

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Daria Batinović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**PROGRAMSKA APLIKACIJA I INTERAKCIJA U
SKLOPU PROŠIRENE STVARNOSTI**

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Tomislav Stipančić, dipl. ing.

Student:

Daria Batinović

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Tomislavu Stipančiću na ukazanom povjerenju i ogromnoj potpori tijekom izrade rada i asistentu Leonu Korenu, mag. ing. na pomoći.

Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima na potpori i bezuvjetnoj ljubavi koju su mi pružali tijekom cijelog studiranja. Veliku zahvalu upućujem mojoj obitelji i prijateljima. Vaša neprestana podrška, razumijevanje i molitve gurali su me naprijed. Zahvalna sam svojim kolegama i prijateljima s faksa koji su uljepšali ovo studentsko razdoblje i s kojima sam proživjela i preživjela FSB.

Posebno hvala mojoj sestri Ani, Kreši i braci Toniju koji su uvijek vjerovali u mene, pružali mi utjehu i bili oni koji su se prvi veselili mojim uspjesima, katkad čak i više od mene. Bez vaših riječi ohrabrenja, sigurno ne bih danas bila ovdje gdje jesam. Hvala vam od srca.

Na kraju, hvala dragom Bogu koji mi je sve ovo podario i koji je uvijek bdio nada mnom u svim lijepim i teškim trenucima studiranja.

Daria Batinović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Daria Batinović** JMBAG: 0035212466

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Programska aplikacija i interakcija u sklopu proširene stvarnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Software application and interaction within augmented reality**

Opis zadatka:

Kao spona između fizičkog, virtualnog i proširenog svijeta koriste se različita sučelja u vidu ekrana i naočala za virtualnu ili proširenu stvarnost. Za kreiranje 3D svjetova moguće je koristiti različite razvojne i interakcijske okoline. Primjene virtualne i proširene stvarnosti se kreću u različitim sferama ljudskog djelovanja.

U radu je potrebno:

- proučiti komponente sustava miješane stvarnosti,
- razviti 3D svijet koji uključuje ciljane objekte od interesa koristeći prikladnu programsku podršku,
- povezati i podesiti hardverske te softverske komponente uključujući naočale za proširenu stvarnost MS HoloLens 2, te
- razviti interakcijsko sučelje koje omogućuje interakciju s objektima u virtualnom svijetu.

Razvijeno cjelovito rješenje potrebno je eksperimentalno evaluirati u sklopu Laboratorija za projektiranje izradbenih i montažnih sustava.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Stipančić

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
SAŽETAK.....	VI
SUMARRY	VII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNA TERMINOLOGIJA	2
2.1. Povijest virtualne, proširene i miješane stvarnosti	2
2.2. Virtualna stvarnost	4
2.3. Proširena stvarnost	5
2.4. Razlike između stvarnosti	6
2.5. Miješana stvarnost.....	6
2.5.1. Primjene miješane stvarnosti.....	8
3. UREĐAJI VIRTUALNE, PROŠIRENE I MIJEŠANE STVARNOSTI	11
3.1. Podjela uređaja	11
3.2. Najznačajniji uređaji današnjice.....	13
3.2.1. HoloLens 2	13
3.2.2. HP Reverb G2	21
3.2.3. Samsung HMD Odyssey +	22
3.2.4. Meta Quest 3	23
3.2.5. Magic Leap 2.....	25
3.2.6. Xreal Air 2.....	26
3.2.7. Apple Vision Pro.....	27
4. RAZVOJ APLIKACIJE	30
4.1. Korišteni alati	30
4.1.1. Unreal Engine.....	30
4.1.2. Microsoft Visual Studio	34
4.1.3. Mixed Reality Toolkit (MRTK).....	35
4.1.4. HoloLens Emulator	35
4.2. Instalacija alata i postavljanje razvojne okoline.....	37
4.3. Dodavanje materijala.....	40

4.4. Izrada scene	42
4.5. Postavljanje projekta za mješovitu stvarnost	43
4.6. Postavljanje interakcije	45
4.7. Dodavanje gumba za resetiranje pozicije šahovskih figura	47
4.8. Dodavanje gumba za okretanje šahovske ploče	52
4.9. Dodavanje gumba za mijenjanje materijala/boje šahovskih figura.....	52
4.10. Dodavanje Switch gumba za okretanje ploče.....	53
4.11. Pakiranje aplikacije za HoloLens Emulator i HoloLens 2 uređaj	54
5. TESTIRANJE APLIKACIJE	57
5.1. Testiranje aplikacije na HoloLens emulatoru.....	57
5.2. Testiranje aplikacije na HoloLens 2 uređaju.....	58
5.3. Mogućnost daljnjeg razvoja aplikacije.....	64
6. ZAKLJUČAK.....	65
7. LITERATURA	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Sutherlandov izum [2]	2
Slika 2.	Razlike virtualne, proširene i miješane stvarnosti [6]	6
Slika 3.	Primjena virtualne, proširene i miješane stvarnosti [8]	7
Slika 4.	Spektar miješane stvarnosti [9]	7
Slika 5.	Koncept mješovite stvarnosti [9]	8
Slika 6.	Vrste okularnosti [12]	13
Slika 7.	HoloLens 2 uređaj [12]	14
Slika 8.	Osnovni dijelovi naočala i dodaci [13]	15
Slika 9.	Komponente HoloLens 2 naočala za proširenu stvarnost [14]	16
Slika 10.	Praćenje ruku [13]	16
Slika 11.	Pet mikrofona na prednjoj strani uređaja [13]	17
Slika 12.	Praćenje očiju korisnika [13]	17
Slika 13.	Prostorno mapiranje [13]	18
Slika 14.	Vidno polje Hololens 2 naočala [13]	18
Slika 15.	Primjena HoloLensa 2 u obrazovanju [16]	19
Slika 16.	Primjena HoloLensa 2 u proizvodnji [15]	21
Slika 17.	HP Reverb G2 [17]	22
Slika 18.	Samsung HMD Odyssey + [18]	23
Slika 19.	Usporedba Meta Quest 2 i Meta Quest 3 uređaja [20]	24
Slika 20.	Magic Leap 2 [21]	26
Slika 21.	XReal Air 2 [22]	27
Slika 22.	Apple Vision Pro [23]	29
Slika 23.	Postavljanje projekta u Unreal Engineu	32
Slika 24.	Instalacija Microsoft Visual Studio aplikacije [24]	34
Slika 25.	Početni zaslon emulatora	36
Slika 26.	Početni zaslon Unreal Enginea i dostupne verzije	37
Slika 27.	Omogućavanje podrške za HoloLens uređaj	38
Slika 28.	Odabir projekta	38
Slika 29.	Postavke projekta	39
Slika 30.	Kreiranje <i>Actora</i>	40
Slika 31.	Dodavanje Static Mesh za kreiranje materijala	41
Slika 32.	Izgled Blueprinta materijala šahovske ploče	41

Slika 33.	<i>World Outliner</i> prozor	42
Slika 34.	Dodavanje AR sesije	43
Slika 35.	<i>Event Graph</i> AR sesije	44
Slika 36.	Postavljanje <i>Game Moda</i> i <i>Main Levela</i>	45
Slika 37.	Mixed Reality UX Tools instalacija	45
Slika 38.	Blueprint ručne interakcije	46
Slika 39.	<i>Uxt Generic Manipulator</i> kao komponenta šahovske ploče	47
Slika 40.	<i>PressableButtonHoloLens2</i> gumb	47
Slika 41.	Dodavanje funkcije <i>ResetLocation</i>	48
Slika 42.	Blueprint funkcije <i>Reset Location</i> za figuru <i>White King</i>	49
Slika 43.	<i>Event Graph</i> šahovskih figura	49
Slika 44.	Kreiranje gumba	50
Slika 45.	Dodavanje događaja <i>On Button Pressed</i> u <i>Event Graph</i>	51
Slika 46.	Blueprint gumba za resetiranje pozicije	51
Slika 47.	Blueprint <i>Reset Location</i> funkcije šahovske ploče	52
Slika 48.	Blueprint gumba za okretanje šahovske ploče	52
Slika 49.	<i>Event Graph</i> gumba <i>ChangeColor</i>	53
Slika 50.	<i>Event Graph</i> Switch gumba za okretanje ploče	53
Slika 51.	Izgled aplikacije šahovske igre u <i>Unreal Engineu</i>	54
Slika 52.	Prikaz korisnikovih ruku unutar <i>Unreal Enginea</i> koje igraju šah i uspješno pomiču figure	54
Slika 53.	Klikom na gumb uspješno promijenjena boja figura	55
Slika 54.	Šahovske figure uspješno vraćene na početne pozicije	55
Slika 55.	Pakiranje projekta za testiranje	55
Slika 56.	Označavanje ikone za pakiranje aplikacije za emulator i uređaj	56
Slika 57.	Otvoren projekt u <i>HoloLens</i> emulatoru	57
Slika 58.	Promijena boje figura klikom na <i>ChangeColor</i> gumb	57
Slika 59.	Okretanje šahovske ploče klikom na gumb <i>TurnaroundBoard</i>	58
Slika 60.	Okretanje šahovske ploče klikom na <i>Switch</i> gumb	58
Slika 61.	<i>Start menu</i> virtualna ikona na zapešću ruke	59
Slika 62.	Otvaranje projekta na <i>HoloLens</i> naočalama	59
Slika 63.	Šahovska aplikacija gledana kroz ekran <i>HoloLens 2</i> naočala	60
Slika 64.	Igranje šaha s <i>HoloLens 2</i> naočalama	60
Slika 65.	Manipuliranje figurom šaha	61

Slika 66.	Šahovska igra smještena na stvarnom objektu za što realističnije iskustvo.....	61
Slika 67.	Uspješna promjena boje šahovskih figura pritiskom gumba <i>Change Color</i>	62
Slika 68.	Vraćanje figura u početni položaj klikom na gumb <i>Reset</i>	62
Slika 69.	Uspješno okretanje šahovske ploče klikom na gumb <i>TurnaroundBoard</i>	63
Slika 70.	Uspješno okretanje šahovske ploče klikom na <i>Switch</i> gumb	63

SAŽETAK

Razvojem brojnih tehnologija, virtualna i proširena stvarnost se sve više primjenjuju u različitim sferama ljudskog života. Programske aplikacije unutar mješane stvarnosti omogućuju korisnicima da vide i ostvaruju interakciju s virtualnim objektima koji su integrirani u stvarni svijet. Takve aplikacije koriste napredne tehnologije za praćenje, grafički prikaz, ulazne uređaje i obradu podataka kako bi se stvorilo uvjerljivo iskustvo u kojem se stapaju digitalni i stvarni objekti. Ovaj rad detaljno opisuje tehnologiju miješane stvarnosti, njezine komponente te njezine hardverske i softverske aspekte. Koristeći najmoćniji alat za kreiranje 3D svjetova u stvarnom vremenu Unreal Engine i Mixed Reality Toolkit, razvijena je programska aplikacija koja uključuje ciljane objekte od interesa. Unutar nje je kreirano interakcijsko sučelje koje korisniku omogućuje interakciju s objektima u virtualnom svijetu koristeći HoloLens 2 naočale za proširenu stvarnost.

Ključne riječi: programska aplikacija, miješana stvarnost, proširena stvarnost, virtualna stvarnost, Unreal Engine, Mixed Reality Toolkit (MRTK), HoloLens 2, interakcija

SUMARRY

Virtual and augmented reality are becoming more and more popular and used in different spheres of human life because numerous technologies are being developed nowadays. Software applications within mixed reality allow users to see and interact with virtual objects integrated into the real world. Such applications use advanced technologies for tracking, graphics, input devices and data processing to create a compelling experience in which digital and physical objects are completely merged. This paper describes in detail the mixed reality technology, its components and hardware and software aspects. An application which includes targeted objects of interest is developed using the most powerful real-time 3D creation tool Unreal Engine and Mixed Reality Toolkit. An interactive interface is built into the application which allows user to interact with objects in the virtual world using HoloLens 2 headset.

Key words: software application, mixed reality, augmented reality, virtual reality, Unreal Engine, Mixed Reality Toolkit (MRTK), HoloLens 2, interaction

1. UVOD

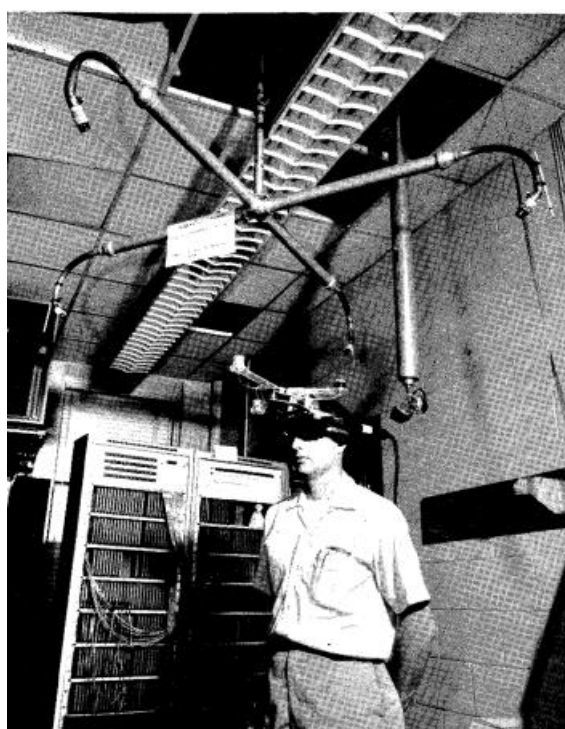
Prije nekoliko desetljeća, ideje o virtualnoj (*engl. Virtual Reality*, skraćeno VR), proširenoj (*engl. Augmented Reality*, skraćeno AR) i miješanoj stvarnosti (*engl. Mixed Reality*, skraćeno MR) bile su domena znanstvene fantastike i futurističkih vizija. Pojavom i razvojem brojnih tehnologija granica između virtualnog i stvarnog svijeta je sve manja, a virtualni svijet pruža iskustva koja otvaraju nove dimenzije koje čovjek prošlog stoljeća nije mogao ni zamisliti. U današnje vrijeme, ta tri termina su postala ključni igrači u revolucionarnim promjenama koje oblikuju i mijenjaju ljudsku stvarnost. Virtualna stvarnost u potpunosti transportira čovjeka u izmišljene digitalne svjetove i pruža mu priliku da iskusi i istraži mjesta koja fizički ne postoje. Na drugom kraju spektra, proširena stvarnost pretapa digitalne informacije na fizičku stvarnost, pružajući podatke koji obogaćuju čovjekovo svakodnevno iskustvo. Miješana stvarnost, kao najnoviji član ove tehnološke trilogije, spaja najbolje aspekte virtualne i proširene stvarnosti i stvara harmonična okruženja u kojima stvarni i virtualni svijet koegzistiraju i međusobno djeluju u realnom vremenu.

Ovaj rad ima za cilj istražiti koncepte miješane stvarnosti i istaknuti mogućnosti koje nudi te, koristeći potrebne alate i programsku podršku, prikazati interakciju između stvarnog i virtualnog svijeta u okviru programske aplikacije igre šaha. U teorijskom dijelu rada prikazan je povijesni pregled spomenutih stvarnosti, dane su njihove definicije, primjena i najznačajniji uređaji koji omogućuju interakciju virtualnog i stvarnog svijeta. Potom su navedeni i detaljno opisani alati i programi korišteni za izradu programske aplikacije. U okviru rada također su detaljno razmotreni koraci razvijanja virtualnog 3D svijeta, točnije šahovske ploče i figura te kreiranje interakcijskog sučelja. Na samom kraju prikazani su rezultati aplikacije testirane u HoloLens emulatoru koji je instaliran na računalo i na HoloLens 2 naočalima za proširenu stvarnost te je izveden zaključak.

2. OSNOVNA TERMINOLOGIJA

2.1. Povijest virtualne, proširene i miješane stvarnosti

Povijest proširene stvarnosti počinje u 1950-im godinama s Mortonom Heilingom, kinematografom koji je vjerovao da bi kinematografija mogla postati iskustvo koje u potpunosti obuhvaća gledatelja, angažirajući sva njegova osjetila. Heiling je 1955. godine opisao svoju viziju u djelu "Kino budućnosti", a 1962. je izradio Sensoramu, prototip koji je prethodio digitalnom računalstvu [1]. Ivan E. Sutherland smatra se ključnom figurom u razvoju proširene stvarnosti budući da je postavio temelje ove tehnologije 1968. svojim izumom Damoklov mač (*engl. Sword of Damocles*) koji je prikazan na Slici 1.



Slika 1. Sutherlandov izum [2]

Ovaj uređaj poznat je kao prvi HMD (*engl. Head mounted display*) uređaj proširene stvarnosti za prikazivanje 3D objekata u stvarnom svijetu. Njegova težina i složenost zahtijevali su da bude pričvršćen za mehaničku ruku, ograničavajući tako kretanje korisnika na jako mali prostor. Sastavljen od dva CRT ekrana, po jedan za svako oko, i opremljen vidnim poljem od 40 stupnjeva, uređaj je također uključivao zaseban senzor za praćenje položaja glave koji je bio smješten iznad korisnika. Ovaj inovativni HMD uređaj predstavljao je temeljni korak u daljnjem razvoju virtualne i proširene stvarnosti, postavljajući standard za buduće tehnologije u ovom području [2]. 1975. godine Myron Krueger je razvio "The Videoplace", inovativnu sobu koja je pružala korisnicima mogućnost interakcije s virtualnim objektima. Početkom

1990-tih, Tom Caudell i David Mizell iz Boeinga su, dok su pomagali radnicima složiti žice i kablove za zrakoplove, skovali termin proširena stvarnost. Njih dvojica su smatrala da proširena stvarnost može olakšati i poboljšati radne procese, smanjujući energetske zahtjeve i potrebu za pikselima u usporedbi s virtualnom stvarnošću. L. B. Rosenberg je razvio jedan od prvih funkcionalnih AR sustava nazvan "Virtual Fixtures". Ovaj sustav je demonstrirao kako AR može poboljšati ljudsku izvedbu u određenim zadacima. 1993. godine Steven Feiner, Blair MacIntyre i Doree Seligmann su predstavili značajan rad o prototipu AR sustava nazvanom KARMA, dodatno promovirajući potencijal AR tehnologije. Pojam mješovita stvarnost prvi put se pojavljuje u znanstvenom članku "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays" koji su objavili Paul Milgram i Fumio Kishino 1994. godine. U članku autori opisuju miješanu stvarnost kao virtualni kontinuum. Taj virtualni kontinuum se može opisati kao spektar na čijem se jednom kraju nalazi stvarni svijet dok se na drugom kraju nalazi virtualna stvarnost s digitaliziranim objektima. Autori su tako predstavili mješovitu stvarnost kao stvarni i virtualni svijet unutar jednog zaslona. Početkom 2000-ih godina, Bruce Thomas je razvio ARQuake, prvu mobilnu aplikaciju proširene stvarnosti koja je otvorila vrata za nove načine interakcije u AR igricama [1]. Prijelaz u 21. Stoljeće donio je značajan napredak u tehnologiji miješane stvarnosti, posebno u pogledu razvoja sofisticiranih HMD uređaja i dostupnosti naprednog računalnog hardvera. Tijekom ovog perioda, pojavili su se uređaji poput Google Glassa koji je imao za cilj pružiti korisnicima iskustvo koje je integriralo digitalni sadržaj sa stvarnim svijetom u kojem se korisnik nalazi. Posljednjih je godina miješana stvarnost postala fokus značajnih ulaganja velikih divova poput Microsofta, Googlea i Applea koji ulažu ogromna sredstva u razvoj ovih naprednih tehnologija [3]. Ova evolucija miješane stvarnosti karakterizirana je nizom inovacija i prekretnica koje su kontinuirano nadograđivale dostignuća prethodnika. Od prvotnih konceptualnih vizija u znanstvenoj fantastici do današnjih tehnoloških čuda, miješana stvarnost je prošla impresivan put u relativno kratkom vremenskom roku. S daljnjim napredovanjem tehnologije, vrlo je vjerojatno da će miješana stvarnost postati sveprisutniji aspekt našeg svakodnevnog života, temeljito mijenjajući način na koji doživljavamo i interaktivno se povezujemo s digitalnim i fizičkim svijetom oko nas.

2.2. Virtualna stvarnost

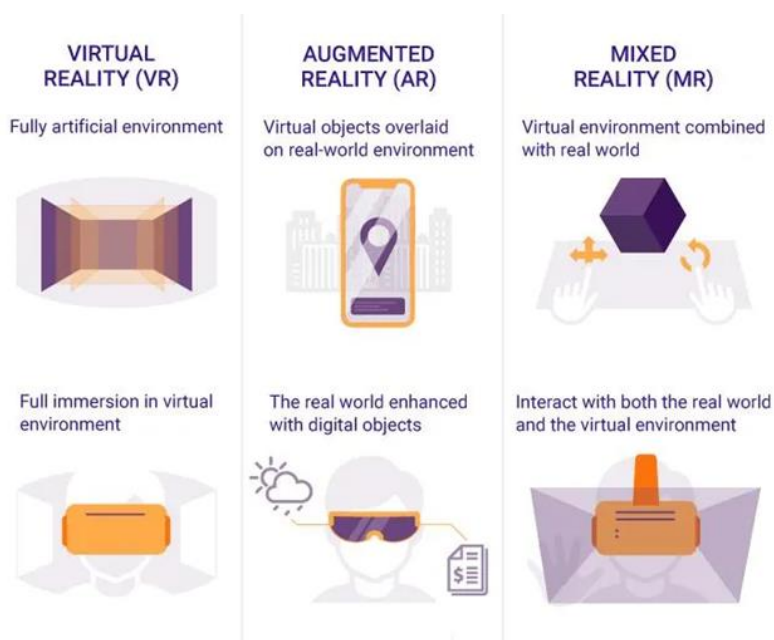
Virtualna stvarnost (*engl. Virtual Reality*, skraćeno VR) predstavlja tehnologiju koja koristi trodimenzionalno, računalno generirano, interaktivno okruženje, omogućujući korisnicima da ga istražuju i njime manipuliraju. U ovakvom okruženju, osoba je potpuno uronjena, može manipulirati objektima i izvoditi niz radnji. Implementacija virtualne stvarnosti danas se najčešće vrši kroz naprednu računalnu tehnologiju, uz korištenje VR naočala, traka za trčanje i posebnih rukavica s osjetnicima za određivanje položaja ruke i pokreta prstiju ili drugih uređaja za praćenje kretanja. Ovi uređaji su dizajnirani da stimuliraju naša osjetila i tako stvaraju uvjerljivu iluziju stvarnosti [4]. Doživljaj se dopunjuje zvukovima, vibracijama, ali se iskušavaju i mogućnosti pobuđivanja taktilnih i mirisnih osjeta. Ključni pojmovi virtualne stvarnosti su imerzivnost i realizam jer je njezin cilj stvaranje uvjerljive iluzije prisutnosti čovjeka unutar digitalnog svijeta. Većina modernih VR sustava se oslanja na HMD uređaje koje je jako bitno optimizirati da bi se postigao veći stupanj prisutnosti u virtualnom svijetu. Budući da virtualna stvarnost omogućuje korisnicima novu razinu interakcije, ima širok spektar primjene u različitim oblastima kao što su: edukacija i obrazovanje (virtualne učionice, vojne obuke, medicinski treninzi), zabava i igre, poslovne aplikacije (virtualni sastanci, arhitektura), zdravstvo (terapije i rehabilitacije), umjetnost i kultura (virtualne izložbe i virtualno praćenje koncerata), industrijska primjena (proizvodnja i testiranje), automobilska industrija (simulacije za testiranje sigurnosti i dizajna vozila), nekretnine (virtualno razgledavanje brojnih nekretnina), sport (sportski treninzi za poboljšavanje vještine i strategije), svemirska istraživanja (simulacije svemirskih misija i scenarija), turizam (razgledavanje udaljenih lokacija i mjesta bez fizičkog odlaska do njih) i još mnoge druge [5]. S obzirom na to da postaje sve pristupačnija i široko rasprostranjena, možemo očekivati da će se njene inovativne primjene u budućnosti još više proširiti. Virtualna stvarnost ima potencijal da revolucionira način na koji komuniciramo i radimo, pritom nudeći nove mogućnosti za interakciju i saradnju u digitalno kreiranim svjetovima.

2.3. Proširena stvarnost

Proširena stvarnost (*engl. Augmented Reality*, skraćeno AR) je tehnologija koja u stvarni svijet dodaje elemente virtualnog okruženja poput vizualnih elemenata, zvukova i drugih osjetilnih podražaja putem holografske tehnologije, pritom čineći da ti elementi izgledaju kao dio stvarnog svijeta. U proširenoj stvarnosti korisnici komuniciraju sa stvarnim svijetom dok u isto vrijeme imaju pristup digitalnom sadržaju na takav način da je stvarni svijet u središtu, ali ga se poboljšava s virtualnim elementima. Jedan od ranijih i najzornijih prikaza proširene stvarnosti, aplikacija Pokemon Go, napravila je pomutnju tjerajući milijune ljudi diljem svijeta da žure sa svojim pametnim telefonima u potrazi za malim virtualnim stvorenjima [6]. Neke AR aplikacije, kao što je Augment ili Ikea Place, omogućuju korisnicima primjenu digitalnih objekata u stvarnim okruženjima, omogućujući tvrtkama da koriste uređaje proširene stvarnosti kao način za pregled svojih proizvoda u stvarnom svijetu. Takve aplikacije se također mogu koristiti za demonstraciju proizvoda u nekom okruženju za kupce, kao što to rade tvrtke što su Mountain Equipment Co-op ili Lowe's koje koriste proširenu stvarnost kako bi korisnicima omogućile pregled kako njihovi proizvodi mogu izgledati kao kod kuće korištenjem 3D modela [7]. Danas postoje brojne aplikacije proširene stvarnosti koje nude bezbroj mogućnosti: aplikacije virtualnog isprobavanja odjeće, obuće i šminke, aplikacije koje skeniranjem nekog objekta daju informacije o njemu, aplikacije koje medicinskim djelatnicima prilikom vađenja krvi pomažu da pronađu pacijentovu venu ili aplikacije za planiranje rasporeda i dizajna interijera u kojoj kupci mogu pregledavati proizvode i postavljati ih na fotografiju svog doma čime se stvaraju realistična AR iskustva.

2.4. Razlike između stvarnosti

Dok je razlika između proširene i virtualne stvarnosti jasna i uočljiva, razlika između proširene i miješane stvarnosti nije baš tako očigledna i zahtjeva dodatno pojašnjenje. Kao što je i prikazano na Slici 2., lako je uočiti da za razliku od virtualne stvarnosti koja uranja korisnike u potpuno digitalno okruženje, proširena stvarnost nudi korisnicima iskustvo gledanja digitalnog svijeta dok su u potpunosti svjesni svoje okoline. Proširena stvarnost dodaje digitalne informacije poput slika, zvuka ili videa u stvarno okruženje u realnom vremenu. S druge strane, miješana stvarnost ne samo da omogućava potpuno iskustvo digitalnog i stvarnog svijeta istovremeno nego također pruža mogućnost interakcije i komunikacije s digitalnim objektima. U sljedećem poglavlju detaljno je objašnjen pojam miješane stvarnosti i spektar koji ona obuhvaća.



Slika 2. Razlike virtualne, proširene i miješane stvarnosti [6]

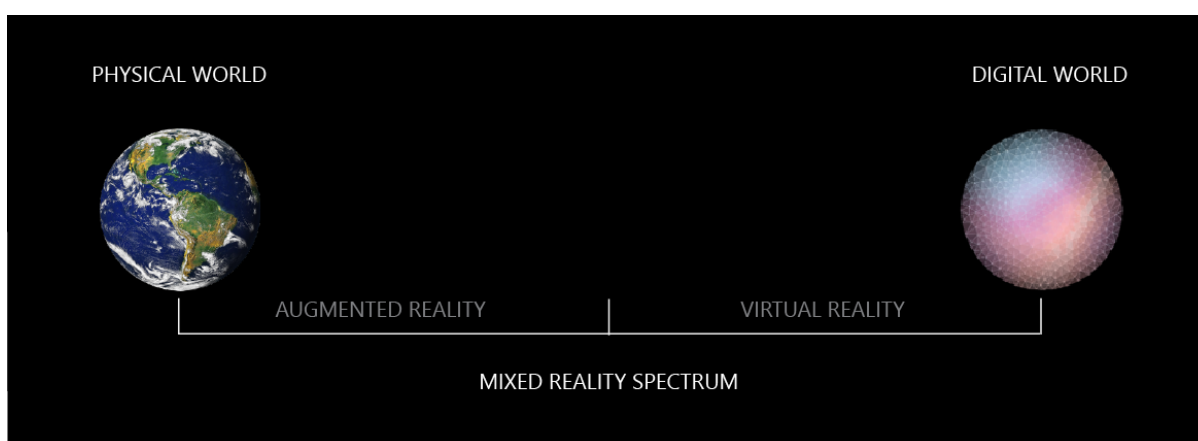
2.5. Miješana stvarnost

Pojmovi virtualne i proširene stvarnosti postoje već duže vrijeme i većini su dobro poznati i definirani. Međutim, pojam miješane stvarnosti (*engl. Mixed Reality*, skraćeno MR) koji se u ovom radu najviše spominje, mnogima je zbunjujuć i nejasan. Poznavajući gore spomenute pojmove virtualne i proširene stvarnosti, moguće je na vrlo jednostavan način dati definiciju miješane stvarnosti. Ona kombinira najbolje aspekte virtualne i proširene stvarnosti, odnosno spaja virtualni sadržaj sa stvarnim svijetom na interaktivan i sveobuhvatan način.



Slika 3. Primjena virtualne, proširene i miješane stvarnosti [8]

Definicija na stranici Microsofta kaže da je miješana stvarnost spektar sveobuhvatnih iskustava koja povezuje i spaja fizički i digitalni svijet u jedan u aplikacijama proširene i virtualne stvarnosti [9]. Na Slici 4. vizualno je prikazana sama definicija miješane stvarnosti. Zamislite miješanu stvarnost kao kreativni prostor koji postoji između krajnosti fizičkog i digitalnog svijeta i podrazumijeva i proširenu i virtualnu stvarnost. Virtualna stvarnost je koncept bliži digitalnom svijetu, ali s elementima stvarnog svijeta, dok je proširena stvarnost koncept bliži stvarnosti s ubačenim virtualnim elementima.

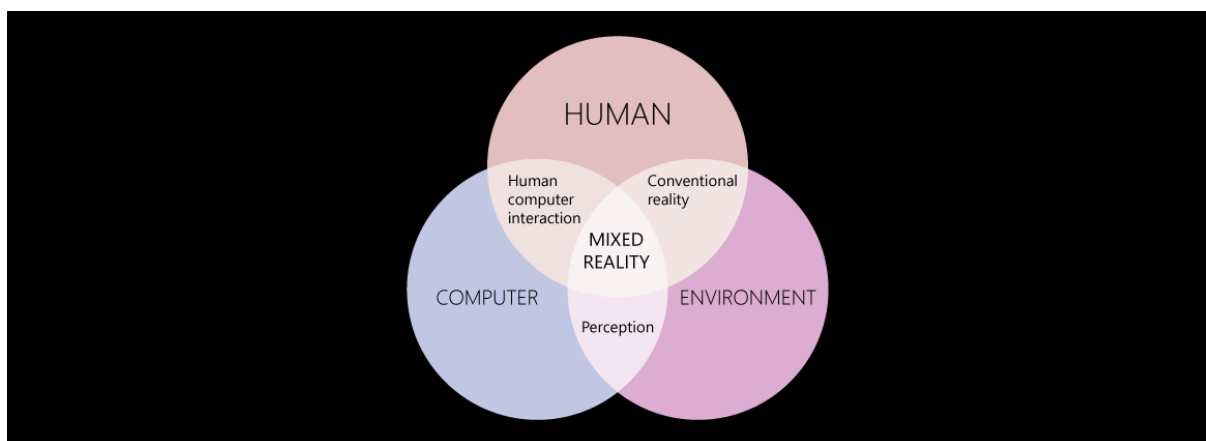


Slika 4. Spektar miješane stvarnosti [9]

Budući da miješana stvarnost pokriva tako širok spektar mogućih koncepata, sadrži vrste interakcije koje su u potpunosti jedinstvene i uključuju [9]:

- Unos okoline korisnika – snimanje korisnikove pozicije u svijetu mapiranjem površina i granica u tom području,
- Prostorni zvuk – 3D zvuk koji ima položaj i dubinu u virtualnom prostoru, kao i u stvarnom svijetu,
- Lokacije, položaje i postojanost objekata u realnom i virtualnom svijetu.

Ove značajke su dio odnosa između ljudskog unosa i računala koji postoji pod nazivom interakcija čovjeka i računala (engl. human-computer interaction, skraćeno HCI). Čovjekov unos odnosi se na interakciju s tehnologijom, odnosno korištenje tipkovnice, miša ili vlastitog glasa. Kako se senzori i sposobnost računala za obradu informacija povećavaju, tako se povećava i područje računalnog unosa iz okoline. Interakcija između računala i okoline naziva se percepcija. Sjecište računalne obrade, ljudskog unosa i razumijevanja okoline je mjesto gdje oživljava mješovita stvarnost i gdje nestaje granica između fizičkog i virtualnog svijeta [9]. Na Slici 5. prikazan je Vennov dijagram koji vizualno ilustrira koncept mješovite stvarnosti koji je ljudskog unosa, računalne obrade i percepcije okoline.



Slika 5. Koncept mješovite stvarnosti [9]

2.5.1. Primjene miješane stvarnosti

Od rane faze informatičke revolucije kada su stvorena prva računala koja su često zauzimala cijele prostorije, preko ere proboja osobnih računala koja su iz temelja izmijenila način na koji se ljudi međusobno povezuju i komuniciraju pa sve do danas kada su ljudima na dohvat ruke uređaji sposobni za obradu i upravljanje podacima na nekoj novoj razini (primjerice senzori za Internet stvari (engl. Internet of Things) i uređaji za miješanu stvarnost), mijenja se čovjekovo shvaćanje svijeta oko sebe i brišu granice između stvarnog i virtualnog svijeta. Da bi se

iskoristio puni potencijal podataka, ključno je osigurati da budu dostupni čovjeku u pravom vremenu i kontekstu. Miješana stvarnost je na pragu da postane ključna tehnologija koja će podatke integrirati u fizički svijet i omogućiti njihovo korištenje na inovativne i interaktivne načine. Primjene virtualne i proširene stvarnosti kreću se u različitim sferama ljudskog života nadovezujući digitalne informacije u stvarnu okolinu i omogućuju da ljudi iskuse i vide svijet oko sebe na potpuno nove načine. Prema [9] najznačajniji i najuobičajeni slučajevi upotrebe tehnologija miješane stvarnosti su:

- Dizajn i izrada prototipa – korištenjem miješane stvarnosti timovi inženjera i dizajnera mogu se udružiti bez obzira na fizičku udaljenost i surađivati na stvaranju i iterativnom poboljšanju prototipa. Uz napredak u proširenoj i virtualnoj stvarnosti, ovi timovi mogu u stvarnom vremenu mijenjati i testirati svoje 3D modele, omogućujući brzo uočavanje i rješavanje dizajnerskih nedostataka. Ovaj proces nije samo brži i ekonomičniji, već i potiče inovacije kroz brzu povratnu informaciju i kolaborativni rad.
- Obuka i razvoj – tehnologije miješane stvarnosti nude obrazovnim stručnjacima alate koji transformiraju tradicionalne metode podučavanja. Učenici mogu istraživati složene koncepte kroz 3D modele i simulacije, što rezultira dubljim razumijevanjem i boljim zadržavanjem informacija. Ova tehnologija također može simulirati realne situacije koje je inače teško reproducirati u klasičnom okruženju, pružajući praksu u sigurnom i kontroliranom okruženju.
- Geoprostorno planiranje – kroz primjenu proširene stvarnosti, stručnjaci kao što su urbanisti, arhitekati i inženjeri mogu vizualizirati buduće projekte poput konstrukcije zgrade ili urbanističkog planiranja unutar stvarnog okruženja. Ovo smanjuje potrebu za ručnim izmjerama i crtežima, pružajući precizne i skalabilne 3D modele koji mogu biti pregledani i modificirani u stvarnom vremenu.
- Prodaja - U prodajnim procesima, aplikacije proširene stvarnosti mogu oživjeti proizvode kroz interaktivne demonstracije koje prikazuju karakteristike, funkcionalnosti i mogućnosti prilagođavanja proizvoda. To omogućuje potencijalnim kupcima da dožive proizvod na inovativan način koji nadilazi statične slike ili opise i potiče brže odluke o kupovini.
- Terenska usluga i korisnička podrška – Upotrebom proširene stvarnosti u terenskoj službi, tehničari mogu imati pristup detaljnim uputama i vizualizacijama koje olakšavaju dijagnostiku i popravke na licu mjesta. To ne samo da povećava efikasnost terenskog osoblja već i poboljšava korisničko iskustvo zahvaljujući bržem i točnijem

rješavanju problema. Također, omogućuje virtualni izlazak stručnog tima na teren i time se rješava problem kupca bez potrebe za fizičkom prisutnosti stručnjaka na terenu.

- Produktivnost i suradnja – korištenjem tehnologija miješane stvarnosti, radne prostorije nisu više ograničene na fizičke zidove. Timovi mogu kreirati radne, virtualne prostorije i surađivati sa stručnjacima s drugog kraja svijeta u istom virtualnom prostoru te dijeliti i uređivati sadržaj te izmjenjivati iskustva i ideje.

3. UREĐAJI VIRTUALNE, PROŠIRENE I MIJEŠANE STVARNOSTI

3.1. Podjela uređaja

Današnje uređaje koji pružaju iskustvo proširene i virtualne stvarnosti nalazimo uglavnom u HMD (*engl. head-mounted displays*) obliku. To su zaslone koji su ili integrirani u naočale ili montirani na korisnikovu glavu. HMD uređaji imaju nevjerojatan raspon primjene, uključujući igrice, medicinu, zrakoplovstvo, inženjerstvo, turizam, razne obuke i simulacije te sport. Kako bi korisnik imao najbolje iskustvo s HMD-om, potrebno je u njih ugraditi niz tehnologija kao što su: zaslon (jedan ili dva), gustoća piksela, latencija, brzina osvježavanja, optika, praćenje glave i oka i druge dodatke. Postoje tri vrste HMD uređaja [10]:

- Slide-on HMD – najprimitivniji i najjeftiniji tip HMD-a, ovi uređaji se oslanjaju na umetnute pametne telefone. Sastoji se od držača za pametni telefon, leća i nekog oblika osnovnog ulaza. Umetnuti pametni telefon služi za prikaz, obradu podataka i praćenje rotacije. Neki slide-on HMD-ovi koriste vlastite ugrađene IMU-ove (*engl. inertial measuring unit*), tj. elektroničke senzore koji mjere rotacijska kretanja nagiba, skretanja i okretanja, umjesto da se oslanjaju na pametne telefone. Popularni slide-on uređaji su Samsung Gear VR i Google Cardboard.
- Diskretni HMD – nema nikakvu računalnu snagu i mora komunicirati s vanjskim računalom. Sadrži zaslon, leće, praćenje rotacije i položaja, audio i napredni unos. Za obradu su ovi HMD-ovi povezani s računalom pomoću kabela. Neki od najpoznatijih su: Oculus Rift, HTC Vive i Vive Pro te PlayStation VR.
- Integrirani HMD – najsofisticiraniji i najskuplji tip uređaja koji pruža iskustva virtualne i proširene stvarnosti bez ikakvog vanjskog hardvera poput osobnog računala i pametnog telefona. Dakle, ima mogućnost samostalnog rada, ali i spajanja s računalom. Sadrži sve, od zaslona preko procesora do kamere, a može izvesti i složeno praćenje i koristiti napredne metode unosa. Trenutno je većina ovih uređaja jako skupa i namijenjena uglavnom poslovnim korisnicima. Popularni integrirani HMD-ovi su Microsoft HoloLens, Magic Leap i Google glass.

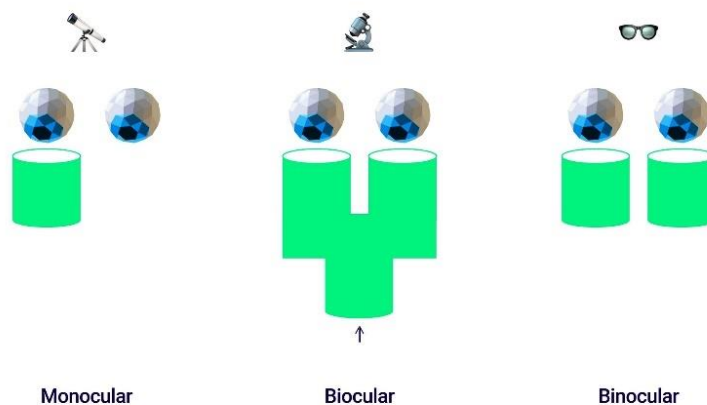
Također, danas postoje dvije vrste uređaja s obzirom na to koji tip zaslona imaju [11]:

- Holografski uređaji – karakterizira ih sposobnost da prikažu digitalne objekte kao da zaista postoje u stvarnom svijetu. Imaju prozirni zaslon koji omogućuje korisniku da izravno gleda stvarni svijet oko sebe, ali i digitalne objekte koji se čine stvarnima.
- Imerzivni uređaji - karakterizira ih sposobnost da stvore osjećaj prisutnosti blokirajući

fizički svijet i zamjenjujući ga potpunim digitalnim iskustvom. Većina takvih uređaja su potpuno virtualni jer imaju neproziran zaslon i ne omogućuju iskustvo mješovite stvarnosti. Međutim, Microsoft pruža zajedničku platformu mješovite stvarnosti Windows Mixed Reality za proizvođače uređaja i programere koja omogućuje da i imerzivni uređaji koji imaju montirane kamere koje skeniraju i mapiraju prostor oko korisnika i prate njegov položaj postanu uređaji miješane stvarnosti. Praćenje kretanja je implementirano u punih šest stupnjeva slobode (*engl. six degrees of freedom, 6DoF*). Time se postiže prirodno kretanje korisnika u digitalnom svijetu, ali i pogled na stvarnu okolinu. Najpopularniji primjeri takvih WMR kompatibilnih uređaja su: Meta Quest Pro, Meta Quest 2, Samsung HMD Odyssey, HP Reverb G2 i slični.

Holografski uređaji koji imaju optički prozirne zaslone su u ovom radu najznačajniji. Takvi zaslone mogu se podijeliti s obzirom na okularnost odnosno mjeru broja očiju potrebnih da se nešto vidi, prikazano na Slici 6. Prema [12] dijele se na:

- Monokularne – ovakvi zaslone omogućuje korisniku gledanje virtualnog sadržaja kroz mali zaslon ili leću ispred jednog oka dok drugim okom gleda stvari svijet. Monokularni zaslone se uglavnom koriste kao informacijski zaslone zbog svog malog oblika i činjenice da ne pružaju naznake dubine. Google Glass i Vuzix Smart Glasses su vrste monokularnog zaslona.
- Biokularne – ovaj tip pruža jedan kanal gledanja za oba oka pomoću unutarnje refleksije. Takvi zaslone nemaju stereopsisiju i prikladni su za gledanje iz neposredne blizine.
- Binokularne – ova vrsta zaslona omogućuje da svako oko ima svoj zaslon čime se stvara stereoskopski prikaz. Binokularni zaslon pruža najviši osjet dubine i uranjanja u prikazani sadržaj, ali su ujedno i najsloženiji. Ovakav tip zaslona koristi HoloLens 2 uređaj.



Slika 6. Vrste okularnosti [12]

3.2. Najznačajniji uređaji današnjice

Danas postoji velik broj dostupnih uređaja koji omogućuju iskustvo mješovite stvarnosti. S obzirom na tehničke specifikacije i mogućnosti miješane stvarnosti koje nude, uređaji se znatno razlikuju po cijeni i namijeni. Većina uređaja namijenjena je za zabavu i igru, dok je samo par njih namijenjeno za korporativne i edukativne svrhe. U nastavku su detaljno opisani neki najpopularniji uređaji koji se koriste ili su se koristili. Spomenut će se uređaji koji omogućuju potpuno iskustvo mješovite stvarnosti, ali i WMR kompatibilni uređaji koji su zapravo VR uređaji s ugrađenim kamerama za analizu prostora i praćenje korisnika. Takvi uređaji su trenutno jako privlačni korisnicima jer nude potpuno virtualno iskustvo, a pritom imaju sposobnost biti i uređaji mješovite stvarnosti. Iako su takvi uređaji bliži virtualnom dijelu spektra i nemaju mogućnosti kakve nude holografski uređaji, danas su jako popularni zbog niže cijene. Neki od najznačajnijih proizvođača uređaja virtualne i proširene stvarnosti su: Oculus, XReal, Rokid, HTC, Meta, Microsoft, Lenovo, Pico, Google i Magic Leap.

3.2.1. HoloLens 2

HoloLens 2 su revolucionarne naočale za proširenu stvarnost uz pomoć kojih virtualni 3D objekti, slike, videozapisi, hologrami, tekst i drugi elementi mogu biti smješteni u stvarni svijet. Uređaj je razvila tvrtka Microsoft 2019. godine kao poboljšanu verziju originalnog HoloLens uređaja predstavljenog 2016. godine i dizajnirane su isključivo za poslovne korisnike, a ne potrošače. U odnosu na originalni HoloLens uređaj, ovaj ima unaprijeđenu memoriju, jači

procesor, snažniju kameru te bolji zvuk zahvaljujući uklanjanju buke. Ovaj bežični uređaj ima svoj operativni sustav i ekosustav aplikacija i uključuje niz resursa za razvojne programere kako bi dizajnirali vlastite, prilagođene aplikacije. Postoje tri varijante: klasični HoloLens 2 uređaj, prikazan na Slici 7., sa spremnim aplikacijama namijenjen poslovnoj potrebi s cijenom od 3500\$, industrijsko izdanje HoloLens 2 naočala koje su razvijene za podršku u okruženjima kao što su čiste sobe ili opasna područja s cijenom od 4950\$ i Trimble XR10 s HoloLens 2 naočalama koje su izrađene sa zaštitnom kacigom i namjenjene za korištenje u opasnim, prljavim i glasnim, u većini slučajeva građevinskim radnim okruženjima s cijenom od 5199\$. Za razliku od drugih, sličnih postojećih uređaja, ovaj je izuzetno skup i namijenjen je za edukacijske, medicinske i korporativne svrhe [12].



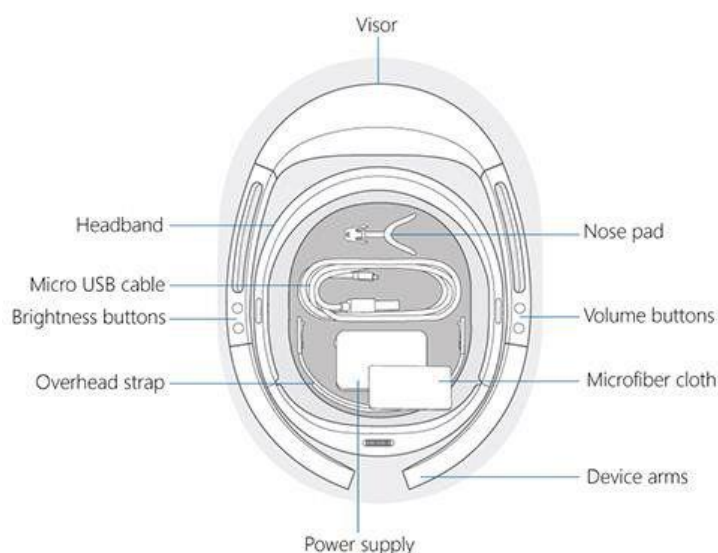
Slika 7. HoloLens 2 uređaj [12]

3.2.1.1. Tehničke specifikacije uređaja

HoloLens 2 naočale iznimno su udobne te je sa stražnje strane omogućeno podešavanje veličine. Kako je prikazano na Slici 8., HoloLens se sastoji od [13]:

- Vizir – sadrži senzore i zaslon te se može okrenuti prema gore u slučaju da ga želite maknuti s očiju
- Traka za glavu – nalazi se na stražnjoj strani uređaja i služi za učvršćivanje uređaja na glavu korisnika. Traka uključuje i kotačić čijim se okretanjem ona ona steže ili otpušta

- Gumbi za svjetlinu – nalaze se na lijevoj strani uređaja, blizu sljepoočnice korisnika
- Tipke za glasnoću – nalaze se na desnoj strani uređaja nasuprot gumbima za svjetlinu
- Gumb za napajanje – nalazi se na desnoj strani stražnjeg vanjskog poklopca
- USB-C priključak – nalazi se na desnoj strani stražnjeg vanjskog poklopca ispod gumba za napajanje

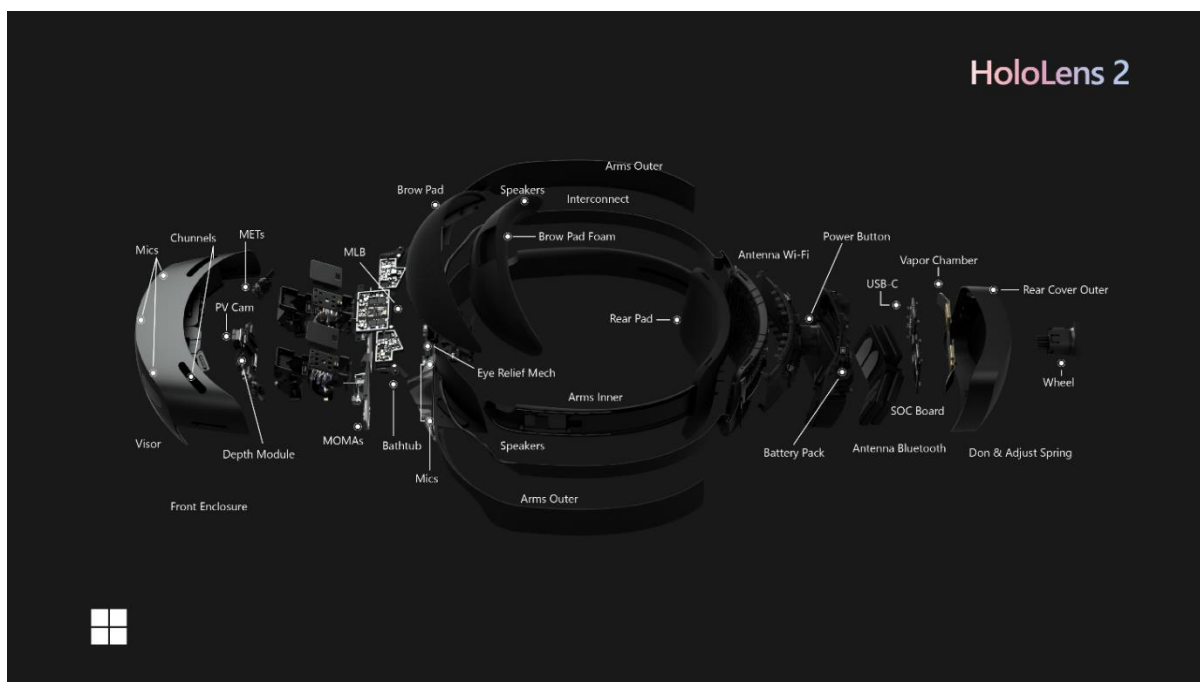


Slika 8. Osnovni dijelovi naočala i dodaci [13]

U kutiji u kojoj se dobije uređaj još se dobiju: jastučić za obrve koji po potrebi možete ukloniti i zamijeniti, remen koji se stavlja iznad glave i koji drži uređaj na mjestu i čini uređaj ugodnijim za nošenje, USB-C punjač i kabel koji se koristi za napajanje ili spajanje HoloLens 2 uređaja na računalo. Što se tiče hardverskih specifikacija, HoloLens 2 koristi Holographic Processing Unit (skraćeno HPU) 2.0 koji uključuje naprednu obradu za 2D i 3D sadržaj, kao i podršku za različite hardverski ubrzane zadatke poput praćenja očiju, detaljnog praćenja ruku, semantičkog označavanja i prostornog zvuka [13].

Zaslona HoloLens 2 naočala su prozirne holografske leće - valovodi (*engl. see-through holographic lenses – waveguides*) u kombinaciji sa svjetlosnim projektorima (*engl. light projectors*). Korisnik gleda kroz prozirne leće dok nosi naočale, a projektori se nalaze u kućištu iznad obrva. Uređaj koristi lasersko svjetlo za osvjetljavanje zaslona. Ovakav sustav omogućuje šire vidno polje koje ne mora biti točno usmjereno u korisnikove oči da bi radio. Kako bi se mogao pratiti položaj korisnika i mjeriti kut gledanja omogućeno je praćenje u 6 stupnjeva slobode (*engl. degrees of freedom, skraćeno 6DOF*) te vidno polje od 52°. Uređaj ima mogućnost i prostornog kartiranja tj. stvaranja mreže okruženja u stvarnom vremenu [14], a

detaljna podjela komponenti naočala dana je na Slici 9.

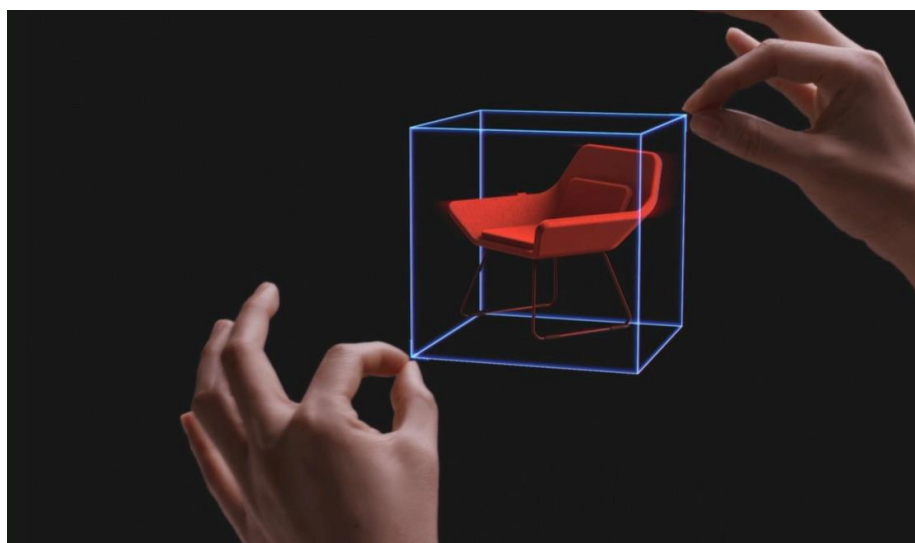


Slika 9. Komponente HoloLens 2 naočala za proširenu stvarnost [14]

HoloLens 2 ima izvrsnu kameru rezolucije 8 MP za snimanje fotografija uz 1080p za snimanje videozapisa što je značajno poboljšanje u odnosu na 2,4 MP na prethodnom HoloLens 1 uređaju [14].

HoloLens 2 uređaj nudi nekoliko jako važnih mogućnosti [13]:

- Praćenje ruku – potpuno praćenje ruku, dodirivanje holograma, hvatanje i pomicanje ruku na prirodan način. Naočale se prilagođavaju korisnikovim rukama tako da hologrami reagiraju kao pravi objekti što je prikazano na Slici 10.



Slika 10. Praćenje ruku [13]

- Ugrađene glasovne naredbe – omogućuju korisniku da jednostavno i brzo navigira i upravlja HoloLens 2 naočalama kada su mu ruke okupirane. Naočale imaju pet mikrofona na prednjoj strani kao što je predloženo na Slici 11.



Slika 11. Pet mikrofona na prednjoj strani uređaja [13]

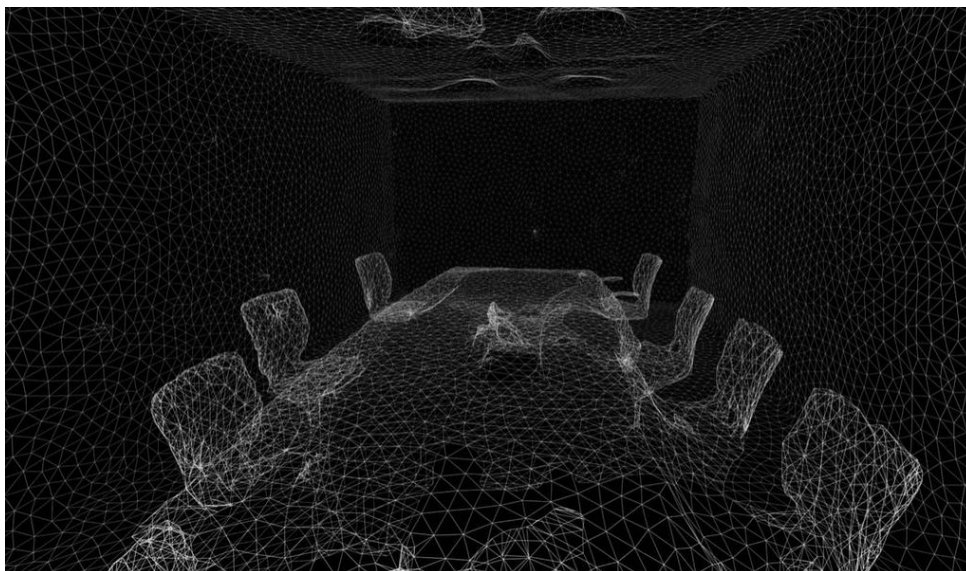
- Praćenje očiju – HoloLens 2 naočale znaju gdje točno korisnik gleda, predloženo na Slici 12., i to omogućuje da se hologrami prilagode našim očima i pogledu u stvarnom vremenu.



Slika 12. Praćenje očiju korisnika [13]

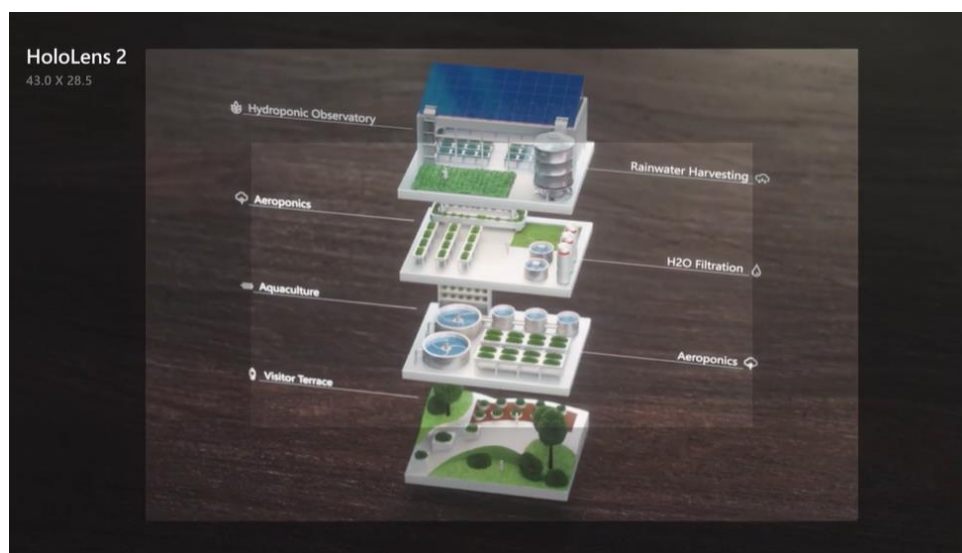
- Prostorno mapiranje – naočale mogu prostorno mapirati prostor što omogućuje da se digitalni objekti mogu kretati, smjestiti ili postaviti u stvarnu okolinu. Prostorno

mapiranje (*engl. Spatial mapping*), prikazano na Slici 13., pomaže korisniku postaviti virtualne objekte u njegovu okolinu. Hologrami koji lebde u prostoru ili se kreću s korisnikom činit će se manje stvarni nego oni koji će se smjestiti u prostor u kojem se korisnik nalazi.



Slika 13. Prostorno mapiranje [13]

- Široko vidno polje – HoloLens 2 naočale nude dvostruko veće vidno polje od svog prethodnika HoloLens 1 naočala, kako je prikazano na Slici 14., čime se postiže da korisnik ostvaruje preciznu interakciju s hologramima i u potpunosti uroni u miješanu stvarnost.



Slika 14. Vidno polje Hololens 2 naočala [13]

3.2.1.2. Primjene HoloLens 2 uređaja

HoloLens 2 pronalazi primjenu u različitim industrijama i organizacijama [15]:

- Arhitektura, inženjerstvo i građevina – koristeći HoloLens 2 stručnjaci mogu vizualno pregledati i manipulirati 3D modelima u stvarnoj veličini što im omogućuje da brže i efikasnije rade na dizajnu. Također, poboljšava se sigurnost na radu jer se radnicima omogućuje da ostanu svjesni svog okruženja dok istovremeno pristupaju jako važnim informacijama koje su im potrebne tijekom rada. Primjerice, inženjeri ili radnici na gradilištu mogu gledati kroz strukture, odnosno vidjeti kroz cijevi i vizualno detektirati potencijalne probleme i rizike prije nego postanu skupi za rješavanje.
- Obrazovanje – učenici i studenti mogu koristiti HoloLens 2 kako bi dublje istražili koncepte i teme, vizualizirajući ih kao holograme. Kako je prikazano na Slici 15., ovo može biti posebno korisno kod učenja anatomije, povijesti ili znanosti gdje modeli i rekonstrukcije mogu uvelike poboljšati razumijevanje gradiva. HoloPatient je proširena 3D aplikacija za učenje koja pomaže studentima medicine u procjeni, dijagnosticiranju i liječenju određenog stanja u stvarnom svijetu pomoću realistične holografske simulacije standardiziranih scenarija pacijenata. Učitelji mogu koristiti ove naočale kako bi transformirali klasičnu učionicu u interaktivno, imerzivno iskustvo.

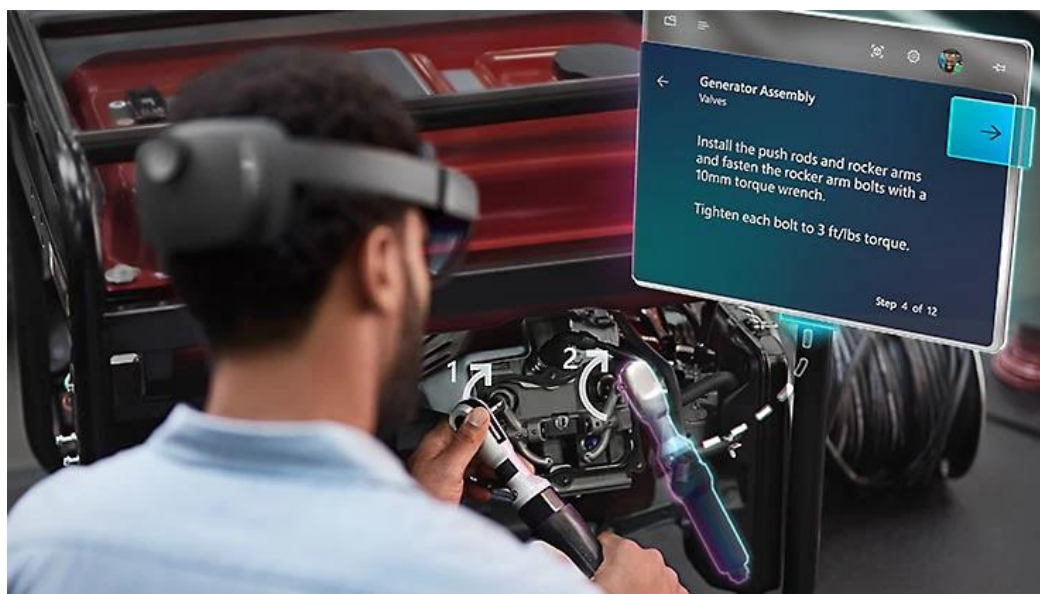


Slika 15. Primjena HoloLensa 2 u obrazovanju [16]

- Vlada i javne službe – HoloLens 2 omogućava predstavnicima vlasti i javnih službi da s hologramima surađuju na infrastrukturnim projektima, planiranju grada ili u izvanrednim situacijama, pružajući im složene podatke u 3D formatu koji su lako

razumljivi i manipulativni. Također, može poslužiti za treniranje osoblja za izvanredne situacije poput požara ili prirodnih katastrofa u kontroliranom, sigurnom okruženju.

- Maloprodaja – trgovački lanci mogu koristiti HoloLens 2 da vizualno prikažu proizvode koji nisu fizički dostupni u trgovini, što kupcima omogućava da isprobaju odjeću ili vide kako namještaj izgleda u njihovom domu, što omogućava bolje iskustvo trgovine i potencijalno povećava prodaju.
- Zdravstvo – liječnici i kirurzi mogu koristiti HoloLens 2 da planiraju i vježbaju kirurške zahvate ili da pružaju personaliziranu edukaciju pacijentima prije zahvata, smanjujući tako rizik i poboljšavajući ishod liječenja. Također, HoloLens 2 donosi revoluciju u operacijske sale omogućujući kirurzima da tijekom operacije imaju 3D hologramsku podršku što može značajno unaprijediti preciznost zahvata. Koristeći ovaj uređaj zdravstveni djelatnici mogu se povezati s udaljenim stručnjacima u stvarnom vremenu i odmah pristupiti medicinskim bilješkama i rendgenskim snimkama pacijenata na mjestu pružanja skrbi. Uz Dynamics 365 vodiče na HoloLens 2 uređaju doktorima je omogućeno učiti korak po korak bez fizičke prisutnosti stručnjaka za određeno područje uz pomoć simuliranih, holografskih uputa
- Proizvodnja – u proizvodnim pogonima HoloLens 2 može koristiti za poboljšanje treninga, brže prepoznavanje i rješavanje problema i efikasniju montažu, omogućujući radnicima da pristupe složenim instrukcijama bez prekida rada. Radnici mogu gledati hologramske upute iznad dijelova koje sklapaju, kako predočava Slika 16., što uvelike smanjuje greške i povećava efikasnost proizvodnje. Kako pokazuju tvrdnje na Microsoft stranici proizvođači su povećali prihode do 5% pomoću mješovite stvarnosti. Također, proizvođači su smanjili vrijeme obuke za 75% uz prosječnu uštedu od 30 \$ po satu rada. Neka značajnija proizvodna poduzeća koja uvode inovacije uz HoloLens 2 su: Airbus, Audi, Mercedes-Benz, Toyota, Lockheed Martin i L'oreal.



Slika 16. Primjena HoloLens 2 u proizvodnji [15]

3.2.2. HP Reverb G2

Reverb G2 su slušalice za virtualnu stvarnost tvrtke HP koja ih je razvila 2020. godine u suradnji s partnerima Microsoftom i Valveom. Poznate po svojim realističnim vizualima, impresivnim zvučnim krajolicima, praćenju i performansima. Na uređaju se nalaze četiri vanjske kamere – dvije okrenute prema naprijed i jedna sa svake strane. Pored bočnih kamera nalaze se ugrađeni mikrofoni i zvučnici koji se mogu podići kada nisu u upotrebi. Budući da lebde iznad uha, nude visokokvalitetni zvuk koji pridonosi uranjanju u virtualnu stvarnost. Unutrašnjost slušalica ima sloj memorijske pjene prekriven tkaninom kako bi se korisniku pružilo ugodno iskustvo tijekom nošenja. Taj dio je odvojiv radi lakšeg čišćenja i kako bi omogućio pristup skrivenom priključku za kabel dug šest metara koji povezuje naočale s računalom. HP Reverb G2 opremljene su s LCD ekranima visoke razlučivosti 2160x2160 (po oku) s lećama koje se mogu prilagoditi različitim udaljenostima očiju te brzinom osvježavanja od 90 Hz. Kompatibilnost ovog uređaja je široka, podržava i SteamVR i Windows Mixed Reality, omogućujući besprijekoran pristup VR sadržaju. Minimalni sistemski zahtjevi uključuju Intel Core i5 ili bolji processor, 8 GB RAM-a, DisplayPort 1.3, USB 3.0 tip C i grafiku koja podržava DX12. Kao i sve slušalice Windows Mixed Reality platforme, Reverb G2 se oslanjaju na kamere za praćenje pozicije i ne koriste vanjske senzore. Pojas koji služi za prijanjanje na vrh korisnikove glave je dizajniran s tri ključne točke s elastičnim remenom i čičak trakama koje omogućuju udobno prijanjanje u sve tri točke. Za razliku od nekih VR

slušalica, HP Reverb G2 dolaze s dva kontrolera pokreta kako je prikazano na Slici 17. Kontroleri na vrhu imaju kružni prsten prekriven malim svjetlima koje Reverb kamere koriste za praćenje pokreta korisnikove ruke. Uparivanje naočala s platformom Windows Mixed Reality je jednostavno, najprije ih uključite u DisplayPort i USB-C priključak, uključite kabel na napajanje i pričekate da Windows otkrije slušalice. Nakon toga je potrebno instalirati WMR (*engl. Windows Mixed Reality*) portal (ukoliko već nije instaliran) i zatim se provjerava jesu li kontroleri pravilno upareni i povezani. Potom softver daje upute o postavkama prostora za igru držeći naočale ispred monitora i obilazeći granice prostora. Nakon što je instalacija i priprema gotova, WMR portal stavlja korisnika u virtualni prostor s raznim VR iskustvima dostupnim u Microsoft trgovini. Uređaj je dosta lagan s težinom od 550 g te sa svim gore navedenim specifikacijama njegova cijena iznosi oko 600\$ [17].



Slika 17. HP Reverb G2 [17]

3.2.3. Samsung HMD Odyssey +

Samsungov HMD Odyssey+ predstavlja evoluciju originalnog Odyssey modela kako u specifikacijama, tako i u funkcionalnosti, uključujući podršku za Windows Mixed Reality (WMR). Lansiran krajem 2018. godine s početnom cijenom od 500\$, ovaj set je uključivao samo HMD i dva kontrolera koja su omogućavala interakciju unutar virtualnog prostora. Iako se više ne proizvodi, na tržištu se sada ovaj uređaj može pronaći po sniženim sijenama koje se kreću oko 200\$. Od ključnih karakteristika, ističu se dva binokularna 3,5-inčna AMOLED zaslona s rezolucijom od 1440x1600 piksela po oku, pružajući oštru i čistu sliku uz frekvenciju osvježavanja od 90 Hz. Imale su procijenjeno vodoravno vidno polje od 101°, dok je okomito vidno polje iznosilo 105° što znači da je Odyssey+ nudio široku perspektivu virtualnog svijeta. Uređaj je imao ugrađene dvije kamere na prednjem dijelu, vidljive na Slici 18., koje su, u

kombinaciji s kontrolerima, bile zadužene za praćenje kretanja korisnika u stvarnom svijetu i repliciranje te pozicije u virtualnom svijetu, što je ključni aspect WMR tehnologije. Samsung Odyssey+ nije bio autonomni uređaj nego je zahtijevao povezivanje s kompatibilnim računalom [18].



Slika 18. Samsung HMD Odyssey + [18]

3.2.4. Meta Quest 3

Meta Quest 3 naočale za proširenu stvarnost predstavljaju najnoviji dodatak u impresivnom portfoliju uređaja proširene i virtualne stvarnosti tvrtke Meta. Ovaj uređaj predstavlja tradiciju inovacija i usavršavanja, gradivši na temeljima svog prethodnika, Ouesta 2 iz 2020., sa značajnim unaprijeđenjima koja obuhvaćaju hardver, performance i korisničko iskustvo. Ove naočale dolaze s dvostrukim LCD ekranima, pružajući korisniku rezoluciju od 2064x2208 piksela po oku, što je za gotovo 30% veće u usporedbi s Meta Quest 2 uređajem. Takva rezolucija omogućava kristalno jasne slike, čime se osigurava da su virtualna okruženja i teksture oštri i realistični. Brzina osvježavanja od 120 Hz je ključna za smanjenje latencije i pružanje glatkog vizualnog doživljaja, što je posebno bažno u akcijskim igrama i aplikacijama koje zahtijevaju brze reakcije. Ovo su prve naočale koje koriste Snapdragon XR2 gen 2 CPU koji donosi znatno poboljšane performance u usporedbi s prethodnom generacijom. Ovo uključuje poboljšanja u brzini učitavanja i dvostruko veću snagu GPU-a (*engl. Graphics Processing Unit*), što omogućava kompleksnija i zahtjevnija iskustva virtualne stvarnosti. S osam gigabajta interne memorije i opcijama pohrane od 128 GB ili 512 GB, korisnici imaju dovoljno prostora za spremanje raznovrsnih aplikacija i igrica. Meta Quest 3 ima poboljšani dizajn, koristeći optiku “palačinke” za smanjenje optičkog profila uređaja za čak 40% kao što

je prikazano na Slici 19., koji doprinosi ukupnoj kompaktnosti i udobnosti uređaja. Iako je dizajn stanjen, s težinom od 515 grama Quest 3 je teži od svog prethodnika koji teži 503 grama. Bez obzira na to, ove naočale su dizajnirane s naglaskom na ergonomiju i nosivost, što korisnicima omogućava da se slobodno kreću bez osjećaja nelagode ili težine. Na prednjoj strani uređaja nalaze se tri "pilule" koje sadrže senzore i kamere. Lijeva i desna "pilula" sadrže crno-bijele infracrvene kamere koje se koriste za 6 DoF (šest stupnjeva slobode) "inside-out" praćenje, koje zajedno s još dvije kamere smještene na dnu uređaja omogućavaju praćenje kretanja i kontrolera. Uz to, imaju i kamere za stereoskopski 3D passthrough mješovite stvarnosti. Srednja "pilula" sadrži novi senzor dubine za Quest, a ove kamere i senzor omogućuju znatno poboljšani sustav mješovite stvarnosti nazvan "meta stvarnost". Takve kamere omogućuju da vidite stvarni svijet u punoj boji i drastično većoj rezoluciji za razliku od njenog prethodnika. Osim toga, integrirani audio sustav pruža 3D prostorni zvuk, dodatno uranjajući korisnika u virtualni svijet. Naočale imaju vidno polje od 110° vodoravno i 96° okomito, što proširuje naš periferni vid kako bi mogli vidjeti više virtualnih svjetova odjednom. Sudeći po postojećim recenzijama za uređaj, miješana stvarnost na uređaju je u redu sve dok se korisnik nalazi u dobro osvijetljenom prostoru, dok se pri slabom osvjetljenju pojavljuje zrnatost i niska rezolucija [19]. Na tržištu su se pojavile 10. listopada ove godine s cijenom od 499\$ za model sa 128 GB pohrane, dok je model s pohranom od 512 GB dostupan po cijeni od 649,99\$. Meta Quest 3 dolaze s podesivim unaprijed instaliranim standardnim sučeljem u paketu s dva "Touch Plus" kontrolera s narukvicom i 2AA baterijama te kabelom za punjenje i strujnim adapterom. Kao samostalni uređaj, snažan hardver i softverske mogućnosti čine ga atraktivnom opcijom za igrače, edukatore i profesionalce koji žele iskoristiti potencijal proširene stvarnosti.



Slika 19. Usporedba Meta Quest 2 i Meta Quest 3 uređaja [20]

3.2.5. Magic Leap 2

Magic Leap 2, lansiran u rujnu 2022., moćni je nasljednik Magic Leap 1 uređaja za proširenu stvarnost iz 2018. Za razliku od svog prethodnika, ove naočale imaju znatno poboljšane mogućnosti prostornog mapiranja koje omogućuje korisniku interakciju s virtualnim objektima i hologramima kao da su zaista u fizičkom prostoru koji ga okružuje. Magic Leap 2 ima senzore koji skeniraju i obrađuju okolinu što omogućuje projiciranje 3D objekata i informacija te interakciju kao da su dio okoline. S LCOS (*engl. Liquid Crystal Silicon*) zaslonima rezolucije 1440x1760 megapiksela uz brzinu osvježavanja od 120 Hz, naočale pružaju bogat vizualni dojam uz prostorni zvuk zahvaljujući dva ugrađena stereo zvučnika i četiri mikrofona. Opremljene su s 16 GB RAM-a i quad core AMD (*engl. Advanced Micro Devices*) procesorom, što znači da uređaj može pokretati iznimno zahtjevne aplikacije. Ima vidno polje od 70° po dijagonali što je gotovo dvostruko više od Magic Leap 1 uređaja te pruža veću točnost praćenja kretanja uz 6DoF optičko praćenje. Veće vidno polje omogućuje realističnije interakcije i vizualizacije između digitalnog i fizičkog svijeta. To je zato što sa širim vidnim poljem veći digitalni objekti mogu ostati unutar vidnog polja ili ne biti napola odsječeni kada okrenete glavu, što daje bolje i prirodnije iskustvo. Slušalicama se može upravljati pomoću kontrolera, praćenjem ruku ili očiju, glasovnim naredbama ili nekim drugim bluetooth uređajem po izboru. Ne samo da se mogu koristiti sve ove metode, već se mogu koristiti i istovremeno. Nadalje, standardni kontroler znatno je poboljšán u odnosu na prethodni Magic Leap 1, korištenjem optičkog praćenja i infracrvenih senzora za poboljšanje preciznosti. Lakoća uređaja, sa samo 260 grama, postiže se korištenjem vanjske procesorske jedinice koja je kabelom povezana s naočalama te se može staviti u torbu ili spojiti na pojas putem sustava kopči. Korištenje vanjske procesorske jedinice i baterije ono je što omogućuje Magic Leap-u da bude lakši, ali i snažniji od svojih konkurenata. Značajka dinamičkog globalnog i segmentnog zatamnivanja omogućuje prilagođavanje osvjetljenja za stvaranje fokusiranog imerzivnog prostora, uz automatsko prilagođavanje svjetlosti kako bi se digitalni objekti održali vidljivim u različitim uvjetima osvjetljenja. Magic Leap 2 primjenjiv je u raznim scenarijima, uključujući specijalizirane obuke kao što su vatrogasne simulacije. Ono što je zanimljivo kod ovih naočala je to da nude mogućnost ubacivanja leća ukoliko korisnik ima dioptriju, a raspon uložaka na recept je od -10 do +5. Ove binokularne naočale, prikazane na Slici 20., namijenjene su ne samo programerima nego i zdravstvu, proizvodnji, maloprodaji i drugim sektorima koji izvode razne simulacije treninga i slično. Proizvođači ih koriste kako bi ubrzali obuku tehničara u tvornicama, trgovački lanci kako bi njihovi radnici mogli vidjeti kako bi police u trgovini

trebale izgledati, a liječnici ih koriste u operacijskim salama, ali i u drugim kliničkim okruženjima. Uz Magic Leap 2, kritični podaci i 3D vizualizacija digitalno su integrirani u operacijski paket, tako da fokus kirurga može ostati na pacijentu. Magic Leap 2 dostupan je u tri varijante, prilagođene različitim potrebama korisnika. Prvi, "Base" paket, po cijeni od 3.299\$, uključuje osnovne slušalice i ograničenu garanciju. Srednja opcija, "Developer Pro" paket za 4.099\$, obogaćena je razvojnim alatima i pristupom ranoj verziji softvera, no namijenjena je isključivo za internu, a ne za širu komercijalnu upotrebu. Za poduzeća, "Enterprise" paket po cijeni od 4.999\$ nudi tromjesečna ažuriranja softvera i alate za upravljanje slušalicama na razini cijele organizacije, potičući integraciju i šire poslovne primjene [21].



Slika 20. Magic Leap 2 [21]

3.2.6. Xreal Air 2

XReal Air 2 naočale za proširenu stvarnost najavljene su u rujnu 2023. i nude brojna poboljšanja u odnosu na svog prethodnika XReal Air iz 2022. Savršene su za uživanje u aplikacijama, igrama i svim vrstama medijskog sadržaja, a pritom omogućuju korisnicima obavljanje svakodnevnih zadataka bez ometanja. Osim što izgledaju kao prave sunčane naočale kako prikazuje Slika 21., opremljene su Micro-OLED zaslonima s 1920x1080 rezolucijom po oku, a ističu se i dvostrukom brzinom osvježavanja i do 120 Hz za impresivan vizualni doživljaj. Okvir je lakši i tanji, s fleksibilnim krakovima za bolju udobnost tijekom nošenja. Dizajnirane su da budu lagane, tanke i diskretne ove naočale su najlakše naočale proširene stvarnosti na svijetu s težinom od 72 grama te su dostupne u crvenoj i crnoj boji. Kompatibilne su sa širokim spektrom

uređaja, uključujući osobna računala, tablete, mobilne uređaje, igraće konzole odnosno sve uređaje s USB-C i HDMI izlazom te podržavaju operativne sustave Android i iOS. Tvrtka XReal najavila je osim ovog modela također najavila i XReal Air 2 Pro koji će biti dostupni korisnicima po cijeni od 399\$ odnosno 449\$. Model Air Pro uvodi značajku zatamnjena s elektrokomatskim staklom, omogućujući korisnicima da prilagode količinu svjetlosti koja prolazi kroz leće. Naočale pružaju vidno polje od 46° te uz dva mikrofona i novu audio tehnologiju smanjuju disperziju zvuka nudeći veću privatnost prilikom nošenja te minimalno ometanje drugih ljudi u okolini [22].



Slika 21. XReal Air 2 [22]

3.2.7. Apple Vision Pro

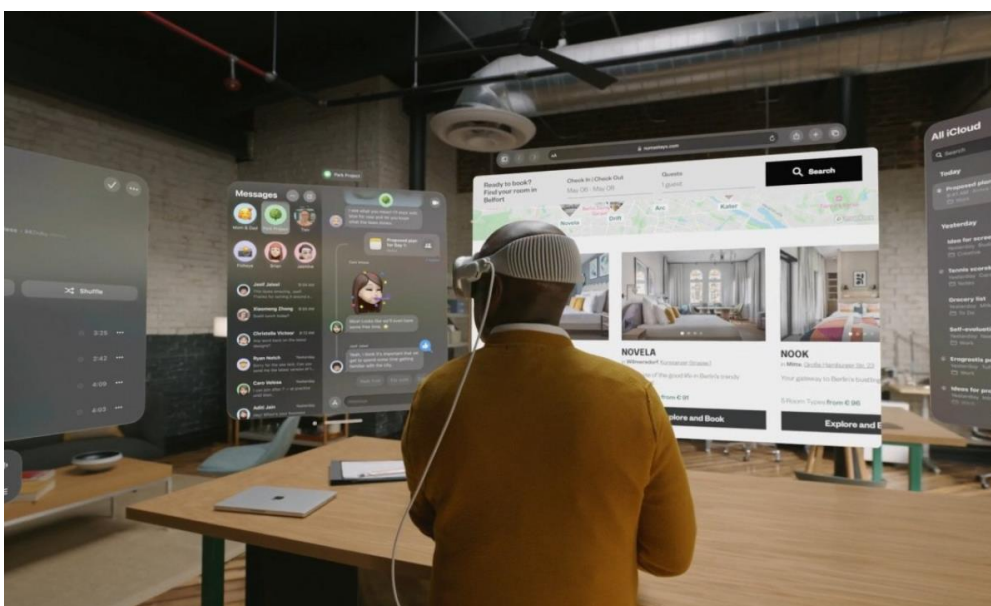
Apple Vision Pro predstavlja revoluciju u proširenoj stvarnosti i početak nove ere u industriji virtualne stvarnosti. Tvrtka Apple ove je naočale za proširenu stvarnost predstavila i najavila u lipnju ove godine. Besprijeckorno stapaju digitalni sadržaj sa stvarnim svijetom i godinama su ispred svega što trenutno postoji na tržištu. Vision Pro stvara beskonačno platno za aplikacije koje nadilazi granice tradicionalnog zaslona i uvodi potpuno trodimenzionalno korisničko sučelje kontrolirano najprirodnijim i najintuitivnijim mogućim unosima - očima, rukama i glasom korisnika. Korisnici mogu pregledavati aplikacije tako da ih jednostavno gledaju, dodiruju prstima za odabir, trzaju zapešćem za pomicanje ili koriste glas za diktiranje. Njegov operativni sustav, visionOS, prvi prostorni operativni sustav na svijetu izgrađen na temeljima macOS-a, iOS-a i iPadOS-a, omogućuje korisnicima interakciju s digitalnim sadržajem na način koji se čini kao da je fizički prisutan u njihovom prostoru. Apple Vision Pro dizajniran je da izdrži radna opterećenja visokih performansi i može raditi dva sata s jednim

punjenjem. Ima sustav zaslona ultra visoke razlučivosti koji sadrži 23 milijuna piksela na dva zaslona (više od 4K TV-a za svako oko) i potpuno novi R1 čip za prikaz u stvarnom vremenu gotovo bez kašnjenja svijet. Uređaj ima 12 kamera, LIDAR senzor, TrueDepth kameru te IR iluminatore kako bi kamere mogle vidjeti korisnikove ruke i u tamnim okruženjima, Dizajnom podsjećaju na ronilačke naočale s jedinstvenim komadom trodimenzionalno oblikovanog laminiranog stakla koje djeluje kao optička površina za kamere i senzore snimaju i promatraju stvarni svijet. Staklo se neprimjetno ulijeva u prilagođeni okvir od aluminijske legure koji se nježno savija kako bi obavio korisnikovo lice dok služi kao točka pričvršćivanja za Light Seal. Light Seal se prilagođava korisnikovom licu i blokira zalutalo svjetlo. Apple Vision Pro nude izvanredna nova iskustva koje nijedne naočale za proširenu stvarnost nisu uspjele [23]:

- Beskrajno platno - VisionOS unosi novitet u interakciju s aplikacijama putem svog trodimenzionalnog korisničkog sučelja koje dopušta aplikacijama da se prikažu bilo gdje u prostor, oslobađajući ih ograničenja klasičnog zaslona. Ovo omogućuje korisnicima ne samo povećanu produktivnost zahvaljujući neograničenom virtualnom radnom prostoru već i inovativne metode multitaskinga, kako je prikazano na Slici 22. Podrška za Magic Keyboard i Magic Trackpad omogućava korisnicima da kreiraju optimalan radni prostor, ili da prošire mogućnosti svog Mac-a na Vision Pro, transformirajući ga u ogroman, osobni i prijenosni 4K zaslon s izuzetno oštrim prikazom teksta.
- Zanimljivo zabavno iskustvo osobnog kina i igara – naočale su opremljene s dva zaslona visoke rezolucije koji transformiraju svaki prostor u privatno kino s virtualnim ekranom ogromnih dimenzija i naprednim Spatial Audio sustavom. Prostorno računalstvo omogućuje nove vrste igara koje igrače vode u skroz nove svjetove.
- Imerzivna okruženja – naočale pružaju korisnicima proširenu stvarnost koja premašuje fizičke granice prostora, nudeći dinamične pejzaže koji pomažu u fokusiranju ili smanjenju vizualnog nereda. Digitalna kruna na uređaju omogućava korisnicima da kontroliraju razinu svoje uronjenosti u digitalno stvorene okoline.
- Oživljavanje uspomena – Apple donosi revoluciju s 3D kamerom koja omogućuje korisnicima da zabilježe ili ponovno dožive trenutke uz prostorni zvuk. Pregledavanje foto i video zapisa u stvarnoj veličini i živopisnim bojama moguće je zahvaljujući pristupu iCloud foto biblioteci.

- FaceTime pozivi u prostoru - FaceTime pozivi na Apple Vision Pro postaju prostorni, sa sudionicima koji se prikazuju u životnoj veličini oko korisnika, uz prostorni zvuk koji stvara dojam prisutnosti. Korisnici se tijekom poziva prikazuju kao digitalni avatar (ili Persona, kako navodi sam Apple) koji u stvarnom vremenu odražava njihove geste lica i ruku, omogućujući zajedničke aktivnosti poput gledanja filmova ili suradnje na projektima.
- Nova trgovina aplikacija - Apple Vision Pro predstavlja inovaciju u interakciji s aplikacijama putem nove verzije App Storea. Korisnici mogu istraživati aplikacije i sadržaj stvoren od strane programera, uz pristup velikom broju već poznatih iPhone i iPad aplikacija optimiziranih za Vision Pro.

Revolucionarni dizajn Vision Pro naočala ima sustav zaslona ultra visoke rezolucije koji sadrži 23 milijuna piksela na dva zaslona i prilagođeni Appleov silikon u jedinstvenom dizajnu s dva čipa kako bi se osiguralo da svako iskustvo izgleda kao da se odvija pred očima korisnika. u stvarnom vremenu. Apple Vision Pro također ima EyeSight, inovativnu tehnologiju koja omogućava korisnicima da zadrže kontakt sa svojom okolinom. Kad se netko približi korisniku koji nosi Vision Pro, uređaj postaje proziran, omogućujući vidljivost korisnikovih očiju. EyeSight također pruža vizualne signale drugima, informirajući ih o tome čemu korisnik posvećuje pažnju dok je angažiran u digitalnom okruženju ili koristi aplikaciju. Apple Vision Pro moći će se nabaviti po cijeni od 3499\$ početkom sljedeće godine na službenoj stranici i u Apple trgovinama u SAD-u, a u drugim zemljama tek krajem sljedeće godine [23].



Slika 22. Apple Vision Pro [23]

4. RAZVOJ APLIKACIJE

Cilj ovog rada je prikazati interakciju korisnika u stvarnom svijetu s digitalnim objektima u virtualnom svijetu korištenjem Unreal Enginea kako bi se stvorio 3D svijet s kojim će korisnik moći komunicirati koristeći HoloLens 2 naočale za proširenu stvarnost. Aplikacija je zamišljena kao igra šaha u kojoj je napravljeno interakcijsko sučelje u obliku gumbova za upravljanje performansama 3D objekata i njome su prikazane glavne i najvažnije značajke Mixed Reality Toolkita za HoloLens 2. Budući da naočale osiguravaju da je korisnik potpuno svjestan svoje okoline, korisnik će primjerice moći igrati virtualni šah u pauzi od svog svakodnevnog posla ili čak dok obavlja neku radnju.

4.1. Korišteni alati

U ovom poglavlju opisat će se alati koji su korišteni kod izrade eksperimentalne aplikacije za proširenu, odnosno mješovitu stvarnost, te specifični alati koji se koriste za izradu aplikacija za HoloLens 2 uređaj. Kako gotovo svi spomenuti alati zahtijevaju velike sistemske resurse, izrada aplikacije sa istima odrađena je na prikladnom stolnom računalu.

4.1.1. Unreal Engine

Unreal Engine (skraćeno UE) najnapredniji je alat za stvaranje i pokretanje interaktivnog sadržaja kao što su video igre, animacije, simulacije i vizualizacije. Prozvan je najpopularnijim programom za razvoj video igrica do sada, zbog čega je ušao u Guinnessovu knjigu rekorda. Razvila ga je tvrtka Epic Games 1998. godine, a od tada se ova platforma kontinuirano razvija i izdaje u novim verzijama sa značajnim unaprijeđenjima u performansama i mogućnostima. Namijenjen je razvojnim programerima igara, profesionalcima u filmskoj i televizijskoj industriji, arhitektima i inženjerima, obrazovnim institucijama za stvaranje simulacija i edukativnog sadržaja te kreatorima VR/AR iskustava. Unreal Engine napisan je u C++ programskom jeziku i podržava veliki broj platformi, od stolnih računala, mobilnih uređaja, konzola te sustava za virtualnu stvarnost. UnrealScript, koji je nekada bio srž programiranja u Unreal Engineu, omogućavao je razvoj igara i svijetova sve do pojave Unreal Engine 4 verzije. Umjesto njega, od 2012. godine, za još snažnije i bolje programiranje igara, koristi se C++. Za vizualno skriptiranje unutar platforme koristi se Blueprint Visual Scripting, nasljednik starijeg Kismet Visual Scripting Sistema. Blueprint funkcionira na principu vizualnog programiranja i omogućuje korisnicima da kreiraju i stvaraju kompleksne funkcije i interakcije bez poznavanja programskih jezika i pisanja koda. Od ožujka 2015. godine, Unreal

Engine je postao besplatan za sve korisnike. U ožujku 2023. godine Unreal Engine je lansirao novi skriptni jezik Verse koji je prvi put korišten u igrici Fortnite. Očekuje se da će do 2025. Verse biti dostupan svim korisnicima čime se otvaraju nove mogućnosti za razvoj igara i interaktivnih iskustava [24]. Iako Unreal Engine sam po sebi nije otvorenog koda, postoji mnogo dodataka i alata otvorenog koda koji se mogu koristiti za razvoj iskustava miješane stvarnosti kao što su GitHub i Unreal Marketplace.

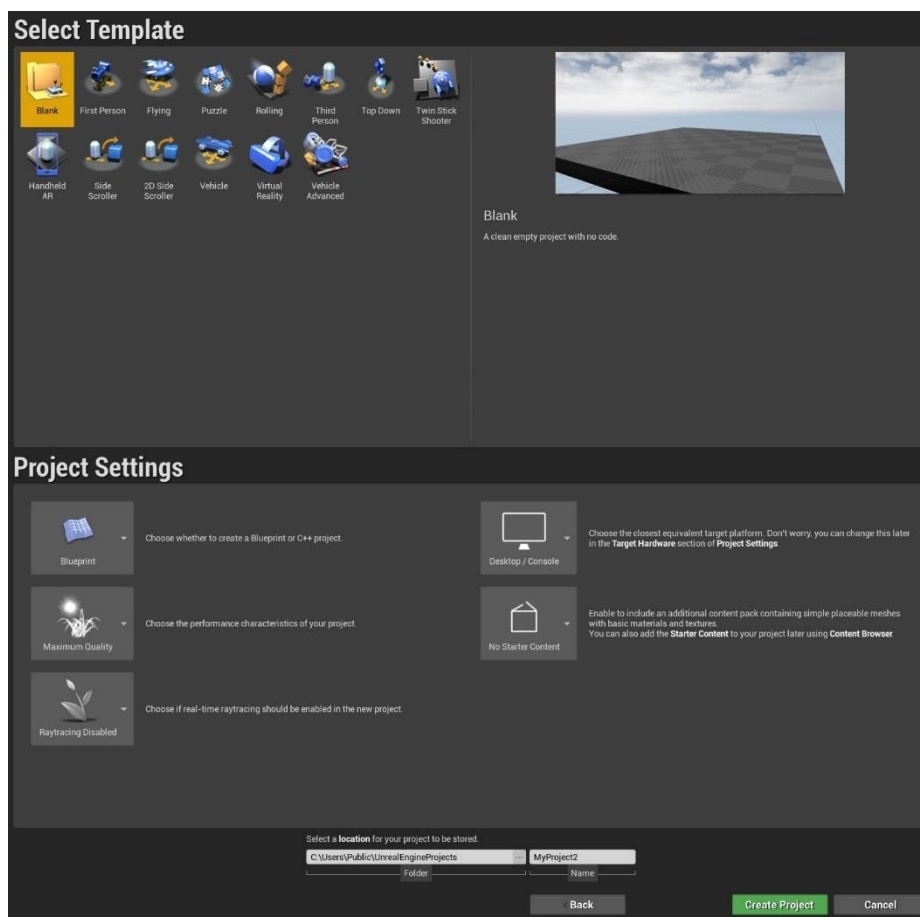
4.1.1.1. Najznačajnije karakteristike Unreal Enginea

Prije početka rada i kreiranja projekta unutar Unreal Enginea, korisnici moraju odabrati metodu rada između dvije postojeće [25]:

1. Blueprint - sustav vizualnog programiranja koji omogućava programerima da konstruiraju logiku igre i interakcije kroz vizualno povezivanje komponenta unutar projekta. Korištenjem blueprintova, odnosno nacрта, korisnik na brži način i bez potrebe za pisanjem tradicionalnog koda može kreirati kompleksne interakcije.
2. C++ - iako je korisničko sučelje slično kao i kod Blueprint opcije, C++ pristup omogućuje dodatnu kontrolu i fleksibilnost. Programeri mogu izmijeniti i proširiti funkcionalnosti Blueprinta kroz C++ kod, omogućavajući tako napredniju interaktivnost i performanse objekata. Za rad s C++ kodom unutar Unreal Enginea, neophodno je imati instaliran Visual Studio na svom računalu.

Bitno je napomenuti da bez obzira izabere li se Blueprint ili C++, u kasnijem razvoju projekta korisnik uvijek može prebaciti postavke na drugi način rada, odnosno integrirati oba načina.

Kao što je vidljivo na Slici 23., prilikom pokretanja projekta u Unreal Engineu moguće je izabrati predložak u kojem će se razvijati aplikacija ovisno u kojem smjeru se želi graditi projekt virtualne stvarnosti. Također, prije pokretanja projekta potrebno je podesiti postavke projekta i odabrati njegovo ime i tek tada je moguće krenuti s radom.



Slika 23. Postavljanje projekta u Unreal Engineu

Kada se projekt otvori, glavni prozor je podijeljen na mnoštvo malih prozora od kojih svaki ima svoju funkciju. Osnovni prozori u Unreal Engineu su [25]:

- *Level Editor* - središnji prozor u kojem se razvija cijeli projekt. U njemu se stvaraju objekti, odnosno *Actori* koje je moguće premiještati, povećavati, smanjivati i rotirati te također stvarati nove levele i testirati ih.
- *Worlds Outliner* - daje tekstualni pregled svih objekata, njihovo ime i vrstu čime se olakšava organizacija i odabir neke od komponenata unutar projekta.
- *Modes* – prozor koji sadrži razne alate za *Level Editor* kao što su: *Place* za dodavanje objekata u level, *Landscape* za modificiranje krajolika, tj. dodavanje brda, planina i dolina, *Foliage* kojim se dodaju *Static Meshes* odnosno tlo, *Mesh Paint* te *Brush Editing*.
- *Content Browser* – prozor u kojem se nalaze sve mape i sadržaj potreban za razvoj igre, uključujući teksture, blueprinte, slike, materijale, zvučne datoteke, animacije, C++ datoteke i sl.

- *Details* – jedan od ključnih elemenata korisničkog sučelja u kojem se nalaze sve postavke nekog objekta koje se mogu mijenjati i podešavati. Kada je objekt selektiran unutar Level Editora ili bilo kojeg drugog relevantnog prozora, Details prozor prikazuje sve parametre i varijable koje se mogu konfigurirati za taj objekt. Neke varijable i parametri unutar Details prozora su: svojstva objekta (transformacija pozicije, skaliranje, materijali, kolizija i fizika objekta), komponente, interakcija s Blueprintima (kada radite s Blueprintima, Details prozor omogućuje da mijenjate vrijednosti koje su prikazane za uređivanje unutar samog Blueprinta, a to uključuje varijable poput parametara animacije te varijable za kontrolu logike igre), prikaz samo određenih kategorija svojstava ili filtriranje po ključnim riječima.

Svaki projekt u Unreal Engineu ima sljedeću hijerarhijsku strukturu [25]:

- *Project* – temeljna jedinica na kojoj se gradi cijela igra ili aplikacija unutar Unreal Enginea. Sadrži sve datoteke, resurse, skrite, module i postavke koji su potrebni za pokretanje aplikacije.
- *Levels* – Razine su konceptualno podijeljene segmente igre ili aplikacije. Svaka razina može predstavljati različite scene, okruženja ili svjetove unutar projekta. Na primjer, u video igri, svaka razina može predstavljati jedinstvenu mapu ili misiju.
- *Sub-levels* – Ove su strukture dijelovi glavnih razina i omogućuju modularni pristup dizajniranju i uređivanju okruženja. Pod-razine se mogu koristiti za organizaciju sadržaja po funkciji ili po sceni, poput odvojenih pod-razina za teren, osvjetljenje ili dinamičke događaje koji se odvijaju unutar razine.
- *Actors* – bilo koji objekt koji se može smjestiti unutar određene razine, primjerice *Sound, Static Mesh, Blueprints, Cameras, Lights, Volumes, Skeletal Meshes*
- *Components* – modularni dijelovi koji se mogu dodijeliti glumcima da bi dodali funkcionalnost ili ponašanje, primjerice *Actor* u nekoj igri može imati komponente za kontrolu fizike, zvuka, animacija i slično.

U ovom radu koristi se Blueprint sustav vizualnog programiranja koji omogućuje korisnicima cijeli spektar alata koji je inače dostupan samo programerima. Tri su vrste blueprinta [23]:

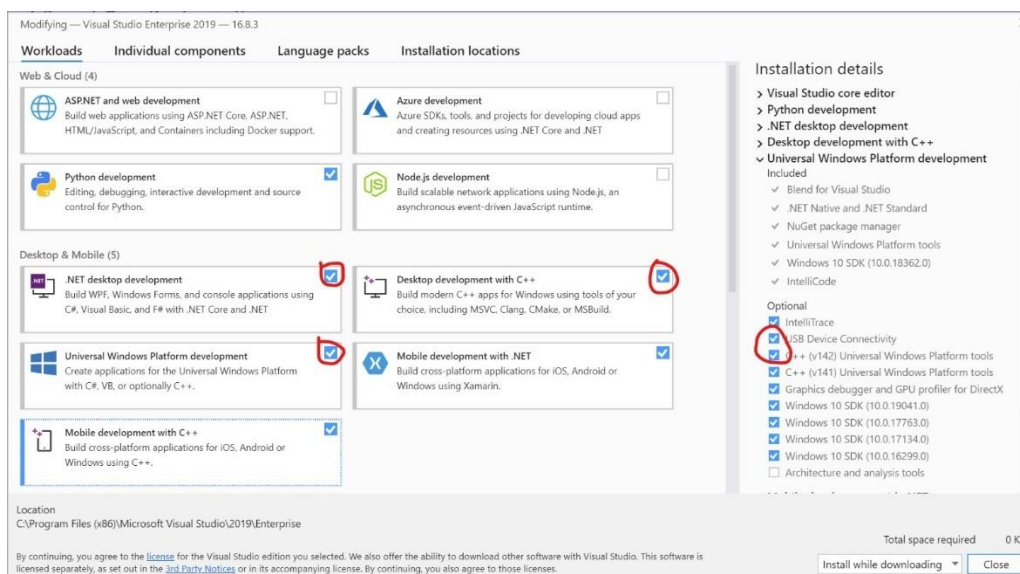
- *Blueprint Class* – resursi koji se dodaju objektima zbog dodavanja funkcionalnosti, kreiraju se izravno unutar samog programa
- *Data-only Blueprint* – shematska klasa koja sadrži samo podatke, varijable i komponente neslijeđene od izvornog objekta

- *Level Blueprint* – shematski prikaz koji upravlja logikom na razini cijelog levela. Može se izmijenjivati, no stvaranje novih blueprinta nije moguće

U Blueprint Editoru, kao i u Unreal Editoru, postoji više prozora koji korisniku pomažu u snalaženju unutar projekta. U *Component* prozoru u Blueprint Editoru moguće je dodavati komponente, *My Blueprint* prozor prikazuje osnovne komponente od kojih se taj Blueprint sastoji: varijable, funkcije, sučelja i sl., *Details* prozor prikazuje detalje komponente kao što su osvjetljenje, kolizija, brzina prikazivanja i druge. Glavni prozori unutar Blueprint Editora su *Construction Script* i *Event Graph*. *Construction Script* sadrži dijagram čija izvršenja omogućavaju provođenje osnovnih procesa unutar blueprint klase. *Event Graph* koristi dijagram baziran na događajima i funkcijama za reagiranje na interakcije unutar igre, omogućavajući blueprintima da odražavaju funkcionalnost kroz sve njihove instance.

4.1.2. Microsoft Visual Studio

Microsoft Visual Studio je integrirano razvojno okruženje (*engl. integrated development environment*, skraćeno IDE) namijenjeno za razvoj računalnih programa. To je podloga za pokretanje koja se koristi za uređivanje, uklanjanje grešaka i izradu koda koja podržava više programskih jezika kao što su C++, C#, Python, Java, JavaScript, Node.js i druge. Dostupan je na operacijskim sustavima Windows, Linux i MacOS [24]. Prilikom instalacije Visual Studio 2019 aplikacije potrebno je instalirati sva potrebna radna opterećenja i komponente prikazane na Slici 24.



Slika 24. Instalacija Microsoft Visual Studio aplikacije [24]

4.1.3. Mixed Reality Toolkit (MRTK)

Mixed Reality Toolkit za Unreal je skup alata i biblioteka namijenjen za razvoj aplikacija za proširenu i mješovitu stvarnost unutar Unreal Enginea. Ovaj toolkit omogućava integraciju Windows Mixed Reality (WMR) tehnologije s Unreal Engineom, što programerima i dizajnerima pruža alate potrebne za stvaranje imerzivnih iskustava u mješovitoj stvarnosti. Unutar Mixed Reality Toolkita nalaze se dva dodatka za miješanu stvarnost: UX Tools for Unreal i Graphic Tools. UX Tools je dodatak za UE igru s kodom, nacrtima i primjerima koji pomažu dodati određene značajke u aplikacije miješane stvarnosti. To uključuje gumbе, panele, tekstualna polja, klizače, izbornike, ručnu interakciju, simulaciju unosa, manipulaciju i još mnoge druge, a nekoliko njih korišteno je u sklopu ove aplikacije. Gumbi i klizači su dizajnirani tako da omogućuju interakciju rukama, simulacija unosa nudi simulaciju ruku unutar aplikacije, manipulacija omogućuje da korisnik uzme komponentu i da je miče, skalira ili rotira [25].

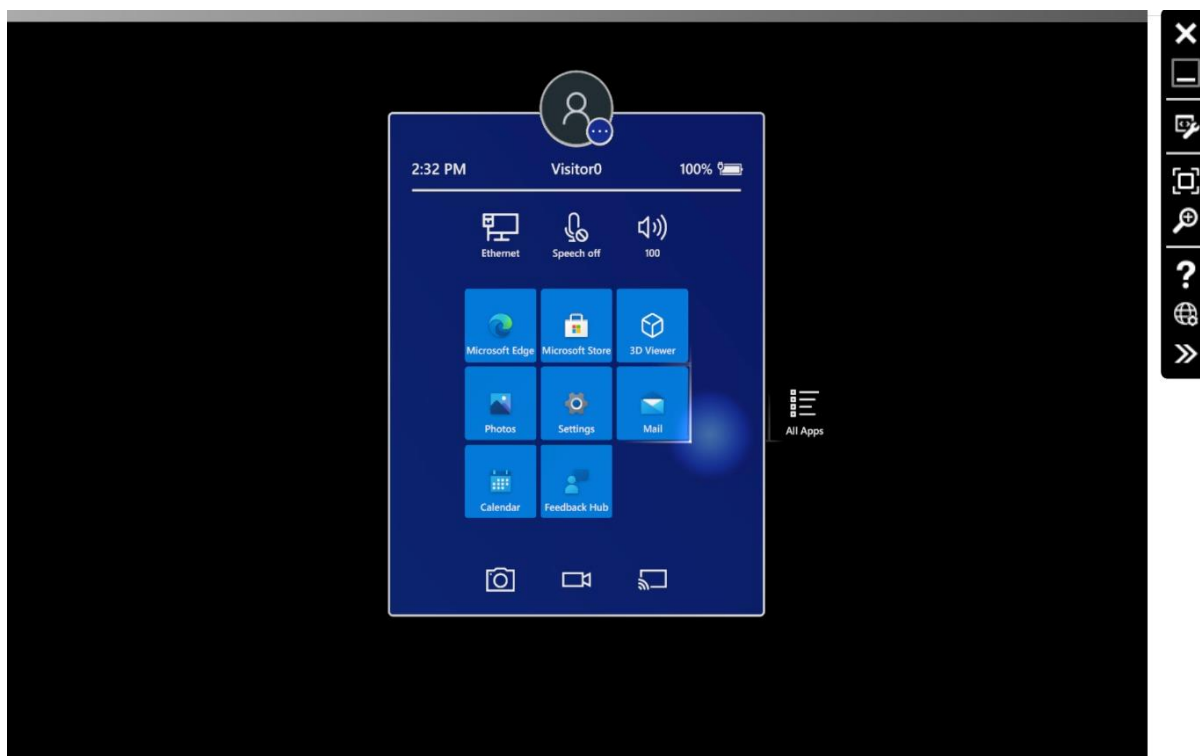
4.1.4. HoloLens Emulator

HoloLens Emulator je aplikacija koja omogućuje testiranje holografskih aplikacija na računala čak i ako nemaju fizički HoloLens uređaj. Emulator koristi Hyper-V virtualni stroj, što znači da se ljudski i okolišni unosi koje čitaju HoloLens senzori simuliraju s korisnikove tipkovnice, miša ili Xbox kontrolera. Projekti se ne moraju dodatno modificirati kako bi se testirali na emulatoru budući da aplikacija ne zna da se ne izvodi na pravom HoloLensu. HoloLens emulator moguće je preuzeti s Microsoftove stranice, ali je pri tome bitno provjeriti zadovoljava li korisnikovo računalo određene hardverske i softverske zahtjeve. Koristi se u kombinaciji s razvojnim alatima poput Visual Studia za kreiranje i testiranje HoloLens aplikacija. Emulatorom se upravlja usmjeravanjem radnji simuliranog korisnika koji nosi HoloLens, odnosno korisnikove radnje po tipkovnici mišu ili kontroleru pomiču simuliranog korisnika u okolini. Aplikacije koje se izvode na emulatoru reagiraju i prikazane su kao i na pravom uređaju. Dok kursor na HoloLens naočalama prati pokrete i rotacije glave, u emulatoru kursor prati pokret i orijentaciju ruke. Neke od najbitnijih značajki koje je potrebno znati za snalaženje u emulatoru su [26]:

- Hodanje naprijed, natrag, lijevo i desno – korištenjem tipki W, S, A i D na tipkovnici ili lijeva palica na Xbox kontroleru
- Pogled gore, dolje, lijevo i desno – pritiskom na tipku miša i njegovim micanjem, koristeći tipke sa strelicama na tipkovnici ili desnom palicom na Xbox kontroleru
- Zračni dodir ili „Air tap“ – klikom na desnu tipku miša, pritiskom na tipku Enter na tipkovnici ili gumba A na Xbox kontroleru

- Bloom/Sistem gesta – pritiskom tipke Windows ili tipke F2 na tipkovnici ili tipke B na Xbox kontroleru
- Pokret ruku za pomicanje odnosno „scrolling“ – istovremenim držanjem tipke Alt i desne tipke miša te pomicanjem miša gore ili dolje. U slučaju Xbox kontrolera, drži se desni okidač i gumb A i desna palica se pomiče gore-dolje
- Micanje i rotacija ruku – pritiskom na tipku Alt i povlačenjem miša gore ili dolje, lijevo ili desno. Pritiskom na tipke Q ili E korisnik može rotirati ili nagnjati ruke. Kod Xbox kontrolera, pritiskom na gumb branika i korištenjem lijeve palice za lijevo, desno, naprijed i natrag, a desne palice za rotiranje.

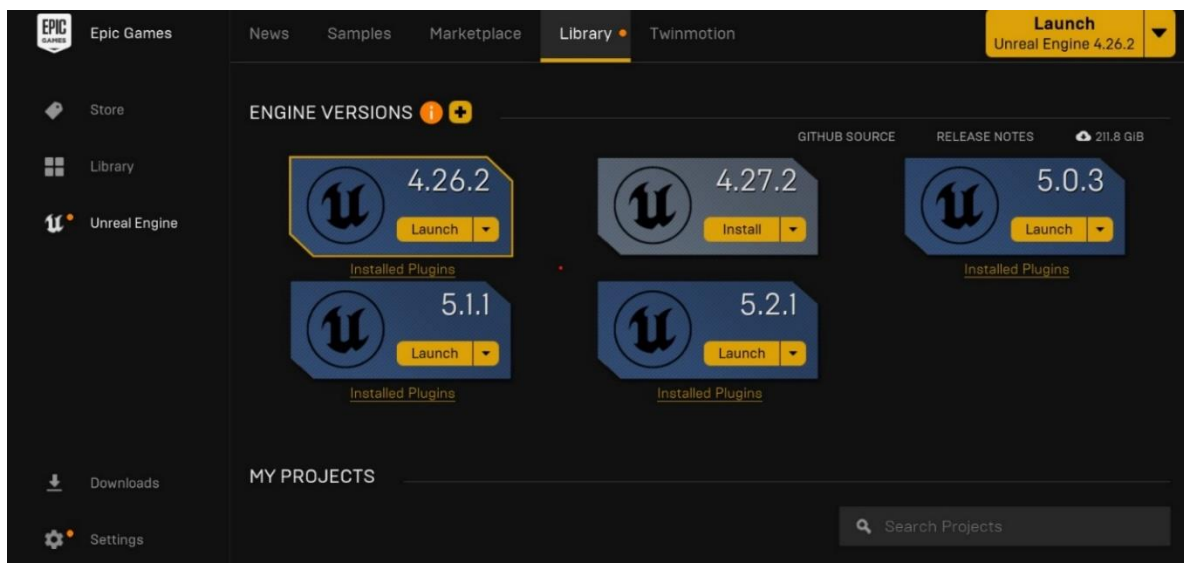
Na Slici 25. je prikazan glavni prozor HoloLens emulatora, na kojem je desno od glavnog prozora prikazana alatna traka emulatora koja sadrži gume za zatvaranje i minimiziranje programa, upravljačku ploču simulacije, gumb za zumiranje, gumb za otvaranje portala o samom uređaju i pomoć te gumb za dodatne alate. Unutar same aplikacije moguće je konfiguriranje simuliranog unosa, poput prikazivanja ili skrivanja jedne ili obje ruke, i uređaja koji se koriste za kontrolu simuliranog unosa, poput tipkovnice, miša ili kontrolera.



Slika 25. Početni zaslon emulatora

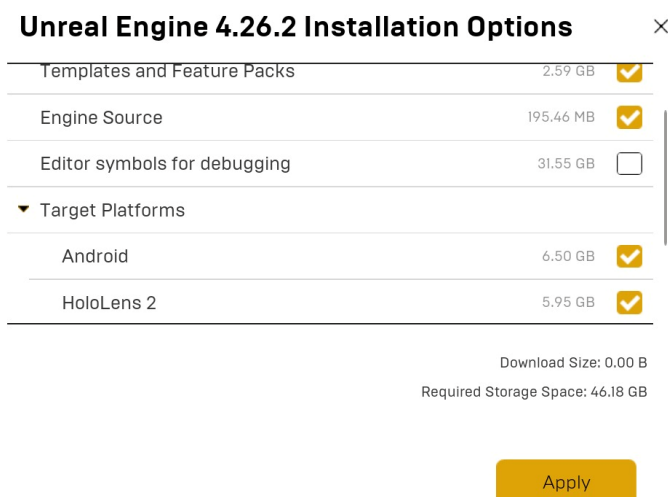
4.2. Instalacija alata i postavljanje razvojne okoline

Prije početka razvoja same aplikacije, potrebno je instalirati i dobro postaviti sve gore navedene alate i HoloLens 2 uređaj. Prvi korak je instalacija Unreal Engine programa za kreiranje animacija i video igara, a preduvjet za to je da korisnik na svom uređaju ima Windows 10 ili 11 operacijski sustav i Visual Studio aplikaciju, verziju 2019 ili noviju. U ovom slučaju, koristit će se Windows 10 operacijski sustav te Visual Studio 2019. Unreal Engine je preuzet sa službene stranice Epic Gamesa te dolazi u 5 dostupnih verzija prema Slici 26.



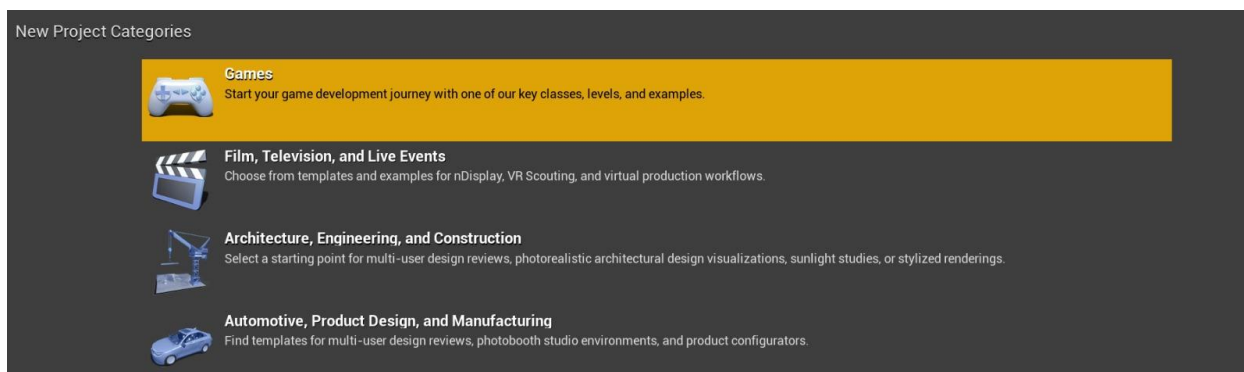
Slika 26. Početni zaslon Unreal Enginea i dostupne verzije

U ovom radu instalirana je i korištena verzija 4.26.2. zbog dostupne dokumentacije za ovu verziju i podudaranjem s HoloLens naočalama. Unreal Engine nudi punu podršku za Windows Mixed Reality i HoloLens 2 naočale. Prilikom instalacije potrebno je podesiti *Opcije* kao što su podrška za platforme, početni sadržaj, paketi predložaka i značajki, izvorni kod te simboli za otklanjanje pogrešaka. Bitno je da se prilikom instalacije klikom na *Opcije* omogući podrška za HoloLens 2 kao što je prikazano na Slici 27. U bilo kojem trenutku rada u Unreal Engine-u moguće je klikom na padajuću strelicu pored gumba *Pokreni* i odabirom gumba *Opcije* dodati ili ukloniti neke komponente iz instalirane verzije.



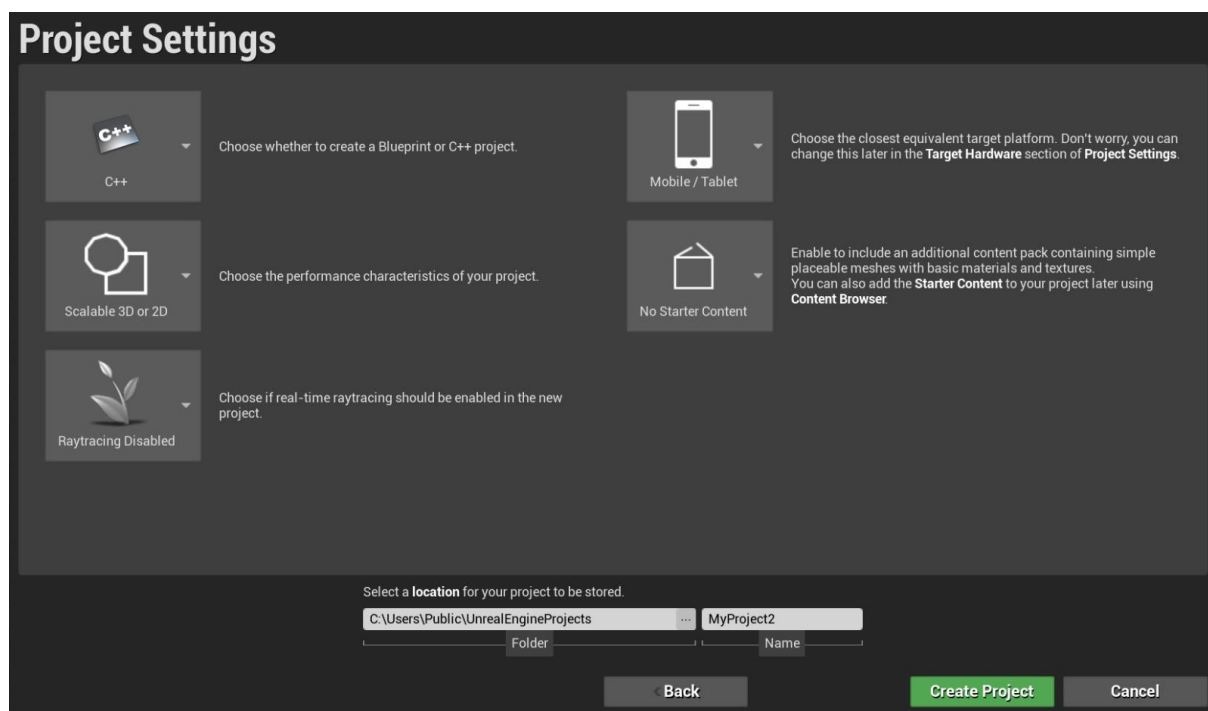
Slika 27. Omogućavanje podrške za HoloLens uređaj

Kada se instalira i pokrene aplikacija potrebno je odabrati projekt u kojem će se kreirati 3D svijet. Unutar aplikacije nude se četiri kategorije prema Slici 28., a bira se kategorija *Games*.



Slika 28. Odabir projekta

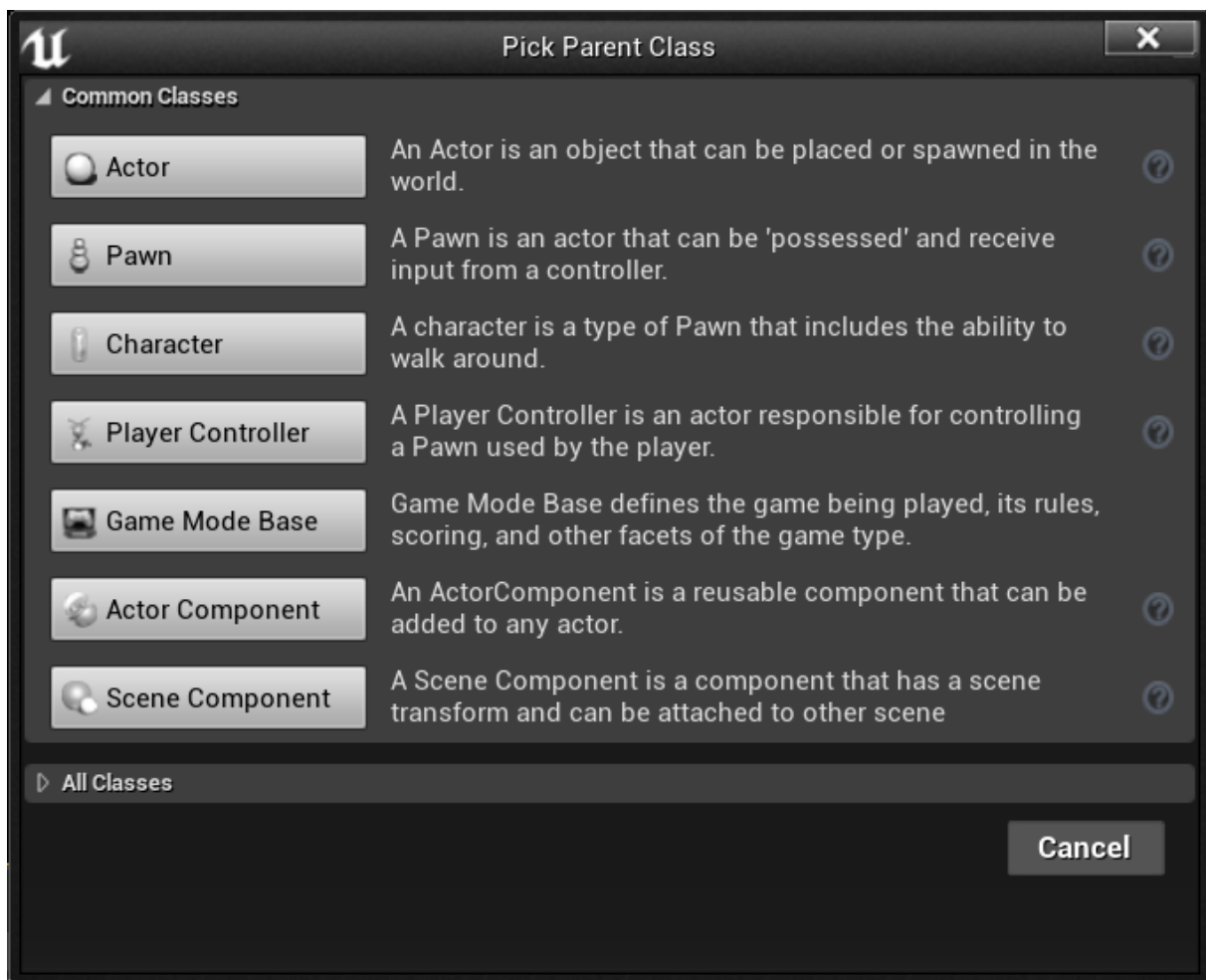
Nakon što se odabere kategorija unutar *New Project Categories*, potrebno je odabrati predložak za kreiranje 3D svijeta. Budući da za ovu aplikaciju nije potreban nekakav postojeći sadržaj, igrač kroz kojeg bi gledali na svijet niti išta slično, bira se *Blank* predložak, odnosno prazan svijet u kojem nema nikakvog sadržaja. Prije samog početka rada na projektu bitno je namjestiti sve postavke projekta kako je prikazano na Slici 29. Odabire se C++ projekt budući da će biti potrebno naknadno instalirati UX Tools dodatak, bira se odgovarajuća platforma *Mobile/Tablet* i *No Starter Content* jer za kreiranje aplikacije nije potreban paket s jednostavnom mrežom i osnovnim materijalima i teksturama.



Slika 29. Postavke projekta

Prije početka izrade same aplikacije i 3D svijeta, potrebno je osposobiti Microsoft OpenXR ekstenziju s dodatnim funkcionalnostima za aplikacije mješovite stvarnosti. OpenXR je otvoreni Khronosov API standard koji aplikacijama poput Unreala omogućuje pristup širokom rasponu uređaja iz spektra miješanje stvarnosti. Unreal Engine s postojećim OpenXR-om omogućava: praćenje očima, praćenje zglobova ruke te mapiranje ruke i kontrolera, a OpenXR dodatak omogućuje: prostorno sidrenje, usmjeravanje unosa s tipkovnice, dinamičko ručno iscrtavanje mreže, glasovni unos, prostorno mapiranje koje pruža mrežu fizičkog svijeta i slične značajke. Kada se u postavkama projekta omogući OpenXR dodatak potrebno je ponovno pokretanje Unreal Enginea kako bi se promjene uspješno spremile.

Izrada aplikacije kreće od kreiranja *Empty Levela* koji ima praznu scenu u koju ubacujemo *PlayerStart* te u *Details* prozoru postavljamo njegovu lokaciju na $X=0$, $Y=0$ i $Z=0$. Također se dodaje i svjetlo koje će omogućiti da projekt bude vidljiv tako što ga se stavi na razumnu udaljenost od ishodišta samog projekta. Unutar ikone *Lights* u panelu *Modes* izabere se *Directional Light* i ubaci se u scenu te postavlja iznad *Player Starta*. Kada je scena spremna unutar *Content Browsera* odabere se dodavanje nove mape koja će se zvati *ChessAssets* u koju će se ubaciti sve dostupne figure, materijali i teksture za šahovsku igru dostupne na GitHubu. Unutar mape *Blueprints* u *Content Browseru* kreira se novi *Blueprint Class – Actor* kako je prikazano na Slici 30. i dodjeljuje mu se ime *Board*. To je blueprint šahovske ploče.

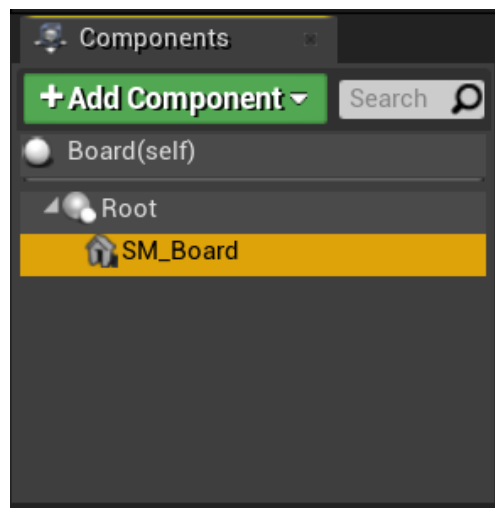


Slika 30. Kreiranje Actora

4.3. Dodavanje materijala

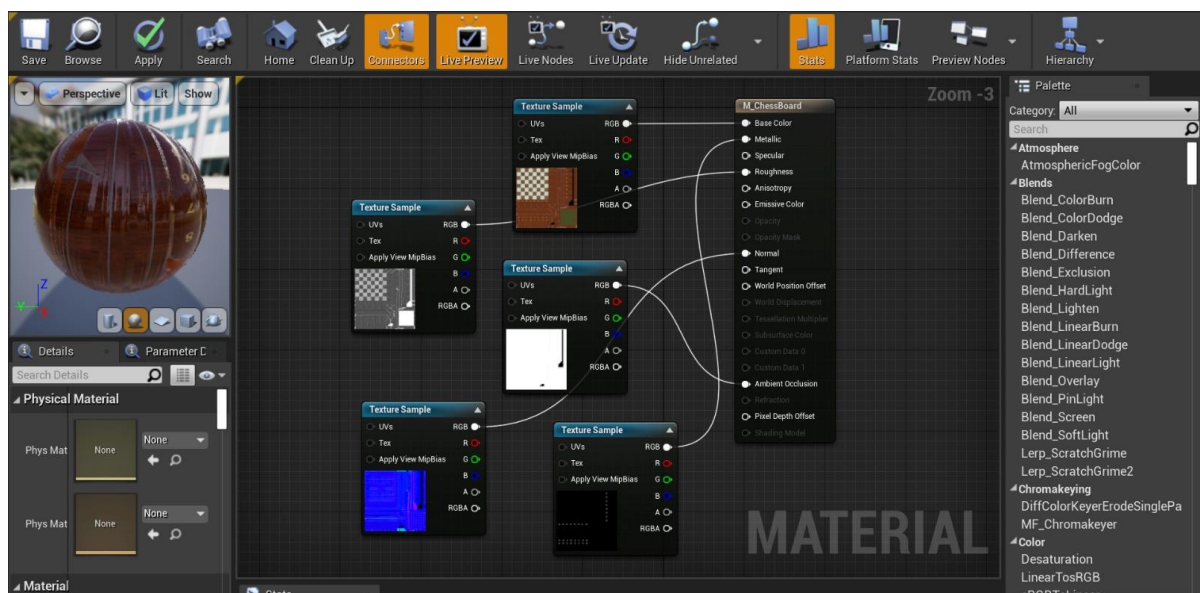
Postupak dodavanja materijala i teksture unutar Blueprinta za svaku komponentu sustava izgleda ovako:

- Otvara se Blueprint editor određene komponente, u ovom slučaju komponente *Board*.
- U njemu se dodaje komponenta *Scene* koja je "dijete" *DefaultSceneRoot* scene. *Scene* se preimenuje u *Root* i postavlja na mjesto *DefaultSceneRoot*.
- Klikom na *Add component > Static Mesh* se unutar *Components* zaslona dodaje mreža *SM_Board* te se pojavljuje kao komponenta čiji je roditelj scena *Root* kao što je prikazano na Slici 31.



Slika 31. Dodavanje Static Mesh za kreiranje materijala

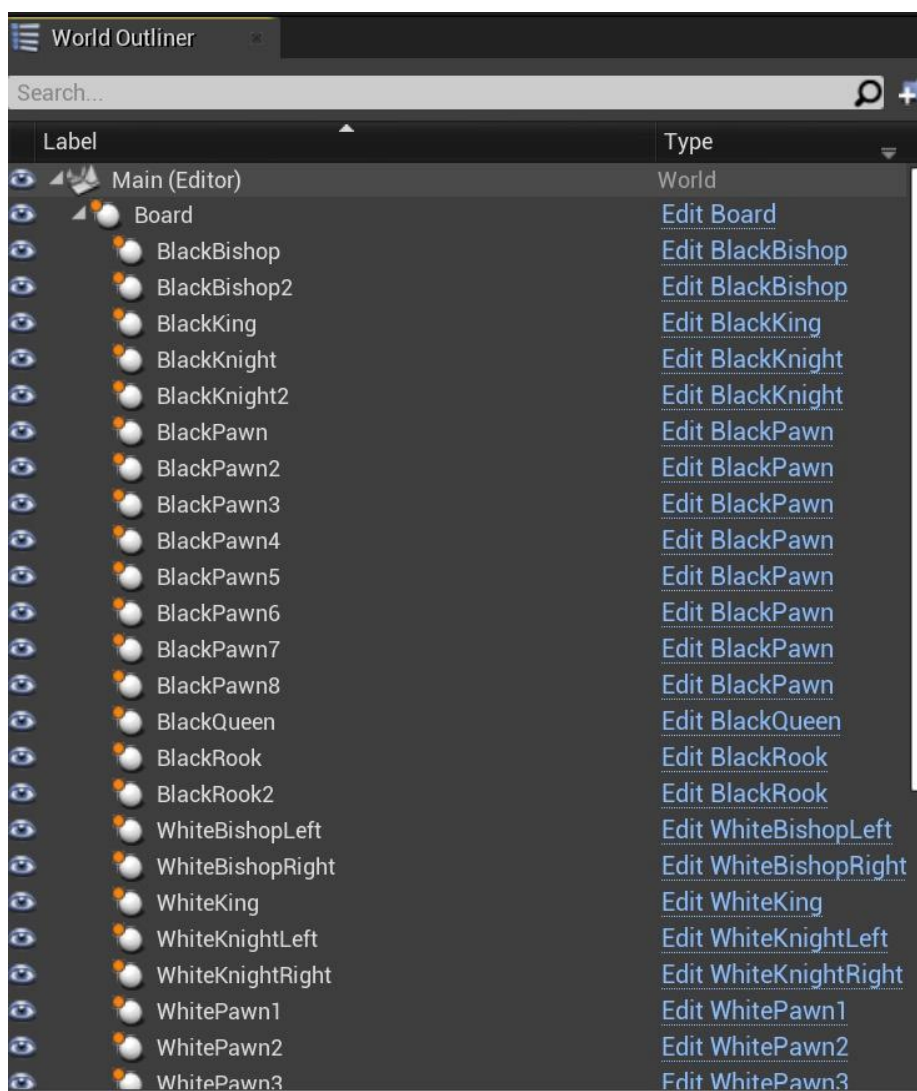
- Odabirom *SM_Board* u *Details* prozoru, dodaje se *Static Mesh* i materijal komponente. Budući da je odabran *Empty Level*, najprije se mora kreirati materijal koji će se dodavati pojedinoj komponenti. U slučaju ove aplikacije postoje tri materijala, materijal šahovske ploče nazvan *M_ChessBoard*, materijal bijelih figura *M_ChessWhite* te materijal crnih šahovskih figura *M_ChessBlack*. Na Slici 32. se može vidjeti blueprint materijala šahovske ploče dobiven dodavanjem tekstura te njihovim spajanjem s *M_ChessBoard* rezultatnim čvorom. Kada se sve spremi, materijal koji je izrađen je primjenjen na ploču.



Slika 32. Izgled Blueprinta materijala šahovske ploče

4.4. Izrada scene

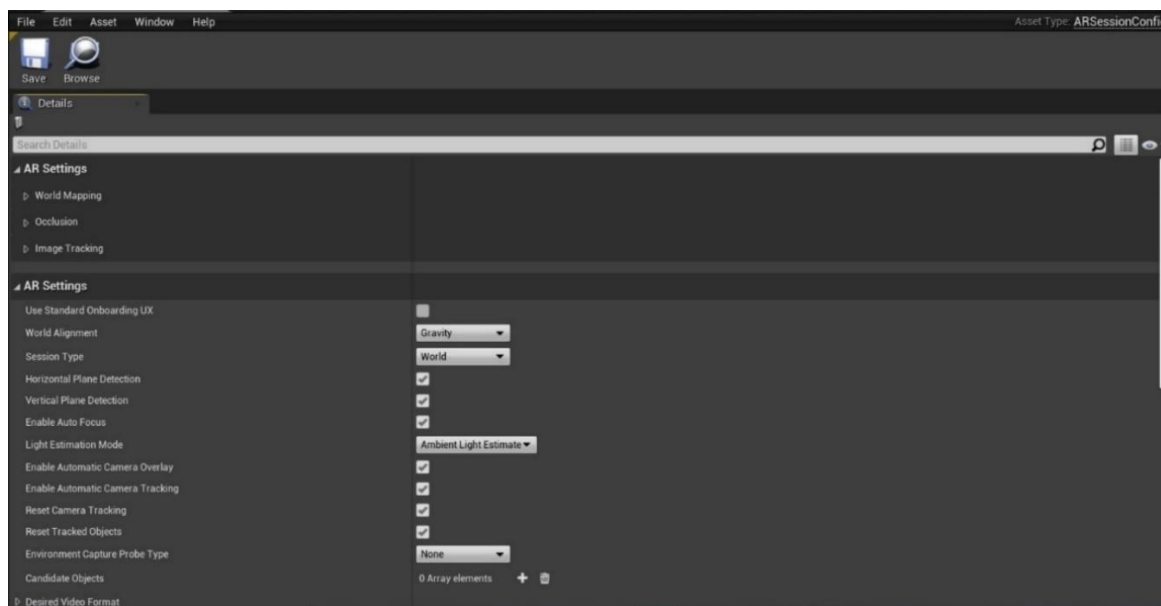
Prije postavljanja koordinata šahovske ploče potrebno je uvjeriti se u to da je ploča razumne veličine i ispravno okrenuta kada se postavi u scenu. Postavlja se *Scale* na (0.05,0.05,0.05) i rotacija oko osi z na 90° te se potom *Board* postavlja na lokaciju X = 80, Y = 0 i Z = -20. Izrada šahovskih figura temelji se na istom principu kao i izrada šahovske ploče. Prvo se u mapi *Blueprints* dodaje *Blueprint Class – Actor* s imenom *WhiteKing* te se ponavljaju isti koraci: dodaje se *Static Mesh* i unutar nje se dodaje materijal *M_ChessWhite*, figura se onda skalira i rotira te se postavlja na ploču na koordinate lokaciju X = -26, Y = 4 i Z = 0. Potom figuru *WhiteKing* treba unutar prozora *World Outliner* povući unutar ploče *Board* kako bi ga učinili podređenim objektom te ploče. Na Slici 33. prikazan je *World Outliner* prozor koji sadrži imena i blueprintove elemenata šahovske ploče na kojem je vidljivo da su šahovske figure podređeni objekti šahovske ploče pod nazivom *Board*.



Slika 33. *World Outliner* prozor

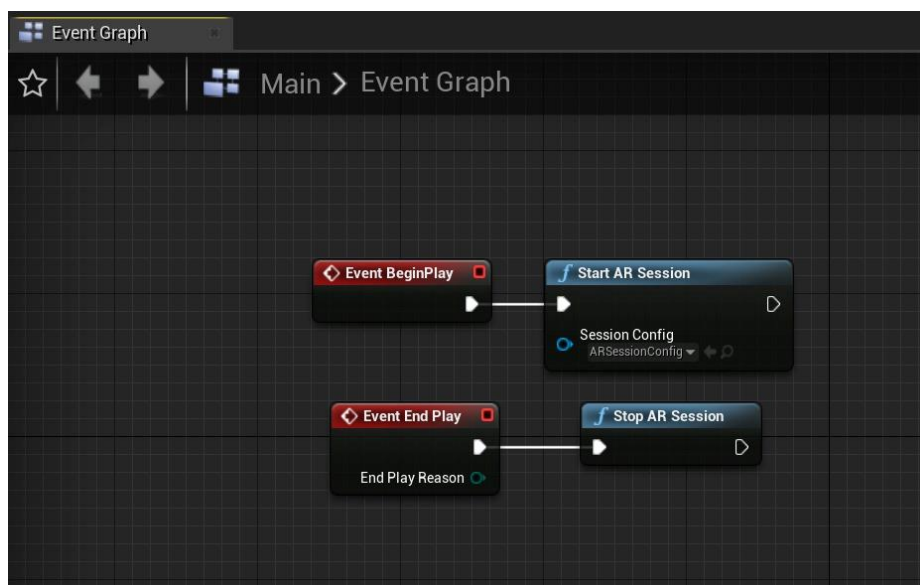
4.5. Postavljanje projekta za mješovitu stvarnost

Nakon što se napravila scena šahovske aplikacije, bitno je napraviti sve potrebne korake za postavljanje aplikacije za razvoj mješovite stvarnosti, a to znači dodavanje AR sesije. Koristi se *ARSessionConfig* koji ima korisne AR postavke kao što su prostorno mapiranje i okluzija. Cilj dodavanja ovih resursa je pomicanje figura i mogućnost postavljanja načina šahovske igre. Dodaje se *ARSessionConfig* podatkovni resurs klikom na *Add New > Miscellaneous > Data Asset* unutar *Content Browsera* i unutar mape *Content*.



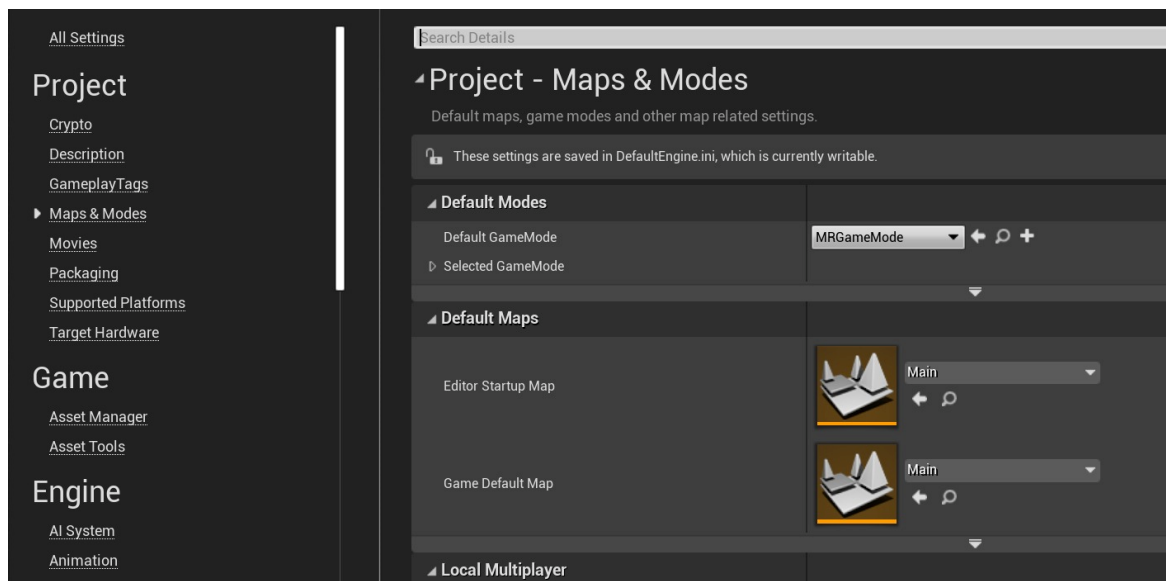
Slika 34. Dodavanje AR sesije

Sljedeći korak je pokretanje AR sesije u posebnom *Level Blueprintu* unutar Unreala koji je globalni dijagram događaja na razini cijele scene. Povezivanjem *ARSessionConfiga* unutar *Level Blueprinta* osigurava da će se AR sesija pokrenuti čim se igra pokrene i zaustaviti kad se razina učita i završi. Na Slici 35. je blueprint koji prikazuje da početak i kraj *AR Session* počinje s početkom i krajem *Eventa*, odnosno cijelog levela.



Slika 35. *Event Graph* AR sesije

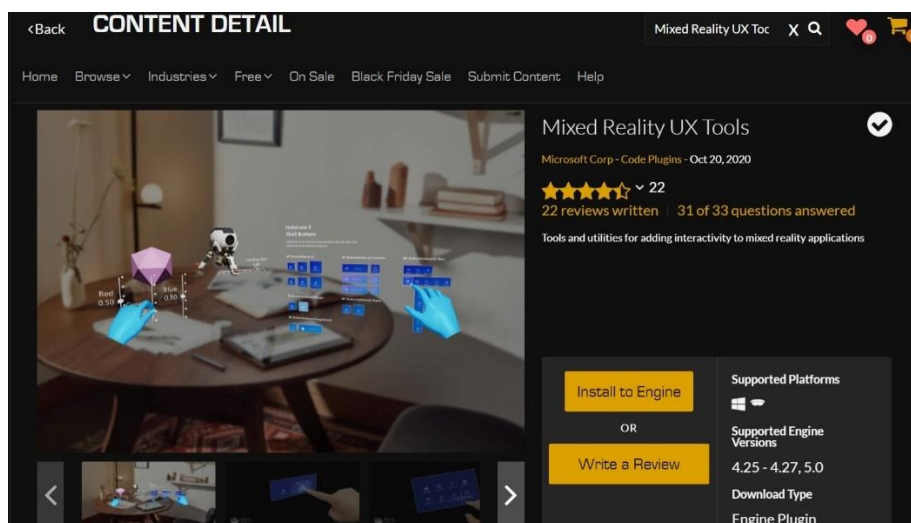
Budući da u ovom trenutku aplikacija nema igrača, a to su u ovom slučaju HoloLens 2 naočale, potrebno je u Unreal Engineu dodati *Pawn* koji predstavlja korisnika u igri. Klikom na *Add New > Blueprint Class* u *Content* mapi kreira se *DefaultPawn* pod nazivom *MR_Pawn*. Unutar njega se dodaje komponenta *Camera* koja je podređeni objekt *CollisionComponent*. To omogućuje da se korisnikova kamera pomiče zajedno s HoloLens 2 uređajem. Bitno je unutar *CollisionComponent* u opcijama podesiti da nema kolizije i to postavljanjem *Collision Presets* na *NoCollision*. Posljednja komponenta koju je potrebno ubaciti u projekt kako bi se postavilo sve za mješovitu stvarnost je način igre, odnosno *Game Mode*. Unutar mape *Content* dodaje se novi *Blueprint Class* pod nazivom *MRGameMode* i u odjeljku *Classes* se *Default Pawn Class* postavlja na *MR_Pawn* i sve se spremi. Potom se u postavkama projekta *Project Settings* klikom na *Maps and Modes* promijeni *Default GameMode* u *MRGameMode*, a za *Editor Startup Map* i *Game Default Map* se postavi *Main level*, kao što je i prikazano na Slici 36. Kada je sve to napravljeno i šahovska aplikacija uspješno postavljena za mješovitu stvarnost, može se krenuti s postavkama interakcije unutar scene.



Slika 36. Postavljanje Game Moda i Main Levela

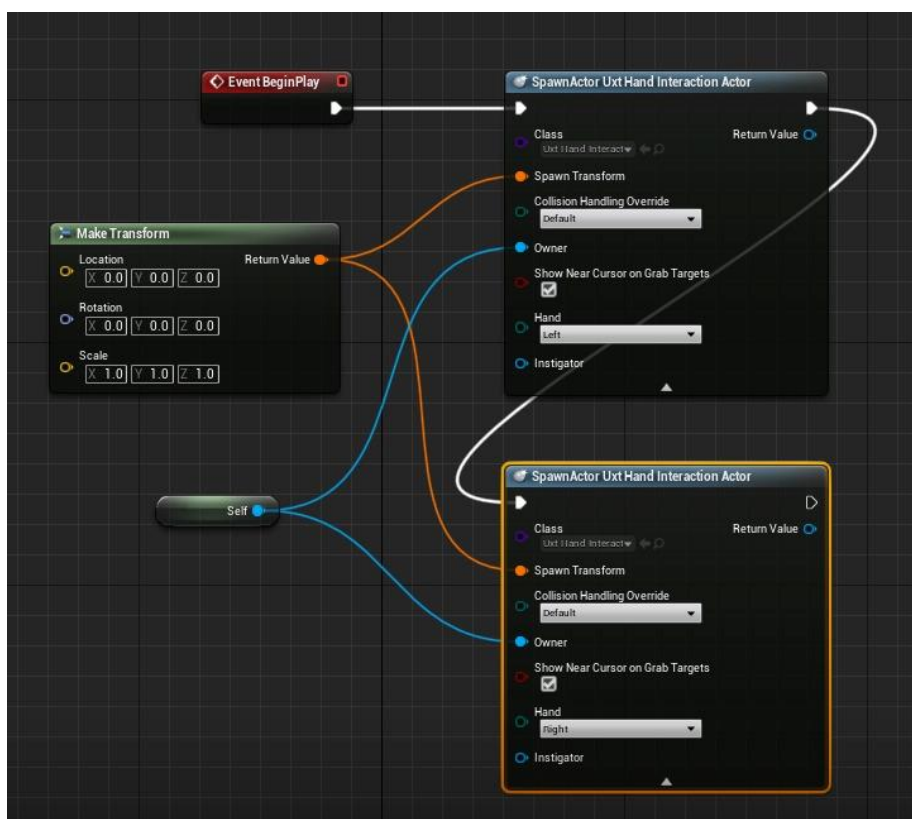
4.6. Postavljanje interakcije

Ovaj dio kreiranja aplikacije fokusira se na instaliranje i korištenje Mixed Reality Toolkita koji pruža alate za interaktivnost scene odnosno pomicanje šahovskih figura prema korisničkom unosu. Unutar Unreal Engine Marketplacea je potrebno pronaći Mixed Reality UX Tools dodatak kao na Slici 37. i instalirati ga, a zatim omogućiti taj dodatak u aplikaciji te ponovno pokrenuti aplikaciju kako bi se promijene spremile. Ovaj dodatak ima mapu *Content* s podmapama koje uključuju komponente kao što su gumbi, simulacije, pokazivači, klizače i menije koji služe za interakciju s korisnikom te mapu C++ Classes s dodatnim kodom. Osim u Unreal Engine Marketplaceu, ovaj dodatak se može pronaći i na Microsoft GitHub repozitoriju.



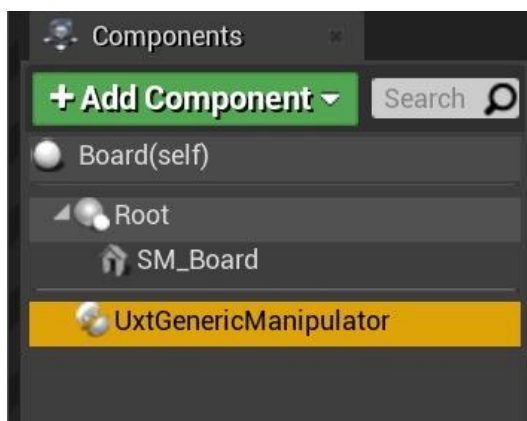
Slika 37. Mixed Reality UX Tools instalacija

U aplikaciju se prvo unosi ručna interakcija pomoću UX elemenata i *Hand Interaction Actorsa* koji stvaraju i pokreću pokazivače i vizualne elemente za blisku i daleku interakciju. Bliska interakcija simuliranih ruku ostvaruje se stiskanjem elementa između kažiprsta i palca ili bockanjem vrhom prsta, a daleka interakcija ostvaruje se umjeravanjem zrake iz virtualne ruke na određeni element i istovremeno pritiskanje kažiprsta i palca. U ovom slučaju, dodavanje *Hand Interaction Actora* u *MR_Pawn* će: dodati kursor na vrhove korisnikovih kažiprsta, omogućiti udaljene artikulirane unose rukom kojima se može manipulirati i omogućiti udaljene interakcijske unose kroz zrake, tj. pokazivače koji se protežu iz dlanova virtualnih ruku. Unutar *Event Grapha* u Blueprintu *MR_Pawna* kreira se graf događaja koji je prikazan na Slici 38. i koji prikazuje *SpawnActor* glumce kojiima treba dodijeliti vlasnika i početne transformacijske lokacije. U ovom slučaju, početna transformacija nije bitna jer će UX alati natjerati glumce interakcije ruku da preskoče na virtualne ruke čim budu vidljive. Međutim, *SpawnActor* zahtjeva unos transformacije (*engl. Spawn Transform*) kako bi se izbjegla greška tako da se ipak stavi lokacija, odnosno ostave se zadane vrijednosti. Navedena interakcija prikazana na slici također pokazuje da je označen okvir *Show Near Cursor on Grab Targets* za oba *SpawnActora*, što znači da se pokazivač pojavi na meti za hvatanje kada joj se korisnikov kažiprst približi.



Slika 38. Blueprint ručne interakcije

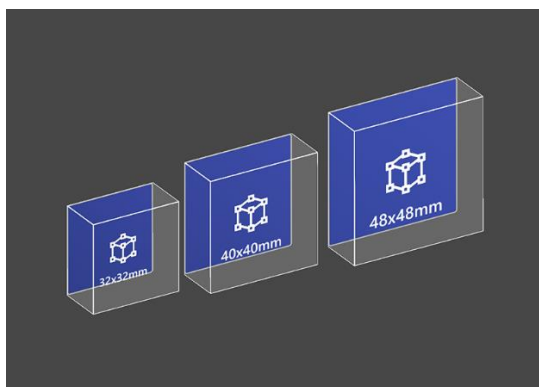
Manipulacija glumcima, odnosno šahovskom pločom i figurama, izravno je omogućena primjenom transformacije manipulatora, komponente koja reagira na unos rukom i može se uhvatiti, rotirati i translirati. Manipulator *Uxt Generic Manipulator* dodaje se kao komponenta svakom *Actoru* klikom na *Add Component > Uxt Generic Manipulator*, a na Slici 39. prikazan je *Uxt Generic Manipulator* kao komponenta unutar šahovske ploče. Postoje dva načina manipulacije, jednoručno ili objeručno, i na korisniku je da odabere način koji želi te spremi sve promjene. Odabran je *Mixed Flags* način rada ili manipulacija objektima s obje ruke.



Slika 39. *Uxt Generic Manipulator* kao komponenta šahovske ploče

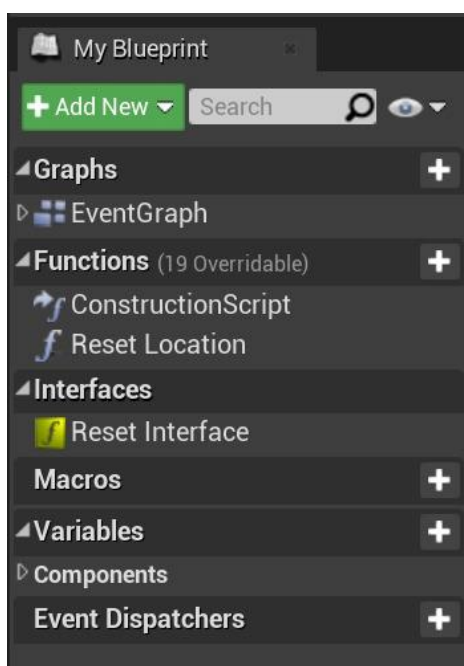
4.7. Dodavanje gumba za resetiranje pozicije šahovskih figura

Kao što je prethodno spomenuto, Mixed Reality Toolkit UX Tools dodatak između ostalog sadrži gumbe koji omogućuju interakciju korisnika sa šahovskom pločom i figurama. U ovom dijelu prikazat će se dodavanje interaktivnog gumba u aplikaciju te stvaranje funkcije za ponovno postavljanje svih šahovskih figura na početni položaj te povezivanje gumba i funkcije kako bi korisnik klikom na gumb ostvario resetiranje same igre. Gumb koji se dodaje je *PressableButtonHoloLens2* prikazan na Slici 40.



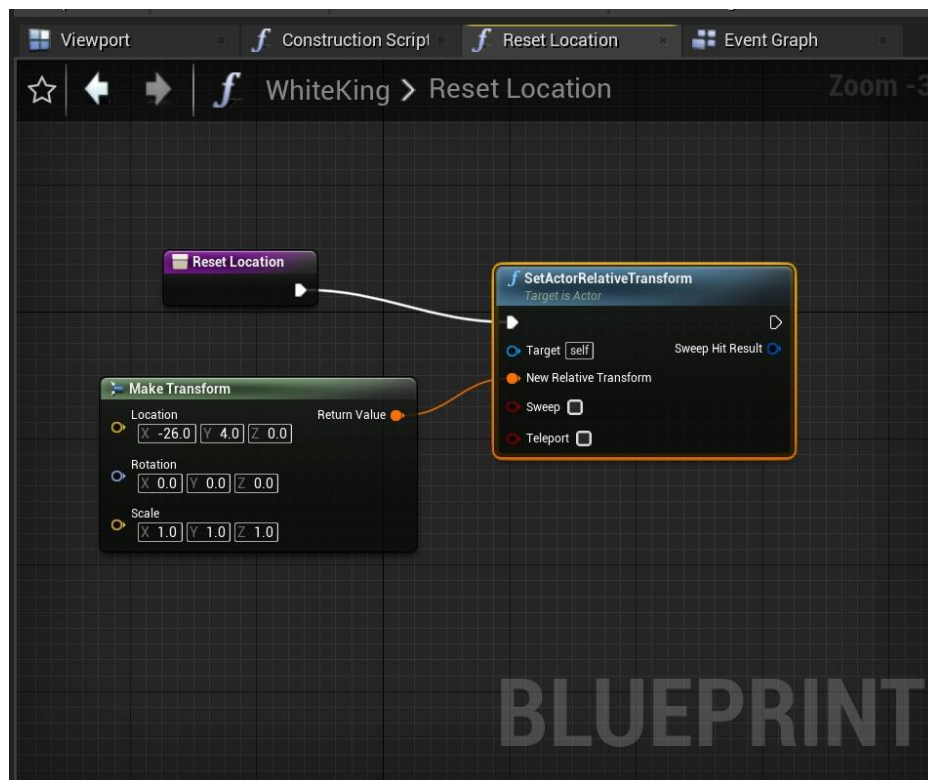
Slika 40. *PressableButtonHoloLens2* gumb

Prvi korak je kreiranje sučelja, odnosno *Interfacea* kojeg se imenuje *Chesspiece*. Sučelja su korisna jer osiguravaju da skup potencijalno nepovezanih klasa implementira zajednički skup funkcija. U slučaju šahovske igre, *Interface* će povezati sve šahovske figure koje su različitih tipova u zajednički apstraktni tip koji dijeli jednu zajedničku funkciju, funkciju *Reset Location* koja vraća figure u početni položaj. Unutar *Content Browsera* u mapi *Blueprints* desnom tipkom miša i odabirom *Blueprint Interfacea* se kreira sučelje koje je nazvano *Chesspiece*. *Actori* unutar aplikacije moraju imati implementiran taj *Interface*. Sučelje se dodaje tako što se u *Main Level Editor* prozoru otvori *Level Blueprint* određenog *Actora* i unutar njega se pritisne gumb *Class Settings* s alatne trake. U *Details* odjeljku, u kategoriji *Interfaces*, kliknemo na *Add Interface* i dodamo jedan od ponuđenih sučelja s liste. Unutar svakog *Actora* se treba u odjeljku *My Blueprint* u polju *Functions* dodati funkcija *Reset Location*, kako je prikazano na Slici 41., koja se potom dovlači na mrežu nacрта gdje se grade *Blueprint* vizualni kodovi.



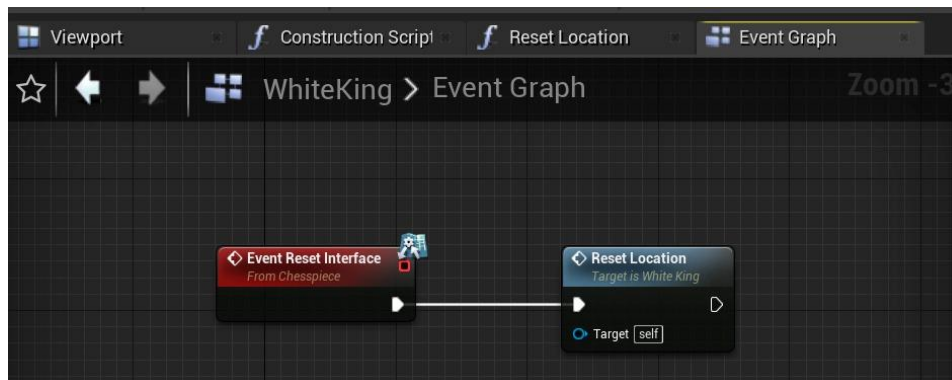
Slika 41. Dodavanje funkcije *ResetLocation*

Desnom tipkom miša kliknemo negdje na mrežu nacрта kako bi dobili izbornik i iz njega odabrali *SetActorRelativeTransform* funkciju koja postavlja transformaciju (translaciju, rotaciju i skaliranje) glumca u odnosu na šahovsku ploču *Board*. *Make Transform* se sastoji od vektora *Location*, rotora *Rotation* i vektora *Scale*. Kod šahovskih figura mijenjamo samo vektor lokacije i za svaku šahovsku figuru upisujemo njezine početne koordinate kako bi osigurali da se pritiskom na gumb šahovske figure vrate u početnu poziciju na ploči. Potrebno je postupak ponoviti za svaku od ukupno 32 šahovske figure. Na Slici 42. je prikazan blueprint funkcije *Reset Location* za figuru *White King*.



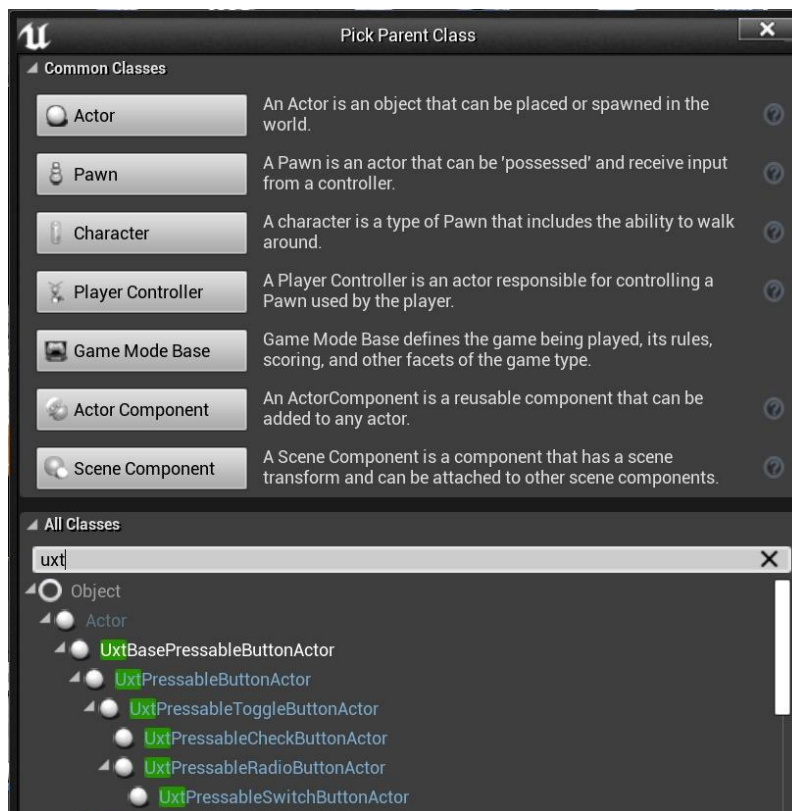
Slika 42. Blueprint funkcije *Reset Location* za figuru *White King*

Potom je potrebno u *Event Graphu* svake figure definirati da *Event Reset Interface* poziva funkciju *Reset Location* kako je prikazano na Slici 43.



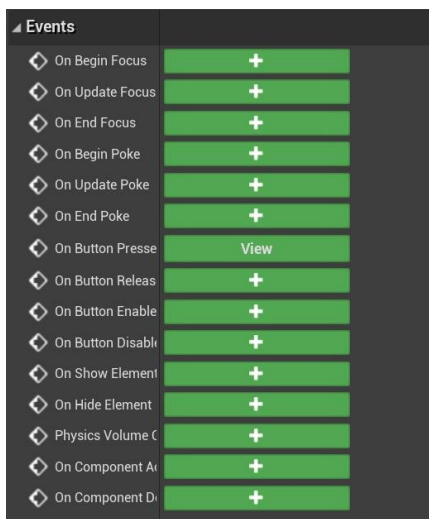
Slika 43. *Event Graph* šahovskih figura

Kada se naprave prethodni korakci i kada je funkcija uspješno postavljena za sve šahovske figure, potrebno je stvoriti gumb koji će aktivirati navedeno. Kao što je prikazano na Slici 44. klikom na *Add New > Blueprint Class* odabire se *UxtPressableButtonActor* i imenuje se *ResetButton*.



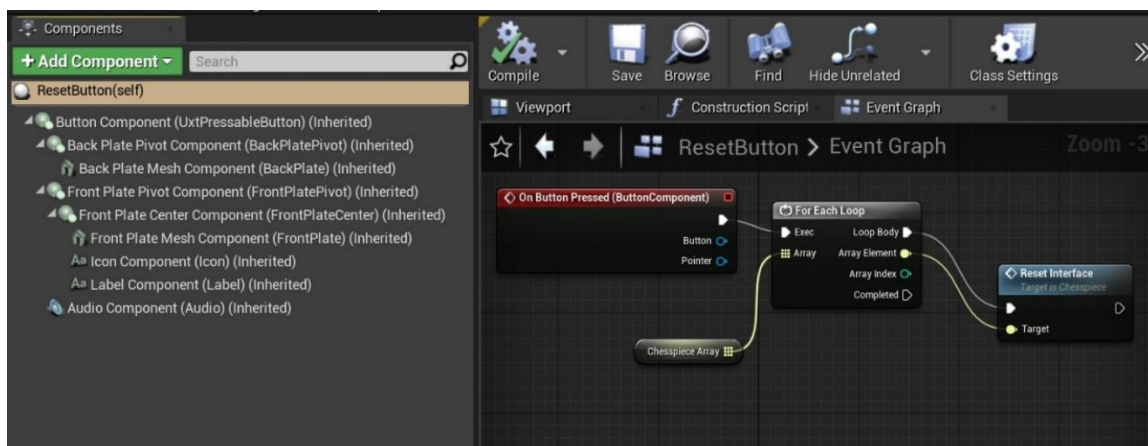
Slika 44. Kreiranje gumba

Potrebno je kliknuti na gumb kako bi se otvorio njegov Blueprint. U odjeljku *Components* klikom na `ResetButton(self)` može se mijenjati izgled samog gumba, njegova veličina, natpis te znak koji daje obilježje značenja toga gumba. Unutar istog odjeljka *Components* klikom na *ButtonComponent (Inherited)* u odjeljku *Details > Events* klikom na zeleni gumb *On Button Pressed*, taj se događaj dodaje na *Event Graph* i bit će pozvan kad se gumb pritisne. Na Slici 45. prikazan je dio *Events* u odjeljku *Details* u kojem se može odabrati neki od navedenih događaja, ovisno o tome koji najbolje odgovara korisnikovoj interakciji.



Slika 45. Dodavanje događaja *On Button Pressed* u Event Graph

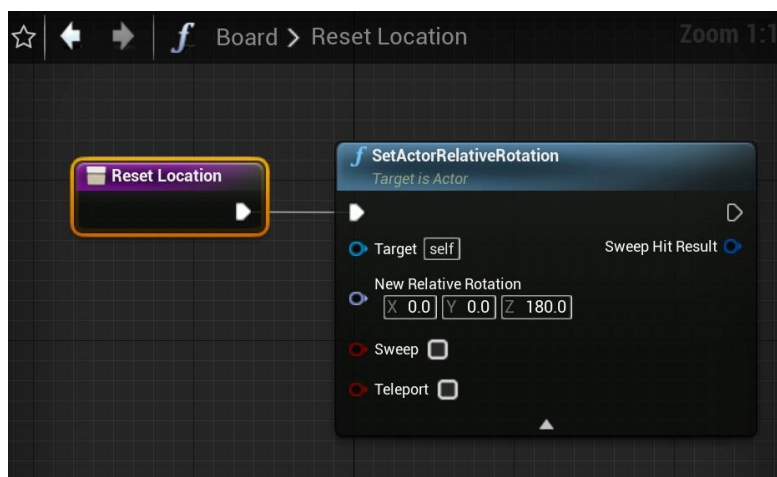
Unutar odjeljka *My Blueprint* u donjem lijevom kutu potrebno je kreirati varijablu *Chesspiece_Array*, klikom na nju u *Details* odjeljku potrebno za *Variable Type* odabrati *Chesspiece* i naznačiti da se radi o nizu tako što se u padajućem izborniku odabere *Array*. Potom u *Event Graphu* gumba kreiramo blueprint tako da *On Button Pressed* događaj povežemo s *For Each Loop* čvorom koji omogućuje da se izvrši neki skup funkcija na svakom pojedinačnom unosu u nizu, kako je prikazano na Slici 46. Izlaz *Loop Body* šalje izvršni impuls za svaki unos u *Array* ulaz. Kada je impuls izvršenja poslan iz *Loop Bodyja*, tada *Array Element* šalje jedan od elemenata niza, na koji god je trenutno fokusiran. Petlja je završena kada čvor prođe kroz svaki element u nizu. Potom gumb smjestimo u 3D svijet i odaberemo koordinate tako da se smjesti na prikladno mjesto u blizini šahovske ploče kako bi ga bilo lakše dohvatiti i pritisnuti. Nako što su redom provedeni svi koraci, testira se gumb i provjeri vraća li uspješno sve šahovske figure na njihove početne pozicije.



Slika 46. Blueprint gumba za resetiranje pozicije

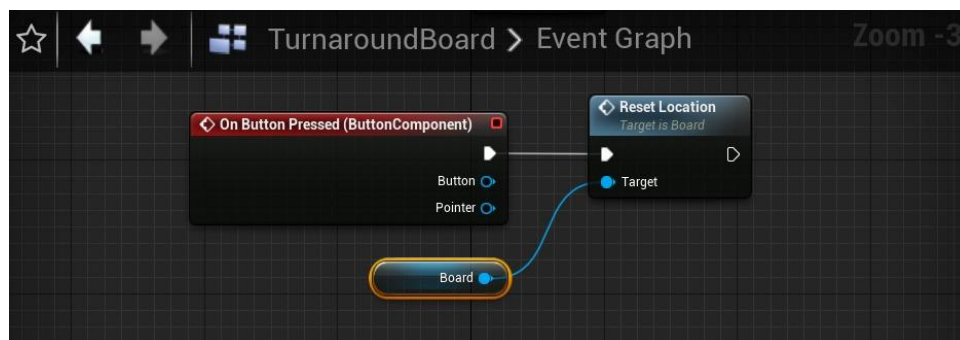
4.8. Dodavanje gumba za okretanje šahovske ploče

Gumb za okretanje šahovske ploče funkcionira po gotovo istom principu kao i gumb za resetiranje pozicija šahovskih figura. Gumb koji se dodaje je *PressableButtonHoloLens2*, a imenuje se *TurnaroundBoard*. Za ovaj gumb nije potrebno sučelje jer se kreira funkcija samo za jedan objekt aplikacije, a to je *Board*. U blueprintu ploče, u odjeljku *My Blueprint > Functions* kreira se nova funkcija *Reset Location* čiji blueprint prikazan na Slici 47.



Slika 47. Blueprint *Reset Location* funkcije šahovske ploče

Potom se u *Event Graphu* gumba izabere događaj *On Button Pressed* koji se poziva kada korisnik pritisne gumb i koji resetira ploču za 180°.

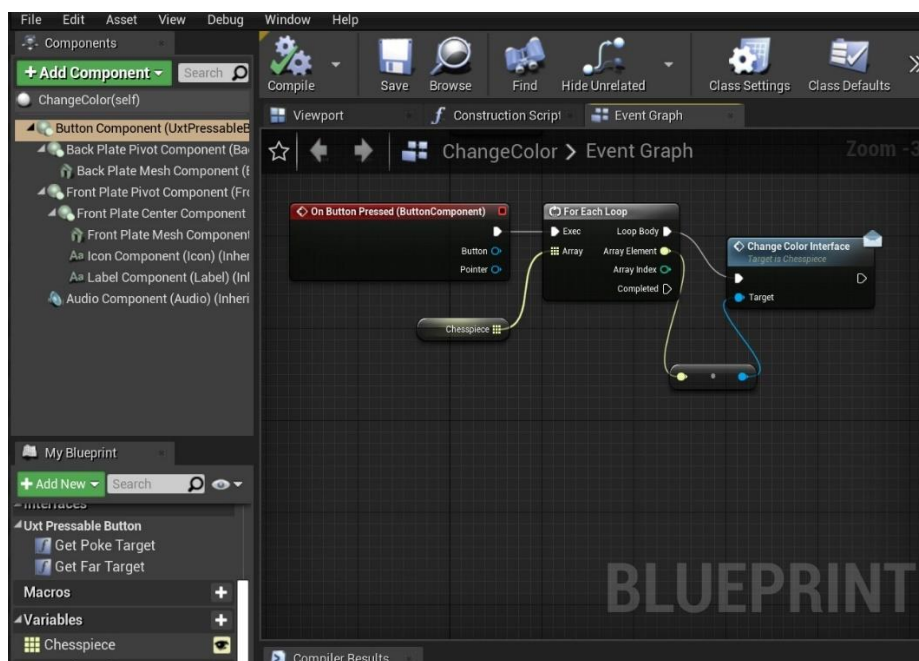


Slika 48. Blueprint gumba za okretanje šahovske ploče

4.9. Dodavanje gumba za mijenjanje materijala/boje šahovskih figura

Gumb za mijenjanje boje šahovskih figura također je *PressableButtonHoloLens2* čiji je postupak dodavanja objašnjen u jednom od prethodnih poglavlja. Također, za spomenute gumbe već je kreiran *Interface* koji nam je potreban i u ovom slučaju. Unutar svakog *Actora* kojem se želi promijeniti boja ili materijal se treba u odjeljku *My Blueprint* u polju *Functions*

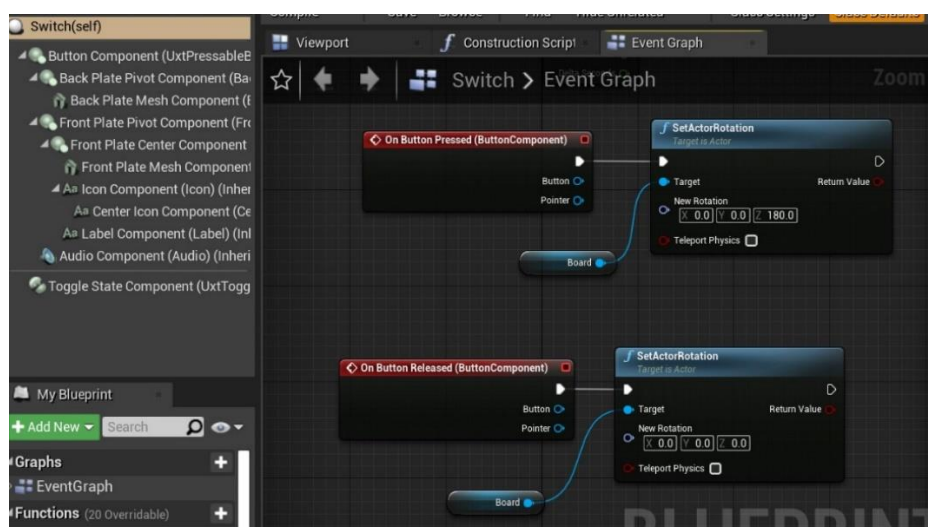
dodati funkcija *Change Color* u čijem se Blueprintu ona povezuje s funkcijom *Set Material*, kao materijal je u ovom slučaju izabran *AnimSharingBlue* materijal koji će učiniti da su figure plave boje. Na Slici 49. prikazan je *Event Graph* unutar gumba koji je nazvan *ChangeColor*. Kad se gumb pritisne poziva se funkcija za mijenjanje boje korištenjem *For Each Loop* petlje kako bi se promijenila boja svakoj figuri koja u svom blueprintu ima dodanu tu funkciju.



Slika 49. *Event Graph* gumba *ChangeColor*

4.10. Dodavanje Switch gumba za okretanje ploče

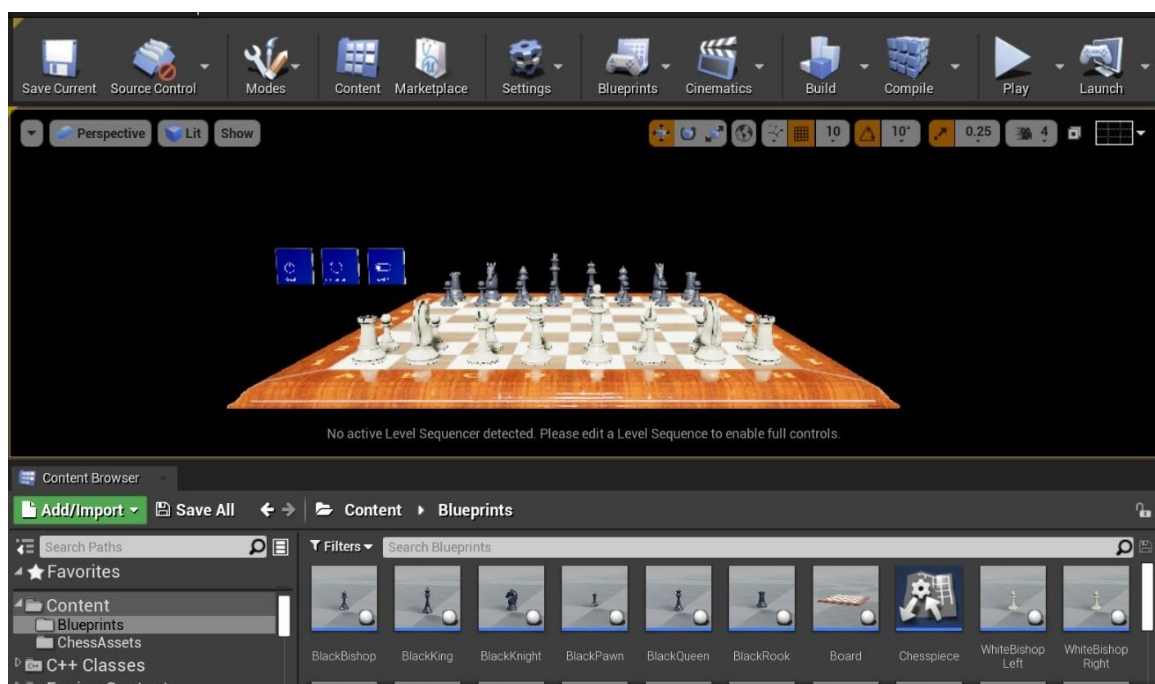
U aplikaciju igre šaha dodan je i *UxtPressableSwitchButtonActor*, odnosno gumb za prebacivanje ploče koji služi za okretanje ploče zajedno s figurama. Slika 50. detaljno prikazuje *Event Graph* ovog gumba.



Slika 50. *Event Graph* Switch gumba za okretanje ploče

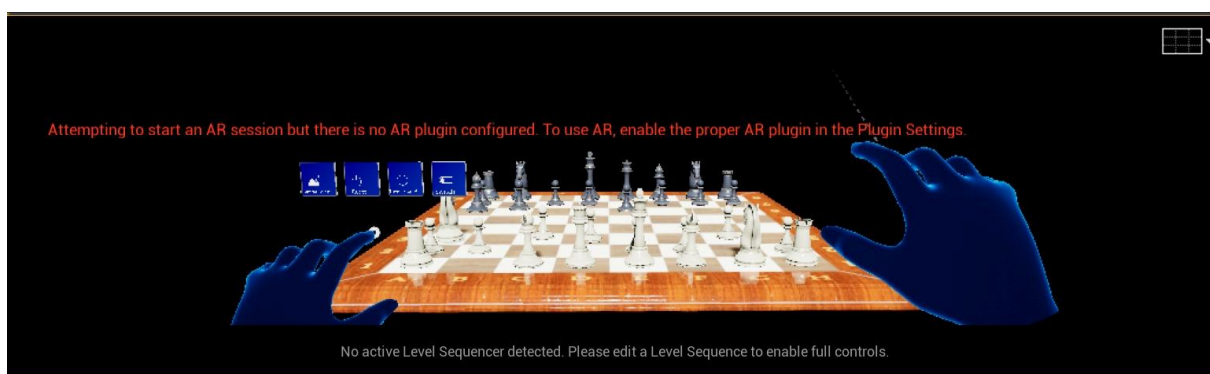
4.11. Pakiranje aplikacije za HoloLens Emulator i HoloLens 2 uređaj

Kako bi gotovu aplikaciju spremili za testiranje i pokretanje na HoloLens Emulatoru ili HoloLens 2 naočalama za proširenu stvarnost jako je bitno pravilno proći sve korake koji su jako dobro objašnjeni na Microsoft stranici. Izgled gotove aplikacije šahovske igre u Unreal Engineu prikazan je na Slici 51. na kojoj su vidljive figure i ploča te interakcijsko sučelje sastavljeno od gumba kojima se vrši manipulacija komponentama igre.



Slika 51. Izgled aplikacije šahovske igre u Unreal Engineu

Prije samog pakiranja aplikacije u Unreal Engineu je provjerena funkcionalnost svih gumbova te Slike 52., 53. i 54. prikazuju uspješno micanje figura, njihovo resetiranje te promjenu boje.



Slika 52. Prikaz korisnikovih ruku unutar Unreal Enginea koje igraju šah i uspješno pomiču figure

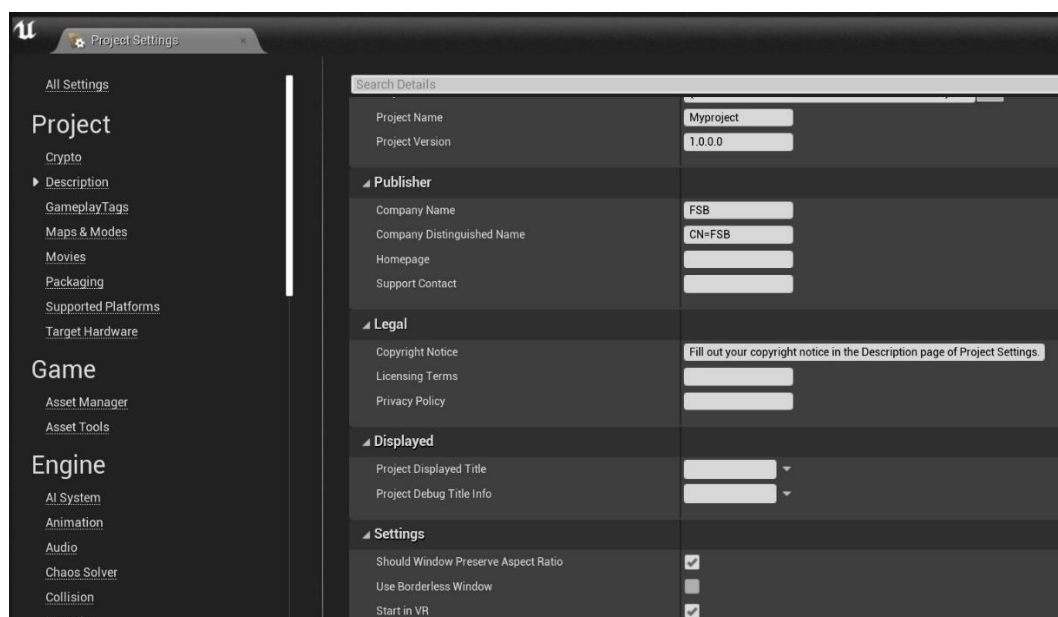


Slika 53. Klikom na gumb uspješno promijenjena boja figura



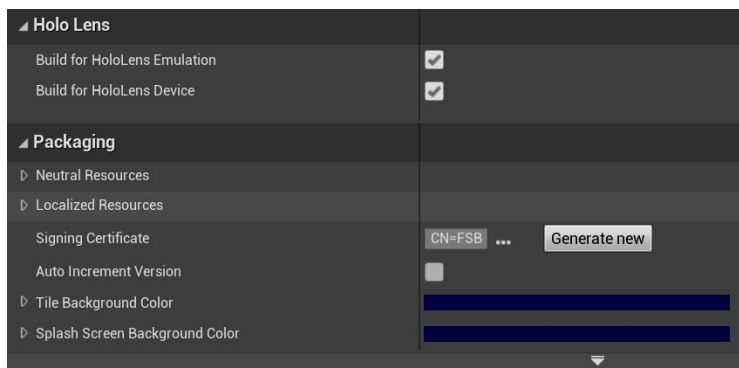
Slika 54. Šahovske figure uspješno vraćene na početne pozicije

Aplikacija se pakira i putem portala uređaja implementira na uređaj. Najprije se unutar Unreal Enginea klikom na *Project Settings* te unutar odjeljka *Project* odabere *Description*. Projektu je potrebno dodati ime i prepoznatljivo ime tvrtke odnosno *Company Distinguished Name*. Za *Company Name* stavlja se FSB, a *Company Distinguished Name* CN=FSB. Potrebno je još označiti ikonu *Start in VR* kako je prikazano na Slici 55.



Slika 55. Pakiranje projekta za testiranje

U *Project Settings* pod odjeljkom *Platforms* potrebno je odabrati HoloLens i u slučaju da želimo spakirati aplikaciju za HoloLens Emulator označimo ikonu *Build for HoloLens Emulation*, a u slučaju da ju pakiramo za HoloLens uređaj označiti ikonu *Build for HoloLens Device*. Potom kliknuti na *Generate New* u odjeljku *Packaging* kako je prikazano na Slici 56.



Slika 56. Označavanje ikone za pakiranje aplikacije za emulator i uređaj

Na prozoru *Create Private Key Password* koji se pojavi nakon toga treba kliknuti *None* jer nije potrebno izraditi lozinku privatnog ključa. Sada je aplikacija spremna i potrebno je kliknuti na *File > Package Project* i odabrati HoloLens te potom odabrati mapu u koju će se spremiti mapa projekta s appx datotekama.

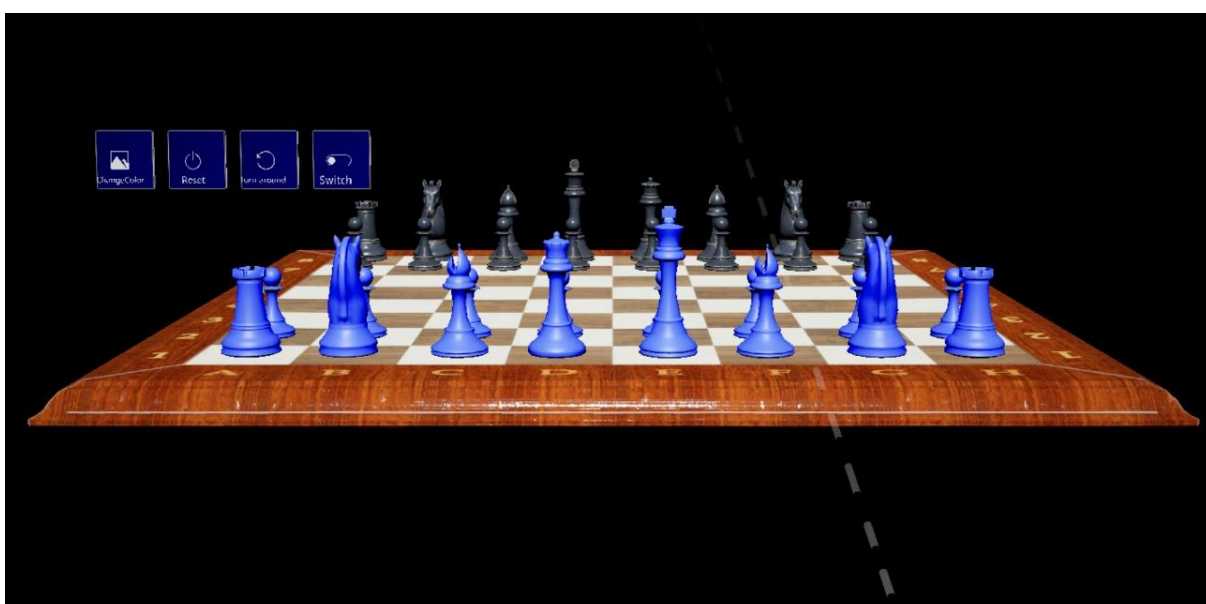
5. TESTIRANJE APLIKACIJE

5.1. Testiranje aplikacije na HoloLens emulatoru

U HoloLens emulatoru uspješno je testirana aplikacija igranja šaha koja je pokazala da korisnik može pomicati sve šahovske figure po ploči i u prostoru, manipulirati figurama i pločom, mijenjati boju šahovskih figura i okrenuti ploču ovisno o tome želi li da su bijele ili crne figure odmah ispred njega. Slike 57., 58. i 59. prikazuju projekt igre šaha otvoren i pokrenut u emulatoru s uspješno ostvarenim funkcionalnostima ostvarivanja interakcije s objektima.



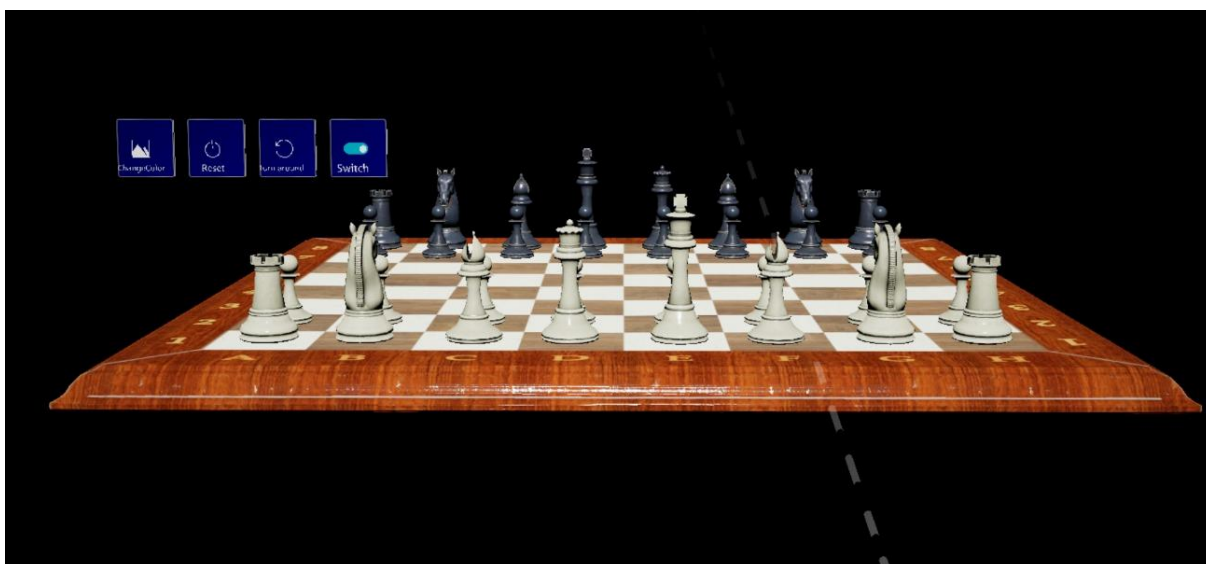
Slika 57. Otvoren projekt u HoloLens emulatoru



Slika 58. Promijena boje figura klikom na *ChangeColor* gumb



Slika 59. Okretanje šahovske ploče klikom na gumb *TurnaroundBoard*

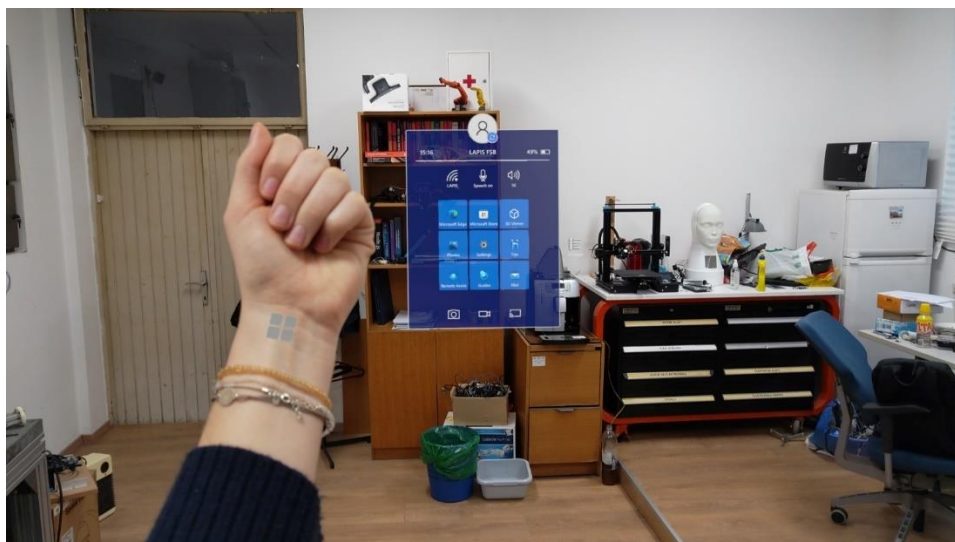


Slika 60. Okretanje šahovske ploče klikom na *Switch* gumb

5.2. Testiranje aplikacije na HoloLens 2 uređaju

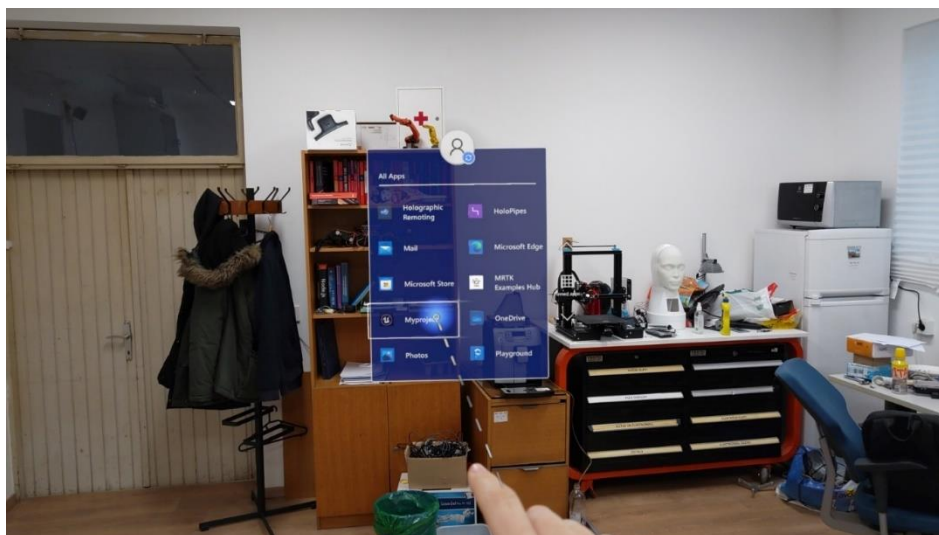
Prebacivanje projekta na HoloLens 2 naočale se vrši preko Windows Device portala koji omogućuje upravljanje uređajem putem WI-FI ili USB veze. Device portal je web poslužitelj na HoloLens 2 uređaju na koji se korisnik može povezati s web preglednika na računalo i uključuje brojne alate koji će pomoći korisniku u upravljanju uređajem, oklanjanju grešaka i optimizaciji aplikacija. Osim upravljanja aplikacijama, omogućuje prikaz i snimanje ekrana i upravljanje mapama i datotekama, odnosno vrlo jednostavno možete prenesti datoteke između računala i HoloLens uređaja. Da biste koristili Windows Device Portal, morate prvo omogućiti

Developer Mode na vašem HoloLens 2 uređaju. Nakon toga, možete se povezati s uređajem putem IP adrese koja se prikazuje u postavkama. Kad su HoloLens 2 i računalo uspješno spojeni, moguće je prebaciti projekt na naočale. Kako je prikazano na Slici 61., projektu pristupamo tako što na zapešću ruke kliknemo u virtualnu ikonu starta nakon čega se u prostoru pojavi glavni izbornik.



Slika 61. Start menu virtualna ikona na zapešću ruke

Na glavnom izborniku se klikne na desni gumb *All Apps* i potraži projekt. Slika 62. prikazuje otvaranje projekta igre šaha na glavnom izborniku HoloLens 2 uređaja nakon uspješnog prebacivanja projekta s računala i moguće je testirati funkcionalnost aplikacije.



Slika 62. Otvaranje projekta na HoloLens naočalama

Projekt se zatim prikaže u prostoru i možemo njime manipulirati, odnosno pomicati virtualne objekte u stvarnom prostoru. Slika 63. prikazuje otvoren projekt u prostoriji Laboratorija za projektiranje izradbenih i montažnih sustava. Kada se otvori projekt na HoloLens naočalama

za proširenu stvarnost, doživljaj koji će korisnik imati ovisi o specifičnostima projekta koji je razvijen za HoloLens, u ovom slučaju šahovska ploča i figure jako su dobro vidljive i dostupne u prostoru. Koristeći geste ruku, štipanjem i razvlačenjem, može se ostvariti interakcija s elementima u prostoru. Slika 64. predočava igranje virtualnog šaha u prostoriji dok je korisnik svjestan okoline koja ga okružuje i koju može vidjeti jednako dobro kao i virtualne elemente. Pomicaje figura omogućeno je gestama ruku, odnosno hvatanjem, štipanjem ili dodirivanjem.



Slika 63. Šahovska aplikacija gledana kroz ekran HoloLens 2 naočala



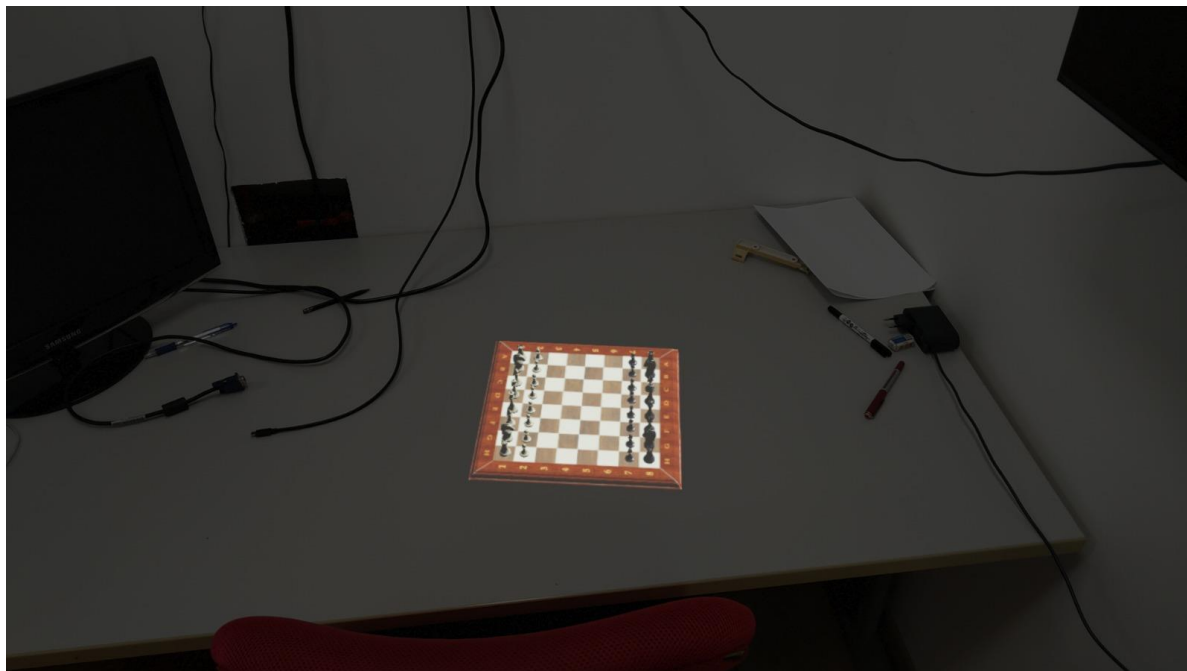
Slika 64. Igranje šaha s HoloLens 2 naočalima

Unutar HoloLens 2 projekta testirana je aplikacija i njezine funkcionalnosti, implementirani gumbi i pomicanje figura. Moguće je projekt otvoriti bilo gdje u prostoru te se kretati oko njega

i manipulirati figurama i pločom s bilo koje strane. Na Slici 65. prikazano je kako se bilo koja figura može povećavati i smanjivati, po želji korisnika. Također, moguće je smanjiti i cijelu ploču i figure ili ih povećati te staviti negdje u prostori, kako je prikazano na Slici 66., da bi scena izgledala što realističnije.



Slika 65. Manipuliranje figurom šaha

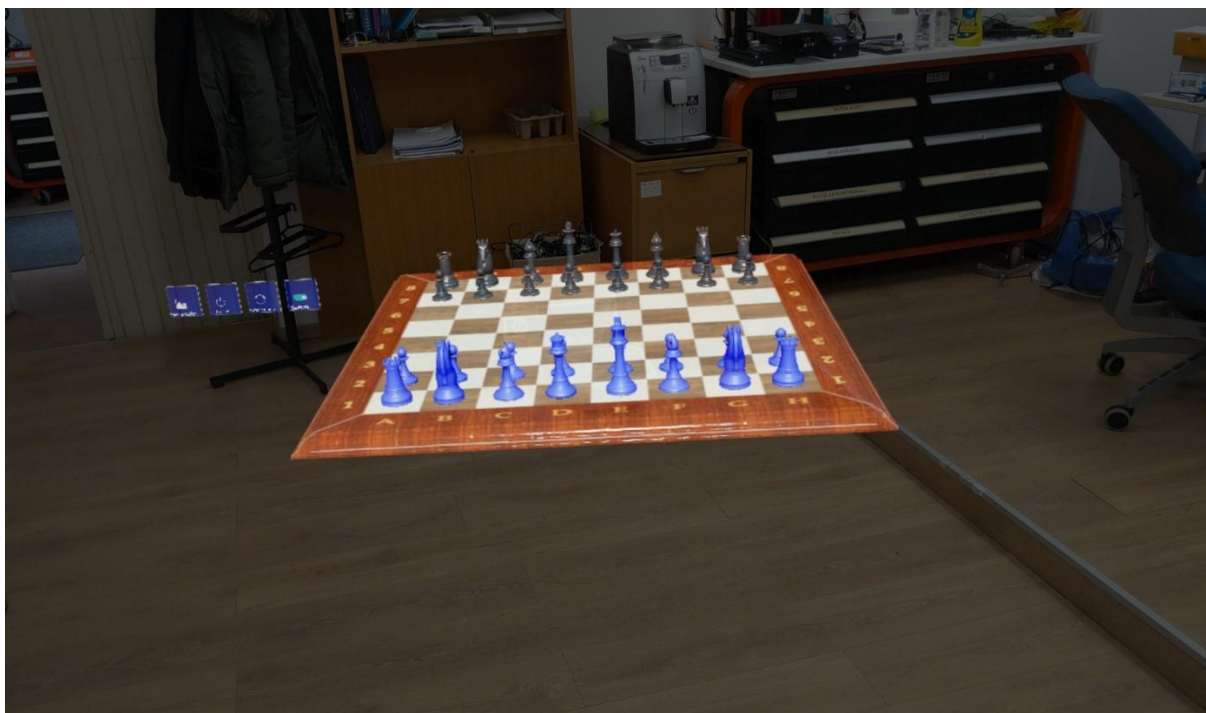


Slika 66. Šahovska igra smještena na stvarnom objektu za što realističnije iskustvo

Na Slici 67. prikazana je scena u kojoj je korisnikovim pritiskom gumba *Change Color* uspješno promijenjena boja figura dok Slika 68. prikazuje da su se sve figure raspoređene po ploči tijekom igre vratile na početno mjesto u sceni klikom na gumb *Reset*. Korisnik tako može krenuti igrati šah ispočetka.

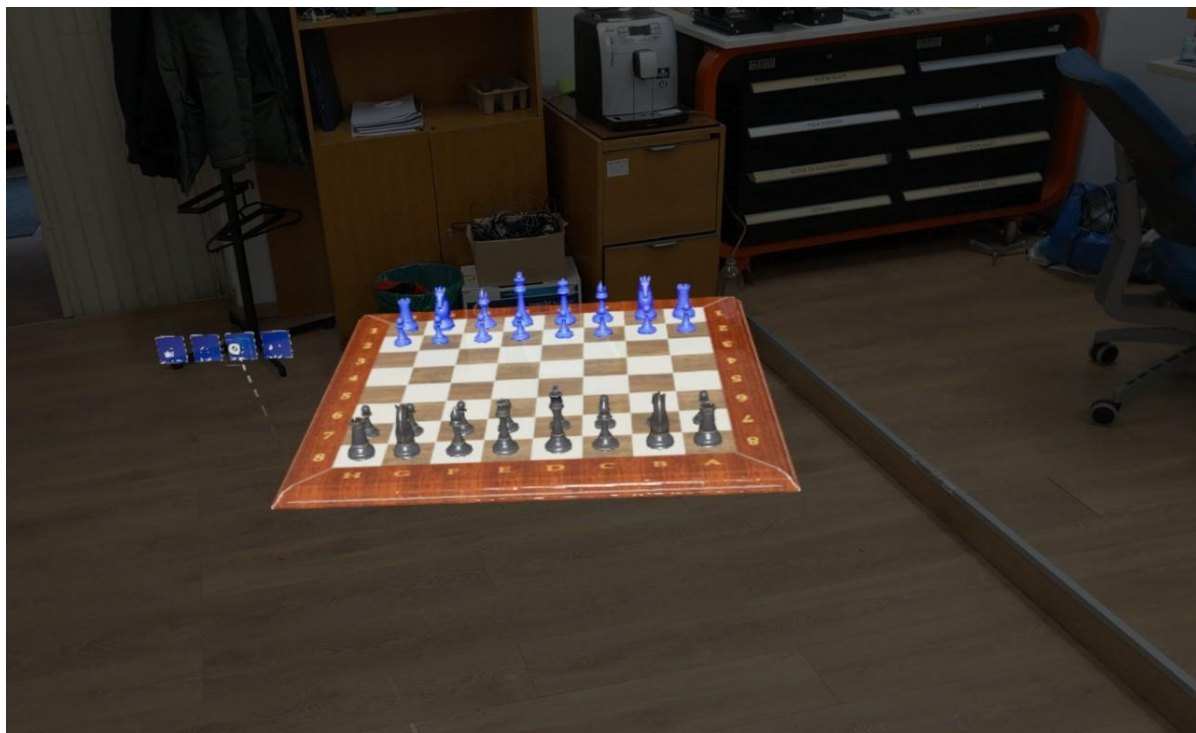


Slika 67. Uspješna promjena boje šahovskih figura pritiskom gumba *Change Color*

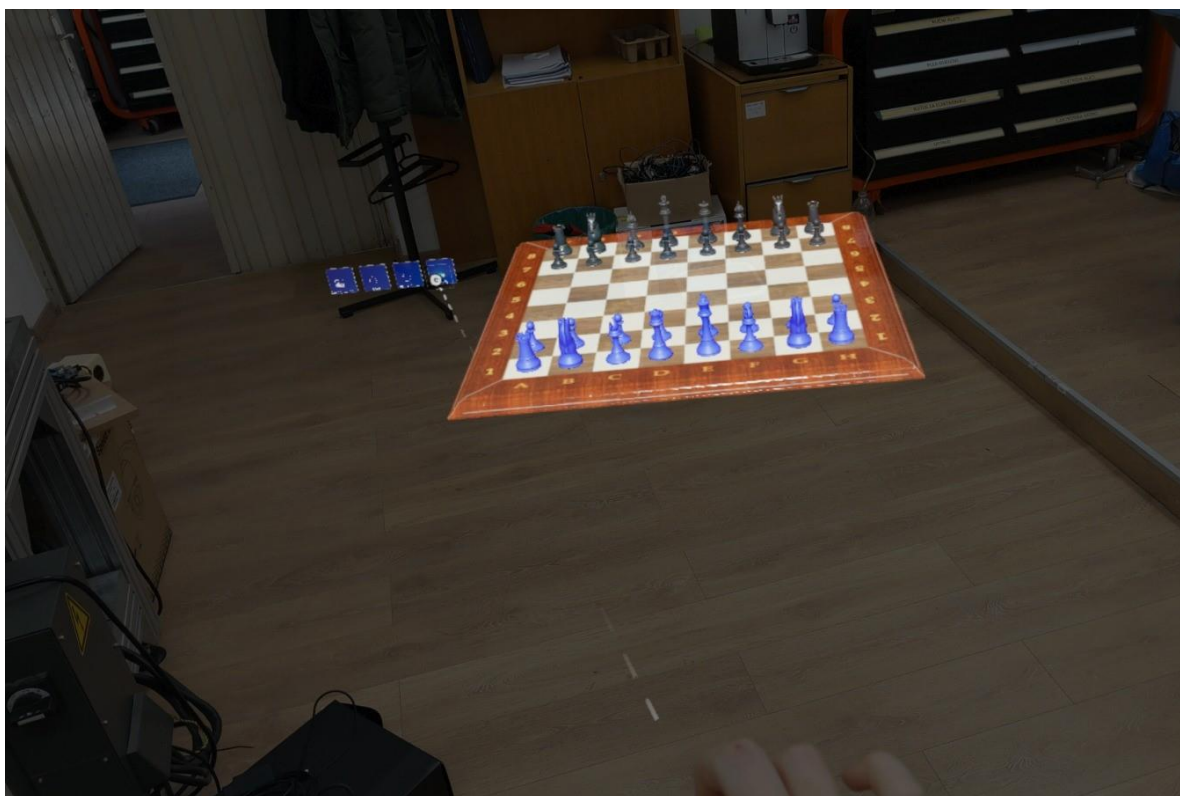


Slika 68. Vraćanje figura u početni položaj klikom na gumb *Reset*

Ukoliko korisnik odluči zamijeniti pozicije bez da se pomiče stvarnom prostoru, može to napraviti klikom na gumb za okretanje šahovske ploče. Slika 69. i Slika 70. prikazuju okretanje ploče u HoloLens 2 naočalama klikom na dva gumba kreirana u Unreal Engineu.



Slika 69. Uspješno okretanje šahovske ploče klikom na gumb *TurnaroundBoard*



Slika 70. Uspješno okretanje šahovske ploče klikom na *Switch* gumb

Programska aplikacija igre šaha u sklopu miješane stvarnosti preklapa se s korisnikovim stvarnim okolišem čime se stvara iskustvo proširene stvarnosti. Činjenica da je 3D objekte, odnosno šahovske figure moguće micati i manipulirati njima gumbima implementiranim koristeći prikladne dodatke u Unreal Engine alatu, čini ovo iskustvo u potpunosti iskustvom miješane stvarnosti.

5.3. Mogućnost daljnjeg razvoja aplikacije

Budući da je trenutna verzija aplikacije igre šaha pokazala samo neke od mogućnosti interakcije unutar miješane stvarnosti, postoji nekoliko načina kako poboljšati i povećati mogućnosti aplikacije u budućnosti. Prva mogućnost je dodavanje gumbova za interakciju koji uključuju neke od osnovnih i često korištenih otvaranja u šahu kako bi aplikacija, osim što nudi mogućnost zabave, bila i edukativnog karaktera. Primjerice, interaktivno sučelje moglo bi imati gumb na čiji bi se pritisak figure rasporedile u sicilijansku obranu, francusku obranu, kraljev gambit, damin gambit i slično. Tako bi aplikacija omogućila korisniku da nauči dobro poznata šahovska otvaranja i da ih primjeni u igri.

Kako bi ova zabavna igra imala i edukativnu komponentu, druga mogućnost je dodavanje tekstualnog opisa osnovnih pojmova i figura u šahovskoj igri. Primjerice dodiranjem određene figure pojavio bi se tekstualni okvir koji bi korisniku početniku objasnio o kojoj se figuri u šahu radi i koja su pravila kretanja odabrane figure.

Još jedna od mogućnosti je dodavanje i timera koji i omogućio korisniku da dobije dojam o vremenu koje mu je potrebno za osmisliti i izvesti određeni potez.

HoloLens 2 ima mogućnost korištenja glasovnih naredbi koje je moguće iskoristiti u sklopu aplikacije na način da korisnik, umjesto ručnog pomicanja, može svojim glasom premiještati figure. Sve ove mogućnosti daljnjeg razvoja aplikacije dovest će do boljeg iskustva unutar miješane stvarnosti.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je razviti aplikaciju koja će omogućiti interakciju s objektima u virtualnom svijetu koristeći Unreal Engine i HoloLens 2 naočale, što je i postignuto. Kreirano je sučelje koje korisniku omogućuje da manipulira i interaktira s objektima u 3D virtualnom svijetu preko zaslona HoloLens 2 naočala, a da je pri tome potpuno svjestan okoline u kojoj se nalazi. Prije samog razvoja, detaljno je opisana tehnologija miješane stvarnosti i njene komponente te su navedene bitne značajke HoloLens 2 uređaja. Objašnjena je aplikacija i detaljno je razrađen postupak postavljanja okoline i alata potrebnih za razvoj aplikacije iz čega je vidljivo da je za razvoj potrebno dosta alata i konfiguracija tih alata te računalnih resursa što razvoj za HoloLens 2 uređaj ne čini nimalo jednostavnim. Usprkos tome, Microsoft i Unreal Engine nude opširnu dokumentaciju i dodatke te gotove primjere koji pomažu korisnicima i programerima da uspješno kreiraju svoje aplikacije. Štoviše, razvoj aplikacija virtualne, proširene ili miješane stvarnosti olakšava činjenica da postoji jako puno platformi, foruma, članaka i web stranica koje nude rješenja i odgovore na brojna pitanja i probleme koji se mogu pojaviti tijekom razvoja. Ovom aplikacijom prikazan je samo jedan način primjene ove tehnologije koja predstavlja revolucionaran korak u interakciji između digitalnog i fizičkog svijeta.

Tehnologije virtualne, proširene i miješane stvarnosti imaju ogroman potencijal kojeg ljudi još uvijek nisu u potpunosti svjesni jer trenutno nisu dio naše svakodnevnice. Kao što davno prije čovjek nije mogao zamisliti da će danas teško funkcionirati bez mobitela i drugih pametnih uređaja, tako je i danas malo teže povjerovati u činjenicu da će ove tehnologije sigurno u budućnosti igrati važnu ulogu u tome kako radimo, učimo i živimo. Trenutno je jedna od značajnih mana ovih tehnologija njihova cijena i činjenica da uređaji nisu pristupačni širokoj javnosti. Budući da se velike količine novca i resursa ulažu u istraživanja i razvoj ovih tehnologija te da se brojne tvrtke posvećuju razvoju i proizvodnji uređaja i softvera, takva pojava konkurentnosti na tržištu će sigurno dovesti do smanjenja cijena. Tržište koje kombinira ove tri stvarnosti u naglom je porastu zbog sve veće popularnosti videoigara koje se baziraju na upotrebi ovih tehnologija, ali i zahvaljujući njihovoj širokoj primjeni u različitim sektorima. Iako tehnologije virtualne, proširene i miješane stvarnosti još uvijek nisu pristupačne široj populaciji, trenutna istraživanja pokazuju i predviđaju procvat tržišta ovih tehnologija u bliskoj budućnosti tako da će se tek otkriti beskrajne mogućnosti koje one nude.

7. LITERATURA

- [1] J. Carmigniani, B. Furht, „Augmented reality: An Overview“, 2011. Dostupno: https://www.researchgate.net/publication/227164365_Augmented_Reality_An_Overview, pristupljeno: 21.10.2023.
- [2] I. E. Sutherland, „A head-mounted three dimensional display“, 1968. Dostupno: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1476589.1476686>, pristupljeno: 21.10.2023.
- [3] M. Frackiewicz, „The History of Mixed Reality: From Science Fiction to Reality“, 2023. Dostupno: <https://ts2.space/en/the-history-of-mixed-reality-from-science-fiction-to-reality/#gsc.tab=0>, pristupljeno: 22.10.2023.
- [4] „What is Virtual Reality“, dostupno: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/what-is-virtual-reality.html>, pristupljeno: 24.10.2023.
- [5] S. Thompson, „VR Applications: 23 Industries using Virtual Reality“, 2022. Dostupno: <https://virtualspeech.com/blog/vr-applications>, pristupljeno: 24.10.2023.
- [6] „The Difference Between Virtual Reality, Augmented Reality And Mixed Reality“, 2018. Dostupno: <https://www.forbes.com/sites/quora/2018/02/02/the-difference-between-virtual-reality-augmented-reality-and-mixed-reality/>, pristupljeno: 24.10.2023.
- [7] Wikipedia, „Augmented reality“, dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality, pristupljeno: 24. 10.2023.
- [8] „Augmented, Virtual, and Mixed Reality Training Landscape“, 2023. Dostupno: <https://www.spheregen.com/augmented-virtual-and-mixed-reality-employee-training/>, pristupljeno: 28.10.2023.
- [9] Microsoft, „Introduction to mixed reality“, 2022. Dostupno: <https://learn.microsoft.com/en-us/training/modules/intro-to-mixed-reality/>, pristupljeno: 28.10.2023.
- [10] Wikipedia, „Head-mounted display“, dostupno: https://xinreality.com/wiki/Head-mounted_display, pristupljeno: 29.10.2023.
- [11] Microsoft, „What is mixed reality“, 2023. Dostupno: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/discover/mixed-reality>, pristupljeno: 29.10.2023.
- [12] HackerNoon, „Displays for Augmented and Virtual Reality“, 2018. Dostupno: <https://hackernoon.com/displays-for-augmented-and-virtual-reality-2d77b5199a8b>, pristupljeno: 29.10.2023.
- [13] Microsoft, „HoloLens 2“, dostupno: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware#document-experiences>, pristupljeno: 29.10.2023.

- [14] Microsoft, „MS HoloLens“, dostupno: <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/>, pristupljeno: 29.10.2023.
- [15] „Microsoft HoloLens 2: Create Innovative Mixed Reality Solutions That Drive Value“, dostupno: https://www.insight.com/en_US/content-and-resources/brands/microsoft/hololens-2-create-mixed-reality-solutions.html, pristupljeno: 29.10.2023.
- [16] Case Western Reserve University, „HoloAnatomy“, dostupno: <https://case.edu/holoanatomy/>, pristupljeno: 29.10.2023.
- [17] PCMag, „HP Reverb G2 Review“, 2022. Dostupno: <https://www.pcmag.com/reviews/hp-reverb-g2>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [18] VRcompare, „Samsung Odyssey+“, 2018. Dostupno: <https://vr-compare.com/headset/samsungodyssey%2B>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [19] Vrcompare, „Meta Quest 3“, 2023. Dostupno: <https://vr-compare.com/headset/metaquest3>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [20] The Verge, „Meta Quest 3 review: almost the one we've been waiting for“, 2023. Dostupno: <https://www.theverge.com/23906313/meta-quest-3-review-vr-mixed-reality-headset>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [21] Magicleap, „Magic Leap 2“, dostupno: <https://www.magicleap.com/magic-leap-2>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [22] Xreal, Air2, dostupno: <https://www.xreal.com/air2>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [23] Apple, „Introducing Apple Vision Pro: Apple's first spatial computer“, 2023. Dostupno: <https://www.apple.com/newsroom/2023/06/introducing-apple-vision-pro/>, pristupljeno: 30.10.2023.
- [24] Epic Games, „Unreal Engine“, dostupno: <https://www.unrealengine.com/en-US>, pristupljeno: 21.11.2023.
- [25] L. Funda, Ž. Mikulić, M. Hrga. „Osnovni elementi razvojnih alata Unity i Unreal Engine za stvaranje računalnih igara“. Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/file/292453>, pristupljeno: 21.11.2023.
- [26] Microsoft, „Visual Studio“, dostupno: <https://visualstudio.microsoft.com>, pristupljeno: 23.11.2023.
- [27] GitHub, „Mixed Reality UXTools - Unreal“, 2022. Dostupno: <https://github.com/microsoft/MixedReality-UXTools-Unreal>, pristupljeno: 23.11.2023.
- [28] Microsoft, „Using the HoloLens Emulator“, 2022. Dostupno: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/develop/advanced-concepts/using-the-hololens-emulator>, pristupljeno: 23.11.2023.