnih modela u imerzivnom i neimerzivnom virtualnom okruženju, ali je VS tehnologija omogućila prirodnije međudjelovanje s virtualnim okruženjem i pregled konstrukcije bez prijašnjega iskustva korištenja VS tehnologije. Rigutti et al. [44] proveli su istraživanje u kojem su uspoređivali mogućnost prepoznavanja grešaka konstrukcije u slučaju aktivnoga i pasivnoga pregleda. Zaključili su da bi pregled konstrukcije u kojem svaki sudionik nosi svoj HMD na glavi i aktivno sudjeluje u pregledu bio najprimjereniji za pregled konstrukcije i pronalaženje grešaka. Vora et al. [55] koristili su VS tehnologiju za pronalaženje grešaka na konstrukciji zrakoplova. Ispitanici su okruženje ocijenili visokoimerzivnim te se tehnologija pokazala korisnom kao alat za vježbanje pronalaska grešaka vizualnom inspekcijom.

Pregled konstrukcije pokazao se nedovoljno istraženim područjem razvoja proizvoda, bez obzira u kojem se okruženju provodi. Jedan od razloga može biti složenost i multidisciplinarnost procesa koja zahtijeva poznavanje razvoja proizvoda kako bi se pregledi konstrukcije mogli i znati provesti te pravovremeno pružiti željene ishode tehničkih rješenja koja se pregledavaju, sposobnost korištenja vizualizacijskih alata i alata za međudjelovanje, sposobnost procesuiranja informacija koje pružaju tehnologija, tehničko rješenje i ostali sudionici te sposobnost donošenja konstruktivnih odluka na temelju stvorenoga razumijevanja. Brojna literatura proučava razumijevanje konstrukcije u razvoju proizvoda (na primjer [56]), ali gotovo nitko kao sastavni dio pregleda konstrukcije. Dostupna literatura, koja je svojim radom najbliža tome, proučava vrste informacija koje ispitanici mogu dobiti iz različitih prikaza konstrukcije na temelju njihovih zaključaka o ispunjenosti zahtjeva [7]. Razumijevanje konstrukcije povezano je s načinom prikaza konstrukcije, informacijama koje korisnik iz prikaza može dobiti i koje je u mogućnosti procesuirati. Imerzivna tehnologija virtualne stvarnosti pokazala je veliki potencijal u prikazu prostornih informacija za čiju percepciju nije potreban dodatni kognitivni napor, čime korisnicima omogućuje veću efikasnost izvršavanja zadataka i bolje razumijevanje prikazane konstrukcije [18], [42]. Zbog toga se bilježi povećan broj studija koje istražuju sustave VS tehnologije za primjenu prilikom pregleda konstrukcije. Međutim, provedeni su eksperimenti najčešće usmjereni na kvalitetu tehnologije, trajanje aktivnosti ili infrastrukturu, a ne na njezin utjecaj na razumijevanja konstrukcije. Pregledom literature nisu pronađeni radovi koji uspoređuju razumijevanje konstrukcije prilikom pregleda konstrukcije korištenjem VS tehnologije i pregleda na zaslonu monitora u području strojarstva. Pronađeni su radovi koji zasebno proučavaju određenu domenu pregleda konstrukcije te su oni korištani kao reference za razvoj eksperimentalne metodologije.

4 Metodologija istraživanja

Cilj je istraživanja proučiti razumijevanje konstrukcije prikazane virtualnim modelom u dva virtualna okruženja različite imerzivnosti te utjecaj prisutnosti u virtualnom okruženju, sposobnosti mentalne rotacije i prijašnjega iskustva na rezultate. Pri tome se razumijevanje konstrukcije odnosi na razumijevanje mehanizama, prostorno razumijevanje dimenzija te prepoznavanje konstrukcijskih grešaka. Primijenjena metodologija istraživanja temelji se na objavljenim eksperimentalnim studijama koje uspoređuje razumijevanje konstrukcije u različitim okruženjima [5], utjecaj prisutnosti i uronjenosti u okruženje na izvedbu zadatka [24] te razumijevanje konstrukcije i donošenje odluka ovisno o korištenim vizualizacijskim alatima [39]. Podaci su dobiveni na tri načina; rješavanjem upitnika (upitnik o prijašnjem iskustvu (PEQ), standardizirani upitnik o prisutnosti (*eng. Presence Questionnaire, PQ*)), rješavanjem standardiziranoga testa mentalnih rotacija (*eng. Mental Rotations Test, MRT*), prikupljanjem usmenih odgovora ispitanika na pitanja i zadatke postavljene tijekom pregleda konstrukcije.

Razvoj istraživanja odvio se u devet koraka prikazanih **Slika 1. Eksperimentalna metodologija** Slika 1, a svaki je korak objašnjen u poglavljima koja slijede.



Slika 1. Eksperimentalna metodologija

4.1 Odabir konstrukcije

U okviru ovoga eksperimentalnoga istraživanja, za pregled konstrukcije odabran je sklopivi skuter. Razvijen je za vrijeme projektnoga kolegija EGPR 2017 (*eng. European Global Product Realization*) u kojem su sudjelovali studenti strojarstva, industrijskoga dizajna i elektrotehnike sa četiri europska sveučilišta; Sveučilište u Zagrebu, City, University of London, Budapest University of Technology and Economics i Sveučilište u Ljubljani. Proizvod je razvijen u suradnji s industrijskim partnerom; tvrtkom BetterLife Innovations Ltd. iz Ujedinjenoga Kraljevstva. Skuter je odabran kao konstrukcija za pregled

jer je nastao kao dio stvarnoga razvojnoga projekta [7], [52]. Za potrebe pregleda konstrukcije korišteni su; zahtjevi prema kojima je proizvod razvijen, 3D CAD model skutera te projektna dokumentacija.

U eksperimentu su korištena dva modela istoga skutera; skuter u položaju za vožnju (Slika 2) i sklopljeni skuter (Slika 3). Oba su modela ispitanicima bila na raspolaganju tijekom cijeloga pregleda konstrukcije te su jednaki modeli korišteni za pregledavanje u oba virtualna okruženja.

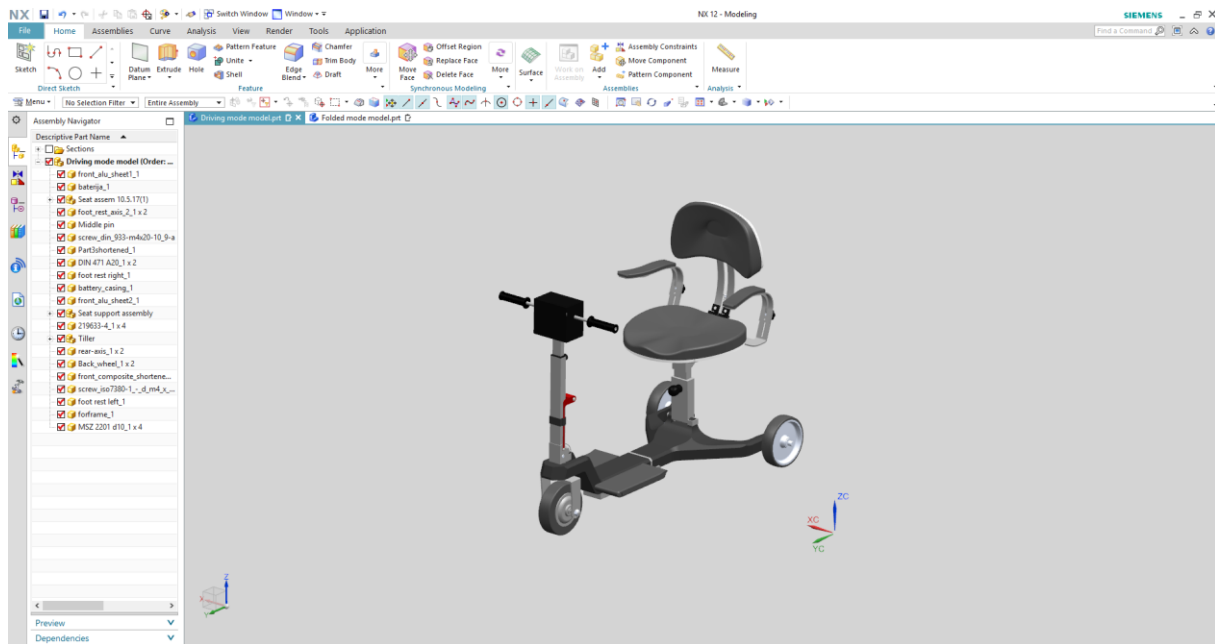


Slika 2. Skuter u položaju za vožnju



Slika 3. Skuter u sklopljenom položaju

Za pregled konstrukcije u neimerzivnom virtualnom okruženju, korišteni su zaslon monitora (zaslon 1 prema Slika 6, računalna tipkovnica i računalni miš. Korišten je monitor DELL P2417H veličine zaslona 24", rezolucije 1920 x 1080 piksela i brzina odziva 60 Hz. Virtualni je model pregledavan u 3D CAD programskom softveru Siemens NX 12. Taj je 3D CAD softver odabran jer su svi studenti LTU-a (gradivo je obrađivano na prvoj godini studija) te dio studenata s FSB-a (gradivo je obrađivano na trećoj godini) upoznati s njegovim korištenjem. Ispitanicima je bilo dopušteno koristiti sve mogućnosti unutar programskoga paketa (uz pitanje 3 kao iznimku, gdje su trebali procijeniti dimenzije skutera bez korištenja alata za mjerenje). Svim ja ispitanicima, prije pregledavanja konstrukcije, prikazan videozapis u kojem je objašnjen način korištenja osnovnih potrebnih alata za upravljanjem virtualnim modelom, kako bismo bili sigurni u njihovo osnovno predznanje korištenja, potrebno za eksperiment. Potrebni alati su: odabir modela skutera u položaju za vožnju i modela sklopljenoga skutera, rotacija modela, smanjivanje i povećavanje prikaza, postavljanje modela u različite poglede, korištenje alata za mjerenje i korištenje presjeka. Osim toga, ispitanici su prije pregledavanja konstrukcije dobili četiri zadatka za vježbu u kojima ih se tražilo korištenje iznad navedenih alata, kako bi bili sigurniji u njihovo korištenje. Ispitanicima je zadatak koji trenutno izvršavaju bio prikazan na zaslonu 2 za vrijeme pregledavanja modela, nakon čega je uslijedilo pitanje. Prijelaz sa zadatka na pitanje te na idući zadatak izvršavao je istraživač.



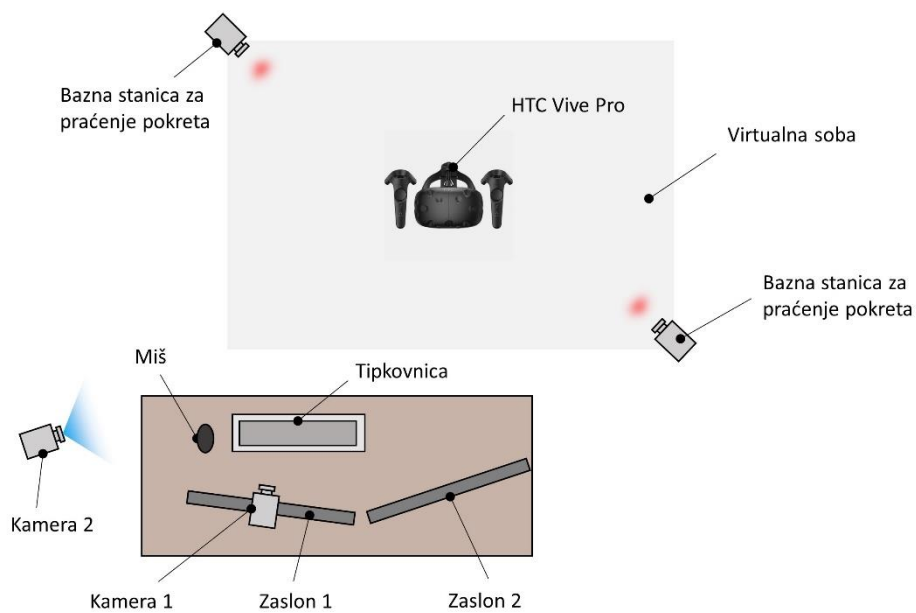
Slika 4. Model skutera u Siemens NX-u

Za pregled konstrukcije u imerzivnom virtualnom okruženju, korišten je VS sustav HTC Vive Pro s 3D upravljačima. Sustav sadrži zaslone Dual AMOLED 3,5" diagonal čija je rezolucija 1440 x 1600 piksela, brzina odziva 90 Hz, a obuhvaćaju vidno polja korisnika od 110°. Taj je VS sustav odabran jer je bio dostupan na FSB-u i LTU-u. Virtualni je model, u ovom slučaju, bio prikazan korištenjem VRED Professional 3D programskog paketa. Programski je paket odabran jer omogućuje učitavanje 3D CAD modela, njegovo uređivanje i izradu virtualnoga okruženja te izravan stereoskopski prikaz korištenjem HTC Vive Pro sustava. Osim toga, dostupan je na LTU-u i na FSB-u. Za potrebe eksperimenta izrađeno je virtualno okruženje s potrebnim alatima za upravljanje modelom. Korištena je *VRED_OpenVR_Scripts* skripta modificirana tako da omogućuje korištenje potrebnih alata. Alati koji su bili dostupni prilikom pregleda su; rotacija modela u položaju za vožnju, rotacija modela u sklopljenom položaju, alat za mjerenje i alat za postavljanje presjeka. Ispitanicima je, kao i u slučaju pregleda na zaslonu monitora, prikazan videozapis u kojemu je objašnjen način korištenja svih potrebnih alata te su, također, dobili četiri zadatka za vježbu. Pojedini zadatak i pitanje ispitanicima su bili prikazani u virtualnom okruženju, a prijelaz sa zadatka na pitanje te idući zadatak izvršavao je istraživač.



Slika 5. Model skutera u VRED-u

Kamere (kamera 1 i kamera 2) korištene su za kreiranje audio i videozapisa s odgovorima ispitanika za vrijeme pregledavanja virtualnoga modela. Osim toga, sniman je zaslon (zaslon 1) na kojemu se moglo vidjeti na što se odnose ispitanikovi komentari. Zaslon 2 koristio se za prikaz prezentacije s uputstvima te videozapisa s uputstvima za korištenje alata za upravljanje virtualnim modelom.



Slika 6. Prostorija s eksperimentalnim postavom

4.2 Zadaci i pitanja

Zadaci su formirani na temelju liste zahtjeva industrijskoga partnera; tvrtke BetterLife Innovations Ltd, što znači da su ispitanici trebali izvršiti radnje koje im omogućuju razumijevanje konstrukcije nužno za donošenje zaključaka o ispunjenosti zahtjeva te odgovoriti na pitanja koja bi bila postavljena prilikom pregleda konstrukcije. Pregled se sastojao od osam zadataka i sedam pitanja vezanih uz zadatke (navedeni su u Dodatku, poglavlje 9.1). Svrha zadataka bila je dobiti uvid u ispitanikovo razumijevanje konstrukcije s obzirom na razumijevanje mehanizama (zadaci 1 i 2), prostorno razumijevanje dimenzija (zadaci 3, 6, 7 i 8) i mogućnost pronalaska konstrukcijskih nedostataka (zadaci 4 i 5). Pri tome su, za izvršavanje svakoga zadatka, potrebne određene vještine prostornoga razumijevanja, prema [12]; unutarnja statička, unutarnja dinamička, vanjska statička ili vanjska dinamička vještina. Unutarnja statička vještina prostornoga razumijevanja definirana je kao sposobnost prepoznavanja prostornih značajki objekata; na primjer prepoznavanje objekata koji pripadaju određenoj skupini ili kategorizacija ovisna o prostornim odnosima. Unutarnja dinamička vještina podrazumijeva transformaciju prostornih objekata; uključujući između ostaloga; rotaciju, sklapanje, plastične deformacije, kako bi se predočila promjena objekta. Uključuje razumijevanje 3D prostornih odnosa u 2D slici, odnosno predočavanje 3D prikaza iz 2D slike, predočavanje promjene objekta tijekom vremena ili s obzirom na niz transformacija. Vanjska statička vještina prostornoga razumijevanja omogućuje prepoznavanje položaja objekta u prostoru relativno u odnosu na određenu referencu; na primjer pozicioniranje svojega položaja u odnosu na druge objekte uspoređujući kako kretnje u stvarnosti utječu na položaj u drugom okruženju (u literaturi je primjer vezan uz pozicioniranje na karti, ali virtualno se okruženje može smatrati analognim) ili razumijevanje mjerila. Vanjska dinamička vještina prostornoga razumijevanja predstavlja razumijevanje odnosa objekata u slučaju njihove transformacije, uključujući i pomicanje promatrača. Primjer je sinkronizacija percipiranoga prikaza s onim što se u stvarnosti događa, mogućnost percepcije prikaza iz različitih pogleda, predočavanje prostornih odnosa, kao što je udaljenost između dvije točke, kut koji zatvaraju tri točke ili predočavanje pomaka jednoga objekta relativno u odnosu na drugi.

Zadaci su bili vremenski ograničeni, a trajanje svakoga zadatka prikazano je u poglavlju 4.7. Pitanje je slijedilo nakon obavljenoga zadatka i odnosilo se na sigurnost u ispravnost odgovora danoga prilikom izvršavanja zadatka. Prema [52], za procjenu sigurnosti korištena je ljestvica u rasponu od 0% do 100%. Pri tome, 0% znači da je ispitanik u potpunosti nesiguran u svoj odgovor, a 100% da je ispitanik u potpunosti siguran u svoj odgovor.

4.3 Upitnici i test mentalnih rotacija

U eksperimentu su korištena dva upitnika; upitnik o prijašnjem iskustvu i standardizirani upitnik o prisutnosti u virtualnom okruženju te standardizirani test mentalnih rotacija. Njihova je svrha pružiti informacije o iskustvu, sposobnostima ili subjektivnim doživljajima ispitanika, koji su usko povezani s rezultatima pregleda konstrukcije.

4.3.1 Upitnik o prijašnjem iskustvu

Upitnik o prijašnjem iskustvu sastojao se od 25 pitanja podijeljenih u tri cjeline; pitanja koja se odnose na osobne i demografske podatke, prethodno iskustvo u konstruiranju te kontekstualno iskustvo vezano uz proizvod koji se pregledava. Demografski podaci koji su prikupljeni odnose se na spol, starost, nacionalnost, visinu, broj cipela, područje obrazovanja i razinu obrazovanja ispitanika. Drugi dio upitnika odnosio se na prethodno iskustvo u konstruiranju; iskustvo i vještine korištenja VS tehnologija, iskustvo i vještine korištenja CAD alata, iskustvo pregledavanja konstrukcija, iskustvo konstruiranja u području strojarstva/industrijskog dizajna/drugog područja konstruiranja. Posljednja skupina pitanja ispituje kontekstualno iskustvo; iskustvo korištenja sklopivih uređaja, vožnja vozila na tri kotača, iskustvo prilagođavanja visine ili kuta sjedala i upravljača vozila

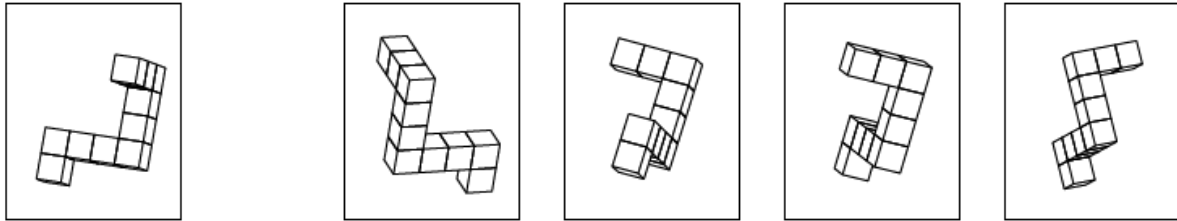
4.3.2 Upitnik o prisutnosti u virtualnom okruženju (PQ)

PQ je odabran između ostalih upitnika prisutnosti (navedenih u poglavlju 3.1) jer je najprimjereniji za ispitivanje prostorne prisutnosti korisnika koji rješava određeni zadatak u virtualnom okruženju [37]. Na primjer; Vora et al. [55] koristili su ga u eksperimentu inspekcije grešaka kako bi provjerili može li se virtualno okruženje koristiti kao zamjena za stvarno, a Kalisperis et al. [57] kako bi ispitali prisutnost ispitanika prilikom provjere prostornoga rasporeda elemenata u prostori. Zadnja službena revizija izvornoga upitnika [58] sadrži 29 pitanja raspoređenih u četiri kategorije; *uključenost* u virtualno okruženje (12 pitanja), *uronjenost* (8 pitanja), *uvjerljivost senzora* (6 pitanja) i *kvaliteta sučelja* (3 pitanja). Kategorije uvjerljivost senzora i kvaliteta sučelja uključuju pitanja koja se, osim na vizualne podražaje, odnose i na taktilne te auditorne. S obzirom na to da u eksperimentu nisu korišteni auditorni ni haptički uređaji, ta pitanja nisu uključena u eksperiment. Prema uputama autora navedenima u [20], ispitanici odgovor na pitanje daju odabirom odgovarajućega stupnja na ljestvici sa sedam mogućnosti. Uz ljestvicu dolaze tri opisna natpisa; za početak ljestvice (stupanj 1), sredinu ljestvice (stupanj 4) i kraj ljestvice (stupanj 7). S obzirom na to da uz originalni upitnik ne dolaze opisni natpisi, većina ih je preuzeta iz [33]. Upitnik s pitanjima i ponuđenom ljestvicom priložen je u Dodatku rada.

4.3.3 Test mentalnih rotacija (MRT)

Test mentalnih rotacija test je vještine prostornoga razumijevanja [12], koji se u potpunosti rješava mentalnom rotacijom objekta prikazanoga slikom [59]. Korišten je standardizirani MRT-A test mentalnih rotacija [60] sa 24 zadatka, prema originalnom Vandenberg & Kuse ispitnom primjerku. Svaki se zadatak sastoji od slike 3D kubičnog objekta prikazane s lijeve strane i četiri slike 3D objekta s desne strane. Dvije su od četiri slike s desne strane zarotirane verzije slike objekta s lijeve strane, dok preostale dvije predstavljaju objekt u potpunosti različit od objekta s lijeve strane. Ispitanici su test dobili u papirnatom obliku. Prvi se list odnosi na uputstva i primjere koje je svaki ispitanik pročitao, proučio i riješio bez vremenskog ograničenja, kako bi shvatio pravila i način rješavanja testa. Nakon toga, ispitanik je rješavao zadatke raspoređene na dva lista (12 zadataka na svakom listu), pri čemu je za svaki

list imao tri minute. Između dva seta zadataka, ispitanici su se kratko odmarali u trajanju prema potrebi, a najmanje 15 sekundi. Primjer zadatka prikazan je na Slika 7.



Slika 7. Primjer zadatka MRT-a

4.4 Ispitanici

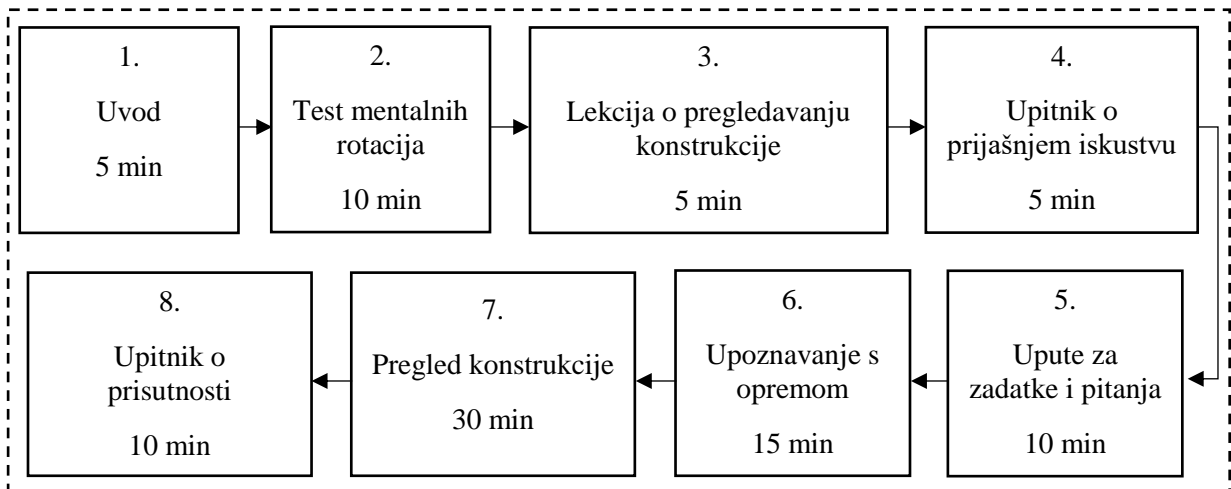
Ciljani broj ispitanika temelji se na literaturi koja se bavi sličnom tematikom, a prikazana je **Tablica 1**, uz broj ispitanika koji su sudjelovali u pojedinom eksperimentu. Sukladno tome, određeno je da je najmanji potreban broj ispitanika 40. Ispitanici su studenti preddiplomskoga i diplomskoga studija u području strojarstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) te Tehničkoga sveučilišta Luleå (LTU). Pri tome su 24 ispitanika studenti LTU-a, dok 16 ispitanika studira na FSB-u. Jedini uvjet pri odabiru ispitanika bio je da su studenti u području strojarstva, dok godina studija, odabrano usmjerenje, kao ni prethodno iskustvo konstruiranja, korištenja 3D CAD alata i VS tehnologije nisu unaprijed određeni. Kako bi se izbjegao neželjeni utjecaj prethodnoga pregledavanja konstrukcije u drugom okruženju [7], [51], svaki je ispitanik proveo pregled konstrukcije u samo jednom virtualnom okruženju; polovica ispitanika konstrukciju pregledava u IVE, a druga polovica u nIVE.

Tablica 1. Tablica broja ispitanika

literatura	Broj ispitanika u eksperimentu
Vora et al. [55]	14
Freeman et al. [39]	10
Paes et al. [5]	30
McKenna et al. [51]	30 u IVE i 23 u stvarnom okruženju
Satter i Butler [61]	15 u IVE i 15 u nIVE
Ostergaard et al. [50]	41
Hannah et al. [7]	60 (grupni rad)
Faas et al. [12]	30

4.5 Tijek eksperimenta

Ekperiment se sastoji od osam glavnih dijelova ukupnoga trajanja 90 minuta, koji su prikazani Slika 8.



Slika 8. Tijek eksperimenta

U prvom su koraku ispitanici upoznati sa sadržajem eksperimenta i konstrukcijom koju će pregledavati te su potpisali izjavu o suglasnosti procesuiranja podataka. U sljedećem su koraku ispitanici rješavali standardizirani test mentalnih rotacija kako bi se provjerila njihova vještina prostornoga razumijevanja, neovisno o okruženju. Nakon toga, upoznati su s osnovama pregleda konstrukcije kratkom lekcijom s objašnjenjima pojmova i svrhe te primjerima provođenja pregleda, za što im je u prosjeku trebalo pet minuta. Uslijedilo je ispunjavanje upitnika o prijašnjem iskustvu, nakon čega su ispitanicima dane upute za rješavanje zadataka i pitanja s primjerima. U koraku šest, ispitanici su se upoznavali s opremom; prvo im je prikazan videozapis o načinu korištenja potrebnih alata u virtualnom okruženju, a nakon toga četiri zadatka za vježbu. Pregled konstrukcije sadržavao je osam zadataka; za svaki su zadatak i pripadno pitanje ispitanici imali određeni period rješavanja (Tablica), nakon čega bi im bilo prikazano pitanje o sigurnosti u odgovor. U posljednjem su koraku ispitanici ispunjavali upitnik o prisutnosti, povezan s njihovim iskustvom virtualne stvarnosti.

Tablica 2. Vrijeme rješavanja zadataka

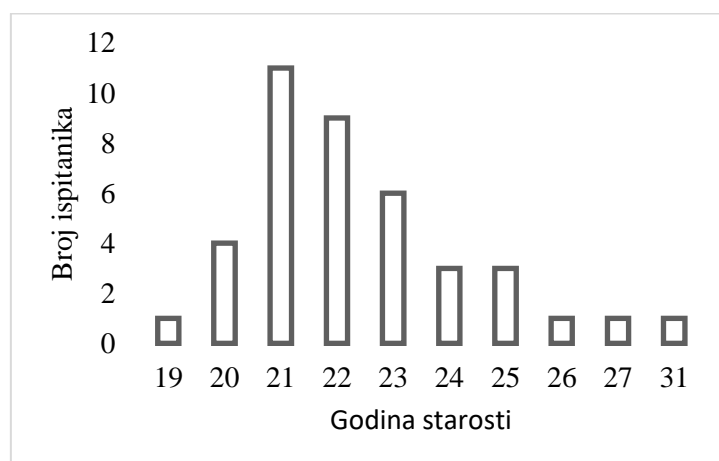
Zadatak i pitanje	1	2	3	4	5	6	7	8
Vrijeme (min)	4	3,5	2,5	3,5	4	2,5	5	5

5 Analiza prikupljenih podataka

Za analizu prikupljenih podataka korištene su deskriptivna i inferencijalna statistika te regresijska analiza. Analiza je provedena korištenjem statističkoga paketa *RStudio*. Deskriptivna statistika korištena je za izračun mjera centralne tendencije (aritmetička sredina, medijan) i mjera varijabiliteta (standardna devijacija, raspon). Odgovori upitnika o prijašnjem iskustvu i PQ-a, rezultati MRT-a te distribucija podataka dobivenih pregledom konstrukcije prikazani su grafički i tabelarno. Medijani i rasponi rezultata prikazani su dijagramom pravokutnika. Testovi inferencijalne statistike korišteni su za provjeru značajnosti razlike rezultata u IVE i nIVE. U slučaju usporedbe dvije varijable, prvo se provjeravao *Shapiro-Wilk* test normalnosti distribucije, a ako je on bio zadovoljen slijedio je *Leveneov* test homogenosti varijanci te *t-test*. Ako Shapiro-Wilk test nije bio zadovoljen, umjesto t-testa provodio se *Wilcoxonov* test. Kod usporedbe više od dvije varijable (usporedba grešaka procjena visine, duljine i širine u pojedinom okruženju), korišten je *Kruskal-Wallis* test te *pairwise Wilcoxon* test. Linearnom se regresijom analizirala povezanost točnosti odgovora ispitanika dobivenih pregledom konstrukcije s procjenom sigurnosti u odgovore te rezultatima MRT-a i PQ-a. *ANOVA* je korištena za provjeru statističke značajnosti modela u slučaju kategoričkih varijabli (broj prepoznatih mehanizama ili koraka sklapanja).

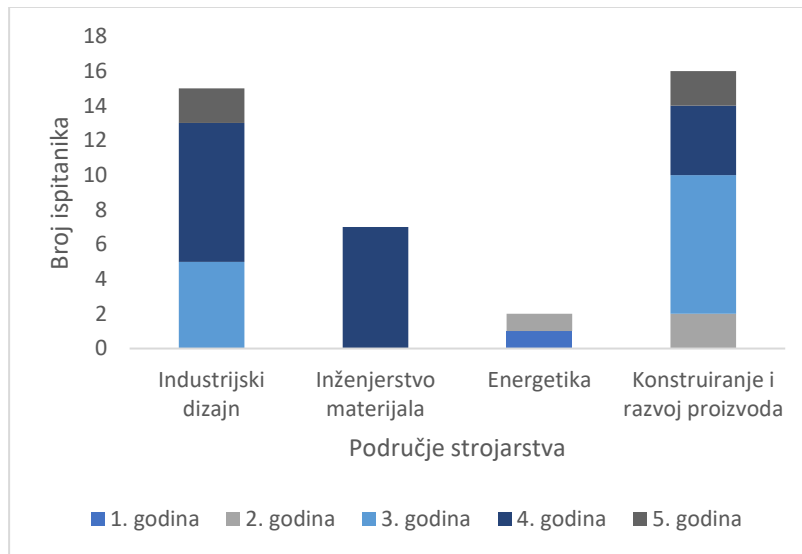
5.1 Podaci o ispitanicima i upitniku o prijašnjem iskustvu

U eksperimentu je sudjelovalo 40 sudionika; studenti preddiplomskoga i diplomskoga studija LTU-a i FSB-a. Uzorak se sastojao od 33 ispitanika muškoga spola i 7 ispitanika ženskoga spola starosti od 19 godina do 31 godine ($m = 22$). Razlikuje se osam nacionalnosti sudionika; Brazilci ($n = 1$), Marokanci ($n = 1$), Sirijci ($n = 1$), Britanci ($n = 1$), Nizozemci ($n = 1$), Francuzi ($n = 4$), Šveđani ($n = 13$) i Hrvati ($n = 16$).



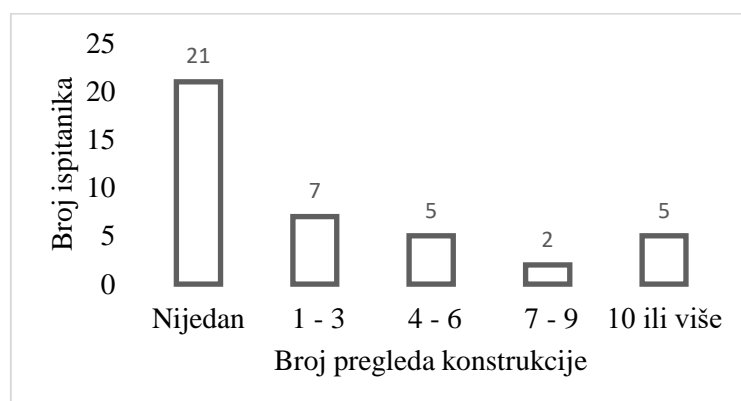
Slika 9. Distribucija ispitanika po godini starosti

Ispitanici su studenti studija strojarstva u području; konstruiranja i razvoja proizvoda ($n = 16$), industrijskoga dizajna ($n = 15$), inženjerstva materijala ($n = 7$) i energetike ($n = 2$). Pri tome, pet studenata industrijskoga dizajna na trećoj je godini studija, osam na četvroj, a dva su na petoj. Svi su studenti inženjerstva materijala na četvrtoj godini studija, jedan student energetike na prvoj, a drugi na drugoj godini studija. Polovica studenata konstruiranja i razvoja proizvoda na trećoj je godini studija, troje ih je na drugoj godini, dvoje na drugoj i dvoje na prvoj godini studija.



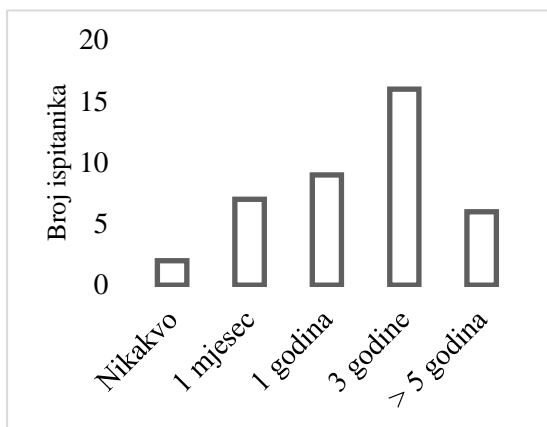
Slika 10. Područje studija ispitanika

Dvadeset jedan sudionik nema iskustva s pregledima konstrukcije, a pet je ispitanika izvršilo njih 10 ili više.

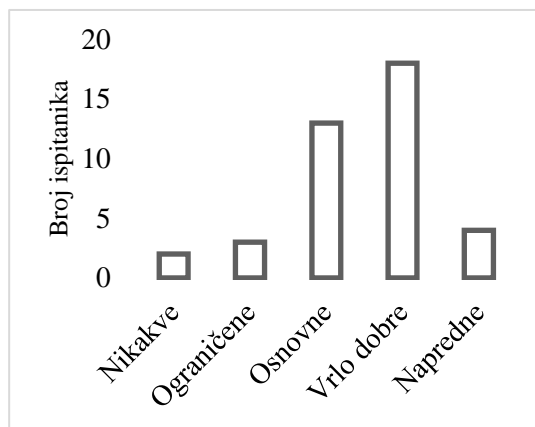


Slika 11. Broj pregleda konstrukcije

Šesnaest ispitanika (40%) ima tri godine iskustva u korištenju CAD alata, a devet (23%) ima iskustvo od jedne godine. Osamnaest je ispitanika (45%) vještine korištenja CAD alata definiralo kao osnovne, a trinaest (33%) kao vrlo dobre.

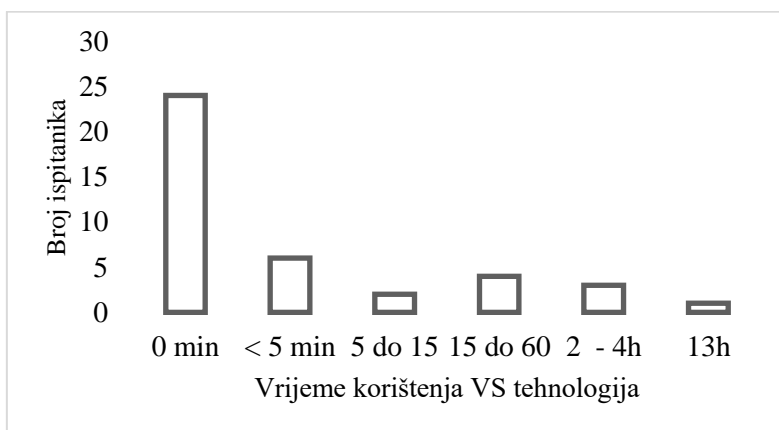


Slika 12. Iskustvo korištenja CAD alata



Slika 13. Vještine korištenja CAD alata

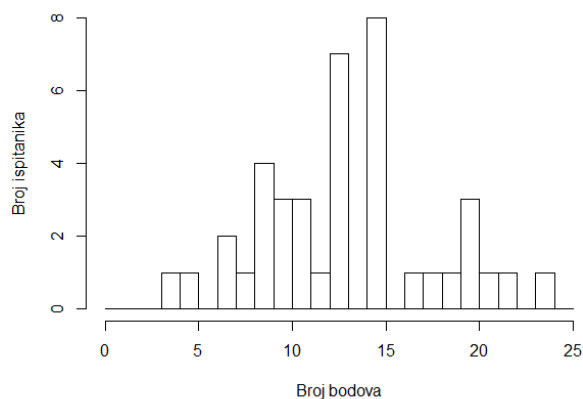
Većina ispitanika (n=24) nema prijašnjeg iskustva s korištenjem VS tehnologija, a šest je ispitanika VS tehnologiju koristilo u vremenu kraćem od pet minuta. Iskustvo korištenja nije utjecalo na odabir i podjelu sudionika koji će konstrukciju pregledavati u IVE, odnosno nIVE.



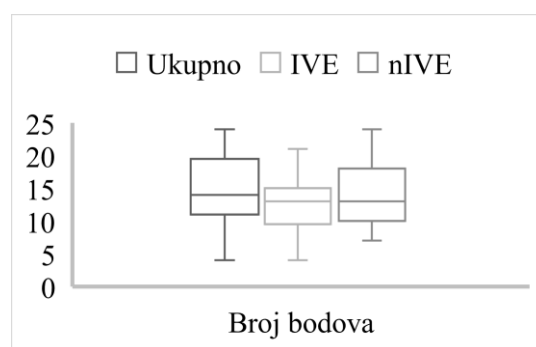
Slika 14. Distribucija ispitanika po vremenu korištenja VS tehnologija

5.1.1 Test mentalnih rotacija

Rezultati testa mentalnih rotacija prikazani su dijagramom prema Slici 10. Najveći je broj ispitanika ($n = 15$) postigao rezultat između 13 i 15 točno riješenih zadataka; od čega ih je osam točno riješilo 15 zadataka, a sedam trinaest. Dva su ispitanika točno riješila manje od šest zadataka (jedan četiri, a jedan pet). Četrnaest je ispitanika točno riješilo između sedam i dvanaest zadataka, dok je visoki rezultat od barem 16 točno riješenih zadataka postiglo devet ispitanika. Prema Slici 11, medijan rezultata ispitanika iznosi $m = 13$, uz raspon rezultata od 4 do 24. Aritmetička sredina rezultata MRT-a iznosi $(13,4 \pm 4,6)$.



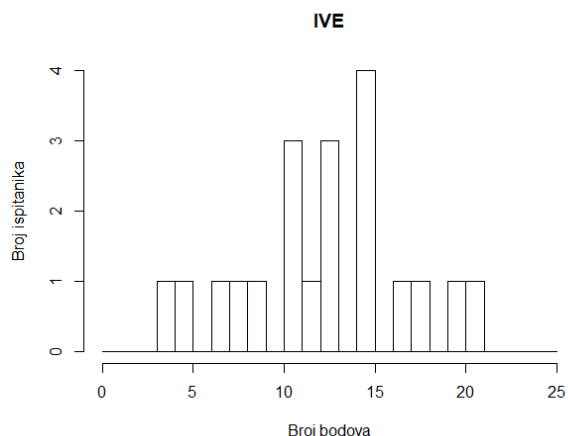
Slika 15. Broj bodova MRT-a



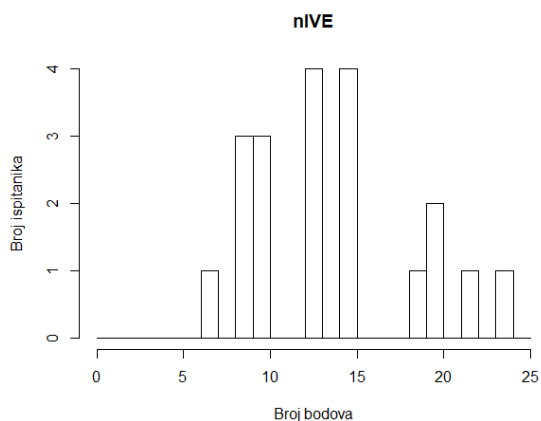
Slika 16. Dijagram pravokutnika MRT-a

Rezultati MRT-a korišteni su s ciljem jednolike raspodjele ispitanika, ovisno o stupnju razvijenosti mentalne rotacije kao vještine prostornoga razumijevanja, u oba virtualna okruženja. Ispitanici su, na temelju tih podataka, podijeljeni u dvije skupine prema kojima je provedeno istraživanje; jedna je skupina konstrukciju pregledavala u IVE, a druga u nIVE. Konačna podjela ispitanika, ovisna o rezultatu MRT-a, prikazana je dijagramima prema Slici 17 (za IVE) i Slici 18 (za nIVE). Aritmetička sredina rezultata MRT-a ispitanika koji su konstrukciju pregledavali u imerzivnom virtualnom okruženju iznosi $(12,7 \pm 4,5)$, a u neimerzivnom $(14,1 \pm 4,7)$.

Osim za podjelu ispitanika u grupe, rezultati MRT-a korišteni su u analizi zadatka 2, gdje se razmatra zavisnost broja prepoznatih mehanizama sklapanja i broja bodova MRT-a.



Slika 17. Broj bodova MRT-a u IVE



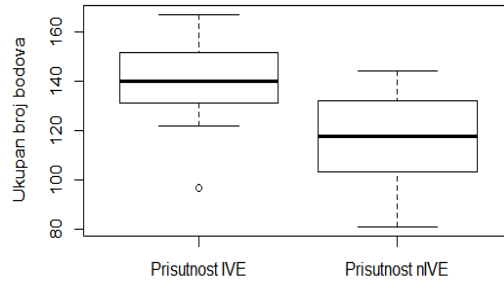
Slika 18. Broj bodova MRT-a u nIVE

5.2 Upitnik o prisutnosti u virtualnom okruženju (PQ)

Rezultati PQ-a podijeljeni su u četiri kategorije [20]; *uključenost*, *uronjenost*, *uvjerljivost senzora i kvaliteta sučelja*. Prema ukupnom zbroju bodova svih ispitanika, imerzivnom virtualnom okruženju dodijeljen je ,u sve četiri kategorije, veći zbroj bodova nego neimerzivnom virtualnom okruženju.

Srednja je vrijednost prisutnosti 129, uz najmanju iznosa 91 (u nIVE) i najveću 167 (u IVE). Srednja vrijednost za IVE iznosi 137, uz najmanju 97, najveću 167 i aritmetičku sredinu 138,7. Srednja vrijednost za nIVE iznosi 122, najmanja je vrijednost 91, a najveća 140, dok je aritmetička sredina 118,6. Aritmetička sredina dobivena zbrojem odgovora ispitanika za uključenost u virtualno okruženje iznosi $66,5/84$ za imerzivno, a $54,1/84$ za neimerzivno okruženje. Srednja je vrijednost za IVE 65,5 (najmanja je 50, a najveća 80), a za nIVE 56 (najmanja je 34, a najveća 70). Uronjenost ispitanika u imerzivno virtualno okruženje pokazala se većom nego u neimerzivnom; aritmetička sredina je $45/56$ prema $40/56$. Srednja je vrijednost uronjenosti u IVE 46,5 (uz najmanju 27 i najveću 54), a u nIVE 39,5 (uz najmanju 32 i najveću 48). Aritmetička sredina uvjerljivosti senzora imerzivnog okruženja iznosi $12/14$, a neimerzivnog $11/14$.

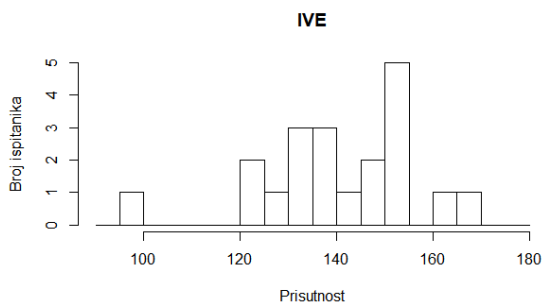
Gledajući ukupnu procjenu prisutnosti, ispitanici koji su konstrukciju pregledavali u imerzivnom virtualnom okruženju, procijenili su prisutnost u virtualnom okruženju većom nego ispitanici koji su konstrukciju pregledavali u neimerzivnom virtualnom okruženju. Aritmetička sredina rezultata u IVE-u iznosi 140,15, a u nIVE-u 116,75. Medijan rezultata procjene prisutnosti u IVE iznosi $m = 140$, uz raspon od 97 do 167, a u nIVE $m = 117,5$, uz raspon od 81 do 144.



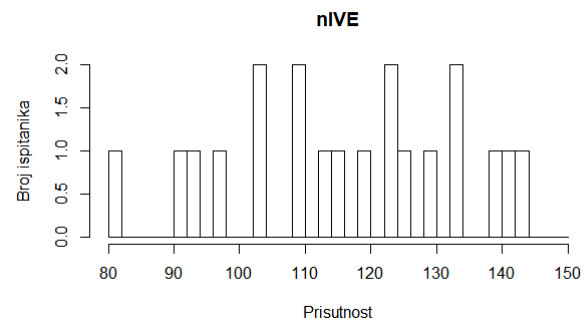
Slika 19. Dijagram pravokutnika za prisutnost

Korišteni su statistički testovi kako bi se usporedila virtualna okruženja s obzirom na prisutnost.

Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije rezultata prisutnosti u IVE ($p = 0,4557$) ni u nIVE ($p = 0,7203$). Histogrami prikazani Slikom 20 i Slikom 21 također ukazuju na normalnu distribuciju rezultata u oba virtualna okruženja.



Slika 20. Histogram prisutnosti u IVE



Slika 21. Histogram prisutnosti u nIVE

Leveneov je test [64] potvrdio homogenost varijanci u IVE i nIVE ($p = 0,379, F = 0,7922$).

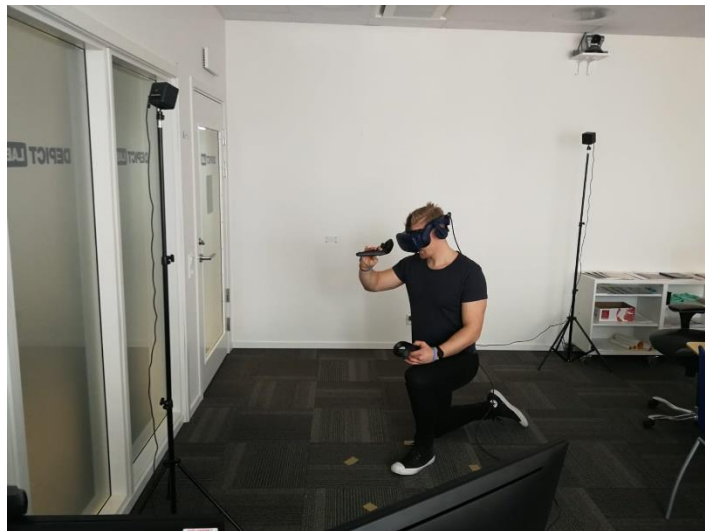
S obzirom na to da su normalnost distribucije i homogenost varijanci rezultata prisutnosti potvrđene, proveden je t-test, koji je potvrdio statistički značajnu razliku rezultata prisutnosti u IVE i nIVE ($p = 9,633 \cdot 10^{-5}$) uz statističku sigurnost od 95% da su rezultati prisutnosti viši u imerzivnom virtualnom okruženju nego u neimerzivnom ($p = 4,924 \cdot 10^{-5}$).

5.3 Pregled konstrukcije

U nastavku je provedena pojedinačna analiza svakoga zadatka, a rezultati su, zatim, u poglavlju 6 grupirani ovisno o tome na koju karakteristiku razumijevanja konstrukcije utječu; razumijevanje mehanizama, pronalazak konstrukcijskih nedostataka ili prostorno razumijevanje dimenzija.



Slika 22. Ispitanik procjenjuje dimenziju skutera u IVE-u

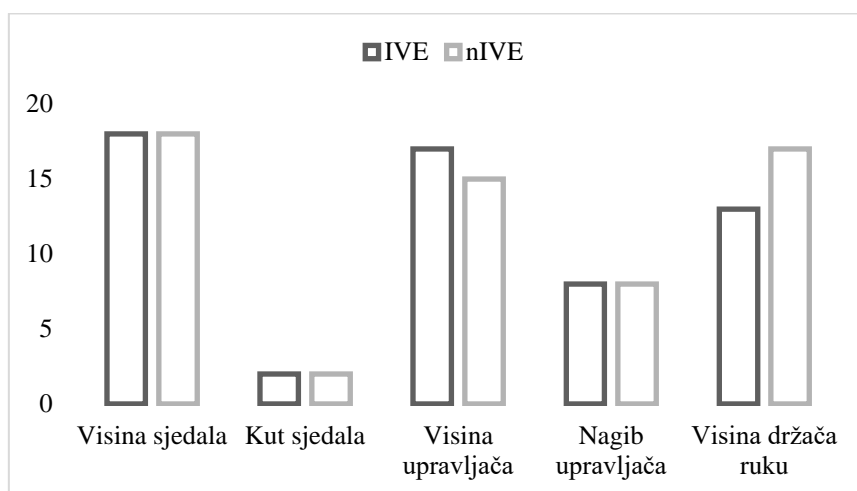


Slika 23. Ispitanik pregledava grešku mehanizma u IVE-u

5.3.1 Zadatak 1

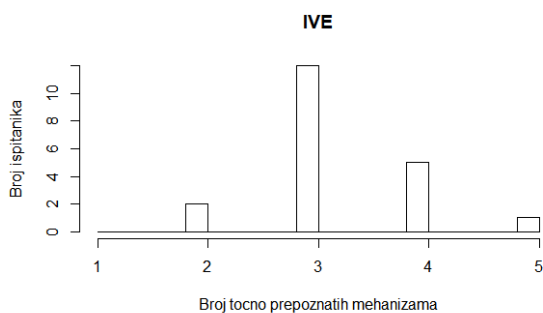
U zadatku 1, ispitanici su trebali prepoznati pet mehanizama za podešavanje visine ili kuta određenoga elementa korisniku; mehanizam za podešavanje visine upravljača, nagiba upravljača, visine naslona za ruke, visine sjedala te kuta sjedala. Točnim se odgovorom smatra ispravno prepoznat mehanizam, uz ispravno objašnjenje njegove funkcije, odnosno, načina podešavanja (translacija ili rotacija). U slučaju prepoznavanja mehanizma, ali netočnoga objašnjenja načina podešavanja, odgovor se ne priznaje kao točan. Ispitanici su mehanizme prepoznavali vizualno i usmeno objašnjavali radi li se o translaciji ili rotaciji, ali na modelu nisu mogli izvršiti transformaciju (podešavanje mehanizma). Prema [12], za rješavanje zadatka potrebna je unutarnja statička vještina prostornoga razumijevanja kao sposobnost prepoznavanja objekata koji pripadaju određenoj skupini, u ovisnosti o prostornim odnosima objekata.

Aritmetička sredina broja mehanizama, koji su ispitanici točno prepoznali prilikom pregledavanja skutera, u IVE iznosi $(3,3 \pm 0,7)$, $m = 3$, uz raspon od 2 do 5, a u nIVE $(3,4 \pm 0,9)$, $m = 3$, uz raspon od 2 do 5. Više od polovice ispitanika točno je prepoznalo mehanizme za podešavanje visine elemenata u oba virtualna okruženja; visina sjedala ($n = 18$ u IVE, $n = 18$ u nIVE), visina upravljača ($n = 17$ u IVE, $n = 15$ u nIVE), visina držača ruku ($n = 13$ u IVE, $n = 17$ u nIVE). Mehanizam za rotaciju sjedala oko z-osi točno je prepoznao najmanji broj ispitanika; $n = 2$ u oba virtualna okruženja.

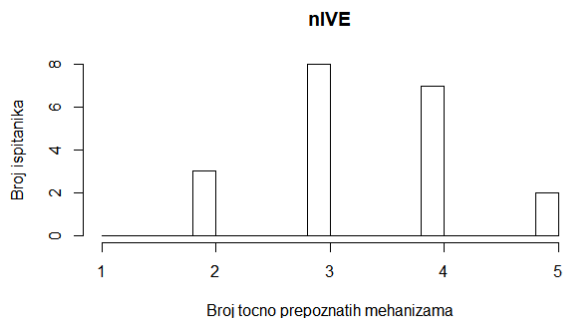


Slika 24. Broj prepoznatih mehanizama za podešavanje

Histogrami prikazuju normalnu distribuciju broja prepoznatih mehanizama u oba virtualna okruženja (Slika 23 i Slika 24).

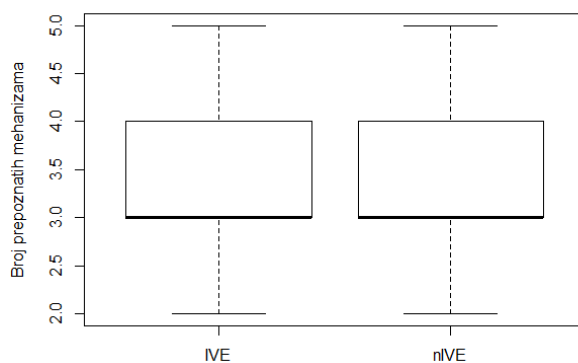


Slika 25. Broj točno prepoznatih mehanizama u IVE



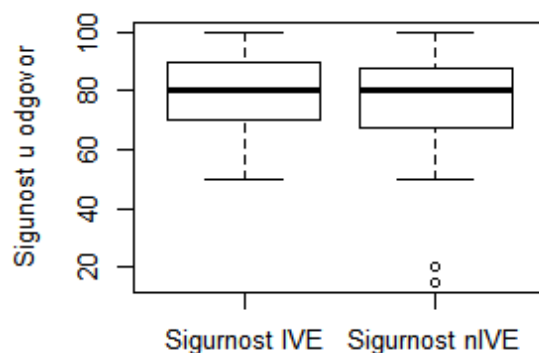
Slika 26. Broj točno prepoznatih mehanizama u nIVE

S obzirom na to da je broj prepoznatih mehanizama kategorička varijabla, proveden je Wilcoxonov test, koji nije pokazao statistički značajnu razliku broja prepoznatih mehanizama u IVE i nIVE ($p = 0,5369$).



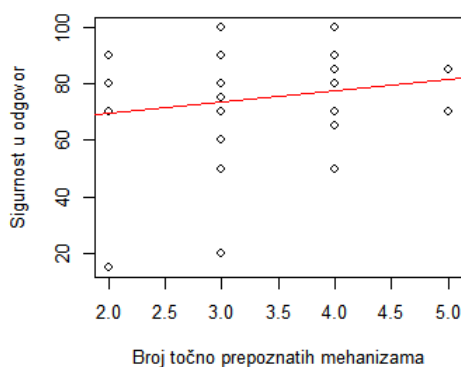
Slika 27. Dijagram pravokutnika za broj točno prepoznatih mehanizama

Osim prepoznavanja mehanizama za podešavanje, ispitanici su nakon provedbe zadatka procjenjivali postotak sigurnosti u točnost odgovora. Ispitanici su u IVE bili sigurniji u točnost svojih odgovora ($(78,3\% \pm 12,4\%)$, $m = 60\%$, uz raspon od 50% do 100%) nego u nIVE ($(71,5\% \pm 22\%)$, $m = 60\%$, uz raspon od 15% do 100%), iako je aritmetička sredina točnosti odgovora ispitanika u IVE-u nešto niža ($(65\% \pm 14\%)$, $m = 80\%$, uz raspon od 40% do 100%) u odnosu na nIVE ($(68\% \pm 17,2\%)$, $m = 80\%$, uz raspon od 40% do 100%). Kako bi se provjerila značajnost razlike rezultata ovisno o pregledavanju konstrukcije u IVE ili nIVE, provedeni su statistički testovi. Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije rezultata sigurnosti u odgovor ispitanika u IVE ($p = 0,2128$), ali da odstupanja postoje u nIVE ($p = 0,004013$). Sukladno, proveden je Wilcoxonov test, koji nije potvrdio statistički značajnu razliku rezultata sigurnosti u točnost odgovora ispitanika u IVE i nIVE ($p = 0,5086$). Prema tome, nije potvrđeno da je imerzivnost virtualnoga okruženja utjecala na razlike u sigurnosti ispitanika u odgovore prilikom rješavanja prvoga zadatka.



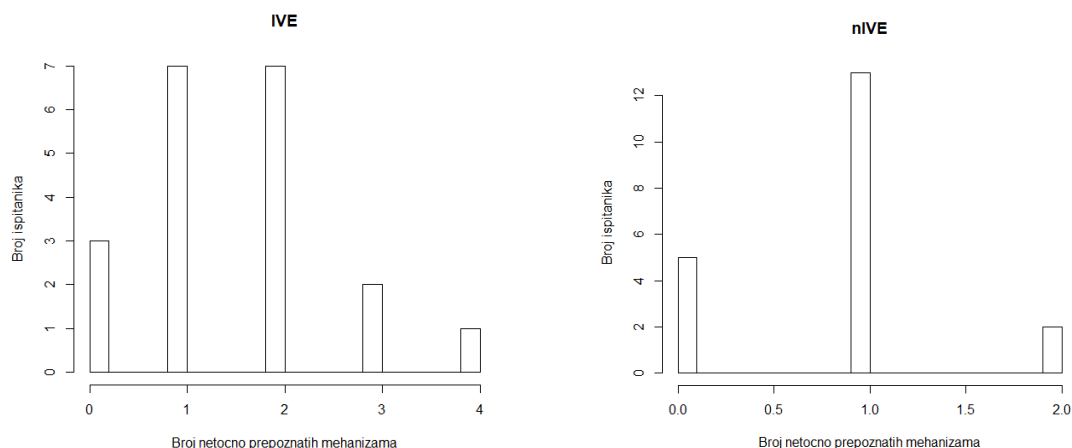
Slika 28. Dijagram pravokutnika sigurnosti u odgovor za zadatak 1

Nakon analize broja točno prepoznatih mehanizama, slijedi analiza zavisnosti broja točno prepoznatih mehanizama i sigurnosti u odgovor. Slika 29 prikazuje zavisnost broja točno prepoznatih mehanizama i sigurnosti u točnost odgovora (s obzirom na one mehanizme koje su prepoznali). Rezultati statističke analize ($R^2 = 0,001007$, $p = 0,3982$, $F_{stat} = 1.013$) ukazuju na nemogućnost opisa modela linearnom regresijom zbog niskoga postotka varijance objašnjene modelom te ANOVA nije potvrdila statističku značajnost modela ($p = 0,251$, $F = 1,361$). Može se primijetiti da su ispitanici sigurni u razumijevanje onih mehanizama koje su prepoznali, bez obzira na ukupan broj prepoznatih mehanizama (ispitanici koji su prepoznali samo dva mehanizma imaju visku razinu sigurnosti), ali i blagi porast sigurnosti povećanjem broja točno prepoznatih mehanizama.



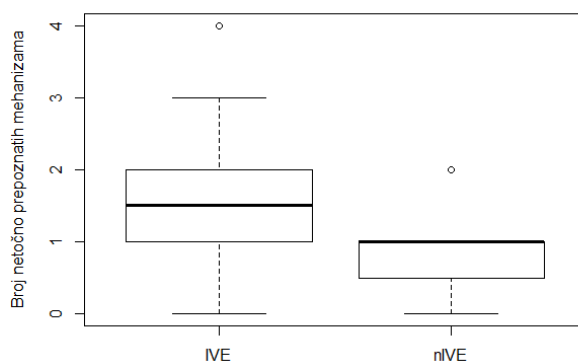
Slika 29. Regresijska analiza zavisnosti broja prepoznatih mehanizama i sigurnosti u odgovor

Ispitanici su u nIVE napravili manji broj grešaka u prepoznavanju mehanizama ($0.9 \pm 0,6$, $m = 1$, uz raspon od 0 do 4), nego u IVE ($1,6 \pm 1,1$, $m = 1$, uz raspon od 0 do 2). Pri tome se greška računa kao razlika ukupnoga broja prepoznatih mehanizama i broja točno prepoznatih mehanizama. Histogrami prikazuju normalnu razdiobu broja netočno prepoznatih mehanizama u IVE (Slika 31) i nIVE (Slika 30).



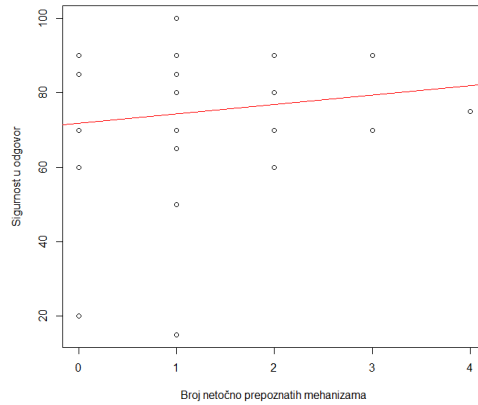
Slika 31. Broj netočno prepoznatih mehanizama u IVE **Slika 30. Broj netočno prepoznatih mehanizama u nIVE**

Kako bi se provjerilo je li razlika u broju netočno prepoznatih mehanizama statistički značajna s obzirom na imerzivnost virtualnoga okruženja, proveden je Wilcoxonov test. Rezultat je pokazao statističku značajnost ($p = 0,01859$), uz sigurnost od 95% da je broj netočno prepoznatih mehanizama manji u nIVE nego u IVE ($p = 0,009297$).



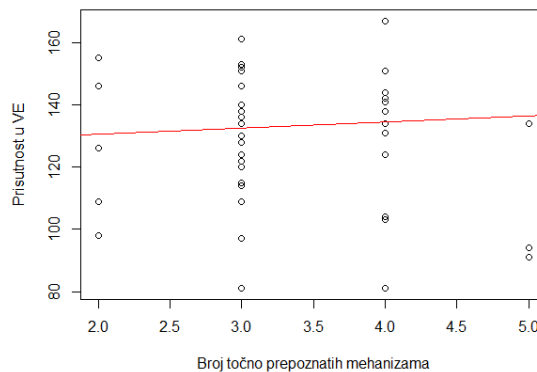
Slika 32. Dijagram pravokutnika broja netočno prepoznatih mehanizama

Ispitanici su sigurnost u svoj odgovor procjenjivali na temelju mehanizama koje su prepoznali, bez obzira jesu li ih prepoznali točno pet, manje ili više od pet. Linearnom je regresijom ($R^2 = -0,08935$, $P = 0,9365$, $F_{stat} = 0,2003$) prikazana zavisnost broja netočno prepoznatih mehanizama i sigurnosti u odgovor, ali ANOVA nije potvrdila statističku značajnost modela ($p = 0,251$, $F = 1,361$). Na grafu, prema **Slika 33**, može se primijetiti da se sigurnost u točnost odgovora ne smanjuje povećanjem broja netočno prepoznatih mehanizama, nego se blago povećava.



Slika 33. Regresijska analiza zavisnosti broja netočno prepoznatih mehanizama i sigurnosti u odgovor

Slika 34 prikazuje zavisnost broja točno prepoznatih mehanizama i prisutnosti u virtualnom okruženju dobivenu regresijskom analizom ($R^2 = 0.001007$ $p = 0.3982$, $F_{stat} = 1.013$), pri čemu je ANOVA potvrdila statističku značajnost modela linearne regresije ($p = 0,00154$, $F = 11,65$).

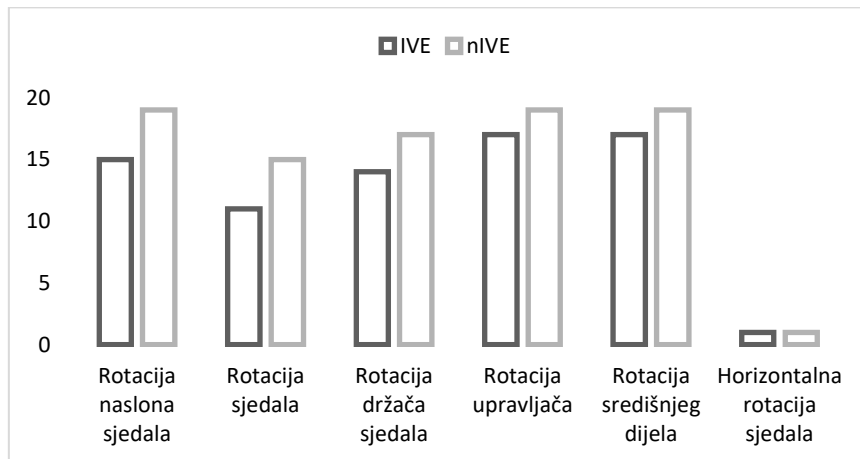


Slika 34. Regresijska analiza zavisnosti broja točno prepoznatih mehanizama i prisutnosti

5.3.2 Zadatak 2

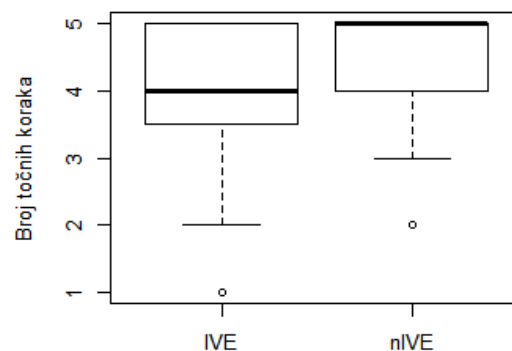
U zadatku 2, ispitanici su trebali prepoznati korake koje je potrebno napraviti kako bi se skuter transformirao iz položaja za vožnju u sklopljeni položaj. Potrebno je izvršiti šest koraka sklapanja za potpunu transformaciju. Pri tome ispitanicima nije rečeno koliko je koraka potrebno napraviti za sklapanje skutera, nego da na kraju skuter treba izgledati jednako kao model skutera u sklopljenom položaju. Ispitanici ni u jednom virtualnom okruženju nisu imali mogućnost rotacije ili translacije elemenata modela, nego se njihovi odgovori temelje na vizualnoj usporedbi dvaju modela i mentalnoj rotaciji [12] elemenata skutera, kako bi si predočili izgled modela nakon rotacije pojedinog elementa.

Aritmetička sredina broja koraka, koje su ispitanici točno prepoznali prilikom pregledavanja skutera u IVE iznosi $(3,8 \pm 1,2)$, $m = 4$, uz raspon od 1 do 5, a u nIVE $(4,5 \pm 0,9)$, $m = 5$, uz raspon od 2 do 5. Rotaciju upravljača i središnjega dijela prepoznao je najveći broj ispitanika u oba virtualna okruženja; u nIVE 19 ispitanika, a u IVE nešto manji broj ($n=17$). Najmanji je broj ispitanika ($n=1$), u oba virtualna okruženja, prepoznao horizontalnu rotaciju sjedala za 180° .



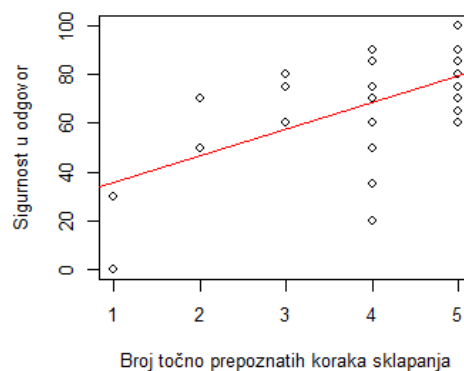
Slika 35. Broj točno prepoznatih koraka sklapanja

S obzirom na to da je broj prepoznatih koraka sklapanja kategorička varijabla, proveden je Wilcoxonov test, koji je pokazao statističku značajnost razlike broja prepoznatih koraka sklapanja u IVE i nIVE ($p = 0,04388$) te sa sigurnosti od 95% možemo tvrditi da je broj prepoznatih koraka u nIVE veći nego u IVE. Prema tome, imerzivno virtualno okruženje nije pozitivno utjecalo na prepoznavanje broja koraka sklapanja.



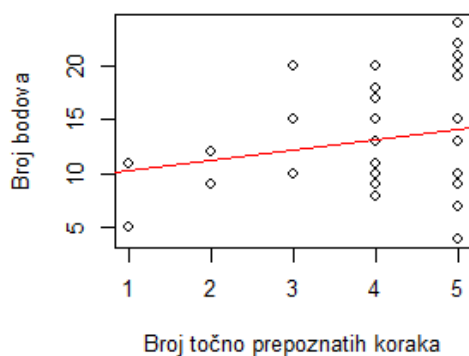
Slika 36. Dijagram pravokutnika broja točno prepoznatih koraka sklapanja

Nakon analize broja točnih koraka, slijedi analiza zavisnosti broja točno prepoznatih koraka i sigurnosti u odgovor. **Slika 37** prikazuje pozitivnu zavisnost broja točno prepoznatih koraka i sigurnosti u točnost odgovora, pri čemu točan odgovor znači da je skuter moguće, izvedbom prepoznatih koraka, transformirati iz položaja za vožnju u sklopljeni položaj. Statističkom analizom dobiveni su rezultati linearne regresije; $R^2 = 0,39, p = 0,0002354, F_{stat} = 7,232$, ali ANOVA nije potvrdila statističku značajnost modela ($p = 0,0722, F = 3,419$). Vizualnom analizom može se primijetiti da se sigurnost u odgovor povećava porastom broja prepoznatih koraka. Aritmetička sredina sigurnosti ispitanika u točnost odgovora iznosi ($64\% \pm 24\%$), $m = 65\%$, uz raspon od 0% do 90% u IVE i ($75,8\% \pm 13\%$), $m = 75\%$, uz raspon od 35% do 100% u nIVE. Prema tome, ispitanici su u nIVE, u prosjeku, bili točniji, ali i sigurniji u točnost svojih odgovora.



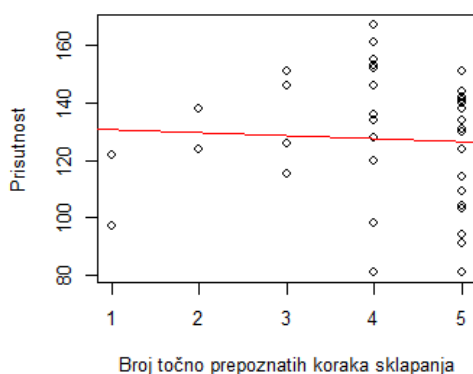
Slika 37. Regresijska analiza zavisnosti broja točno prepoznatih koraka sklapanja i sigurnosti u odgovor

S obzirom na to da za točno rješavanje zadatka 2 ispitanici trebaju imati razvijenu vještinu mentalne rotacije [12], provedena je regresijska analiza ovisnosti broja točno prepoznatih koraka sklapanja (koji određuju točnost izvršenoga zadatka) i ostvarenoga rezultata testa mentalnih rotacija ($p = 0,4109, R^2 = 0,00196, F_{stat} = 1,019$). Graf, prema **Slika 38**, prikazuje pozitivnu zavisnost između broja prepoznatih koraka kao nezavisne varijable i rezultata MRT-a kao zavisne varijable, ali ANOVA nije pokazala statističku značajnost modela ($p = 0,0641, F = 3,636$). Primjećuje se povećanje broja prepoznatih koraka ispitanika povećanjem broja ostvarenih bodova. S druge strane, određeni je broj ispitanika postigao nizak rezultat MRT-a, a prepoznao svih pet mehanizama sklapanja skutera.



Slika 38. Regresijska analiza zavisnosti broja točno prepoznatih koraka sklapanja i rezultata MRT-a

Nakon analize broja točno prepoznatih koraka sklapanja s obzirom na rezultat MRT-a, slijedi analiza zavisnosti broja točno prepoznatih mehanizama i prisutnosti. Graf, prema Slika 39, prikazuje njihovu linearnu zavisnost ($R^2 = 0,03494, p = 0,2701, F_{stat} = 1,353$), pri čemu je ANOVA pokazala statističku značajnost modela ($p = 0,00154, F = 11,65$). Pad regresijske linije ukazuje na smanjenje broja prepoznatih koraka sklapanja povećanjem prisutnosti. Primjećuje se da je veći broj ispitanika, koji su prisutni u virtualnom okruženju ocijenili manjom od 130, prepoznao pet koraka sklapanja nego samo jedan. Svi ispitanici koji su prisutni u virtualnom okruženju procijenili zbrojem bodova manjim od 130, a točno prepoznali pet koraka sklapanja, konstrukciju su pregledavali u nIVE (n=11). Iz toga se može zaključiti da prisutnost u virtualnom okruženju nije pokazala značajan utjecaj na razumijevanje mehanizama ispitivano ovim zadatkom.



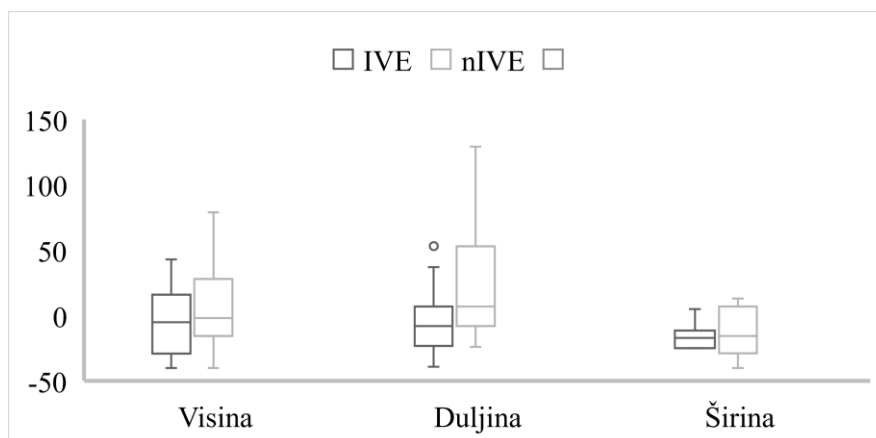
Slika 39. Regresijska analiza zavisnosti broja prepoznatih koraka sklapanja i prisutnosti

5.3.3 Zadatak 3

Ispitanici su u zadatku 3 trebali procijeniti dimenzije sklopljenoga modela skutera prikazanoga u virtualnom okruženju, bez korištenja alata za mjerenje i bez dodatnih dimenzijskih referenci. Za rješavanje zadatka, potrebna je unutarnja statička vještina prostornoga razumijevanja, prema [12]. Dimenzija udaljenosti od naslona sjedala do početka držača nogu (520mm) bila im je poznata iz zadatka za vježbu (poglavlje 4). Greška u procjeni dimenzije računa se kao količnik razlike procijenjene i stvarne dimenzije sa stvarnom dimenzijom. Izražena je u postocima kako bi greške ispitanika bile međusobno usporedive.

Ispitanici, koji su skuter pregledavali u imerzivnom virtualnom okruženju, pogriješili su u procjeni visine skutera u prosjeku za 15,3%, u procjeni duljine 17,8%, a u procjeni širine 20,7%. Pri tome je većina ispitanika sve tri dimenzije procijenila **manjima** nego što jesu. Visinu je 14 ispitanika procijenilo manjom nego što je (aritmetička sredina pogreške iznosi 18,6%), dok je šest ispitanika visinu skutera procijenilo većom nego što je (aritmetička sredina pogreške iznosi 21%). Duljinu je 12 ispitanika procijenilo manjom nego što je, u prosjeku za 17,7%, a osam ju je ispitanika procijenilo većom; za 10,75% prema aritmetičkoj sredini. Širinu je 18 ispitanika procijenilo manjom nego što je (22,1%), dok su dva ispitanika širinu skutera procijenila većom; za 23,3% prema aritmetičkoj sredini.

Ispitanici koji su skuter pregledavali u neimerzivnom virtualnom okruženju, u većem su broju sve tri dimenzije procijenili **većima**; prema aritmetičkoj sredini; visinu za 30%, duljinu za 42,4%, a širinu za 20,2%. Visinu je 10 ispitanika procijenilo većom, za 37,6% prema aritmetičkoj sredini, dok je 10 ispitanika procijenilo dimenziju manjom nego što je; za 15,1%. Najveća su odstupanja zabilježena u procjeni duljine; ispitanici su pogriješili za 42,4% u prosjeku. Od toga je 8 ispitanika duljinu procijenilo kraćom za 13,1% prema aritmetičkoj sredini, a dvanaest ju je ispitanika procijenilo duljom; za 45,3%. Širina skutera pogrešno je procijenjena za 23,1%, prema aritmetičkoj sredini. Deset je ispitanika širinu procijenilo kraćom za 24,5%, a deset ju je ispitanika procijenilo duljom nego što je i, pritom, pogriješilo za 21,6%.

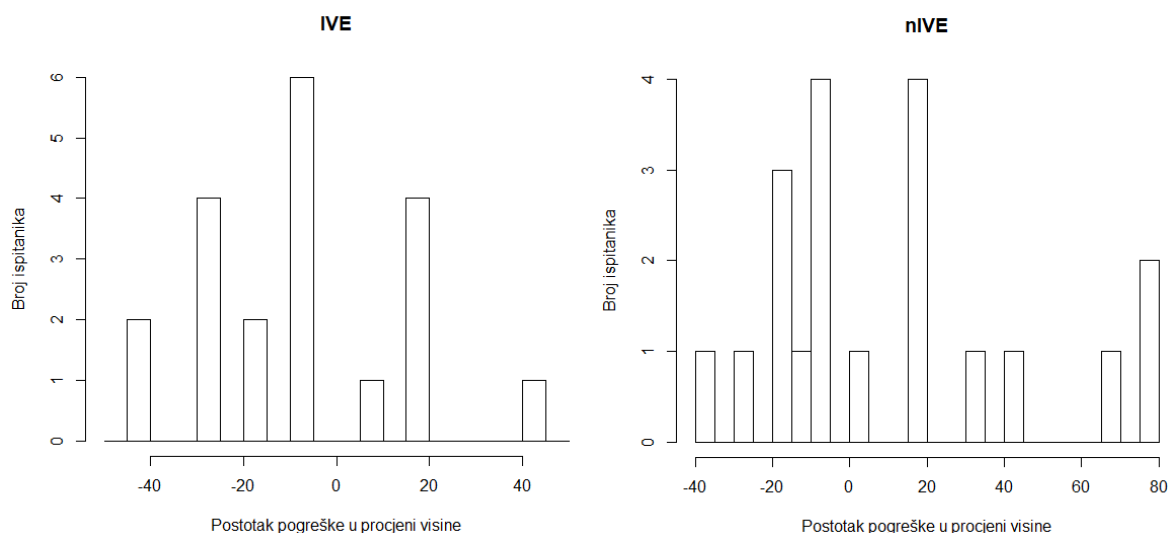


Slika 40. Dijagram pravokutnika pogreške u procjeni dimenzija sklopljenoga skutera

Provedena je statistička analiza kako bi se provjerila statistička značajnost razlike rezultata u IVE i nIVE:

1) Procjena visine

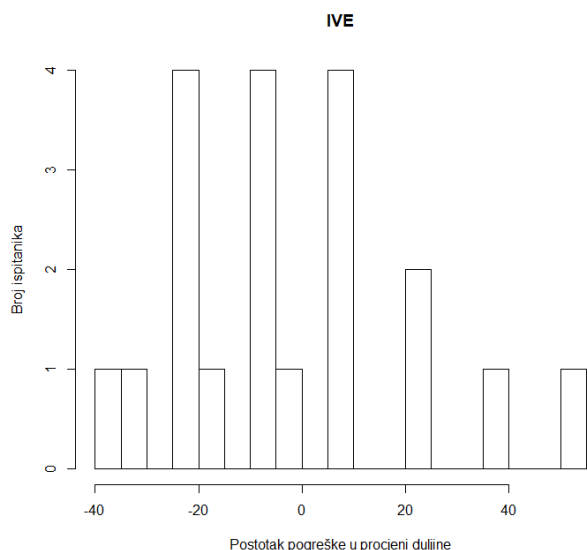
Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni visine u IVE ($p = 0,2114$) ni u nIVE ($p = 0,07099$). Leveneov je test [64] potvrdio homogenost varijanci u IVE i nIVE ($p = 0,1667, F = 1,9878$). S obzirom na to da su normalnost distribucije i homogenost varijanci rezultata prisutnosti potvrđene, proveden je t-test, koji nije potvrdio statistički značajnu razliku u pogreški procjene visine u IVE i nIVE ($p = 0,05769$).



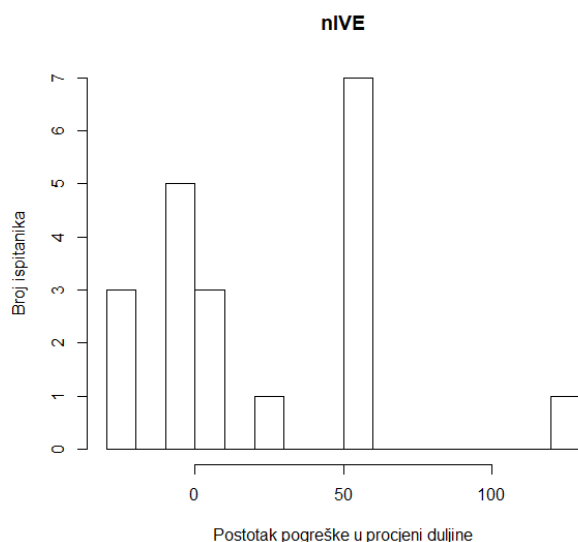
Slika 41. Distribucija pogreška u procjeni visine u IVE **Slika 42. Distribucija pogreška u procjeni visine u nIVE**

2) Procjena duljine

Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da ne postoje statistički značajna odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni duljine u nIVE ($p = 0,4068$), ali da postoje u IVE ($p = 0,007508$). Rezultat Wilcoxonova testa pokazao je statističku značajnost ($p = 0,04555$), uz statističku sigurnost od 95% da su pogreške u procjeni duljine manje u IVE nego u nIVE ($p = 2,964 \cdot 10^{-6}$).



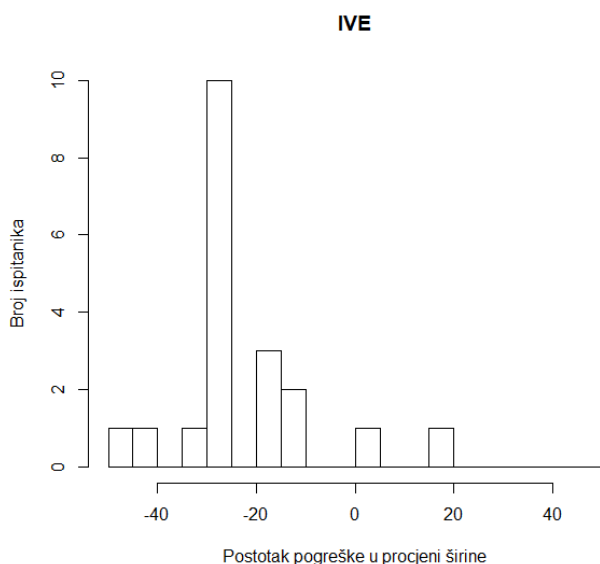
Slika 43. Distribucija pogreške u procjeni duljine u IVE



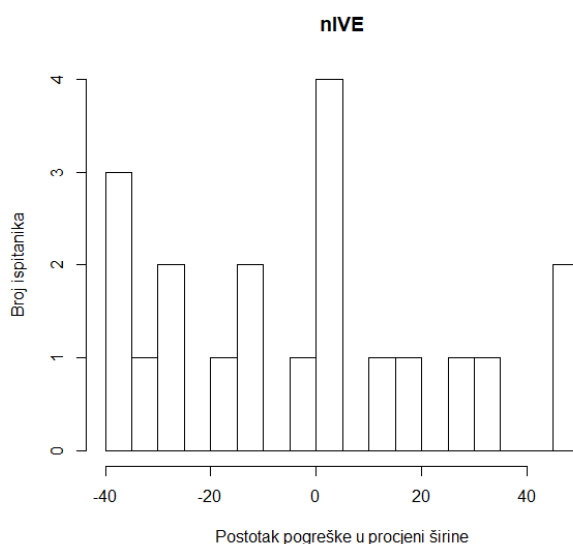
Slika 44. Distribucija pogreške u procjeni duljine u nIVE

3) Procjena širine

Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni širine u nIVE ($p = 0,2932$), ali da postoje u IVE ($p = 0,006166$). Rezultat Wilcoxonova testa pokazao je statističku značajnost ($p = 0,04555$), uz sigurnost od 95% da su pogreške u procjeni duljine manje u IVE nego u nIVE ($p = 0,02277$).



Slika 46. Distribucija pogreške u procjeni širine u IVE



Slika 45. Distribucija pogreške u procjeni širine u nIVE

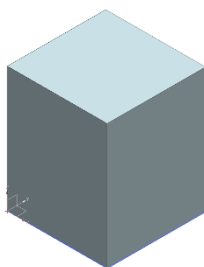
4) Procjena visine, duljine i širine unutar IVE i nIVE

Nakon usporedbe postotka pogreške u procjeni visine, procjeni duljine i procjeni širine skutera u IVE i u nIVE, provodi se provjera statističke značajnosti razlike u pogreški procjene između tri dimenzije unutar istoga virtualnoga okruženja; razlike u pogreški procjene unutar IVE i razlike u pogreški procjene unutar nIVE.

S obzirom na to da je Shapiro-Wilk test pokazao statistički značajna odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni duljine ($p = 0,007508$) i širine ($p = 0,006166$) u IVE, korišten je Kruskal-Wallis test. Potvrđena je statistička značajnost razlike u pogreški procjene dimenzija u IVE ($p = 0,01013$), dok u nIVE nije ($p = 0,1239$). Nakon toga, korišten je Pairwise Wilcoxon test kako bi se provjerila razlika u pogreški procjene između pojedinih dimenzija unutar istoga okruženja. U IVE je potvrđena statistički značajna razlika između pogreške procjene duljine i pogreške procjene širine ($p = 0,0036$). U nIVE nije potvrđena statistički značajna razlika u pogreški procjene visine, duljine i širine.

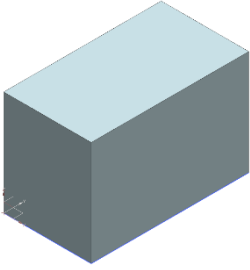
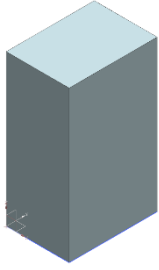
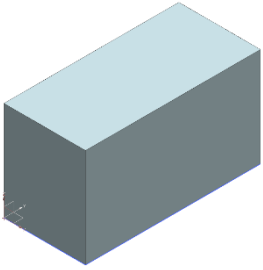
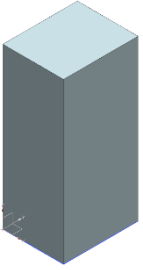
5) Odnos dimenzija

Nakon što su ispitane pogreške u procjeni svake dimenzije zasebno, u nastavku se provodi analiza pogreške u procjeni odnosa dimenzija. Definirana je kao najveća apsolutna razlika u postotku pogreške u procjeni dimenzija; $\max(|Visina - Duljina|, |Duljina - Širina|, |Visina - Širina|)$. Rezultati pokazuju kako je aritmetička sredina pogreške odnosa dimenzija 26% u slučaju pregleda skutera u imerzivnom, a 32,5% za pregledavanje u neimerzivnom virtualnom okruženju. Dvije najveće razlike u procjeni dimenzija, kod ispitanika koji su koristili VS tehnologiju, iznose 68% (visina: 43%, širina: -25%) i 66% (visina: -29%, duljina: 37%). Kod pregleda skutera na zaslonu računala, također se ističu dva slučaja; jedan je ispitanik napravio razliku od +128% u točnosti procjene visine (+1%) i duljine (+129%), dok je razlika u pogreški procjene drugoga ispitanika 93%; visinu je procijenio višom za 79%, a širinu procijenio kraćom za 14%. U tablici su prikazani iznad opisani slučajevi, uz prikaz kvadra čije dimenzije odgovaraju procijenjenim dimenzijama ispitanika. Za usporedbu, **Slika 47** prikazuje kvadar čije dimenzije odgovaraju stvarnim dimenzijama skutera.



Slika 47. Odnos dimenzija skutera

Tablica 3. Pogreška procjene odnosa dimenzija

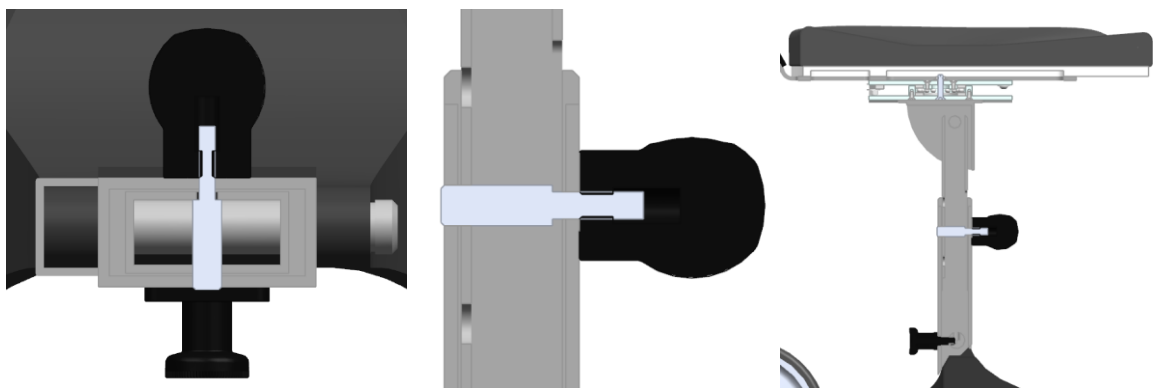
IVE			
Visina: 43%		Visina: -29%	
Duljina: 7%		Duljina: 37%	
Širina: -25%		Širina: -25%	
Razlika: 68%		Razlika: 66%	
nIVE			
Visina: 1%		Visina: 79%	
Duljina: 129%		Duljina: 7%	
Širina: 5%		Širina: -14%	
Razlika: 128%		Razlika: 93%	

U procjenu dimenzija sigurniji su bili ispitanici koji su skuter pregledavali u imerzivnom okruženju, s aritmetičkom sredinom sigurnosti od 67% ($std = 12,5\%$). Aritmetička sredina sigurnosti u procjenu dimenzija iznosi 43,8% ($std = 18\%$) za sudionike koji su skuter pregledavali u nIVE.

5.3.4 Zadatak 4

U zadatku 4, ispitanici su trebali provjeriti postoje li na skuteru konstrukcijske greške koje bi mogle uzrokovati nefunkcionalnost mehanizma za podešavanje visine sjedala. Na skuteru postoje tri greške koje uzrokuju nefunkcionalnost mehanizma za podešavanje visine sjedala:

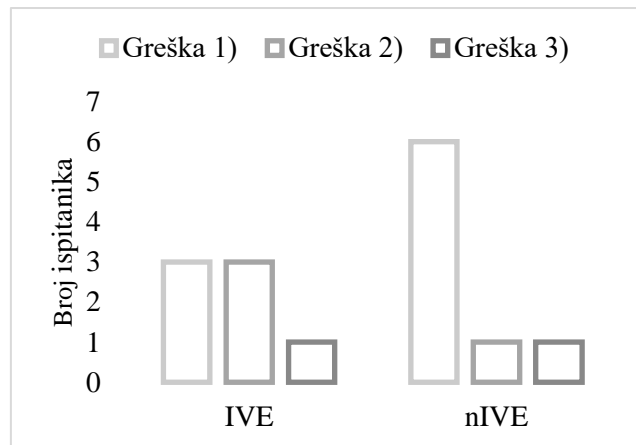
- 1) nemogućnost pomicanja svornjaka u smjeru lijevo-desno uslijed prevelikoga promjera,
- 2) nedostatak provrta vanjskoga profila držača sjedala,
- 3) nemogućnost spuštanja sjedala u najniži položaj zbog prevelike vertikalne dimenzije elementa mehanizma za rotaciju cijeloga sjedala.



Slika 48. Greške funkcionalnosti

Za uspješno rješavanje zadatka, važna je unutarnja statička vještina prostornoga razumijevanja, prema [12] te razumijevanje mehanizama, s obzirom na to da je za pronalazak sve tri greške potrebno prethodno razumjeti način na koji mehanizam radi (*eng. affordance error* [65] [44]). Odgovor se smatra točnim ako je ispitak prepoznao barem jednu od tri navedene konstrukcijske greške.

U imerzivnom je okruženju sedam ispitanika prepoznalo jednu grešku funkcionalnosti; tri ispitanika grešku navedenu pod 1), uz sigurnost od 80%, tri ispitanika grešku 2) uz sigurnosti od 20%, 50% i 70% te jedan ispitanik grešku 3) uz sigurnost od 30%. U neimerzivnom je virtualnom okruženju šest ispitanika prepoznalo greške funkcionalnosti mehanizma navedenu pod 1), uz sigurnosti od 70% (n=2), 60% (n=2) i 50% (n=2). Pri tome je jedan od njih prepoznao i ostale dvije greške; navedene pod 2) i 3).



Slika 49. Distribucija grešaka funkcionalnosti

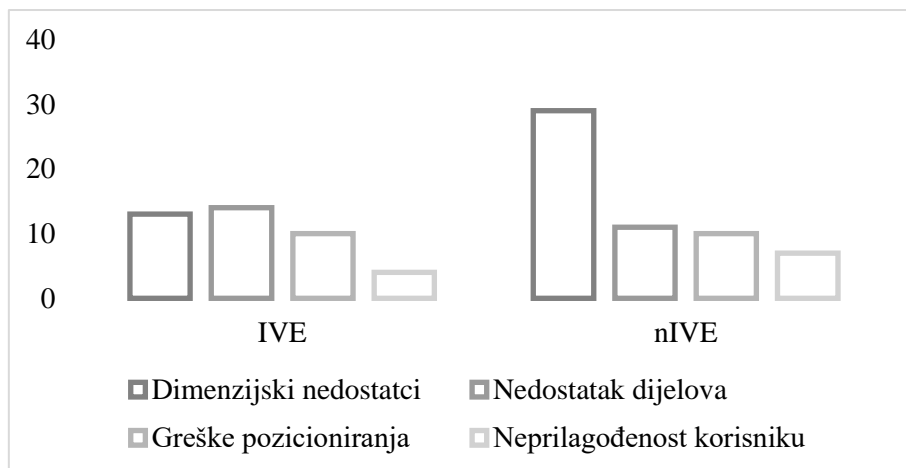
Od preostalih 13 ispitanika u IVE, osam ih nije pronašlo nikakvu greške, dok pet ispitanika nije pronašlo tražene greške funkcionalnosti, ali su kao nedostatke mehanizma naveli; prenizak položaj ručke mehanizma (n=1), neprilagođenost mehanizma korisniku jer mora držati cijelo sjedalo kako bi namjestio visinu (n=1), probleme u održavanju mehanizma jer bi nešto moglo zapriječiti provrte (n=1), nedostatak odstoynih čahura (n=1), trenje kao jedino mehaničko osiguranje od ispadanja (n=1). U nIVE, 9 ispitanika nije pronašlo nikakve greške, a pet je ispitanika navelo greške koje nisu greške funkcionalnosti mehanizma; premali promjeri provrta da bi izdržali težinu sjedala i korisnika (n=3), neprilagođenost mehanizma korisniku jer mora držati cijelo sjedalo kako bi namjestio visinu (n=1), mogući problemi s izvlačenjem svornjaka uslijed velikoga trenja (n=1).

Prosječna sigurnost ispitanika koji nisu pronašli grešku funkcionalnosti mehanizma, da bi mehanizam radio s obzirom na trenutno konstrukcijsko rješenje, iznosi 44% u IVE, a 49% u nIVE.

Prema tome, rezultati nisu pokazali bitnu razliku u broju prepoznatih grešaka funkcionalnosti mehanizma za podešavanje visine sjedala s obzirom na virtualno okruženje u kojem se konstrukcija pregledavala.

5.3.5 Zadatak 5

Ispitanici su u zadatku 5 trebali pregledati skuter s obzirom na konstrukcijske nedostatke ili nedostatke modela, koje su u mogućnosti uočiti i objasniti, slično kao u [44], [55]. Za razliku od zadatka 4, ne postoje unaprijed određeni nedostatci prema kojima se definira točnost odgovora. Zbog toga se u analizi ne navodi točnost nedostataka koje su ispitanici prepoznali, nego broj i vrsta nedostataka primijećenih u pojedinom virtualnom okruženju. Nedostatci su podijeljeni u četiri skupine; dimenzijski nedostatci, nedostatak dijelova, greške pozicioniranja i neprilagođenost konstrukcije korisniku.

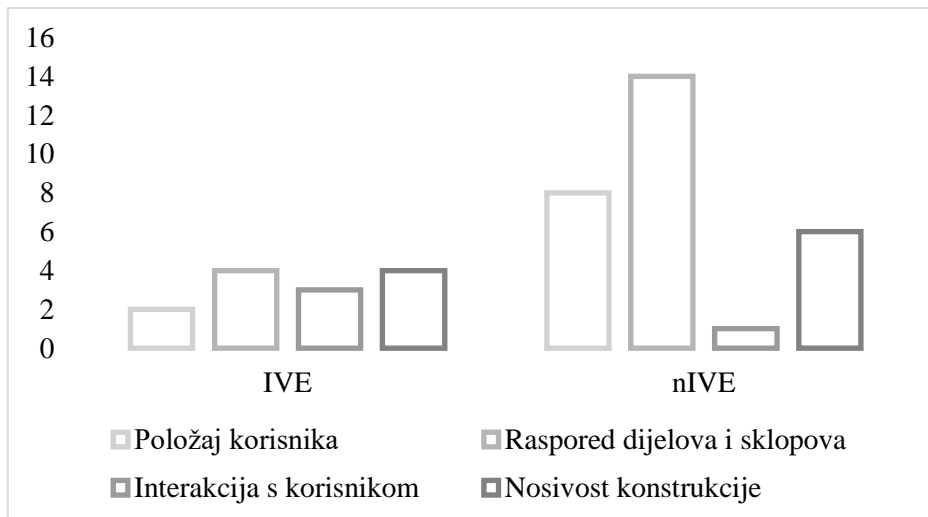


Slika 50. Distribucija prepoznatih nedostataka

Slika 50 prikazuje broj nedostataka svake skupine, koji su ispitanici prepoznali u IVE i u nIVE. Najveća se razlika primjećuje u broju prepoznatih dimenzijskih nedostataka; u nIVE su primijećena 22, a u IVE je primijećeno šest nedostataka. U neimerzivnom virtualnom okruženju, ispitanici su naveli 11 elemenata koje bi konstrukcija trebala imati, a nema, dok su ih u imerzivnom virtualnom okruženju naveli 14. Greške pozicioniranja elemenata prepoznate su u jednakom broju; deset grešaka u oba virtualna okruženja. Ispitanici su i IVE primijetili četiri nedostatka konstrukcije koja uzrokuju neprilagođenost konstrukcije korisniku, a u nIVE sedam.

5.3.5.1 Dimenzijski nedostaci

Dimenzijski se nedostaci odnose na primjedbe vezane uz premale dimenzije ili predimenzioniranost elemenata te udaljenosti među njima. Na temelju komentara ispitanika, podijeljene su u četiri skupine s obzirom na karakteristike skutera: položaj korisnika (omogućuju li raspored elemenata skutera i udaljenosti među njima vožnju u primjerenom položaju), raspored dijelova i sklopova (odabir prigodnih dimenzija elemenata, iskoristivost prostora), interakcija s korisnikom (prilagođenost sučelja skutera korisniku), nosivost konstrukcije (mogućnost prijenosa potrebnoga opterećenja s obzirom na dimenzije).



Slika 51. Broj prepoznatih dimenzijskih nedostataka

Najveća se razlika u broju dimenzijskih nedostataka javlja u komentarima koji se odnose na optimizaciju konstrukcije; ispitanici koji su konstrukciju pregledavali u nIVE pronašli su 14 nedostataka konstrukcije koji, a ispitanici u IVE 4. Također, veći je broj ispitanika u nIVE komentirao nedostatke vezane uz položaj za vožnju ($n=8$), nego u IVE ($n=2$). Ispitanici su u IVE pronašli 4 dimenzijska nedostatka konstrukcije koja utječu na funkcionalnost konstrukcije, a ispitanici u nIVE jedan. Tri dimenzijska nedostatka koja utječu na interakciju s korisnikom prepoznata su u IVE, a 1 u nIVE.

Položaj za vožnju

U imerzivnom virtualnom okruženju, dva su ispitanika primijetila da je upravljač postavljen predaleko od sjedala. Istu je primjedbu dalo četvero ispitanika u neimerzivnom virtualnom okruženju. Osim toga, kao grešku položaja vožnje, ispitanici su u neimerzivnom virtualnom okruženju primijetili; da je prednji dio podvozja predugačak ($n = 1$), držač sjedala treba pomaknuti nazad kako bi se smanjila opasnost od prevrtanja korisnika ($n = 2$), provrta na profilu mehanizma za podešavanje sjedala trebali bi biti više razmaknuti ($n = 1$).

Raspored dijelova i sklopova

Četiri su ispitanika; tri u imerzivnom virtualnom okruženju, a jedan u neimerzivnom, primijetila da bi zadnji kotači trebali biti veći. Jedan ispitanik u neimerzivnom virtualnom okruženju smatra da je podvozje skutera nepotrebno predimenzionirano. U neimerzivnom virtualnom okruženju, prepoznati su sljedeći nedostaci konstrukcije; postoji neiskorišteni dio prostora kad je skuter sklopljen ($n = 1$), središnji svornjak je predugačak ($n = 3$), osovina kotača je predugačka ($n = 4$), kutija upravljača je prevelika ($n = 1$), vilica upravljača preširoka ($n = 1$), konstrukcija je preteška jer su elementi izrađeni

iz punoga materijala ($n = 1$), aksijalni ležaj na zadnj kotače staviti i podlošku kako bi se smanjilo trenje ($n = 1$).

Interakcija s korisnikom

Jedan je ispitanik u imerzivnom virtualnom okruženju primijetio da bi držači nogu trebali biti veći, držači ruku duži i sklopivi te ručka mehanizma za podešavanje kuta upravljača šira kako bi je korisnici mogli uhvatiti. U neimerzivnom virtualnom okruženju, jedan je ispitanik komentirao da bi ručke mehanizma za podešavanje visine držača ruku trebale biti veće kako bi njihovo korištenje bilo lakše.

Nosivost konstrukcije

Tri ispitanika u imerzivnom virtualnom okruženju, a dva u neimerzivnom smatraju da je element mehanizma za podešavanje kuta upravljača pretanak da bi izdržao opterećenja. Sličan je problem s ručkom središnjega mehanizma za sklapanje primijetio jedan ispitanik u imerzivnom virtualnom okruženju. U neimerzivnom su okruženju primijećene još tri dimenzijske greške koje se odnose na funkcionalnost mehanizma; jedan je ispitanik primijetio da je svornjak mehanizma za podešavanje visine upravljača prekratak, jedan da bi opruga naslona sjedala trebala biti većeg promjera da bi podnijela opterećenja, jedan da su vijci na preklopu prednjega i zadnjega dijela podvozja premaloga promjera, a jedan da nema osiguranja aksijalnoga pomaka zadnjih kotača.

5.3.5.2 Nedostatak dijelova

U imerzivnom je okruženju primijećen nedostatak sljedećih elemenata: vijci ispod sjedala ($n = 2$), vijci na prirubnicama ručaka, vijci na mehanizmu za sklapanje naslona sjedala ($n = 1$), uskočnik ($n = 1$), ručka za spuštanje naslona sjedala, vijci i provrti na mehanizmu za podešavanje visine upravljača ($n = 1$), sigurnosni pojas, kočnice ($n = 2$), sigurnosni mehanizam za zaključavanje skutera, veza između baterije i motora, bolja zaštita baterije ($n = 1$), odstojna čahura na spoju vilice i prednjega kotača. Ispitanici su u neimerzivnom okruženju komentirali da na skuteru nedostaju vijci na mehanizmu za podešavanje visine upravljača ($n = 1$) i ploči ispod sjedala ($n = 5$), svjetla ($n = 2$), brzinomjer ($n = 1$), krov ($n = 1$), uskočnik na svornjaku mehanizma za rotaciju držača sjedala ($n = 1$).

5.3.5.3 Greške pozicioniranja elemenata

Ispitanici su u imerzivnom virtualnom okruženju primijetili da se opruga u donjem dijelu upravljača ne nalazi na *svornjacima* ($n = 4$), da provrti na vrhu unutarnjega profila mehanizma za podešavanje visine upravljača nemaju nikakvu svrhu ($n = 1$) te da je ručka mehanizma za rotaciju cijeloga sjedala krivo pozicionirana u odnosu na svornjak ($n = 2$). Osim toga, primijetili su da je ručka mehanizma za podešavanje visine sjedala svojim volumenom ulazi u središnji dio skutera kada je u sklopljenom položaju ($n = 1$), stranice kutije upravljača nisu pravilno povezane ($n = 1$), onemogućena je rotacija središta prednjega kotača zbog svornjaka ($n = 1$), matica unutar kutije upravljača nije pričvršćena ($n = 1$).

U neimerzivnom su okruženju također primijećene pogreške vezane uz nepravilno pozicioniranje opruge u donjem dijelu upravljača ($n = 2$), ručke mehanizma za rotaciju cijeloga sjedala ($n = 3$). Uz to, dva su ispitanika komentirala da vijak onemogućuje kretanje ručke za rotaciju sjedala oko z-osi po putanji po kojoj je zamišljeno, a dva da je uskočnik na svornjaku mehanizma za rotaciju cijeloga sjedala previše izmaknut.

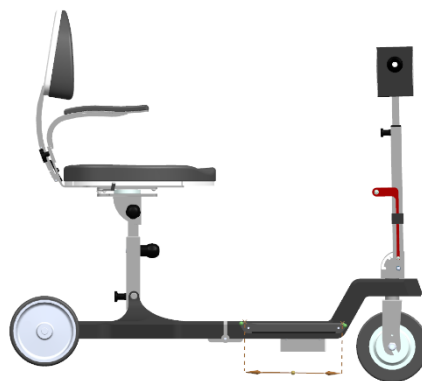
5.3.5.4 Neprilagođenost konstrukcije korisniku

Komentari ispitanika koji su konstrukciju pregledavali u imerzivnom okruženju usmjereni na elemente čije oblikovanje ne omogućuje dobru interakcije s korisnikom su; ručka za rotaciju sjedala oko z-osi nije ergonomično oblikovana ($n = 1$), zaslon bi trebao biti pod kutom kako bi ga korisnik mogao vidjeti ($n = 1$), ručke mehanizama za podešavanje i sklapanje trebale bi biti druge boje uz odgovarajuće signale ($n = 1$), središnji dio s držačima nogu trebao bi biti pod kutom ($n = 1$).

U neimerzivnom su okruženju također primijećene četiri greške vezane uz interakciju s korisnikom; cijev upravljača nije ergonomično oblikovana ($n = 1$), ručka za rotaciju sjedala oko z-osi nije ergonomično oblikovana ($n = 1$), ručka mehanizma za rotaciju upravljača nije ergonomično oblikovana ($n = 1$), ručke mehanizama trebale bi biti druge boje ($n = 1$), kut držača nogu trebao bi biti podesiv ($n = 1$), baterija bi trebala biti na mjestu koje je pristupačnije za punjenje ili zamjenu ($n = 1$), naslon sjedala bi trebao biti viši ($n = 1$).

5.3.6 Zadatak 6

U zadatku 6 ispitanici su trebali procijeniti može li njihovo stopalo stati na držače nogu s obzirom na njihovu duljinu, pri čemu im je duljina držača nogu bila poznata jer su je izmjerili na početku zadatka korištenjem alata za mjerenje. Prema [12], vanjska statička vještina prostornoga razumijevanja važna je za izvršavanje zadatka jer ispitanik stavlja u odnos sebe i virtualni model. Usporedbom antropometrijskih mjera s dimenzijama držača nogu, ustanovljena je točnost njihove procjene.



Slika 52. Model skutera s označenom dimenzijom duljine držača nogu

U imerzivnom je virtualnom okruženju 15 ispitanika točno procijenilo mogućnost postavljanja svojih stopala na držače nogu, a pet netočno, uz sigurnost svih ispitanika od $(79,3\% \pm 16,1\%)$. Pri tome je stopalo dvoje ispitanika s točnom procjenom neznatno manje od duljine držača nogu (0,5 mm), a njihova je sigurnost u odgovor visoka (85% i 100%), što može ukazivati na preveliku samouvjerenost, bez stvarnoga razumijevanja odnosa dimenzija.

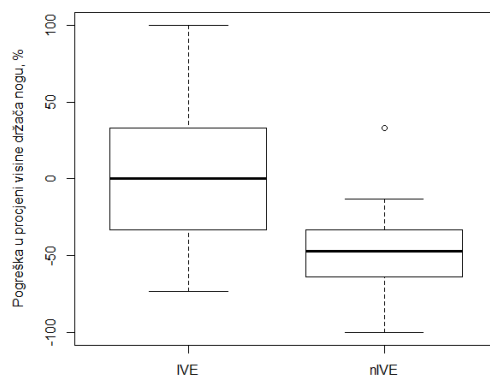
U neimerzivnom virtualnom okruženju, deset je ispitanika pogriješilo u procjeni mogućnosti postavljanja stopala na držače nogu, dok je deset ispitanika procijenilo ispravno, uz prosječnu sigurnost svih ispitanika od $(78\% \pm 22,6\%)$. Od ispitanika koji su točno procijenili mogućnost postavljanja stopala na držače nogu, tri su ispitanika bila u potpunosti sigurna u svoj odgovor (100%), iako su držači nogu neznatno duži od njihovih stopala (u dva slučaja 0,1 mm, a u jednom 8 mm), što može ukazivati na nerazumijevanje stvarnoga odnosa dimenzija.

Aritmetička sredina sigurnosti u odgovor ispitanika, koji su pogriješili u procjeni u IVE iznosi 75%, uz aritmetičku sredinu razlike duljine držača nogu i stopala od 6,6 mm. U nIVE, aritmetička sredina sigurnosti u odgovor, ispitanika koji su pogriješili u procjeni, iznosi 73%, uz aritmetičku sredinu razlike duljine držača nogu i stopala od 7 mm.

5.3.7 Zadatak 7

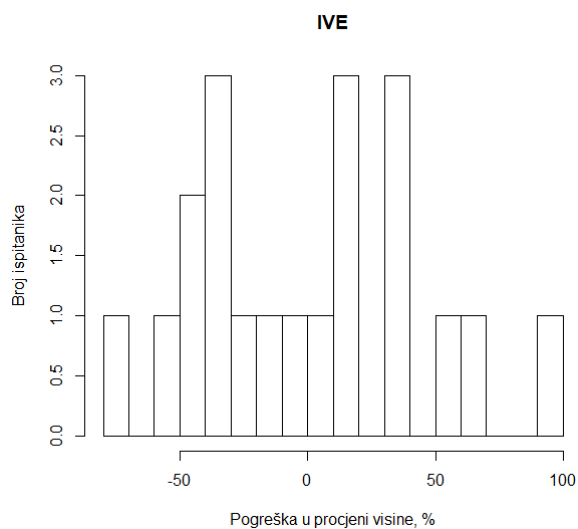
U zadatku 7, ispitanici su procjenjivali mogu li biti u odgovarajućem položaju za vožnju na skuteru prikazanom u virtualnom okruženju. Pri tome stavljaju u odnos sebe i virtualni model pa je, za rješavanje zadatka, važna vanjska statička vještina prostornoga razumijevanja, prema [12]. Ispitanicima je u zadatku bila dostupna stolica čiji je naslon okomit na sjedalo, a sjedalo postavljeno na visinu jednaku visini sjedala skutera prikazanoga virtualnom modelom (550 mm od razine tla). Zadatak je podijeljen na tri dijela; postavljanje noge u stvarnom okruženju na procijenjenu visinu držača nogu, zauzimanje odgovarajućega položaja za vožnju radi procjene udaljenosti između pete i leđa te procjena mogućnosti sjedenja na skuteru u odabranom položaju za vožnju. Usporedbom izmjerenih antropometrijskih mjera s dimenzijama skutera prikazanoga u virtualnom okruženju, ustanovljena je točnost njihove procjene.

Prvi se dio zadatka odnosi na pozicioniranje ispitanikove noge na visinu koja odgovara visini držača nogu u virtualnom okruženju. Ispitanici koji su skuter pregledavali u imerzivnom virtualnom okruženju, u prosjeku su nogu pogrešno pozicionirali za $(36,6\% \pm 23,1\%)$, $m = 0$, uz raspon od -73% do 100%, od čega je deset ispitanika nogu postavilo previsoko (u prosjeku za 37,9%), dok su četiri ispitanika nogu postavila prenisko (u prosjeku za 35,2%), a šest je ispitanika bilo točno u procjeni visine. U neimerzivnom virtualnom okruženju, aritmetička sredina pogreške u procjeni iznosi 51,7% ($std = 24,8\%$), $m = -47$, uz raspon od -69 do 32, pri čemu je 19 ispitanika nogu postavilo prenisko (uz postotak pogreške od 52,6%), a jedan je ispitanik nogu postavio previsoko i pogriješio za 33%.

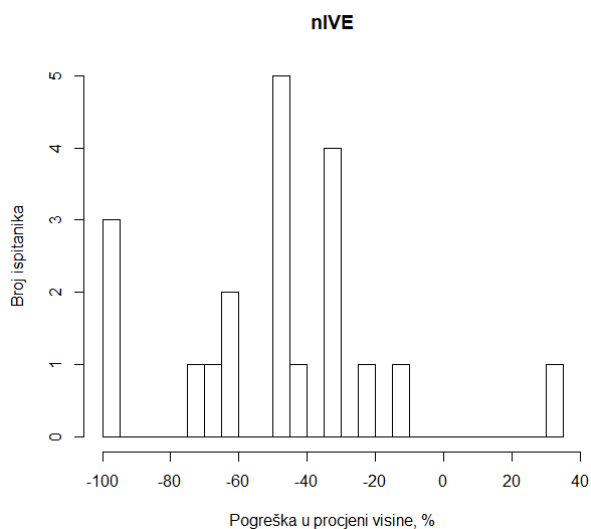


Slika 53. Dijagram pravokutnika za pogrešku procjene visine držača nogu

Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni visine u IVE ($p = 0,8246$) ni u nIVE ($p = 0,1248$). Leveneov test [64] nije potvrdio homogenost varijanci u IVE i nIVE ($p = 0,04938, F = 4,1216$) pa se provodi Welchov t-test. Rezultat je potvrdio statistički značajnu razliku u pogreški procjene visine držača nogu u IVE i nIVE ($p = 0,0002519$).



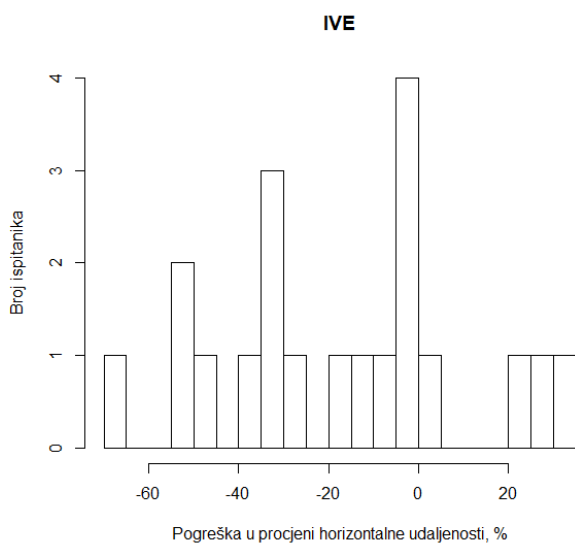
Slika 55. Distribucija pogreške u procjeni visine u IVE



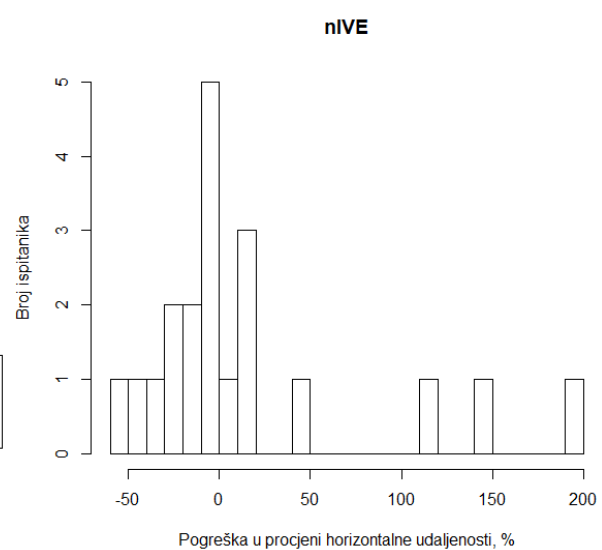
Slika 54. Distribucija pogreške u procjeni visine u nIVE

Drugi se dio zadatka odnosi na procjenu horizontalne udaljenosti između naslona sjedala na koji je ispitanik naslonjen i ispitanikove pete, kako bi se provjerilo prostorno razumijevanje dimenzije u stvarnom okruženju i imerzivnom virtualnom okruženju. Ispitanici, pritom, u stvarnom okruženju sjede na stolici, čije je sjedalo postavljeno na visinu od 550 mm, u položaju koji smatraju odgovarajućim za vožnju skutera. Taj položaj ispitanici određuju individualno. Ispitanici koji su skuter pregledavali u imerzivnom virtualnom okruženju, u prosjeku su pogriješili za $25,7\% \pm 19\%$, $m = -14$ u procjeni, pri čemu je većina ispitanika ($n=15$) udaljenost procijenila kraćom nego što je izmjerena, u prosjeku za 28,4%. Četiri su ispitanika udaljenost procijenila duljom za 21,8% u prosjeku, a jedan je bio točan u procjeni. Prosječna greška u procjeni udaljenosti ispitanika koji su skuter pregledavali u neimerzivnom virtualnom okruženju iznosi $38,8\% \pm 53,1\%$, $m = 0$. Pet je ispitanika bilo točno u procjeni, osam je ispitanika udaljenost procijenilo duljom (u prosjeku za 71,3%), dok je sedam ispitanika udaljenost procijenilo kraćom (za 29,4% u prosjeku).

Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni visine u IVE ($p = 0,7808$), ali da ima u nIVE ($p = 0,0006238$).

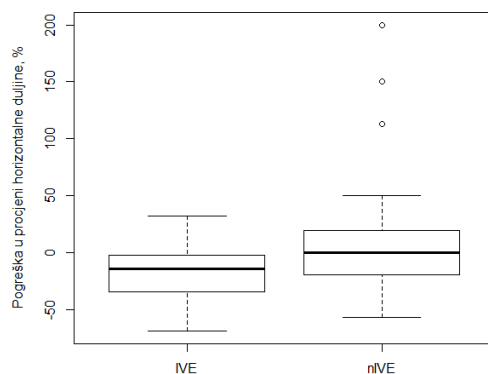


Slika 56. Procjena horizontalne udaljenosti u IVE



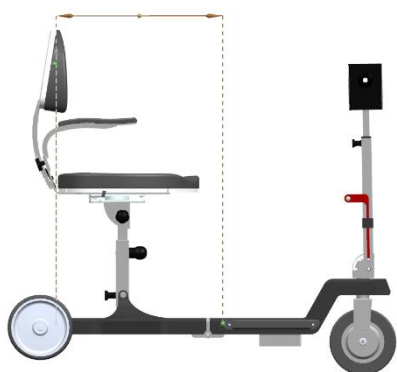
Slika 57. Procjena horizontalne udaljenosti u nIVE

Rezultat Wilcoxonova testa pokazao je statističku značajnost ($p = 0,04488$), uz statističku sigurnost od 95% da su pogreške u procjeni horizontalne duljine manje u IVE nego u nIVE ($p = 0,02244$).

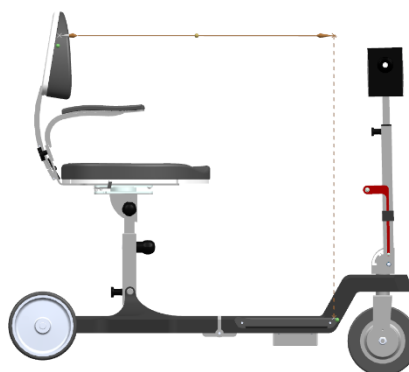


Slika 58. Dijagram pravokutnika za pogrešku u procjeni horizontalne duljine

Treći se dio zadatka odnosi na procjenu mogućnosti sjedenja u odgovarajućem položaju za vožnju definiranom u drugom dijelu zadatka, s obzirom na dimenzije skutera. Udaljenost držača nogu i naslona sjedala na skuteru je definirana i ne može se prilagoditi korisniku (iznosi 520 mm), a duljina držača nogu iznosi 280 mm. Odgovarajući položaj definiran je kao položaj u kojemu ispitanici istovremeno mogu sjediti na sjedalu (visine 550 mm), biti leđima naslonjeni na naslon sjedala i većinu površine stopala postaviti na držače nogu (udaljeni su 520 mm od naslona i dugi 280 mm). Ispitanici mogućnost sjedenja u odgovarajućem položaju na skuteru određuju usporedbom udaljenosti od pete do leđa s udaljenosti početka držača nogu i naslona sjedala (520 mm) te od vrha prstiju do naslona sjedala (520 mm + 280 mm). Većina površine stopala definira se kao najmanje 70% duljine stopala postavljene na držačima nogu. To znači da udaljenost između naslona sjedala i pete ispitanika mora iznositi najmanje $(520 - 0,3 \cdot \text{duljina noge})$ mm da bi se položaj definirao kao položaj za vožnju u kojem ispitanik može voziti prikazani skuter. Analogno, udaljenost od sjedala do vrha prstiju ispitanika ne smije biti veća od $(800 + 0,3 \cdot \text{duljina noge})$ mm.



Slika 60. Udaljenost naslona i početka držača nogu



Slika 59. Udaljenost naslona i kraja držača nogu

Sigurnost ispitanika u odgovor odnosi se samo na treći dio zadatka. Sigurnost svih ispitanika u IVE iznosi $76\% \pm 13\%$, $m = 70\%$. Jedanaest je ispitanika točno procijenilo mogućnost sjedenja na skuteru u odabranom položaju (uz sigurnost $(72,7\% \pm 13,5\%)$, $m = 70\%$), a devet ih je pogriješilo (uz sigurnost $(78,9\% \pm 12\%)$, $m = 80\%$). Od devet ispitanika koji su pogriješili u procjeni, osam ih je izjavilo da bi na skuteru mogli biti u odabranom položaju, a dimenzije skutera ne bi bile odgovarajuće u stvarnosti (za sedam ispitanika udaljenost od naslona do prstiju bi bilo prekratka, a za jednoga bi udaljenost od naslona do pete bila predugačka), dok je jedan izjavio da na skuteru ne bi mogao biti u odabranom položaju, a dimenzije skutera su bile odgovarajuće. Medijan razlike u duljini (između naslona i početka ili kraja držača nogu), koja uzrokuje nemogućnost postavljanja nogu na željenu udaljenost od naslona, iznosi $m = 24$ mm (uz raspon od -50 mm do 129 mm).

Sigurnost svih ispitanika u nIVE iznosi $(64\% \pm 22\%)$, $m = 65\%$. Jedanaest je ispitanika točno procijenilo mogućnost sjedenja na skuteru u odabranom položaju (uz sigurnost $(59,1\% \pm 25,4\%)$, $m = 60\%$), a devet ih je pogriješilo (uz sigurnost $(70\% \pm 13,3\%)$, $m = 70\%$). Svih devet ispitanika koji su pogriješili reklo je da bi na skuteru mogli biti u odabranom položaju, a dimenzije skutera ne bi bile odgovarajuće u stvarnosti (za pet ispitanika udaljenost od naslona do prstiju bi bilo prekratka, a za četiri bi udaljenost od naslona do pete bila predugačka). Medijan razlike u duljini (između naslona i početka ili kraja držača nogu), koja uzrokuje nemogućnost postavljanja nogu na željenu udaljenost od naslona, iznosi $m = 30$ (uz raspon od -50 mm do 230 mm).

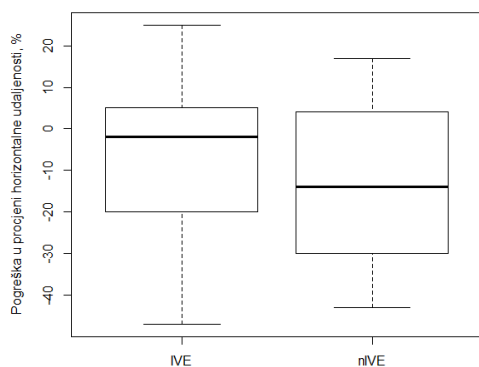
5.3.8 Zadatak 8

U zadatku 8, ispitanici su procjenjivali mogu li biti u odgovarajućem položaju za vožnju na skuteru prikazanom u virtualnom okruženju, s obzirom na visinu ručki upravljača i njihovu udaljenost od naslona sjedala. Za rješavanje zadatka važna je vanjska statička vještina prostornoga razumijevanja (ispitanici stavljaju u odnos sebe i virtualni model), ali i vanjska dinamička vještina (provjeravaju mogućnost sjedenja u odabranom položaju u ovisnosti o mogućnostima mehanizma za podešavanje visine i kuta nagiba upravljača), prema [12]. kao i u zadatku 7, ispitanicima je bila dostupna stolica. Zadatak je podijeljen na tri dijela; postavljanje ruku (u stvarnom okruženju) u položaj u kojem bi ispitanicima odgovaralo držati upravljač za vrijeme vožnje, procjena visine na koju su postavili ruke (od razine tla) i horizontalne udaljenosti šaka od leđa te procjena mogućnosti postavljanja upravljača u odabrani položaj za vožnju (ovisno o mogućnostima mehanizma za podešavanje visine i kuta nagiba upravljača). Usporedbom izmjerenih antropometrijskih mjera s dimenzijama skutera prikazanoga u virtualnom okruženju, ustanovljeno je je li njihova procjena točna ili nije.

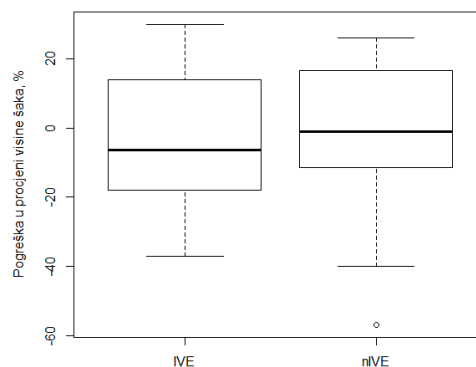
Prvi se dio zadatka odnosi na pozicioniranje ruku ispitanika u položaj u kojem bi im bilo ugodno držati upravljač za vrijeme vožnje. Ispitanici, pritom, u stvarnom okruženju sjede na stolici odgovarajuće visine (550 mm). Istraživač je izmjerio visinu šaka i horizontalnu udaljenost između šaka i leđa kako bi

se dimenzije mogle usporediti s procijenjenim dimenzijama ispitanika te kako bi se provjerila točnost procjene.

U drugom su dijelu ispitanici trebali procijeniti visinu na koju su postavili šake (predstavlja visinu upravljača) i horizontalnu udaljenost između leđa i šaka (predstavlja horizontalnu udaljenost od naslona do upravljača skutera). Pogreška procjene postotna je vrijednost koja se računa kao razlika između vrijednosti izmjere iz prvoga dijela zadatka i vrijednosti procjene ispitanika iz drugoga dijela. Ispitanici koji su skuter pregledavali u imerzivnom okruženju, u prosjeku su pogriješili u procjeni visine svojih ruku za $(16,8\% \pm 19,1\%)$, $-m = -6,5\%$, a raspon od -37 do 24. Dva su ispitanika bila točna u procjeni, jedanaest je ispitanika visinu procijenilo nižom nego što je, u prosjeku za 18,2%, a pet ispitanika višom, u prosjeku za 15%. Horizontalnu udaljenost između leđa i šaka ruku, ispitanici su pogrešno procijenili za $(10,9\% \pm 18,6\%)$, $m = -2\%$, a raspon od -47% do 25%. Deset je ispitanika udaljenost procijenilo duljom nego što, u prosjeku za 5,6%, a deset ju je ispitanika procijenilo kraćom (za 22,6% u prosjeku). Prosječna greška procjene visine položaja šaka ispitanika u nIVE iznosi $(16,3\% \pm 20,9\%)$, $m = -1\%$, a raspon od -57% do 22%. Jedan je ispitanik bio točan u procjeni, devet je ispitanika visinu procijenilo višom nego što je, u prosjeku za 15,1%, a deset ju je ispitanika procijenila nižom, u prosjeku za 17,1%. Greška procjene horizontalne udaljenosti u prosjeku iznosi $(19,2\% \pm 19\%)$, $m = -14,1\%$, a raspon od -43% do 17%. Jedan je ispitanik bio točan u procjeni, pet je ispitanika udaljenost procijenilo duljom (u prosjeku za 12,1%), a pet ispitanika kraćom (u prosjeku za 23,1%).



Slika 61. Dijagram pravokutnika za horizontalnu udaljenost

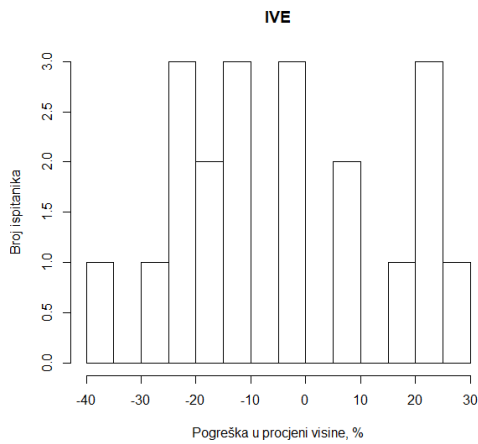


Slika 62. Dijagram pravokutnika za visinu šaka

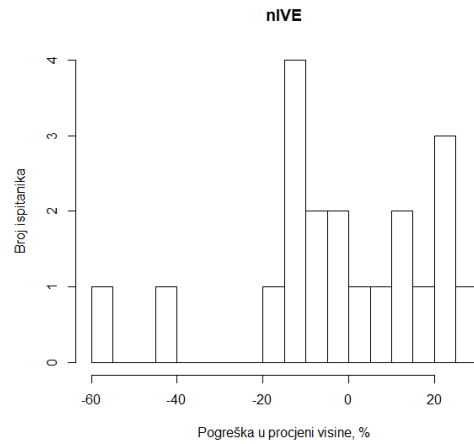
1) Statistička analiza procjene visine šaka

Provedena je statistička analiza kako bi se provjerila statistička značajnost razlike u pogreški procjene visine u dva okruženja. Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni visine u IVE ($p = 0,4033$) ni u nIVE ($p = 0,09581$). Leveneov je test [64] potvrdio homogenost varijanci u okruženjima ($p = 0,9478$, $F = 0,0043$). S obzirom na to da su normalnost distribucije i homogenost varijanci

rezultata prisutnosti potvrđene, proveden je t-test, koji nije potvrdio statistički značajnu razliku u pogreški procjene visine u okruženjima ($p = 0,7427$).



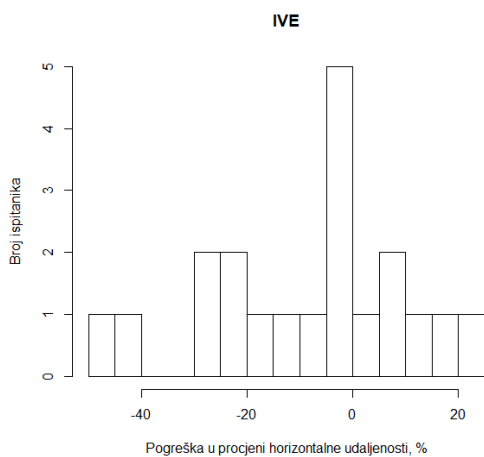
Slika 64. Pogreška u procjeni visine šaka u IVE



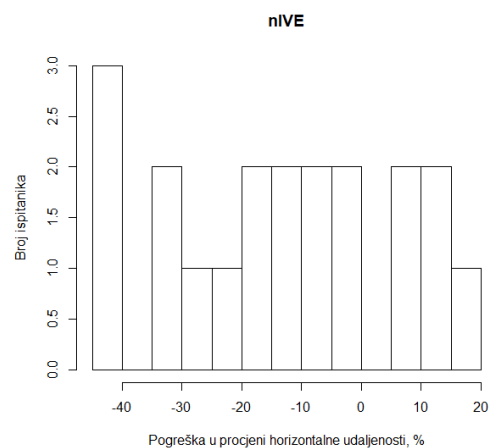
Slika 63. Pogreška u procjeni visine šaka u nIVE

2) Statistička analiza procjene horizontalne udaljenosti od šaka do leđa

Provedena je statistička analiza kako bi se provjerila statistička značajnost razlike u pogreški procjene visine u dva okruženja. Shapiro-Wilk test [62], [63] normalnosti distribucije pokazao da je nema statistički značajnih odstupanja normalnosti distribucije postotka pogreške u procjeni visine u IVE ($p = 0,6448$) ni u nIVE ($p = 0,3242$). Leveneov je test [64] potvrdio homogenost varijanci u okruženjima ($p = 0,8315, F = 0,0459$). S obzirom na to da su normalnost distribucije i homogenost varijanci rezultata prisutnosti potvrđene, proveden je t-test, koji nije potvrdio statistički značajnu razliku u pogreški procjene horizontalne udaljenosti u okruženjima ($p = 0,374$).

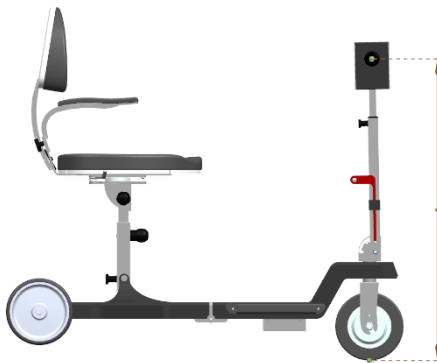


Slika 66. Distribucija horizontalne udaljenosti u IVE

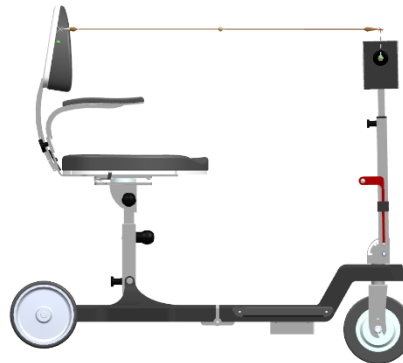


Slika 65. Distribucija horizontalne udaljenosti u nIVE

U trećem su dijelu zadatka ispitanici procjenjivali mogućnost postavljanja upravljača u odabrani položaj, definiran u prvom dijelu zadatka, a s obzirom na visinu i udaljenost od naslona sjedala. Mehanizam za podešavanje visine upravljača omogućuje njegovo postavljanje na različite visine, a mehanizam za podešavanje nagiba na četiri različita kuta nagiba. Ispitanici nisu imali mogućnost promjene visine i kuta nagiba upravljača u virtualnim okruženjima, nego su o njegovu položaju zaključivali na temelju vizualne percepcije i mentalne rotacije. Trebali su staviti u odnos visinu šaka i horizontalnu udaljenost između šaka i leđa (u položaju definiranom u prvom dijelu zadatka) te visinu upravljača i horizontalnu udaljenost naslona sjedala i upravljača. Pri tome su visina upravljača i horizontalna udaljenosti upravljača od naslona sjedala definirani odabranim provrtom mehanizama za podešavanje visine i kuta. Provrt su odabrali ispitanici, a visina i horizontalna udaljenost izmjereni su naknadno, za potrebe analize, postavljanjem virtualnoga modela u definirane položaje.



Slika 67. Visina upravljača



Slika 68. Udaljenost naslona sjedala i upravljača

Svi su ispitanici, koji su skuter pregledavali u imerzivnom virtualnom okruženju, rekli kako im geometrija mehanizama omogućava postavljanje upravljača u željeni položaj, s prosječnom sigurnosti u odgovor od $(79,9\% \pm 14,1\%)$. Sigurnost svih ispitanika u nIVE iznosi $(63,8\% \pm 19,7\%)$, pri čemu su četiri ispitanika rekla kako upravljač nije moguće staviti u željeni položaj (uz sigurnost od 70%), a 16 da je (uz sigurnost od 62,2%). Prosječna razlika u visini upravljača (kada je postavljen na odabrane provrte mehanizama za podešavanje visine i kuta) i izmjerene visine šaka ruku ispitanika u odabranom položaju za vožnju, u prosjeku iznosi $(12\% \pm 8,7\%)$, $m = -11\%$, uz raspon od -26% do 19% za imerzivno virtualno okruženje, a za neimerzivno; $(9,4\% \pm 8\%)$, $m = -6\%$, uz raspon od -26% do 7%. U oba bi okruženja visina bila niža od izmjerene za većinu ispitanika; njih 19 u imerzivnom (11,6% u prosjeku) i 14 u neimerzivnom (za 10,1% u prosjeku). Prosječna razlika u horizontalnoj udaljenosti sjedala i upravljača u IVE iznosi $(10,6\% \pm 11,8\%)$, $m = 1\%$, uz raspon od -20% do 17%, a u nIVE $(9,6\% \pm 12,2\%)$, $m = 3\%$, uz raspon od -30% do 16%. U imerzivnom okruženju, za deset bi ispitanika upravljač bio postavljen bliže od izmjerena položaja (u prosjeku za 10,5%), a za deset dalje (u prosjeku 10,7%). Horizontalna udaljenost bi za osam ispitanika u nIVE bila dulja (u prosjeku za 10%), a za šest ispitanika kraća (u prosjeku za 11,6%).

6 Rasprava

Pregled konstrukcije aktivnost je unutar razvoja proizvoda u kojoj se donose, potvrđuju ili mijenjaju odluke važne za proizvod, ali je u literaturi zastupljen u znatno manjoj mjeri u odnosu na aktivne dijelove razvoja. Osnovu pregleda konstrukcije čini razumijevanje konstrukcije. Za uspješan pregled potrebno je razumijevanje tehničkoga rješenja, njegovih osnovnih mehanizama te načina rada i funkcije. U provedenom se istraživanju naglasak stavlja na razumijevanje konstrukcije, a VS tehnologija istražuje s obzirom na utjecaj koji imerzivnost stereoskopskoga prikaza ima na razumijevanje mehanizama, prostorno razumijevanje dimenzija i pronalazak konstrukcijskih nedostataka. Utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na ta tri područja razumijevanja ispitan je pomoću osam zadataka određenih na temelju zahtjeva koje je tvrtka (industrijski partner projekta) postavila na konstrukciju koja se pregledava. Za svaki zadatak, a onda i područje koje se ispituje, potrebna je određena vještina prostornoga razumijevanja, definirana prema [12]. Na taj se način zadaci i aktivnosti pregleda konstrukcije stavljaju u vezu s vizualnom percepcijom, prostornim predočavanjem, prostornom percepcijom te zauzimanjem različite prostorne percepcije, zbog čega je razumno proučavati razliku u njihovu izvršavanju u imerzivnim i neimerzivnim okruženjima (s obzirom na stereoskopski prikaz kao najveću razliku među njima). Pregledom literature pronađene su studije koje proučavaju svako od tri područja zasebno (na primjer [8], [50], [52], [54], [55], [66]), ali nijedna koja ih ispituje kao sastavni dio pregleda konstrukcije u IVE i nIVE. Za pregled je odabran model sklopivoga skutera, što je još jedna razlika u odnosu na većinu dosadašnjih studija pregleda konstrukcije u IVE, koje su uglavnom vezane uz automobilsku i zrakoplovnu industriju te industrijske projekte u građevini i arhitekturi. Pri tome, istraživanja uglavnom nisu imala unaprijed definirane zadatke vezane uz konstrukciju, njezine elemente i mehanizme, na temelju kojih se može provesti statistička analiza.

6.1 Razumijevanje mehanizama

Provedena istraživanja pregleda konstrukcije u građevini i arhitekturi (na primjer [42], [67]), pokazala su da postoji razlika u razumijevanju funkcionalnosti konstrukcije kada je korištena tehnologija virtualne stvarnosti u odnosu na zaslon računala, računalnu tipkovnicu i miš. Taj se odnos htio provjeriti i u provedenom istraživanju te se u tri zadatka ispituje razumijevanje mehanizama (zadatak 1, zadatak 2 i zadatak 4). Zadatkom 1 ispitalo se razumijevanje mehanizama s obzirom na mogućnost prepoznavanja mehanizama za podešavanje visine ili kuta određenoga elementa skutera korisniku. Za točno rješavanje zadatka, potrebna je sposobnost prepoznavanja objekata koji pripadaju određenoj skupini (unutarnja statička vještina prostornoga razumijevanja) [12]. Statistička analiza podataka dobivenih rješavanjem zadatka 1 pokazala je da nema statistički značajne razlike između imerzivnoga i neimerzivnoga virtualnoga okruženja u broju prepoznatih mehanizama podešavanja ni sigurnosti u odgovore. U zadatku 2, ispitanici su u neimerzivnom virtualnom okruženju točno prepoznali veći broj koraka sklapanja. Statističkom analizom podataka dobivena je statistička sigurnost od 95% da je broj prepoznatih mehanizama u nIVE veći ($m = 5$) nego u IVE ($m = 4$). Zadatak 2 povezuje se i s rezultatima

MRT-a jer je za njegovo rješavanje potrebna mentalna rotacija kao vještina prostornoga razumijevanja. Linearna regresija ukazuje na pozitivnu zavisnost broja prepoznatih koraka i rezultata MRT-a, ali povećanje broja prepoznatih koraka ispitanika povećanjem broja ostvarenih bodova ne može se jednoznačno definirati jer je određeni broj ispitanika postigao nizak rezultat MRT-a, a prepoznao svih pet mehanizma sklapanja skutera. Također, linearna je regresija zavisnosti sigurnosti i točnosti odgovora pokazala da se sigurnost u točnost odgovora povećava porastom broja prepoznatih koraka. Takav je rezultat u skladu s rezultatima provedenih eksperimenata (na primjer [52]), gdje se sigurnost povećavala s brojem prepoznatih traženih karakteristika konstrukcije. Osim toga, sigurnost ispitanika u točnost odgovora bila je veća u neimerzivnom nego u imerzivnom virtualnom okruženju. Slični su rezultati broja prepoznatih grešaka dobiveni i u zadatku 4, gdje je gotovo jednak broj ispitanika (7 u IVE, a 6 u nIVE) prepoznao grešku funkcionalnosti mehanizma na temelju prikaza, pri čemu je prethodno razumijevanje načina rada mehanizma bilo nužno za prepoznavanje greške. Prema tome, imerzivnost virtualnoga okruženja nije utjecala na značajno poboljšanje razumijevanje mehanizama u ovom eksperimentu. Jedan od uzroka može biti to da oba virtualna okruženja pružaju jednake vizualne informacije potrebne za razumijevanje mehanizama [7], zbog čega prethodno iskustvo ima veći utjecaj na rješavanje zadatka od korištene tehnologije.

Zavisnost razumijevanja mehanizama i prisutnosti u virtualnom okruženju provjerena je linearnom regresijom u zadacima 1 i 2, ali ANOVA nije potvrdila statističku značajnost modela. Značajna statistička zavisnost prisutnosti u virtualnim okruženjima i uspješnosti izvršavanja zadatka u provedenom eksperimentu nije primijećena. Povezanost prisutnosti u virtualnom okruženju i točnosti izvršavanja zadataka u literaturi nije jednoznačno definirana [5], [13], [47]. Faas et al. [24] proučavali su utjecaj prisutnosti u virtualnom okruženju na uspješnost u konstruiranju. Rezultati su pokazali povezanost visoke prisutnosti s visokom, ali i niskom uspješnosti te niske prisutnosti s prosječnom uspješnosti. U ostalim je provedenim eksperimentima (na primjer [13], [20]) primijećena povezanost jačeg osjećaja prisutnosti i boljšeg izvršavanja zadataka u virtualnom okruženju, ali povezanost nije bila značajna u svim slučajevima. Takav se rezultat objašnjava utjecajem iskustva na pojedine zadatke te subjektivnosti doživljaja svakoga korisnika. Sličnoga su zaključka i Slater et al., na temelju rezultata eksperimenta [21], koji su pokazali da se može očekivati pozitivan utjecaj veće prisutnosti u virtualnom okruženju na izvršavanje onih zadataka za čije je izvršavanje uronjenost potrebna.

6.2 Pronalazak konstrukcijskih nedostataka

Pronalazak konstrukcijskih nedostataka česta je aktivnost prilikom pregleda konstrukcije jer njihovo rano otkrivanje može značajno smanjiti troškove razvoja i povećati zadovoljstvo korisnika [8]. Rezultati eksperimenata [9], [18], [26], [42] pokazuju da pregledavanje modela u imerzivnom virtualnom okruženju može dovesti do otkrivanja neočekivanih nedostataka (problema i grešaka) konstrukcije, koje obično nisu prepoznate prilikom pregledavanja konstrukcije u neimerzivnom okruženju. Pri tome je, za pretraživanje konstrukcijskih nedostataka, nužna vizualna pozornost korisnika [44]. Zbog prednosti

stereoskopskoga zaslona u odnosu na zaslon računala objašnjenih u poglavlju 3.3., bilo je očekivano da će u imerzivnom virtualnom okruženju biti prepoznat veći broj nedostataka konstrukcije, osobito onih koje se odnose na dimenzije, prostorno predočavanje i prostornu percepciju.

Prema rezultatima zadatka 5, prikazanima u poglavlju 5.3.5, ispitanici su prepoznali veći broj konstrukcijskih nedostataka u neimerzivnom virtualnom okruženju (57 nedostataka), nego u IVE (41 nedostatak). Takav se rezultat pronalazi i u literaturi; na primjer Hou et al. [31] su pretpostavili da se uspješnost rješavanja zadatka povećava povećanjem imerzivnosti virtualnoga okruženja, međutim, ispitanici su prepoznali veći broj nedostataka u virtualnom okruženju manje imerzivnosti. Autori takav rezultat objašnjavaju nedostatkom iskustva u korištenju VS tehnologija i potrebnim dužim vremenom prilagodbe na novi način međudjelovanja, kako bi njihove mogućnosti dovele do poboljšanja izvedbe korisnika. U eksperimentu koji smo proveli nije primijećena izravna povezanost iskustva korištenja VS tehnologija i broja pronađenih grešaka jer većina ispitanika ima jednako (ne)iskustvo korištenja VS tehnologije (samo su četiri ispitanika koristila VS tehnologiju duže od 60 min, a 24 ispitanika nisu nikada). S druge strane, ispitanik koji je imao iskustvo korištenja VS tehnologija 13 sati, jedini je u IVE primijetio šest konstrukcijskih nedostataka.

Za pronalazak pogreške u virtualnom okruženju, korisnik mora stvoriti predodžbu promatranog objekta, iz sjećanja predočiti kakav bi objekt trebao biti u ispravnom obliku bez grešaka te usporediti dvije predodžbe, kako bi odlučio postoje li greške ili ne [68]. Zbog toga bi drugo objašnjenje dobivenoga rezultata moglo biti prijašnje iskustvo konstruiranja i pregleda konstrukcija, neovisno o imerzivnosti virtualnoga okruženja [52]. Tome u prilog ide broj ispitanika koji je pronašao nedostatke u pojedinom okruženju. U nIVE većinu je primjedbi dalo šest ispitanika; dvoje sedam nedostataka, dvoje šest i dvoje pet, što ukupno čini 36 od 57 nedostataka primijećenih u tom virtualnom okruženju. S druge strane, u IVE je samo jedan ispitanik pronašao šest konstrukcijskih nedostataka. Analogno se objašnjenje može primijeniti i na rezultate zadatka 4 koji ispituje mogućnost prepoznavanja greške razumijevanja. Analiza rezultat nije pokazala značajne razlike u točnim odgovorima ispitanika ni prosječnoj sigurnosti u odgovore. Prema tome, imerzivnost virtualnoga okruženja nije utjecala na prepoznavanje grešaka razumijevanja.

Konstrukcijski su nedostaci podijeljeni u četiri kategorije s obzirom na odgovore ispitanika; dimenzijski nedostaci, nedostatak elemenata, greške pozicioniranja elemenata, neprilagođenost konstrukcije korisniku. U neimerzivnom virtualnom okruženju, ispitanici su naveli 11 elemenata koji nedostaju na konstrukciji, dok su ih u imerzivnom virtualnom okruženju naveli 14. Greške pozicioniranja elemenata prepoznate su u jednakom broju; deset grešaka u oba virtualna okruženja. Ispitanici su u IVE primijetili četiri nedostatka konstrukcije koja uzrokuju neprilagođenost konstrukcije korisniku, a u nIVE sedam.

IVE je pokazao određene prednosti pri identificiranju dimenzijskih nedostataka konstrukcije, koji nisu bili prepoznati prethodnim korištenjem tradicionalnih tehnologija; na primjer da je određena

komponenta tanja nego što se mislilo [42] ili da je razmak dvaju elemenata premali da bi se između njih moglo proći [26]. Sličan se rezultat očekivao i u ovome eksperimentu, ali su ispitanici u nIVE primijetili više dimenzijskih nedostataka (22 nedostatka) nego u IVE (6 nedostataka). Najveći broj nedostataka primijećenih u nIVE odnosi se upravo na dimenzijske nedostatke. Dimenzijski su nedostaci podijeljeni na nedostatke koji se odnose na položaj korisnika, raspored dijelova i sklopova, interakciju s korisnikom i nosivost konstrukcije. Od navedenih, u nIVE se najveći broj komentara (n=15) odnosi na raspored dijelova i sklopova (na primjer; da je svornjak mehanizma za rotaciju podvozja nepotrebno predugačak ili da je određeni dio prostora još uvijek neiskorišten kada je skuter u sklopljenom obliku) i na nosivost konstrukcije (opruga naslona sjedala trebala bi biti većega promjera kako bi izdržala opterećenja, svornjak mehanizma za podešavanje visine upravljača je prekratak). Prema saznanjima autora, nisu provedene slične studije s kojima bi se mogla napraviti usporedba.

Provedeni je eksperiment pokazao da su ispitanici prepoznali veći broj nedostataka konstrukcije u nIVE. Prema tome, imerzivno virtualno okruženje ispitanicima nije omogućilo bolje razumijevanje konstrukcije u pogledu učinkovitosti prepoznavanja konstrukcijskih nedostataka.

6.3 Prostorno razumijevanje dimenzija

Veća točnost u procjeni dimenzija i prostornih odnosa između elemenata govori o boljem prostornom razumijevanju virtualnoga modela [5]. Satter i Buttler provedli su eksperiment [61] u kojemu su ispitivali korisnikovu prostornu percepciju kao udaljenost od percipiranoga položaja 3D objekta u odnosu na stvarnu udaljenost. Rezultati su pokazali značajno poboljšanje u percepciji prostora i povezanosti elemenata u prostoru korištenjem stereoskopskoga zaslona i imerzivnoga virtualnoga okruženja. Berg i Vance [42] primijetili su da je u velikom broju slučajeva mogućnost pregledavanja modela u stvarnom mjerilu (koju omogućuje imerzivno virtualno okruženje) bila ključna u slučaju pregledavanja virtualnoga modela koji je u stvarnom mjerilu veći od dimenzija zaslona računala na kojemu se pregledava. S druge strane, ispitanici Tamkeova istraživanja [30], imali su problema s procjenom dimenzija prikazanih objekata, bez obzira na prikaz virtualnoga modela u stvarnom mjerilu, a uspješniji su u izvršavanju zadatka bili tek kada je model bio stavljen u poznato okruženje (na primjer, unutar prostorije).

Procjena prostornoga razumijevanja dimenzija u eksperimentu je provjerena pomoću dvije najčešće korištene metode; verbalna procjena u obliku brojčane vrijednosti (zadatak 3) i procjena temeljena na radnji (zadatak 7) [69], [70]. Rezultati zadatka 3 pokazali su da postoji razlika u verbalnoj procjeni dimenzije u obliku brojčane vrijednosti između IVE i nIVE za sve tri dimenzija skutera u sklopljenom položaju. Prosječna pogreška procjene dimenzije u IVE manja je nego u nIVE za sve tri dimenzije. Pogreška procjene visine iznosi 15,3% (IVE) prema 30% (nIVE), ali se ta razlika nije pokazala statistički

značajnom. Za pogrešku procjene duljine (17,8% u IVE prema 42,4% u nIVE) i širine (20,7% u IVE prema 20,2% u nIVE) dokazana je statistička značajnost razlike uz statističku sigurnost od 95% da su pogreške u procjeni dimenzija manje u IVE nego u nIVE. Rezultati zadatka 7 pokazali su da postoji razlika u procjeni dimenzija temeljenoj na radnji, gdje je radnja pozicioniranje noge ispitanika na visinu koja bi trebala odgovarati visini držača nogu skutera prikazanoga u virtualnom okruženju. Analiza je pokazala statistički značajnu razliku između IVE i nIVE u procjeni visine, pri čemu je prosječna pogreška procjene visine manja u IVE ($36,6\% \pm 23,1\%$, $m = 0$) nego u nIVE ($51,7\% \pm 24,8\%$, $m = -47$). Rezultati obje korištene metode pokazuju manju pogrešku u procjeni traženih dimenzija u IVE nego u nIVE. Iz toga se može zaključiti da imerzivnost virtualnoga okruženja pozitivno utječe na procjenu dimenzija i njihovo prostorno razumijevanje te da ispitanici u imerzivnom virtualnom okruženju lakše i točnije procesuiraju prikazane prostorne informacije, čime su potvrđena prethodna saznanja dobivena u istraživanju [5].

Istraživanja [69], [71] su pokazala da ispitanici prilikom korištenja HMD-a pogrešno procjenjuju dimenzije manjima nego što jesu u stvarnosti, a greške su u nekim slučajevima veće do 50% u odnosu na procjene u stvarnom okruženju [69]. Kao mogući razlozi, navedeni su ergonomija HMD-a, tehnološki nedostaci, ali i manjak prisutnosti u virtualnom okruženju. Prema rezultatima verbalne procjene dimenzija sklopljenoga modela skutera iz zadatka 3 numeričkom vrijednosti, ispitanici su u IVE u većem broju sve tri dimenzije procijenili manjima nego što jesu, a u nIVE većima. U drugom dijelu zadataka 7 i 8, barem polovica ispitanika u IVE procijenila je tražene dimenzije kraćima nego što jesu. Time su dobiveni rezultati verbalne procjene dimenzija u skladu s rezultatima navedene literature. S druge strane, u procjeni visine držača nogu postavljanjem noge na percipiranu visinu u zadatku 7, veći je broj ispitanika u IVE nogu postavio prenisko (za 35,2%), a u nIVE previsoko (za 52,6%).

Osim toga, u drugom se dijelu zadataka 7 i 8 uspoređuje prostorno razumijevanje dimenzija u imerzivnom virtualnom okruženju i stvarnom okruženju, verbalnom procjenom u obliku numeričkih vrijednosti. Analiza je pokazala da je razlika u pogreški procjene horizontalne dimenzije (zadatak 7) statistički značajna, uz statističku sigurnost od 95% da su pogreške u procjeni horizontalne duljine manje u imerzivnom virtualnom ($25,7\% \pm 19\%$, $m = -14$) nego u stvarnom okruženju ($38,8\% \pm 53,1\%$, $m = 0$). Pogreške u procjeni visine i horizontalne udaljenosti u zadatku 8 također su manje u IVE nego u stvarnom okruženju, ali statistička značajnost razlike nije dokazana. Razlog manje pogreške u imerzivnom virtualnom okruženju može se objasniti dostupnosti alata za mjerenje koji su ispitanici imali na raspolaganju. Drugo objašnjenje može biti nepovezivanje numeričkih vrijednosti dimenzija i vizualnoga prikaza dimenzija, neovisno o okruženju u kojemu dimenziju procjenjuju.

U zadatku 6 te trećem dijelu zadataka 7 i 8, ispitanici stavljaju u odnos svoje tijelo i virtualni model prikazan u virtualnom okruženju, odnosno, svoje antropometrijske mjere i dimenzije virtualnoga modela. Prema [12], za to su im potrebne vanjska statička i dinamička prostorna vještina. Rezultati

zadatka 6 pokazali su da su ispitanici u IVE bili točniji u procjeni mogućnosti postavljanja svojega stopala na držače nogu s obzirom na njihovu duljinu. Točnu je procjenu u IVE dalo 15, a u nIVE 10 ispitanika. U zadatku 7, jednak je broj ispitanika točno procijenio mogućnost sjedenja na skuteru u odgovarajućem položaju za vožnju (n=11). Rezultati zadatka 8 ne pokazuju značajne razlike u odstupanjima između visine upravljača i horizontalne udaljenosti upravljača i naslona sjedala izmjerenih u stvarnom okruženju (prema položaju ruku ispitanika) te dimenzija izmjerenih u virtualnom okruženju (na temelju translacije mehanizama prema odgovorima ispitanika). Prema tome, imerzivnost virtualnoga okruženja nije u velikoj mjeri utjecala na potrebne vještine prostornoga razumijevanje u ovim zadacima.

Bolje prostorno razumijevanje modela ne mora nužno uzrokovati bolje razumijevanje cijele konstrukcije u tehničkom smislu. Međutim, može se tvrditi da pozitivno utječe na razumijevanje prostornih odnosa između elemenata konstrukcije i prostornih odnosa između virtualnoga modela konstrukcije i korisnika. Na temelju toga, može se pretpostaviti da pozitivan utjecaj na vještine prostornoga razumijevanja (olakšavanjem prostornoga predočavanja i prostorne percepcije) vodi boljem rješavanju problema i ispunjavanju zahtjeva konstrukcije vezanih uz prostorne odnose.

6.4 Ograničenja

Prvo se ograničenje eksperimenta odnosi na činjenicu da je ispitanicima bilo dopušteno postavljati pitanja istraživaču u svakome dijelu eksperimenta, što je moglo utjecati na razlike u rezultatima. Nadalje, interakcija s istraživačem bila je nužna u zadacima 7 i 8 zbog uzimanja antropometrijskih mjera ispitanika za usporedbu s njihovim procjenama dimenzija u analizi rezultata. Nužna interakcija u tim zadacima te generalna mogućnost komunikacije s istraživačem mogli su utjecati na rezultate Upitnika o prisutnosti u virtualnom okruženju. Osim toga, eksperimenti su se na LTU-u u cijelosti provodili na engleskome jeziku koji ispitanicima nije materinji jezik, što je moglo dovesti do nerazumijevanja pojedinih riječi, dijelova zadataka ili pitanja. Navedenim su ograničenjima u eksperiment unesene nekontrolirane varijable čiji utjecaj na rezultate ne možemo pratiti.

7 Zaključak

U radu je proveden eksperiment tehničkoga pregleda konstrukcije nakon faze koncipiranja, kako bi se provjerile razlike u razumijevanju konstrukcije korištenjem imerzivnoga virtualnoga okruženja (prikazanoga VS tehnologijom) i neimerzivnoga virtualnoga okruženja (prikazanoga tradicionalnom tehnologijom). Razumijevanje konstrukcije odnosi se na razumijevanje mehanizama, prostorno razumijevanje dimenzija i pronalazak konstrukcijskih nepravilnosti konstrukcije. Pregled konstrukcije uključuje prepoznavanje, opisivanje i definiranje oblika elemenata konstrukcije i njihova položaja [12] te je za razumijevanje konstrukcije važna vizualna percepcija [5], koja ima velik utjecaj na potrebne vještine prostornoga razumijevanja [12]. Imerzivnost virtualnoga okruženja nije utjecala na poboljšanje razumijevanja mehanizama, pri čemu je za prepoznavanje koraka sklapanja skutera u neimerzivnom virtualnom okruženju prepoznat veći broj točnih koraka, uz statističku sigurnost od 95%. Nadalje, rezultati nisu pokazali statistički značajnu razliku između broja primijećenih nedostataka konstrukcije u IVE i nIVE, ali je veći broj nedostataka primijećen u nIVE, pri čemu se najveća razlika javlja u broju dimenzijskih nedostataka. Takav se utjecaj imerzivnosti na razumijevanje mehanizama i pronalazak konstrukcijskih nedostataka može objasniti iskustvom te jednakom količinom vizualnih informacija potrebnih za razumijevanje mehanizama i prepoznavanje konstrukcijskih nedostataka, koje iVE i nIVE pružaju ispitanicima. Statistički značajne razlike između IVE i nIVE javljaju se u prostornome razumijevanju dimenzija konstrukcije. Greške u verbalnoj procjeni dimenzija u obliku brojčanih vrijednosti i u procjeni temeljenoj na radnji (postavljanje noge na visinu držača nogu) statistički su značajno manje u IVE. Iz toga se može zaključiti da imerzivno virtualno okruženje poboljšava prostorno razumijevanje dimenzija ispitanika.

8 Zahvale

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Stanku Škecu na pruženoj prilici, savjetima, motivaciji i pomoći prilikom izrade ovoga rada.

Zahvaljujem se komentoru dr. Peteru Törlindu na savjetima prilikom izrade rada te pomoći u provođenju eksperimentalnoga dijela rada na LTU-u.

Zahvaljujem prof.dr.sc. Mariju Štorgi na savjetima prilikom osmišljavanja metodologije istraživanja.

Zahvaljujem Nikoli Horvatu, mag.ing.mech. na pomoći u provođenju eksperimentalnoga dijela rada na FSB-u.

Zahvaljujem Mariji Majdi Perišić, mag.math na savjetima i pomoći oko statističke analize podataka.

Zahvaljujem svim ispitanicima na odvojenom vremenu i volji za sudjelovanje u eksperimentu.

Istraživanje prikazano u ovom radu financirala je Hrvatska zaklada za znanost, kao dio projekta IP-2018-01-7269: Timska adaptabilnost u razvoju inovativnih proizvoda - TAIDE (<http://www.taide.org>).

9 Literatura

- [1] G. E. Dieter and L. C. Schmidt, *Engineering Design*. 2012.
- [2] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote, *Engineering Design; A Systematic Approach*, Third Edit. Springer.
- [3] K. Satter-Black and N. Iverson, "How to conduct a design review," *Mech. Eng.*, 1994.
- [4] G. Thompson, "Design Review : A Structured Approach," no. October 2014, pp. 37–41, 2007.
- [5] D. Paes, E. Arantes, and J. Irizarry, "Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models : Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems," *Autom. Constr.*, vol. 84, no. December, pp. 292–303, 2017.
- [6] S. K. Chandrasegaran *et al.*, "The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 45, no. 2, pp. 204–228, 2013.
- [7] R. Hannah, S. Joshi, and J. D. Summers, "A user study of interpretability of engineering design representations," vol. 4828, 2012.
- [8] L. De Casenave and J. E. Lugo, "Design Review using Virtual Reality enabled CAD," pp. 1–11, 2017.
- [9] K. M. Satter and A. C. Butler, "Finding the Value of Immersive, Virtual Environments Using Competitive Usability Analysis," *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, p. 024504, 2012.
- [10] J. Wann and M. Mon-Williams, "What does virtual reality NEED ? : human factors issues in the design of three-dimensional computer environments," *Hum. - Comput. Stud.*, vol. 44, pp. 829–847, 1996.
- [11] R. Chu, C. C. P.; Dani, T. H.; Gadh, "Evaluation of virtual reality interface for product shape designs," *IIE Trans. (Institute Ind. Eng)*.
- [12] N. S. Newcombe and T. F. Shipley, "Thinking About Spatial Thinking: New Typology, New Assessments," in *Studying Visual and Spatial Reasoning for Design Creativity*, J. S. Gero, Ed. Springer, 2015.
- [13] G. Hubona, G. Shirah, and D. Fout, "The effects of motion and stereopsis on three-dimensional visualization," pp. 609–627, 1997.
- [14] K. M. Stanney, R. R. Mourant, and R. S. Kennedy, "Human Factors Issues in Virtual Environments :," *Presence-Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 7, no. 4, pp. 327–351, 1998.
- [15] I. E. Sutherland, "A head-mounted three dimensional display," *Proc. December 9-11, 1968, fall*

Jt. Comput. Conf. part I - AFIPS '68 (Fall, part I), p. 757, 1968.

- [16] J. Q. Coburn, I. Freeman, and J. L. Salmon, "A Review of the Capabilities of Current Low-Cost Virtual Reality Technology and Its Potential to Enhance the Design Process," *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 3, p. 031013, 2017.
- [17] C. Cruz-Neira, D. Sandin, and T. DeFanti, "Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE," ... *20Th Annu. Conf. ...*, pp. 135–142, 1993.
- [18] J. Liu, Yifan; Lather, Jennifer; Messner, "Virtual Reality to Support the Integrated Design Process: A Retrofit Case Study," no. 2007, pp. 801–808, 2014.
- [19] J. Steuer, "Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence," *J. Commun.*, vol. 42, no. 4, pp. 73–93, 1992.
- [20] B. G. Witmer, "Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence," *Massachusetts Insitute Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 225–241, 1998.
- [21] M. Slater, V. Linakis, M. Usoh, and R. Kooper, "Immersion , Presence , and Performance in Virtual Environments : An Experiment with Tri-Dimensional Chess Keywords 1 . Introduction : Is VR better than a workstation ?," 1995.
- [22] T. Schubert and F. Friedmann, "The Experience of Presence :," vol. 10, no. 3, pp. 266–281, 1998.
- [23] P. Banerjee, G. M. Bochenek, and J. M. Ragusa, "Analyzing the Relationship of Presence and Immersive Tendencies on the Conceptual Design Review Process," *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 1, p. 59, 2002.
- [24] D. Faas, Q. Bao, D. D. Frey, and M. C. Yang, "The influence of immersion and presence in early stage engineering designing and building," *Cambridge Univ. Press*, 2019.
- [25] P. George *et al.*, "Evaluation of Smartphone-based interaction techniques in a CAVE in the context of immersive digital project review," 2014.
- [26] P. S. Dunston, L. L. Arns, and J. D. McGlothlin, "Virtual reality mock-ups for healthcare facility design and a model for technology hub collaboration," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 3, no. 3, pp. 185–195, 2010.
- [27] M. Germani, M; Mengoni, M; Peruzzini, "Metric-based approach for VR technology evaluation in styling product design," pp. 1–15, 2009.
- [28] M. Mengoni, M., Peruzzini, M., Germani, "The impact of virtual environments on human collaboration in product design," pp. 57–68.
- [29] S. Makris, L. Rentzos, G. Pintzos, D. Mavrikios, and G. Chrysolouris, "CIRP Annals -

- Manufacturing Technology Semantic-based taxonomy for immersive product design using VR techniques,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 147–150, 2012.
- [30] M. Tamke, “BAKING LIGHT: Global Illumination in VR Environments as Architectural Design Tool,” *Caadria 05*, pp. 214–228.
- [31] M. Hou, J. G. Hollands, A. Scipione, L. Magee, and M. Greenley, “Comparative Evaluation of Display Technologies for Collaborative Design Review,” *Presence-Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 18, no. 2, pp. 125–138, 2009.
- [32] M. Lombard and T. Ditton, “At the Heart of It All: The Concept of Presence,” *Journal Comput. Commun.*
- [33] B. G. Witmer and M. J. Singer, “Presence questionnaire QÉP,” 2004.
- [34] E. Keogh, “A Cross-Media Presence Questionnaire : The ITC-Sense of Presence Inventory,” vol. 10, no. 3, pp. 282–297, 1998.
- [35] T. W. Schubert, “The sense of presence in virtual environments: A three-component scale measuring spatial presence, involvement, and realness,” *J. Media Psychol.*, no. 15, pp. 69–71, 2003.
- [36] M. Lombard, T. B. Ditton, and L. Weinstein, “Measuring Presence : The Temple Presence Inventory.”
- [37] T. Hartmann, W. Werner, and H. Schramm, “The Spatial Presence Experience Scale (SPES) A Short Self-Report Measure for Diverse Media Settings,” no. June 2018, 2015.
- [38] C. Donalek *et al.*, “Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms,” *2014 IEEE Int. Conf. Big Data Immersive*, pp. 609–614, 2014.
- [39] I. J. Freeman and J. Q. Coburn, “CAD integration in Virtual Reality design reviews for improved engineering model interaction,” pp. 1–10, 2017.
- [40] S. Jayaram, J. Vance, R. Gadh, U. Jayaram, and H. Srinivasan, “Assessment of VR Technology and its Applications to Engineering Problems,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 72, 2001.
- [41] S. Choi, H. Jo, S. Boehm, and S. Do Noh, “ONESVIEW: An integrated system for one-stop virtual design review,” *Concurr. Eng. Res. Appl.*, vol. 18, no. 1, pp. 75–91, 2010.
- [42] L. P. Berg and J. M. Vance, “An Industry Case Study: Investigating Early Design Decision Making in Virtual Reality,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 1, p. 011001, 2016.
- [43] T. A. DeFanti *et al.*, “The future of the CAVE,” *Cent. Eur. J. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 16–37, 2011.

- [44] S. Rigutti *et al.*, “Don ’ t worry , be active : how to facilitate the detection of errors in immersive virtual environments,” pp. 1–28, 2018.
- [45] M. K. Kaiser, “Perceptual issues in scientific visualization,” *Three-Dimensional Vis. Disp. Technol.*, vol. 1083, pp. 205–211, 1989.
- [46] Q. Chen, R. Weidner, S. Vossel, P. H. Weiss, and G. R. Fink, “Neural Mechanisms of Attentional Reorienting in Three-Dimensional Space,” vol. 32, no. 39, pp. 13352–13362, 2012.
- [47] C. Hendrix, “Environments as a Function of Visual Display Parameters,” vol. 5, no. 3, pp. 274–289, 1996.
- [48] K. Watanuki, “Development of virtual reality-based universal design review system,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 257–262, 2010.
- [49] G. Moreau and P. Fuchs, “Stereoscopic Displays for Virtual Reality in the car manufacturing industry: application to design review and ergonomic studies,” *Proc. SPIE Stereosc. Displays Virtual Real. Syst. IX*, vol. 4660, no. 0, pp. 504–513, 2002.
- [50] K. J. Ostergaard, W. Wetmore, and J. D. Summers, “A methodology for the study of the effects of communication method on design review effectiveness,” *Proc. DETC’03*, no. September 2003, 2003.
- [51] A. F. Mckenna, W. Chen, and T. W. Simpson, “Exploring the Impact of Virtual and Physical Dissection Activities on Students’ Understanding of Engineering Design Principles,” pp. 1–10, 2016.
- [52] Thimmaiah, K. Phelan, and J. D. Summers, “An Experimental Study on the Influence That Failure Number, Specialization, and Controls Have on Confidence in Predicting System Failures,” vol. 139, no. January, 2017.
- [53] M. Bassanino, K. C. Wu, J. Yao, F. Khosrowshahi, T. Fernando, and J. Skj??rb??k, “The impact of immersive virtual reality on visualisation for a design review in construction,” *Proc. Int. Conf. Inf. Vis.*, pp. 585–589, 2010.
- [54] M. A. Schnabel and T. Kvan, “Spatial Understanding in Immersive Virtual Environments,” *Int. J. Archit. Comput.*, vol. 1, no. 4, pp. 435–448, 2006.
- [55] J. Vora *et al.*, “Using Virtual Reality Technology to Improve Aircraft Inspection Performance: Presence and Performance Measurement Studies,” *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol. 45, no. 27, pp. 1867–1871, 2012.
- [56] C. Eckert, Claudia; Maier, Anja; McMahon, “Communication in design,” in *Design Process Improvement*, 2005, pp. 232–261.

- [57] L. N. Kalisperis *et al.*, “Evaluating Relative Impact of Virtual Reality System Variables on Architectural Design Comprehension and Presence,” 2002.
- [58] N. 1994)* (Witmer & Singer, Vs. 3.0 and R. by the U. C. L. (2004), “Presence Questionnaire.” [Online]. Available: http://w3.uqo.ca/cyberpsy/docs/qaires/pres/PQ_va.pdf.
- [59] M. Peters, P. Chisholm, and B. Laeng, “Spatial Ability , Student Gender , and Academic Performance,” *J. Eng. Educ.*, no. 84, pp. 69–73, 1994.
- [60] M. Peters, B. Laeng, K. Latham, M. Jackson, R. Zaiyouna, and C. Richardson, “A Redrawn Vandenberg & Kuse Mental Rotations Test: Different Versions and Factors that affect Performance,” *Brain Cogn.*, no. 28, pp. 39–58, 1995.
- [61] K. Satter and A. Butler, “Competitive Usability Analysis of Immersive Virtual Environments in Engineering Design Review,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 15, no. 3, p. 031001, 2015.
- [62] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, “Biometrika Trust An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples),” *Biometrika*, vol. 52, no. 3, pp. 591–611, 2016.
- [63] Razali.N.M and Wah.Y.B, “Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov , Lilliefors and Anderson-Darling tests,” *J. Stat. Model. Anal.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–33, 2011.
- [64] W. Martin and K. Bridgmon, *Quantitative and statistical research methods: From hypothesis to results*. 2012.
- [65] D. A. Norman, *The Design of Everyday Things*. 1988.
- [66] C. Eckert *et al.*, “Variations in functional decomposition for an existing product : Experimental results Variations in functional decomposition for an existing product : Experimental results,” pp. 107–128, 2012.
- [67] L. Maftai and C. Harty, “Challenging Design Perceptions in Immersive Virtual Reality Environments?,” *Proc. 32nd Annu. ARCOM Conf.*, no. September, pp. 113–122, 2016.
- [68] D. G. Mackay and L. E. James, “Visual cognition in amnesic H . M . : Selective deficits on the What ’ s-Wrong-Here and Hidden-Figure tasks,” vol. 31, no. April 2000, pp. 769–789, 2009.
- [69] V. Interrante, L. Anderson, and B. Ries, “Distance Perception in Immersive Virtual Environments , Revisited Distance Perception in Immersive Virtual Environments , Revisited,” no. May, pp. 2–11, 2014.
- [70] C. Pagano and G. Bingham, “Comparing Measures of Monocular Distance Perception: Verbal and Reaching Errors Are Not Correlated,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 24, no. 4, pp. 1037–1051, 1993.

- [71] J. M. Loomis and J. M. Knapp, “Visual Perception of Egocentric Distance in Real and Virtual Environments,” in *Medical Applications Of Virtual Reality*, no. September, 2014.

10 Sažetak

Fanika Lukačević

Utjecaj imerzivnosti virtualnoga okruženja na razumijevanje tehničkih rješenja prilikom pregleda konstrukcije

Ključne riječi: virtualno okruženje, virtualna stvarnost, pregled konstrukcije, razumijevanje konstrukcije, vizualna percepcija

Tehnički pregled konstrukcije (*eng. Design review*) aktivnost je unutar razvoja proizvoda, čiji je cilj provjeriti konstrukciju s obzirom na tehničke značajke elemenata konstrukcije. Tehnička se rješenja danas najčešće prikazuju u obliku 3D CAD virtualnih modela te je vizualizacija osnovni način međudjelovanja s virtualnim okruženjem. Uobičajenom se tehnologijom virtualno okruženje prikazuje na zaslonu računala, ograničenom u mogućnosti prikazivanja 3D modela kao 2D slike. Ta ograničenost utječe na korisnikovo razumijevanje prostornih modela; javljaju se poteškoće u predodžbi mjerila i dubine prostora, zbog čega korisnici moraju imati razvijenu sposobnost prostornoga predočavanja. Tehnologija virtualne stvarnosti (*eng. Virtual Reality*) upotrebom stereoskopskoga prikaza i multimodalnosti omogućuje međudjelovanje s 3D virtualnim modelom unutar virtualnoga okruženja. Na taj se način smanjuje kognitivni napor nužan za vizualnu percepciju prostornih informacija i omogućuje usmjeravanje pažnje na pregled konstrukcije i njezino razumijevanje, nužno za učinkovitost pregleda. U radu je proveden eksperiment tehničkoga pregleda konstrukcije nakon faze koncipiranja, kako bi se provjerile razlike u razumijevanju konstrukcije korištenjem imerzivnoga virtualnoga okruženja (prikazanoga VS tehnologijom) i neimerzivnoga virtualnoga okruženja (prikazanoga uobičajenom tehnologijom pomoću zaslona monitora, tipkovnice i miša). Razumijevanje konstrukcije odnosi se na razumijevanju mehanizama, prostorno razumijevanje dimenzija i prepoznavanje konstrukcijskih nedostataka. Podaci su dobiveni ispunjavanjem upitnika o prijašnjem iskustvu i standardiziranoga upitnika o prisutnosti (*eng. Presence Questionnaire, PQ*), rješavanjem standardiziranoga testa mentalnih rotacija (*eng. Mental Rotations Test, MRT*) te prikupljanjem usmenih odgovora ispitanika za vrijeme izvršavanja zadataka i odgovaranja na posatvljena pitanja o sigurnosti u odgovor. Rezultati statističke analize podataka pokazali su statistički značajno manju pogrešku u procjeni dimenzija u imerzivnom virtualnom okruženju iz čega se može zaključiti da imerzivnost virtualnoga okruženja pozitivno utječe na procjenu dimenzija i njihovo prostorno razumijevanje. S druge strane, imerzivno virtualno okruženje ispitanicima nije omogućilo bolje razumijevanje konstrukcije u pogledu učinkovitosti prepoznavanja konstrukcijskih nedostataka ni razumijevanja mehanizama.

11 Summary

Fanika Lukačević

Impact of virtual environment immersion on design understanding during a design review

Keywords: Virtual Environment, Virtual Reality, Design Review, Design understanding, Visual perception

Technical design review is a product development activity whose goal is to inspect a design concerning its technical characteristics. Nowadays, designs are often presented as 3D CAD virtual models with visualization being the essential way of interacting with it. Conventional technologies present a virtual environment on the monitor screen, which is limited in presenting a 3D model as a 2D representation. Its limitation affects users' spatial understanding, causing difficulties in space depth comprehension and requiring developed spatial visualization skills. Stereoscopy and multimodality of Virtual Reality technology enable the user to interact with a 3D virtual model inside the virtual environment, demining cognitive load needed for visual perception of spatial information and focusing users' attention to design review and design understanding, necessary for its efficiency. Conceptual design review experiment study has been conducted to investigate differences in design understanding when it is presented in an immersive virtual environment by Virtual Reality and in a non-immersive virtual environment by conventional technology (monitor screen, keyboard, and mouse). Design understanding in this study refers to mechanisms understanding, spatial understanding of dimensions and design errors detection. Data is collected by asking participants to fill out a prior experience questionnaire, *Presence Questionnaire*, *Mental Rotations Test*, and provide the researcher with verbal answers during design review and while answering confidence questions. Statistical analysis results have shown that error in dimensions assessment is significantly lower in an immersive virtual environment, leading to the assumption that immersion of virtual environment has a positive effect on dimensions assessment and spatial comprehension. On the other hand, the immersive virtual environment did not provide participants with better design understanding when it comes to design errors detection or mechanisms understanding.

12 Dodatak

12.1 Zadaci

12.1.1.1 Zadatak 1 – Identifikacija mehanizama za podešavanje

Napomena: mehanizam za podešavanje omogućuje korisniku pozicioniranje određenih elemenata (na primjer visina ili kut) kako bi ih prilagodili sebi.

Vi trebate:

1. Identificirati mehanizam za podešavanje
2. Pokazati identificirani mehanizam koristeći pokazivač
3. Naglas reći omogućuje li mehanizam translaciju ili rotaciju komponente.

Postoji ukupno pet mehanizama za podešavanje.

Napomena: nisu svi mehanizmi skutera mehanizmi za podešavanja, neki se koriste samo za sklapanje skutera – te mehanizme ne trebate tražiti u ovome zadatku.

12.1.1.2 Zadatak 2 – Identifikacija koraka sklapanja

Vi trebate:

1. Identificirati korak sklapanja
2. Pokazati mehanizam koji ga omogućuje koristeći pokazivač
3. Naglas reći što biste trebali napraviti kako biste proveli taj korak sklapanja (na primjer, zarotirati komponentu)
4. Ponoviti sve dok se ne utvrde svi koraci sklapanja.

Napomena: ako su svi koraci sklapanja točno utvrđeni, prateći te korake, skuter bi se trebao transformirati iz položaja za vožnju u sklopljeni položaj i izgledati kao model u sklopljenom položaju.

12.1.1.3 Zadatak 3 – Procjena gabaritnih dimenzija skutera

Napomena: molimo da ne koristite alat za mjerenje u ovom zadatku!

Vi trebate:

1. Promotriti model u sklopljenom položaju
2. Pokazivačem pokazati smjer osi za koju procjenjujete dimenziju skutera
3. Naglas reći procijenjenu dimenziju skutera
4. Ponoviti za sve tri gabaritne dimenzije skutera.

12.1.1.4 Zadatak 4 – Inspekcija grešaka mehanizma za podešavanje visine sjedala

Vi trebate:

1. Pregledati mehanizam za podešavanje visine sjedala s ciljem pronalaska konstrukcijskih grešaka koje bi mogle uzrokovati nefunkcionalnost mehanizma
2. Ako pronađete takvu grešku, pokažite grešku koristeći pokazivač
3. Ako pronađete takvu grešku, naglas objasnite grešku.

12.1.1.5 Zadatak 5 – Inspekcija konstrukcijskih grešaka skutera

Vi trebate:

1. Pregledati postoje li na skuteru konstrukcijske greške
2. Ako pronađete grešku, pokažite grešku koristeći pokazivač
3. Naglas recite što je greška.

12.1.1.6 Zadatak 6 – Dimenzije držača za noge

Vi trebate:

1. Izmjerite duljinu držača za noge
2. Ispitajte stane li Vaše stopalo na držače za noge ili ne (s obzirom na duljinu).

12.1.1.7 Zadatak 7 – Procjena prilagođenosti pozicije za vožnju s obzirom na udaljenost držača nogu i sjedala

Vi trebate:

1. Pretpostaviti da u virtualnom okruženju sjedite na sjedalu leđima naslonjeni na oslonac za leđa i stopalima na držačima za noge
2. U stvarnom svijetu, postaviti noge na visinu držača nogu i u poziciju koja bi Vam bila ugodna za vožnju skutera
3. Naglas recite kolika je horizontalna udaljenost između Vaše pete i oslonca za leđa
4. Ostanite u toj poziciji sve dok istraživač ne izmjeri udaljenost
5. Ispitati možete li biti na skuteru u toj poziciji za vožnju i naglas reći svoj odgovor.

Napomena: voziti skuter u odgovarajućoj poziciji za vožnju znači da možete sjesti na sjedalo leđima naslonjenim na oslonac za leđa i većinom stopala postavljenom na držače za noge.

Trenutna visina sjedala je 550 mm (mjereći od razine poda).

Držači za noge nalaze se na visini od 150 mm od razine poda.

Udaljenost između oslonca za leđa i držača za noge je 520 mm.

Oslonac za leđa okomit je na sjedalo.

12.1.1.8 Zadatak 8 – Procjena prilagođenosti pozicije za vožnju s obzirom na položaj upravljača

Vi trebate:

1. Sjesti na sjedalo u stvarnom okruženju u istu poziciju kao i u prethodnom zadatku
2. Postaviti ruke u položaj u kojem bi Vam odgovaralo držati upravljač tijekom vožnje
3. Naglas reći kolika je vertikalna udaljenost između poda i Vaših ruku (predstavlja visinu na kojoj bi trebao biti upravljač)
4. Naglas reći kolika je horizontalna udaljenost između oslonca za leđa i Vaših ruku
5. Ostati u toj poziciji sve dok istraživač ne izmjeri udaljenosti
6. Promotriti mehanizam za podešavanje visine i kuta upravljača te ispitati je li moguće pomaknuti upravljač u željeni položaj
7. Ako je, pokazivačem pokazati provrt mehanizma za podešavanje visine koji to omogućuje
8. Ako je, pokazivačem pokazati provrt mehanizma za rotiranje upravljača koji to omogućuje.