



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**INTERAKTIVNÍ DEMO ROZŠÍŘENÉ REALITY S HAP-
TICKOU ODEZVOU**

INTERACTIVE AUGMENTED REALITY DEMO WITH HAPTICAL FEEDBACK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FILIP EMANUEL DREXLER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL BAMBUŠEK

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Drexler Filip Emanuel**
Program: Informační technologie
Název: **Interaktivní demo rozšířené reality s haptickou odezvou**
Interactive Augmented Reality Demo with Haptical Feedback
Kategorie: Uživatelská rozhraní

Zadání:

1. Prostudujte koncept haptické odezvy v oblasti uživatelské interakce v rozšířené realitě. Seznamte se s zařízením Stratos Explore a Microsoft HoloLens 2.
2. Prozkoumejte vhodné příklady a využití haptické odezvy v uživatelských rozhraních a aplikacích rozšířené reality.
3. Vyberte vhodné metody a nástroje a navrhnete demo pro Microsoft HoloLens 2, které bude vyžít haptické odezvy zařízení Stratos Explore.
4. Navrženou aplikaci implementujte.
5. Proveďte uživatelské experimenty a vyhodnoťte vlastnosti výsledného řešení.
6. Vytvořte video prezentující klíčové vlastnosti výsledného řešení.

Literatura:

- SCHMALSTIEG Dieter, HÖLLERER Tobias. *Augmented Reality: Principles and Practice*. Addison-Wesley, 2016. ISBN 978-0321883575.
- HARTSON Rex. *The UX Book: Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience*. 2012. ISBN 9780123852427.
- Dále dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1, 2, 3 a rozpracovaný bod 4.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Bambušek Daniel, Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 21. dubna 2022

Abstrakt

Cielom tejto práce je spojiť funkcionality zariadení Stratos Explore a Hololens 2, to znamená vytvorenie virtuálneho objektu, ktorý bude zobrazený pomocou rozšírenej reality ako hologram a pri dotyku tohto objektu bude cítiť jeho haptickú odozvu vďaka ultrazvukovým vlnám. Výstupom sú aplikácie, pre Stratos Explore a Hololens 2, ktoré spolu komunikujú sieťovou komunikáciou. V aplikáciách je hologram gule, ktorý má haptickú odozvu a je ním možné buď manipulovať v jednej aplikácii, alebo ho rukou odrážať v aplikácii s mini hrou, kde je cieľom rozpučiť guľou chrobáky, ktoré sa pohybujú po zemi.

Abstract

Objective of this thesis is to connect functionality of devices Stratos Explore and Hololens 2. This means to create virtual object that is going to be displayed by virtual reality as a hologram. When the hologram is touched, user is going to feel haptic feedback because of ultrasound waves. Output of this thesis are applications for Stratos Explore and Hololens 2 which communicate together using network communication. User can resize, move and rotate the ball hologram in one application or can repel the ball by hand to squash bugs that move on ground in mini game application. Ball in this applications has haptic feedback.

Klíčové slova

haptická odozva, Stratos Explore, Hololens 2, Ultraleap, Ultrahaptics, zmiešaná realita, rozšírená realita.

Keywords

haptic feedback, Stratos explore, Hololens 2, Ultraleap, Ultrahaptics, mixed reality, augmented reality.

Citácia

DREXLER, Filip Emanuel. *Interaktivní demo rozšířené reality s haptickou odezvou*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Daniel Bambušek

Interaktivní demo rozšířené reality s haptickou odezvou

Prehlásenie

Vyhlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Daniela Bambuška. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....
Filip Emanuel Drexler
10. mája 2022

Podakovanie

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu, Danielovi Bambuškovi, ktorý ma viedol pri tvorbe tejto práce. Keď som nevedel, ako ďalej pokračovať, mal som nejaké otázky, alebo ťažkosti vždy bol ochotný a pohotový mi pomôcť.

Obsah

1	Úvod	3
2	Rozšírená realita	4
2.1	Definícia a vnímanie	4
2.2	Stručná história rozšírenej reality	5
2.3	Kontinuum rozšírenej reality	7
2.4	Výstupy rozšírenej reality	7
2.5	Hololens 2	10
3	Haptická odozva	12
3.1	Spôsoby riešenia haptickej odozvy	12
3.2	Stratos Explore	13
3.3	Ako ruka cíti neviditeľné vzduchové vzruchy	14
3.4	Amplitúdová a časopriestorová modulácia	15
3.5	Interakčné zóny a formačné faktory	17
3.5.1	Rozlíšenie produktov Ultrahaptics	19
3.5.2	Ako funguje fázované pole	19
4	Návrh výslednej aplikácie	21
4.1	Poznávanie zariadení	21
4.2	Počiatky vývoja	21
4.3	Komunikácia medzi zariadeniami	23
4.4	Formovanie výslednej aplikácie	25
5	Implementácia	26
5.1	Stratos Explore	26
5.2	Hololens 2	28
5.3	Architektúra klient – server	32
5.4	Spustenie výslednej aplikácie	33
6	Užívateľské testy	35
6.1	Popis priebehu testov	35
6.2	Získavanie výsledkov	35
6.3	Výsledky testov	36
6.4	Možné zlepšenia	38
7	Záver	40
	Literatúra	41

A	Moje otázky pre testerov	44
B	Otázky UEQ	46
C	Obsah priloženého pamäťového média	47

Kapitola 1

Úvod

Užívateľské rozhrania sa stále vyvíjajú aj z dôvodu toho že stále viac pracujeme a žijeme vo virtuálnom svete, alebo používame rôzne technologické nástroje, ktoré potrebujeme nejak ovládať. Dôležitou časťou užívateľských rozhraní je odozva systému. Keby sme nemali odozvu, nevedeli by sme napríklad či sme stlačili nejaké tlačidlo, alebo by sme nevedeli že sa niečo načítava keby sme nedostali spätnú väzbu.

Spätná väzba môže byť rozličných typov: obrazová, ako napríklad zmena farby virtuálneho tlačidla alebo chybový výpis, zvuková, ako keď pripojíme zariadenie k počítaču, hmatová, teda haptická, v dnešnej dobe popularizovaná rôznymi video hernými ovládačmi, ale aj čuchová či chuťová, tie sa však používajú pri technike len výnimočne.

Táto práca sa zaoberá aj rozšírenou realitou. V rozšírenej realite je odozva len vizuálna, poprípade zvuková. Hmatová odozva by mohla urobiť rozšírenú realitu zaujímavejšou pre užívateľa. Preto používam zariadenie Stratos Explore, ktoré pomocou ultrazvukových vln spôsobuje tlak v podobe vibrácií na pokožke a tak vyvoláva haptický vnem. Toto spojenie demonštrujem v dvoch aplikáciách, kde v jednej je možné rôzne transformovať hologram gule, pritom keď sa užívateľova ruka prekrýva s guľou, je na ruke možné cítiť haptickú odozvu. V druhej aplikácii, ktorá je mini hrou sa virtuálna guľa správa ako lopta a odráža sa od stien, podlahy a vašej ruky. Cieľom hry je pomocou lopty rozpučiť chrobáky.

V kapitole rozšírená realita 2 popisujem čo to rozšírená realita je, jej históriu, aké prvky obsahuje a konkrétne sa venujem aj zariadeniu Hololens 2. Kapitola haptická odozva 3, vysvetľuje čo to je haptická odozva, rôzne spôsoby vytvárania haptickej odozvy a ako funguje zariadenie Stratos Explore. Po nej nasleduje kapitola návrh 4, ktorá hovorí o tom, ako som postupoval pri návrhu a tvorbe tejto práce. Nasledovaná je kapitolami o implementácii 5, užívateľských testoch 6 a záver 7.

Kapitola 2

Rozšírená realita

Rozšírená realita si dáva za cieľ vytvoriť priame, automatické a hodnotné prepojenie medzi fyzickým svetom a elektronickými informáciami. Poskytuje jednoduché a bezprostredné užívateľské rozhranie k elektronicky doplnenému fyzickému svetu. Táto technológia má obrovský potenciál v oblasti užívateľských rozhraní hlavne keď sa pozrieme na veľký vzrast počtu interakcií človeka s počítačom najmä kvôli internetu, sociálnym sieťam a mobilným telefónom.

Veľký posun v oblasti narábania s počítačom a umiestnením v priestore zaznamenala virtuálna realita hlavne v oblasti video hier ale ešte sa nepresadila masám.

Rozšírená realita by mohla túto situáciu zmeniť a znovu definovať to, akým spôsobom prehliadame informácie a ako ich tvoríme. Táto metafora užívateľských rozhraní umožňuje technológiám formovať fascinujúcu a futuristickú tvorbu aplikácií. Rozšírená realita dokáže vytvoriť vrstvu počítačom generovaných informácií na obraze skutočného sveta a tak umocniť vnímanie a poznávanie v nových smeroch [22, Kapitola 1].

2.1 Definícia a vnímanie

Virtuálna realita (VR) sa snaží zasadiť užívateľa do kompletne počítačom generovaného sveta, pričom rozšírená realita (AR) chce prezentovať informácie, ktoré budú priamo vykreslené do fyzického sveta. Rozšírená realita ide za to urobiť počítače mobilné, snaží sa prepojiť skutočný a virtuálny svet. V rozšírenej realite sa digitálna informácia užívateľovi má zdať súčasťou reálneho sveta.

Najširšie prijímanou definíciou toho čo je rozšírená realita bola navrhnutá Azumou v roku 1997 viz [2]. Podľa Azumi, musí mať rozšírená realita tieto tri charakteristiky:

- kombinuje reálne a virtuálne,
- je interaktívna v reálnom čase,
- je registrovaná v 3D.

Táto definícia nepopisuje výstupné zariadenie, ako napríklad náhlavný displej, ani ne-limituje rozšírenú realitu na vizuálne média. Definícia zahŕňa kontrolu v reálnom čase a registráciu priestoru, čo znamená vyrovnanie sa s korešpondujúcou virtuálnou a reálnou informáciou.

Názory na to čo kvalifikuje výkon a výkon v reálnom čase sa líšia podľa človeka a aplikácie. Interaktivita znamená, že medzi človekom a počítačom, a medzi počítačom a človekom

sa operácie vykonávajú v krátkom časovom úseku. Užívateľ naviguje scénu rozšírenej reality a ovláda zážitok. Systém na oplátku prijíma užívateľský vstup na základe sledovania užívateľovho hladiska a polohy. Registruje pozíciu v skutočnom svete s virtuálnym obsahom a potom prezentuje užívateľovi situovanú vizualizáciu.

Kompletný systém rozšírenej reality potrebuje najmenej tri komponenty: sledovaciu komponentu, registračnú komponentu a vizualizačnú komponentu. Štvrtá komponenta, model priestoru, ukladá informácie o reálnom svete a o virtuálnom svete. Model reálneho sveta je požadovaný aby slúžil ako referencia na sledovaciu komponentu, ktorá musí určiť pozíciu užívateľa v skutočnom svete. Model virtuálneho sveta pozostáva z obsahu používaného pre úpravu alebo rozšírenie reality. Obe časti priestorového modelu musia byť registrované v jednej súradnicovej sústave viz [22, Kapitola 1].

2.2 Stručná história rozšírenej reality

Prvé anotácie fyzického sveta s počítačom generovanými informáciami sa objavili v šesťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia. Ivan Sutherland môže byť kreditovaný za začiatok disciplíny z ktorej vznikla virtuálna a rozšírená realita. V roku 1965 predpovedal takzvaný *ultimate display* v eseji viz [24], ktorá obsahovala známy výrok, že perfektný displej by bola miestnosť, v ktorej by mohol počítač kontrolovať existenciu hmoty. Na stoličke v tejto miestnosti by sa dalo sedieť. Putá zobrazené v takej miestnosti, by púťali a guľka zo zbrane by bola smrteľná. Správne naprogramovaný takýto displej by bolo ako vkročiť do Krajiny zázrakov, kam vkročila Alica.

Krátko na to Sutherland skonštruoval prvý VR systém. V roku 1968 dokončil prvý náhlavný displej. Kvôli jeho váhe, musel byť visieť zo stropu a dostal príznačnú prezývku „Sword of Damocles“, alebo Damoklov meč, ako vidieť na obrázku 2.1.

Vzrast vo výpočtovej výkonnosti bol v osemdesiatych a deväťdesiatych rokoch nutný pre rozšírenú realitu aby sa stala samostatnou oblasťou výskumu. Počas sedemdesiatych a osemdesiatych rokov, Myron Krueger, Dan Sandin, Scott Fisher a spol. experimentovali s mnohými konceptami miešania ľudskej interakcie s počítačom generovanými prekrytiami na videu pre interaktívne zážitku umenia viz [22, Kapitola 1].

V roku 1992 sa zrodil termín „augmented reality“ teda rozšírená realita. Tento termín sa prvý krát objavil v práci Caudella a Mizella (1992) v Boeingu, ktorá sa pokúšala asistovať pracovníkom v továrni na lietadlá, tým že zobrazovala schému zapojenia káblov do náhlavného priehľadného displeja viz [3].

V roku 1993 Fitzmaurice vytvoril prvý displej, ktorý si bol vedomý priestoru, na držanie v rukách, ktorý slúžil ako predchodca rozšírenej reality do rúk. Chameleon pozostával zo LCD (liquid-crystal display) obrazovky. Obrazovka znázorňovala video výstup z SGI grafickej stanice danej doby a bola sledovaná v priestore na základe magnetického sledovacieho zariadenia viz [5].

V roku 1996, Schmalstieg a spol. vyvinuli Studierstube, prvý kolaboratívny systém rozšírenej reality. S týmto systémom mohlo mnoho používateľov vnímať virtuálne objekty v rovnakom zdieľanom priestore. Každý užívateľ mal náhlavný displej a mohol vidieť perspektívne správne stereoskopické obrázky zo svojho samostatného pohľadu. Jedným zo spôsobov použitia tejto aplikácie bol geometrický kurz, ktorý bol úspešne testovaný vysokoškolskými študentami viz [21].

V 1997 roku Feiner a spol. vyvinuli prvý vonkajší systém pre rozšírenú realitu zvanú Touring Machine na Kolumbijskej univerzite. Toto zariadenie tiež využívalo náhlavný prie-



Obr. 2.1: Sutherland a prvý systém virtuálnej reality zvaný Damoklov Meč. Systém visí zo stropu, lebo bol moc ťažký, z toho aj názov.

Zdroj: <https://4.bp.blogspot.com/-JaRJPiEA0As/VtbYLhmX3KI/AAAAAAAAAiU/qEXGGCBwh-8/s1600/Ivan%2BSutherland%2527s%2Bfirst%2BVVR%2Bdevice%2B%2528The%2BSword%2Bof%2BDamocles%2529.png>

hladný displej s GPS a sledovaním orientácie. Produkovanie 3D grafiky pomocou tohto systému vyžadovalo batoh s počítačom, senzormi a tablet pre užívateľský vstup viz [4].

V roku 1998 Raskar a spol. na Univerzite v Severnej Karolíne prezentoval the Office of the Future, teleskopický systém postavený na myšlienke štrukturovaného skenovania svetla a projektor – kamera systémov. Aj keď potrebný hardware nebol veľmi praktický pre danú dobu, podobné technológie, ako napríklad senzory hĺbky a pár kamera – projekcia, hrajú významnú rolu v rozšírenej realite a iných oblastiach dnešných technológií viz [20].

Do roku 1999 nebol dostupný žiadny systém rozšírenej reality mimo špecializovaných laboratórií. Táto situácia sa zmenila keď Kato and Billinghurst zverejnili ARToolKit, prvú open-source software platformu pre AR. Obsahovala 3D sledovaciu knižnicu používajúcu čierne - biele rámové značky, ktoré mohli byť vytlačené na tlačiarni viz [9].

Po roku 2000 sa začali rapídne rozvíjať mobilné telefóny a mobilné zariadenia. V roku 2003 Wagner a Schmalstieg prezentovali prvý systém rozšírenej reality do ruky, ktorý bežal autonómne na PDA viz [26].

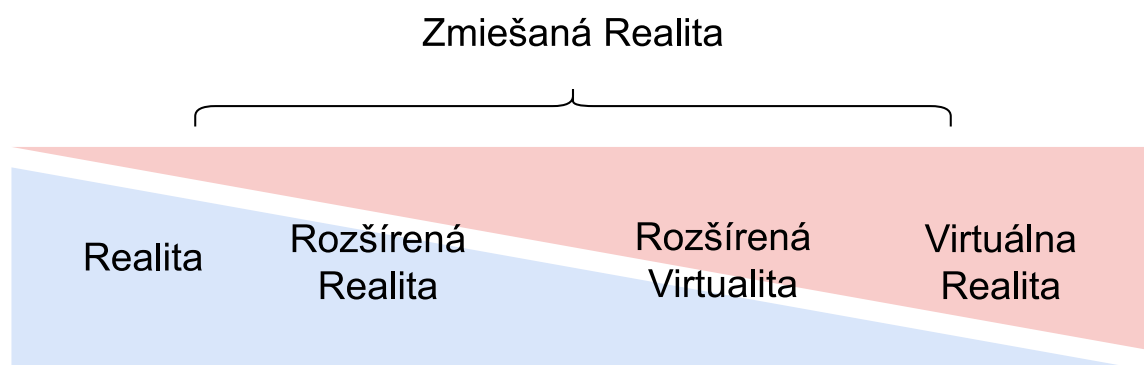
V roku 2008 sa prvýkrát objavil skutočne použiteľný sledovací (tracking) systém pre chytré telefóny, ktorý sa stal predchodcom pre populárny nástroj **Vuforia**¹ pre vývojárov pre rozšírenú realitu. Medzi významné úspechy v posledných rokoch patria systém paralelného sledovania a mapovania (PTAM), ktoré dokáže sledovať bez prípravy aj v neznámom prostredí a systém KinectFusion, ktorý vytvára detailné 3D modely z lacných senzorov hĺbky [13, 22].

¹<https://developer.vuforia.com/>

2.3 Kontinuum rozšírenej reality

Priestor medzi realitou a virtuálnou realitou je možné opísať, ako kontinuum, kde užívateľ virtuálnej reality je takmer úplne ponorený do iného sveta a oddelený od reality. Priestor medzi realitou a virtuálnou realitou sa nazýva **zmiešaná realita**, ako znázorňuje obrázok 2.2. Tento termín je niekedy preferovaný nad rozšírenú realitu, lebo je viac obecný.

Rozšírená realita, sa nachádza na škále realít, bližšie k realite, naproti nej stojí **rozšírená virtualita**, ktorá obsahuje viac virtuálneho, ako reálneho [22, Kapitola 1].



Obr. 2.2: Kontinuum zmiešanej reality.

2.4 Výstupy rozšírenej reality

AR displeje sa líšia od bežných displejov, pretože musia kombinovať virtuálne a reálne podnety. Medzi hlavné používané výstupy patria zvuk a obraz, čuchové a chuťové výstupy sa veľmi nepoužívajú, hmatové výstupy sú vo výskume a vývoji. Zaujímavosťou je zariadenie Nosulus Rift² vyvinutý pre hru South Park, ktoré pôsobí na čuch, tým že vypúšťa plyny do užívateľovho nosa.

Ďalej budem popisovať hlavne náhlavné systémy rozšírenej reality ako Hololens 2 s ktorým v rámci bakalárskej práce pracujem.

Obraz

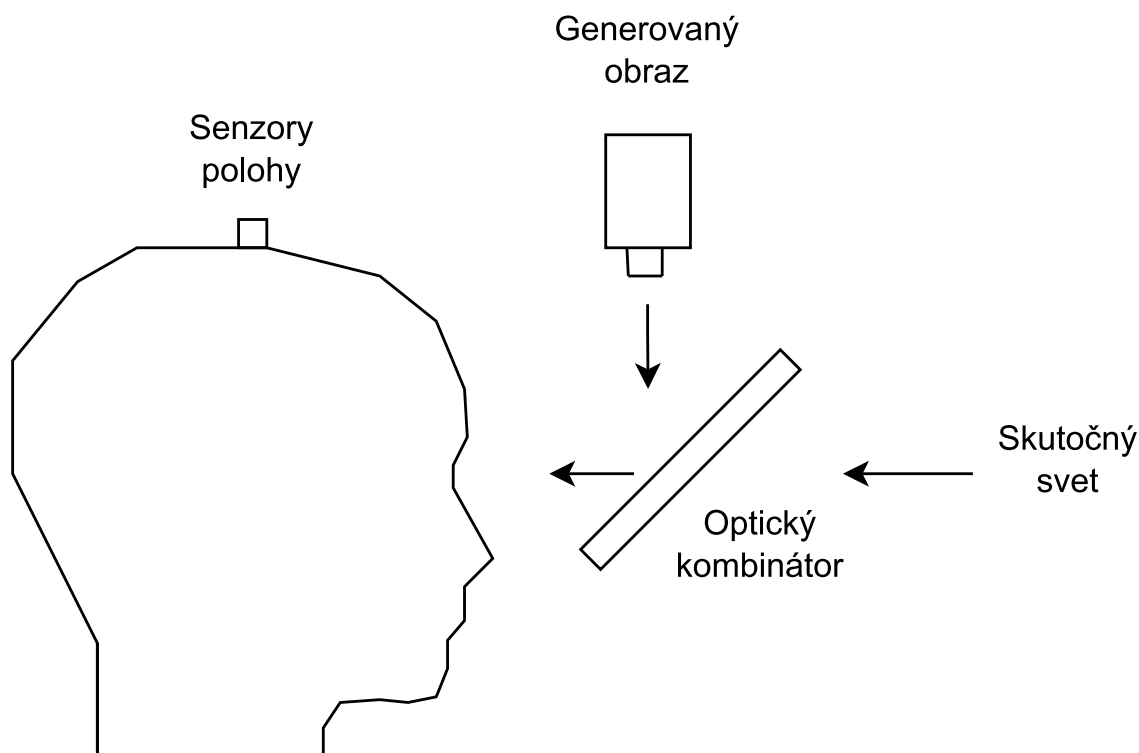
Rozšírená realita by mala zobrazovať reálne aj virtuálne objekty a vzniklo viacero spôsobov ako riešiť tento problém, napríklad opticky priehľadný displej (optical see-through (OST)), video priehľadný displej (video see-through (VST)) a priestorová projekcia (spatial projection) viz [22, Kapitola 2].

Opticky priehľadný displej

Tento spôsob zobrazenia sa spolieha na optický element, ktorý je čiastočne transparentný a čiastočne reflektívny aby spojil reálne a virtuálne, ako je vidieť na obrázku 2.3. Jedným z príkladov takýchto prvkov je polo postriebrené zrkadlo. Toto zrkadlo prepustí dosť svetla z reálneho sveta, tak aby bolo možné vidieť reálny svet priamo a zároveň toto zrkadlo odráža

²<https://www.techtimes.com/articles/174579/20160822/forget-oculus-rift-meet-nosulus-rift-this-wearable-tech-will-let-you-smell-fart-in-new-south-park-game.htmj>

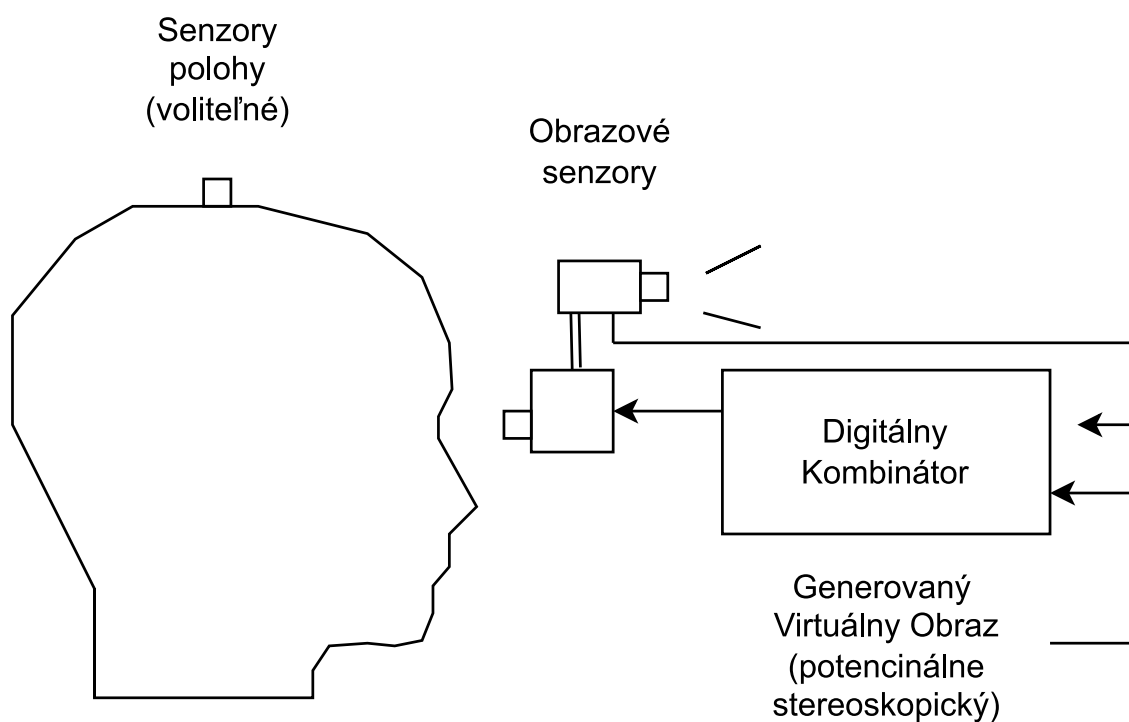
obrázky generované počítačom. Tento spôsob zobrazovanie využíva aj zariadenie Hololens 2 viz [22, Kapitola 2].



Obr. 2.3: Optický priehľadný displej používa optický prvok na kombinovanie pohľadu užívateľa na reálny svet s počítačom generovaným obrazom.

Video priehľadný displej

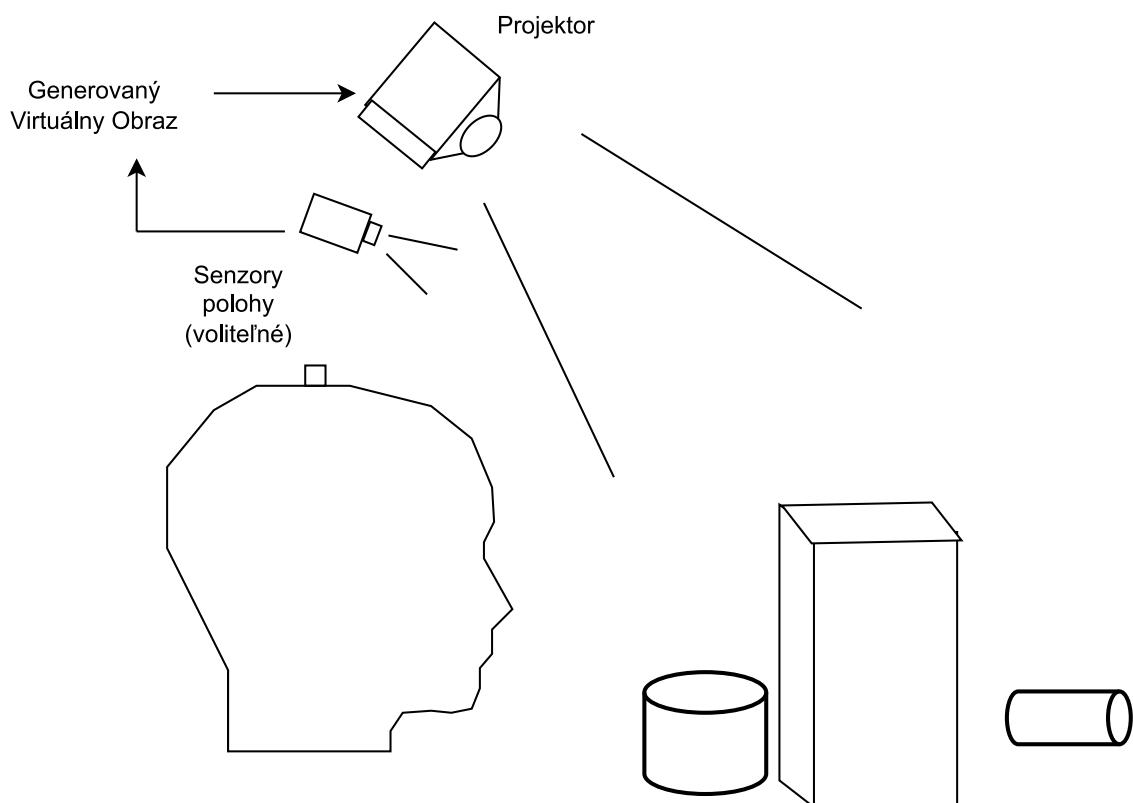
Video see-through displeje dosahujú prepojenie virtuálneho a skutočného sveta elektronicke. Skutočný svet je zachytávaný kamerou a záznam spracovávaný grafickým procesorom, ako ukazuje obrázok 2.4. Tento procesor potom kombinuje obraz z kamery a počítačom generovanými často to prebieha kopírovaním obrazu z kamery do framebufferu ako pozadia a virtuálne objekty do popredia. Tento obraz je prezentovaný pomocou konvenčného zobrazovacieho zariadenia viz [22, Kapitola 2].



Obr. 2.4: Video priehľadný displej zachytáva skutočný smer kamerou a elektronicky modifikuje výsledný obraz použitím grafického procesoru, aby odoslal kombinovaný virtuálny obraz užívateľovi.

Priestorová projekcia

Tento princíp využíva na zobrazenie projektor, ktorý obraz zobrazuje na objekty skutočného sveta, nepotrebuje kombinátor, možno vidieť na obrázku 2.5 viz [22, Kapitola 2].



Obr. 2.5: Priestorová projekcia premieta obraz priamo na objekty skutočného sveta.

2.5 Hologens 2

Hololens 2 je náhlavné zariadenie rozšírenej reality od spoločnosti Microsoft. Obsahuje priehľadné holografické šošovky s rozlíšením 2k, holografickou hustotou väčšou ako 2500 svetelných bodov na radián. 4 kamery na sledovanie pozície hlavy, 2 IR kamery na sledovanie očí, hĺbkový senzor. Ďalej mikrofóny, reproduktory s priestorovým zvukom, sledovanie rúk a očí. Sledovanie v šiestich rozmeroch (6DoF tracking), mapovanie okolia, možnosť zaznamenávať virtuálne objekty aj reality pomocou kamery. Na výpočty používa Qualcomm Snapdragon 850 procesor, druhú generáciu na mieru spravenú holografickú procesorovú jednotku, 4 GB DDR4 pamäte. Na pripojenie je možné použiť wi-fi, Bluetooth a USB C konektor.³ Spôsoby, akými je možné manipulovať s hologramami a celkovo ovládať zariadenie, je možné nájsť v Hololens 2 dokumentácii⁴. V mojej práci využívam manipuláciu s objektami pomocou ich chytenia, ale aj možnosť takzvaného air tap, ktorý umožňuje interakciu s objektom, ktorý sa nachádza ďalej od ruky užívateľa.

³<https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>

⁴<https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-basic-usage>



Obr. 2.6: Hololens 2.

Zdroj: https://media.itpro.com/image/private/s--XbW1Bhtd--/v1572454706/itpro/2019/10/hololens_2_hands-on_3.jpg

Kapitola 3

Haptická odozva

V skutočnom svete interakcia s objektami prebieha typicky pomocou dotyku. V rozšírenej realite je toto problém, kde s reálnymi objektami môžem manipulovať a používať pri tom hmat, ale čo sa týka hologramov, je potrebné simulovať ich hmatateľnosť. Zariadenie, ako Hololens 2 používa ohraničujúcu krabicu (bounding box) objektov na zvýraznenie možnej manipulácie a zvuky pri manipulovaní s hologramom.

3.1 Spôsoby riešenia haptickej odozvy

Tohto problému sa chopilo veľa výskumných skupín a každý sa tento problém snaží riešiť trochu iným spôsobom a zariadením, zariadenia sú založené na aktívnych materiáloch schopných vnímania a hmatovej odozvy. Existuje rozdelenie do skupín, podľa prístupu k tomuto problému.

Dotykové zariadenia

Prvou z nich sú haptické prostredia založené na dotyku. Dnes sú to najbežnejšie mobily a tablety, ale existujú aj sofistikovanejšie povrchy, ktoré prispôbujú koeficient trenia, skúmali ich napríklad Ayyildiz a spol. viz [1]. Vo výskume sú aj zariadenia, ktorých povrch je 3D topológia schopná haptickej deformácie, ako systém inFORM viz [10].

Zariadenia, ktoré je možné nosiť

Ďalšou skupinou sú zariadenia, ktoré je možné nosiť, respektíve si ich obliecť, ako rukavice, vesty a topánky. Tieto zariadenia najčastejšie využívajú nejakú formu vibrácií a zmeny tvaru. Napríklad rukavice pre virtuálnu realitu od spoločnosti DextaRobotics¹, alebo haptická vesta viz [6].

Zariadenia pripevnené na kožu

Zariadenia, ktoré je možné pripevniť na kožu sú ďalšou skupinou, podobnou predchádzajúcej. Tieto zariadenia, sú väčšinou tenšie a nerušia človeka pri pohybe. Využívajú aktívne materiály podobné gume, alebo látke. Využívajú vodivé a elastické materiály. Ako vnem slúžia napríklad vibrácie, nťahovanie a sťahovanie, alebo zmena teploty. Ako príklad týchto zariadení využitých pre rozšírenú realitu je výskum, v ktorom Pedro Lopes a spol. využili

¹<https://www.dextarobotics.com/>

elektrickú simuláciu svalov. Odozvu dokázali požiť pri otáčaní zápästia, stláčaní virtuálneho tlačidla a napríklad aj tlačení virtuálneho gauča. Pri tom všetkom nebol testovací užívateľ takmer vôbec obmedzovaný zariadeniami na haptickú odozvu, viz [11]. Alebo aj elektroaktívne mäkké hmatové rozhranie pre zariadenia pripevnené na kožu založené na polyméry od Seongcheol Mun a spol. viz [12].

Zariadenia využívajúce vzduch

Skupina zariadení označovaných ako mid-air využíva nekontaktnú odozvu pomocou vzduchu. Môžu to byť zariadenia využívajúce ultrazvuk, ako Stratos Explore, alebo zariadenia využívajúce prúd a tlak vzduchu, laser a ďalšie. Ako napríklad Multimodal acoustic trap display (MATD) viz [7], AIREAL viz [23], alebo výskum Jae-Hoon Jun a spol. viz [8].

Neuro – haptické zariadenia

A poslednou skupinou sú neuro – haptické zariadenia, implantované do ľudského tela, či už do mozgu, alebo rúk, či na nervové periférie viz výskum Daniel W. Tan a spol. [25]. V poslednej dobe sa v tejto oblasti koná rapídny výskum, ako môžeme vidieť napríklad pri firme Neuralink².

Viac o typoch hmatovej odozvy viz [27].

3.2 Stratos Explore

Stratos Explore³ je zariadenie spoločnosti Ultraleap. Na imitovanie hmatateľnosti hologramov využíva systém ktorý vyvinula spoločnosť Ultrahaptics, ktorá dnes patrí pod Ultraleap. Názov plynie z ultrazvukových vln, ktoré sú vytvárané dvojrozmerným poľom 256 ultrazvukových meničov poukladaných do štvorcového tvaru. Toto zariadenie obsahuje aj rám, ktorý drží reproduktory pohromade, zo spodnej strany je umiestnený plošný spoj s čipmi, na jednej strane rámu je Leap Motion Controller, čo je zariadenie na sledovanie rúk.

²<https://neuralink.com/>

³<https://www.ultraleap.com/product/stratos-explore/>



Obr. 3.1: Zariadenie Stratos Explore.

Ako funguje technológia Ultrahaptics

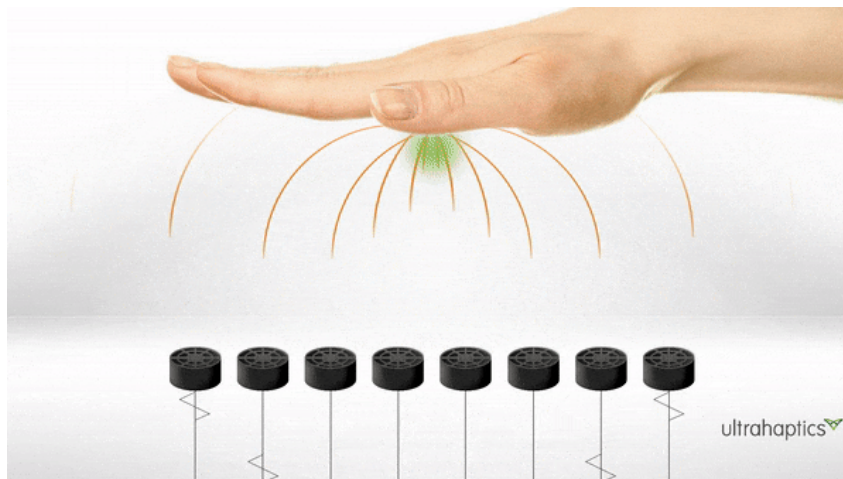
Technológia firmy Ultrahaptics, ktorá vytvára haptickú odozvu vo vzduchu využíva ultrazvuk (zvukové frekvencie, ktoré presahujú hranicu počuteľnú ľudským uchom) aby vytvorili hmatový vnem priamo na ruke. Ultrahaptics vytvorilo algoritmy, ktoré vytvárajú požadované ultrazvukové vlny a modulačné techniky k tomu potrebné s relatívne nízkymi požiadavkami na hardware.

Ultrahaptics používajú fázové polia ultrazvukových reproduktorov, aby vytvorili časované vlny, ktoré sa stretnú v jednom bode v priestore.

3.3 Ako ruka cíti neviditeľné vzduchové vzruchy

Súvislé nemenné vlny tvoria sústredný bod frekvencie, ktorá je moc vysoká, aby bola citelná ako hmatový vnem. Na to aby bol bod ohniska citelný, je potrebné buď meniť intenzitu jeho vybrácií – **amplitúdová modulácia**, alebo meniť jeho polohu – **časopriestorová modulácia**. Ako príklad 40 kHz intenzita ultrazvuku môže byť modulovaná Sínusoidou oveľa nižšej frekvencie, tak aby bolo cítiť tlak v bode ohniska.

Pole ultrazvukových reproduktorov dokáže meniť pozíciu a silu ohniskového, alebo **kontrolného bodu**, dosť rýchlo na to, aby vyvolalo haptický vnem. Taktiež umožňuje vytvoriť niekoľko kontrolných bodov súčasne.



Obr. 3.2: Pretnutie zvukových vln z ultrazvukových meničov, pretínajúce sa v jednom bode.
Zdroj: <https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2018/07/ultrahaptics-phased-array.gif>

Povrch kože je pokrytí citlivými nervovými zakončeniami zvanými mechanoreceptory, ktoré reagujú na dotyk, tlak a ťah. Veľké množstvo týchto receptorov sa nachádza na miestach bez vlasov a chlupov.

V kombinácii s 3D, ruku sledujúcou kamerou (Leap Motion kamerový modul) môžeme sledovať ruku a umiestniť kontrolné body na dlaň a prsty. Sú to tieto haptické kontrolné body, ktoré stimulujú mechanoreceptory a vytvárajú haptický vnem. Zložitejšie útvary, ako úsečky a kruhy, sa dajú vytvoriť rýchlym pohybom kontrolných bodov, alebo použitím väčšieho počtu bodov.

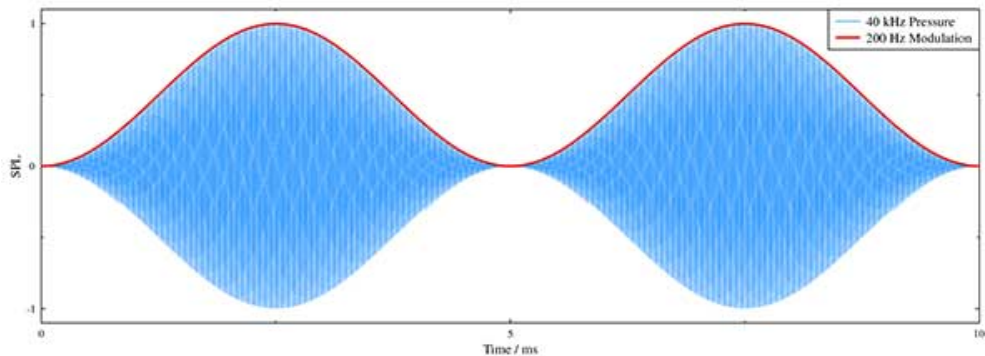
3.4 Amplitúdová a časopriestorová modulácia

Príklad vyššie ukazuje, ako je možné kontrolovať intenzitu kontrolného bodu použitím sínusovej vlnovej obálky. Toto sa nazýva Amplitúdová modulácia. Ďalšia možnosť je udržať intenzitu kontrolného bodu rovnakú a rýchlo meniť jeho pozíciu na koži. Pretože kontrolný bod sa pohybuje každým bodom cesty, tlak je efektívne modulovaný a citeľný. To je časopriestorová modulácia.

Na obrázku 3.4 je možné vidieť obe techniky ilustrované na príklade, kde je vytvorený kruhový vnem použitím a) amplitúdovej modulácia a b) časopriestorovej modulácie. Pri amplitúdovej modulácii využívame skupinu kontrolných bodov, pulzujúcich po obvode kruhu. Časopriestorová využíva jeden bod, ktorý sa hýbe po obvode kruhu.

Ultrahaptics solver

Srdcom technológie Ultrahaptics je algoritmus na počítanie intenzity a fáze každého reproduktora, pre každý kontrolný bod. Keď je použitých viac kontrolných bodov, ich polia sa môžu deštruktívne prekrývať medzi sebou a znižovať intenzitu. Keďže fáze 40 kHz je pre vnem nepodstatná, technológia Ultrahaptics využíva algoritmus na optimalizovanie fáz jednotlivých kontrolných bodov, aby sa polia konštruktívne miešali najviac ako je to možné aby vytvorili najintenzívnejšie vnemy.



Obr. 3.3: Sínusoidy rôznych frekvencií.

Zdroj: <https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2018/07/Modulated-Pressure.jpg>

Toto vzduchové vlnenie pôsobí na kožu človeka a vytvára hmatový vnem. Zariadenie toho dosahuje tým že sleduje ľudskú ruku nad týmto zariadením pomocou zariadenia Ultra-leap, v Stratos Explore je nahraný program v ktorom sú uložené informácie o virtuálnom objekte, ktorý by sa mal nachádzať nad zariadením, keď sa ruka človeka nachádza v oblasti, v ktorej je virtuálny objekt, zariadenie vypúšťa ultrazvukové vlny na miesto kolízie ruky s hologramom. Vlny z jednotlivých reproduktorov sú vysielané takým spôsobom, aby sa pretli v mieste dotyku hologramu s rukou[14].

Amplitúdová modulácia

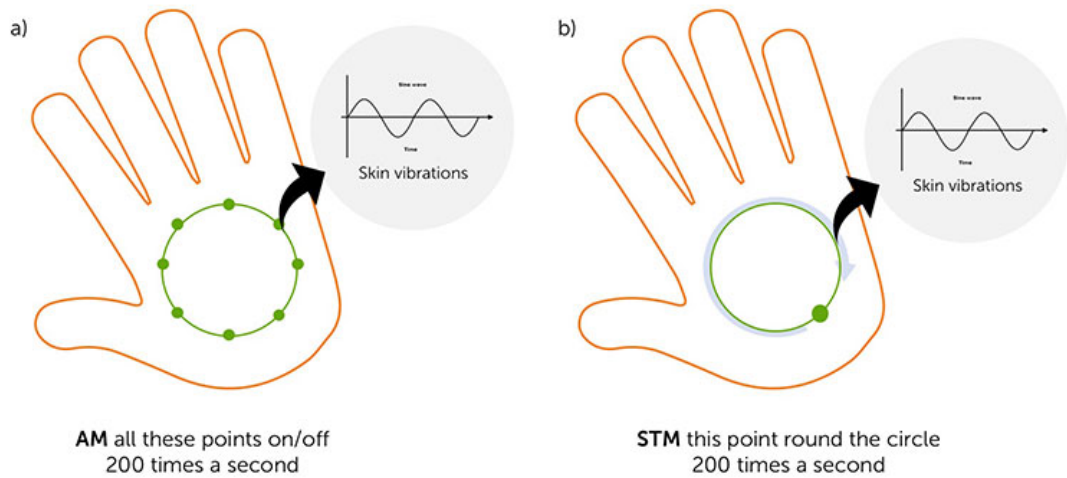
Amplitúdová modulácia (AM) je modulácia amplitúdy signálu, pomocou iného signálu.

Originálna technológia firmy Ultrahaptics modulovala ultrazvukové vlny zapínaním a vypínaním dosť rýchlo na to, aby stimulovala mechanoreceptory citlivé na vibrácie. Tieto pulzy sú frekvencií od 40 do 400 Hz. Zapínanie a vypínanie ultrazvuku, môže byť nepríjemné na sluch, takže skutočné pulzy sú zjemňované sínusoidou, ako môžete vidieť na obrázku 3.3.

Ultrahaptics používa termín amplitúdová modulácia ako referenciu na prvú generáciu a aplikačné programové rozhranie. To využíva pevnú vlnovú dĺžku a vyžaduje, aby aplikácia posielala zmeny keď chce zmeniť pozíciu, alebo intenzitu kontrolného bodu. Pri požití tohto sa zmena prejaví, len v maximálnej, alebo minimálnej intenzite kontrolného bodu [16].

Time Point Streaming

Time Point Streaming je pokročilá funkcionálna dostupná pre Stratos platformu. S Time Point Streaming aplikačným rozhraním, je možná časopriestorová modulácia. S touto technológiou je možné meniť pozíciu a intenzitu oveľa vyššou rýchlosťou ako pri aplikačnom rozhraní Amplitúdová modulácia. To má je výhodou pre plynulejšie prechody medzi zmenami, rýchlejšie zmeny, tvorbu komplikovanejších senzácií a iné funkcionality [18].



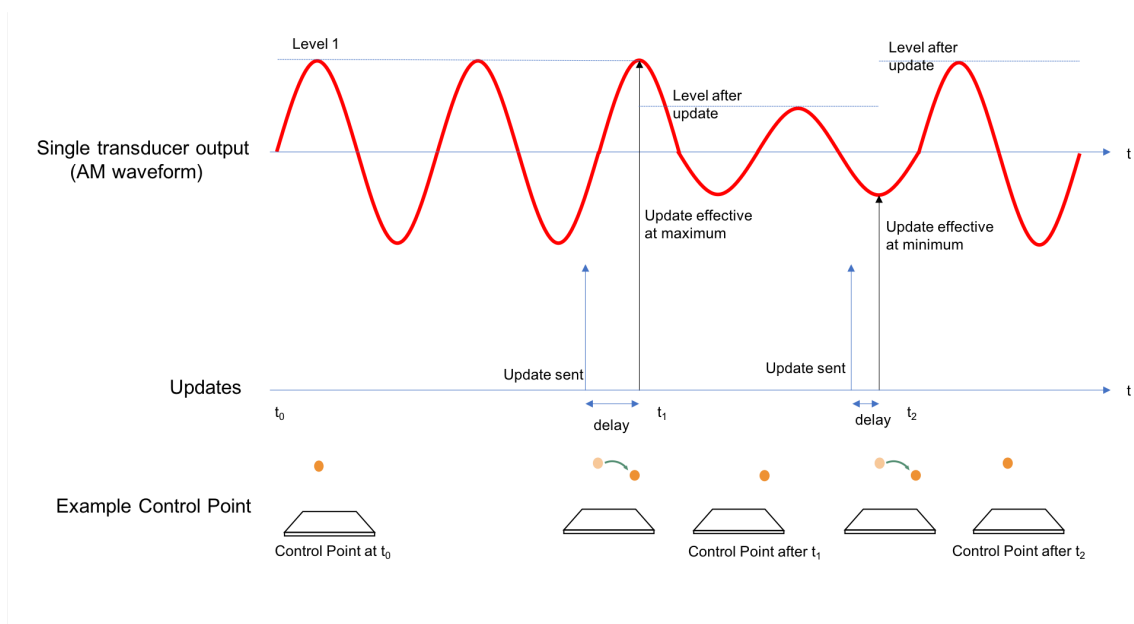
Obr. 3.4: Amplitúdová a časopriestorová modulácia.

Zdroj: <https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2018/07/am-stm-hand-graphic.jpg>

3.5 Interakčné zóny a formačné faktory

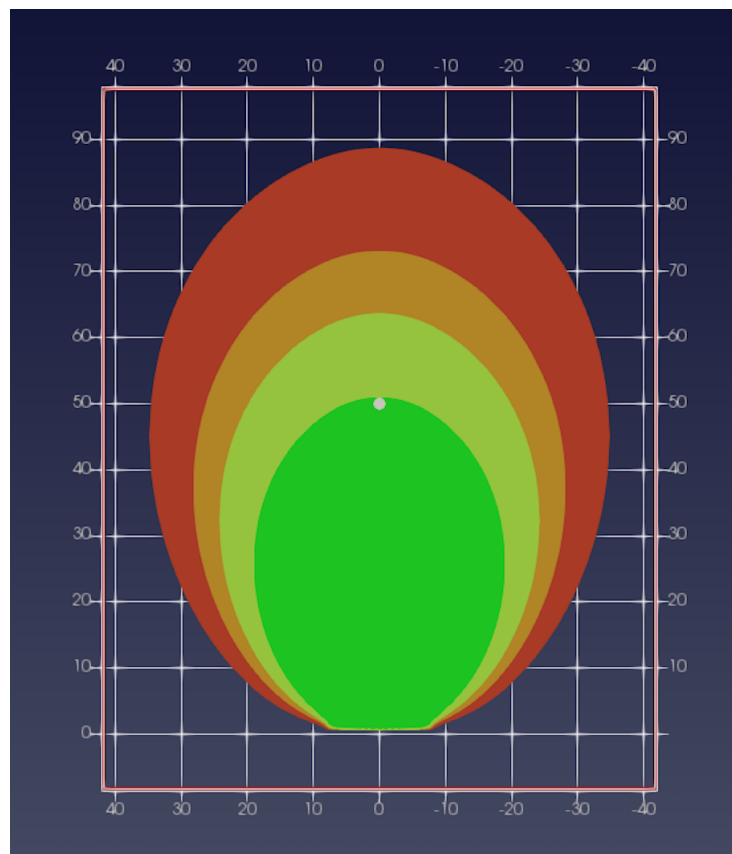
Produkty Ultrahaptics dovoľujú vytvárať vlastné haptické aplikácie. Základnou časťou ich zariadení je pole ultrazvukových meničov, ktoré sú synchronizované, aby pred sebou vytvorili akustickú oblasť. Sústredená energia v tejto oblasti vytvára haptickú odozvu, ktorú je možné cítiť. Táto oblasť sa nazýva **interakčná zóna**. Jej veľkosť a tvar závisí od počtu meničov a ich pozície.

Interakčné zóny môžu byť simulované, aby bolo možné ukázať relatívnu silu senzácie, ktorú bude možné cítiť. Na obrázku 3.6 je zelenou farbou zóna najlepšej kvality [15].



Obr. 3.5: Amplitúdová modulácia. Obrázok znázorňuje aj čas, v ktorom je možné meniť pozíciu kontrolného bodu.

Zdroj: <https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2018/07/AMupdates.png>



Obr. 3.6: Interakčná zóna pre Stratos Explore. Mierka je cm. Zelená znamená zónu najvyššej kvality.

Zdroj: https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2018/07/USX_centre.png

3.5.1 Rozlíšenie produktov Ultrahaptics

Stratos Explore obsahuje 256 ultrazvukových meničov a **Leap Motion** kamerový modul. Kamerový modul používa infračervené svetlo a viditeľné svetlo pri určení pozície ruky, typicky je jeho rezolúcia pod milimeter v rozsahu do 80 centimetrov pre ovládač (driver) **Orion**. Počet snímkov za sekundu sa pre tento modul pohybujú od 20 do 200, záleží od počítača ku ktorému je pripojený.

Veľkosť kontrolného bodu je približne o priemere 8,5 mm. Meniče majú stabilnú frekvenciu 40 kHz, rýchlosť zvuku je asi 340 m/s pri izbovej teplote.

Rýchlosť zmeny haptickej senzácie závisí od použitej technológie. Pri amplitúdovej modulácii pre modulačnú frekvenciu 200 Hz je to maximálne 400 Hz. Pri Time Point Streaming je to 40 kHz [17].

3.5.2 Ako funguje fázované pole

V tejto časti je možné sa dozvedieť niečo viac, ako funguje pole ultrazvukových meničov. Ako sa upravuje natočenie poľa a sústredenie poľa do bodu.

Každý prvok poľa Ultrahaptics produkuje sínusoidný signál. Frekvencia signálu f sa zhoduje s rezonančnou frekvenciou meniča. Tento typ akustického signálu sa označuje ako harmonický a matematické simulácie robí priamočiare.

Natočenie poľa

Aby bolo možné natočiť pole do zvoleného smeru, je potrebné potrebné použiť prepočítané oneskorenie pre každý prvok. Taktiež je potrebné použiť fázový posuv. Uhol θ_s udáva smer, na ktorý je pole natočené, v prípade 0, miery priamo hore.

Oneskorenie Δt pre susediace prvky pre natočenie sa dá vypočítať nasledovne:

$$\Delta t = \frac{p \cdot \sin\theta_s}{c}$$

, kde c je rýchlosť zvuku a p je umiestnenie meniča. Rovnica na výpočet fázového posuvu vyzerá takto:

$$\varphi^{rad} = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t$$

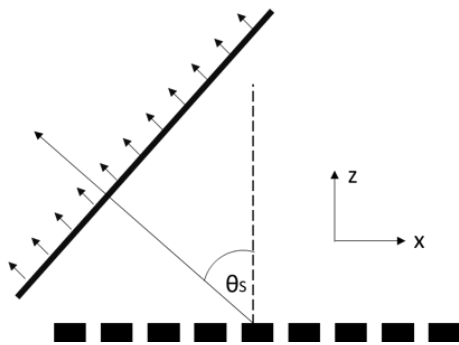
Sústredenie poľa

Sústredenie umožňuje vysielaným signálom z jednotlivých prvkov konvergovať do jedného bodu, čo vyústi do miesta s vysokým tlakom. Pre pole Ultrahaptics je tento bod označovaný aj ako **fokálny**, alebo **kontrolný bod**.

Na dosiahnutie sústredenia, sú počítané fázy pre jednotlivé body. Najprv vypočítame vzdialenosť fokálneho bodu od meniča a potom relatívne časové zmeny medzi jednotlivými prvkami viz [19].

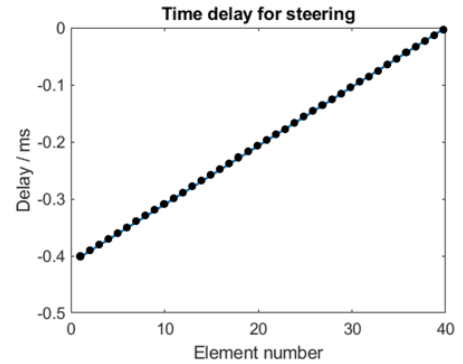
$$t_j = \frac{(d_j - d_o)}{c}$$

$$\varphi_j^{rad} = 2\pi \cdot f \cdot t_j$$



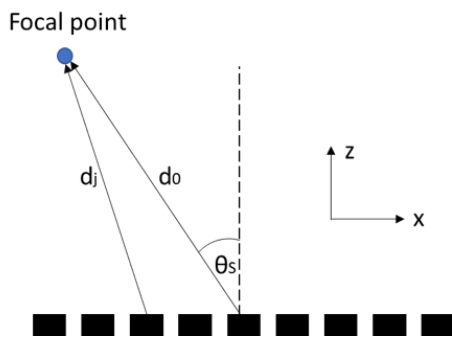
(a) Natočenie $\theta_s = -45^\circ$.

Zdroj: [https://
developer.ultrahaptics.com/wp-
content/uploads/2019/01/beam-
steering-a.png](https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2019/01/beam-steering-a.png)



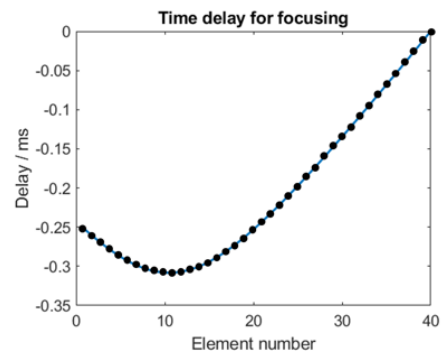
(b) Ilustratívne časové oneskorenia pre jednotlivé prvky.

Zdroj: [https://
developer.ultrahaptics.com/wp-
content/uploads/2019/01/beam-
steering-b.png](https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2019/01/beam-steering-b.png)



(a) Vzďialenosť kontrolného bodu od meničov.

Zdroj: [https://
developer.ultrahaptics.com/wp-
content/uploads/2019/01/array-
focusing-a.png](https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2019/01/array-focusing-a.png)



(b) Ilustratívne časové oneskorenia pre jednotlivé prvky.

Zdroj: [https://
developer.ultrahaptics.com/wp-
content/uploads/2019/01/array-
focusing-b.png](https://developer.ultrahaptics.com/wp-content/uploads/2019/01/array-focusing-b.png)

Kapitola 4

Návrh výslednej aplikácie

Môj návrh demonštračnej aplikácie som nepostupoval veľmi priamočiaro a návrh sa mnohokrát počas vývoja menil. Cieľom bolo využiť naplno možnosti oboch zariadení.

Zariadenie Hololens 2, ktoré máme v škole dostupné je na špičke čo sa týka vývoja zariadení pre rozšírenú realitu. O zariadení Stratos Explore som pred výberom tejto práce nepočul a s Hololens 2 som pred tým nepracoval, takže som sa musel zoznámiť s oboma a až potom som sa pustil na návrh.

4.1 Poznávanie zariadení

Pred tým, ako som sa pustil do vývoja som zisťoval, čo zariadenia, s ktorými budem pracovať ponúkajú, a aké sú ich limity. Pre Stratos Explore existuje aplikácia zvaná Ultraleap Demo Suite s ukázkami rôznych objektov, či už statickým ako guľa, alebo dynamických, ako tlačidlo, prípadne posuvné tlačidla a lietajúce a praskajúce bublinky. Táto demo aplikácia mi teda ukázala, aké presné je sledovanie ruky, aký pocit vyvoláva dotknutie sa virtuálneho objektu. Zistil som že vnem je veľmi jemný a toto zariadenie je vhodné použiť skôr na jednoduchšie objekty, čo sa týka geometrických detailov.

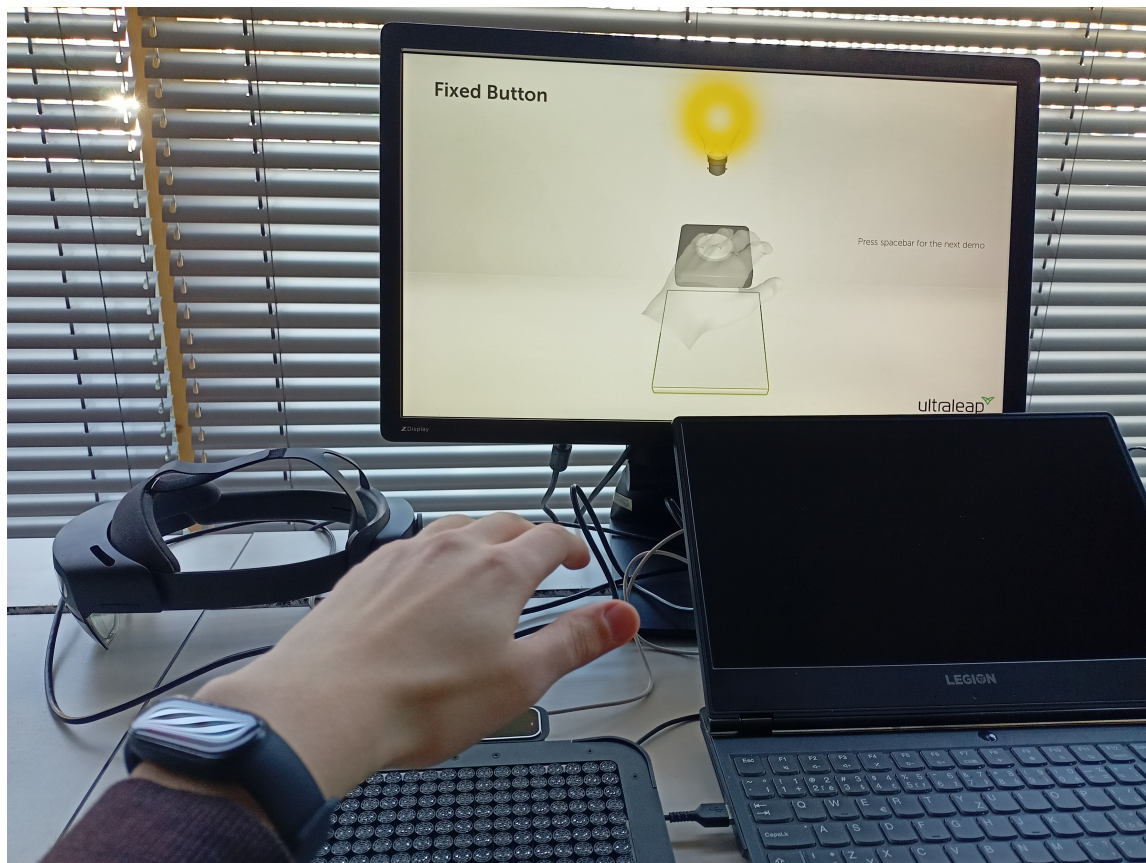
V zariadení Hololens 2 existuje taktiež aplikácia, ktorá užívateľovi ukáže ako vyzerá hologram, ako s hologramom manipulovať, aká je odozva týchto objektov aj čo sa týka zvuku. Taktiež som si pozrel predstavenie tohto zariadenia na nejakej konferencii. Po tomto menšom prieskume som zistil, že Hololens 2 ponúka veľa možností na vytvorenie objektov a zaujímavých rozšírených svetov.

Vzhľadom k tomu, že Stratos Explore je statický a objem v ktorom je možné vytvoriť objekt s haptickou odozvou dosť malý, pričom Hololens je vhodné použiť hlavne vo väčšom priestore s viacerými objektami, chcel som vytvoriť viacero malých scén s jedným alebo dvoma objektami, s ktorými bude možné manipulovať, podobnými príkladom z Ultraleap Demo Suite.

4.2 Počiatky vývoja

Pre obe zariadenia existujú balíčky do game engine **Unity**, preto som aplikácie vyvíjal v Unity.

Prvý krok bol vytvoriť virtuálny objekt nad Startos Explore, preto som potreboval získať jeho pozíciu pre Hololens 2. Ako najjednoduchší spôsob, ako to urobiť, bol marker, alebo image detection. Teda detekcia nejakého vzoru, alebo obrázka.



Obr. 4.1: Ultraleap Demo Suite scéna s tlačidlom.

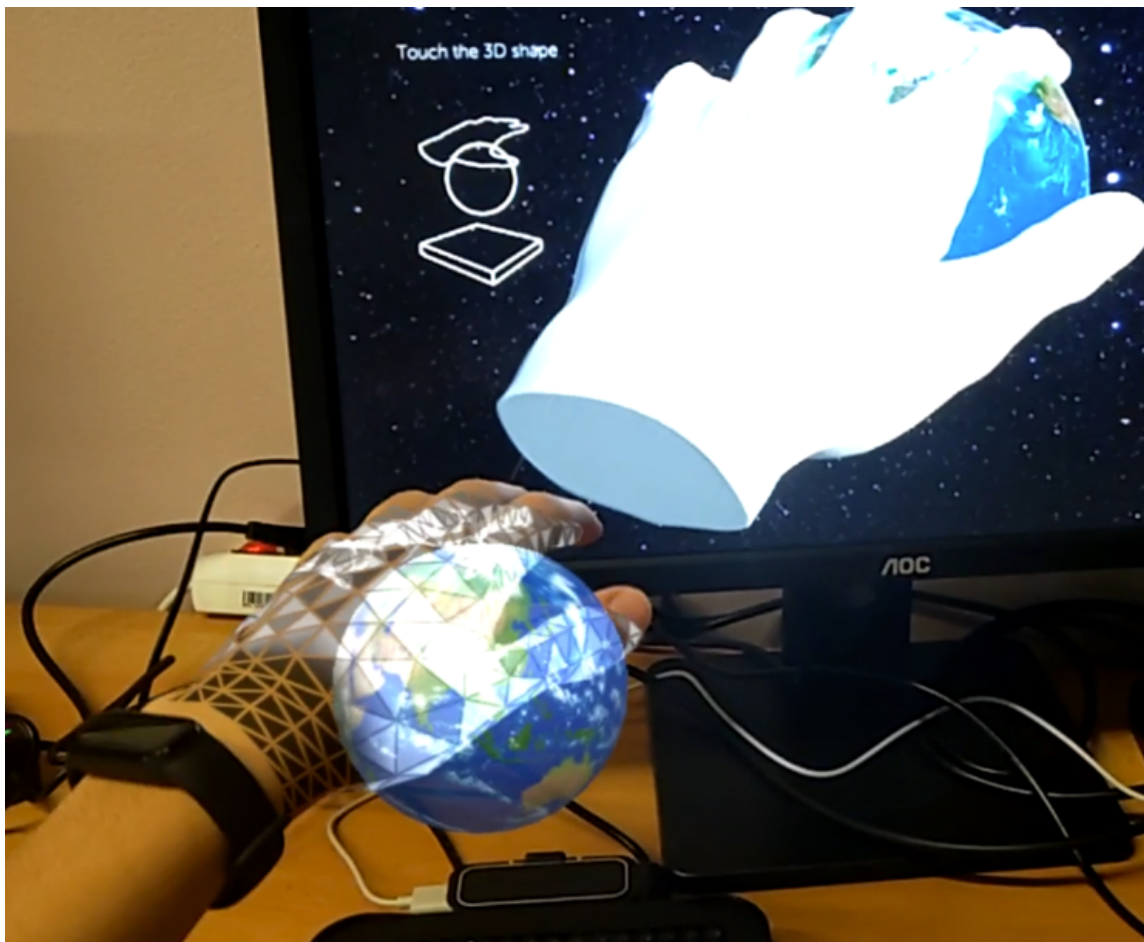
Na detekciu obrázka som použil **Vuforia Engine**. Táto platforma pre vývoj pre rozšírenú realitu ponúka okrem iného aj rozšírenie do Unity na rozpoznávanie obrázkov. Nástroj umožňuje si vybrať ľubovoľný obrázok, ktorý použijete ako cieľový. Ideálny je komplikovanejší obrázok. Obrázok je možné nahráť do databázy Vuforie a bude mu priradené hodnotenie, na základe jednoduchosti rozpoznania.

Vytvoril som program pre HoloLens 2, v ktorom sa nachádza objekt, ktorý obsahuje nastavenia pre Vuforia Engine a jeho materiálom je obrázok, ktorý chcem aby bol rozpoznávaný. Na základe toho je zariadenie schopné detektovať môj obrázok a vytvoriť na jeho pozíciu virtuálny objekt.

Využil som aplikáciu Ultraleap Demo Suite. V tejto aplikácii je scéna, kde sa zobrazí guľa nad Stratos Explore, do ktorej keď vložíte ruku, cítite haptickú odozvu.

Určil som si pozíciu vedľa Stratos Explore, na ktorú budem pokladať obrázok, ktorý sa má detektovať a upravil som program pre HoloLens 2, aby sa objekt, guľa, zobrazil nie priamo na obrázku, na mieste, kde sa pre Stratos Explore zobrazovala guľa. Tým som dosiahol to že keď som mal spustený môj program pre HoloLens 2, ktorý vytvoril guľu neďaleko obrázku a na počítači, ku ktorému som mal pripojený Stratos Explore som spustil demo aplikáciu, ktorá taktiež vytvorila guľu rovnakých rozmerov na rovnakom mieste, bolo možné sa virtuálnej guľe „dotknúť“.

Do programu pre HoloLens 2 možnosť guľu zväčšovať, rotovať a pohybovať s ňou. To ma priviedlo k problému, ako vytvoriť komunikáciu medzi počítačom, kde bežal program pre



Obr. 4.2: Vykreslenie gule nad Stratos Explore a Ultraleap Demo Suite.

Stratos Explore a Hololens 2, tak aby transformácia virtuálneho objektu bola rovnaká, pre oba programy.

4.3 Komunikácia medzi zariadeniami

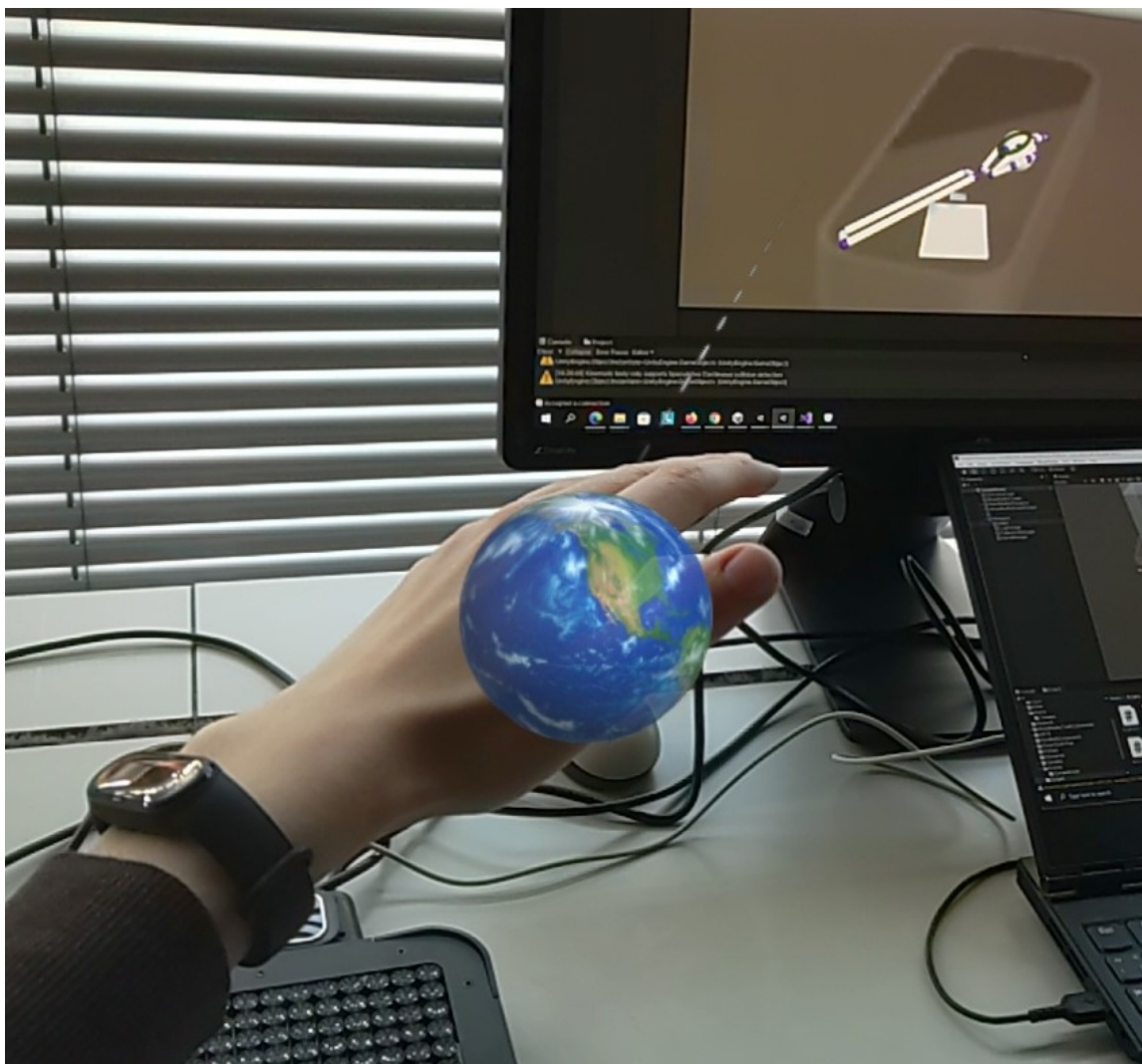
Pre zaistenie rovnakej informácie o pozícií a veľkosti gule, bolo potrebné implementovať určitý spôsob komunikácie, medzi dvoma aplikáciami, bežiacimi na iných zariadeniach. Rozhodol som sa implementovať bezdrôtovú sieťovú komunikáciu v lokálnej sieti. Návrh bol spraviť na osobnom počítači, ku ktorému bolo pripojené Stratos Explore, serverovú aplikáciu s lokálnym klientom, ktorý by získaval informácie od klientskej aplikácie v Hololens 2 a následne ich spracoval a odovzdal aplikácií Stratos Explore.

Na implementáciu komunikácie som skúsil použiť aplikačné programové rozhranie **Mirror**¹ pre Unity. Zistil som, že ho nebude možné použiť, pretože by bolo potrebné mať jeden projekt v Unity, ktorý by mohol byť spustený buď vo forme klient, server, alebo server s lokálnym klientom. To nebolo možné, lebo v tom čase som už mal 2 projekty v Unity. Jeden bol pre rozšírenú realitu Hololens 2 a využíval nástroje ako **Mixed Reality Toolkit**

¹<https://mirror-networking.com/>

(MRTK)² a Vuforia Engine, obsahoval objekty s komponentami týchto nástrojov a druhý projekt bol pre Stratos Explore a taktiež obsahoval balíčky pre prácu s **Ultraleap** technológiami a objekty z týchto balíčkov na získanie polohy ruky a ovládanie poľa ultrazvukových meničov.

Ako ďalší prostriedok pre zaistenie tejto komunikácie som našiel balíček **Unity transport**, ktorý umožňuje vytvoriť aplikácie pre Unity komunikujúce na transportnej vrstve. Ten som nakoniec použil na tvorbu skriptov pre vzájomnú komunikáciu. To vyriešilo problém o rovnakej transformácii gule v programoch, ako vidieť na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Aplikácia v Hololens, kde je možná manipulácia s guľou a aplikácia v Stratos Explore, ktorá reaguje na transformácie z rozšírenej reality pomocou klient – server komunikácie.

²<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/?view=mrtkunity-2021-05>

4.4 Formovanie výslednej aplikácie

Aplikáciu som chcel rozšíriť na mini hru, kde by sa guľa odrážala z jednej ruky do druhej, podobne ako v hre Pong, no Stratos Explore podporuje len jednu ruku v daný moment. Rozhodol som sa že pri myšlienke zostanem a že použijem jednu ruku, gravitáciu a plochu, od ktorej sa bude guľa odrážať.

Pre aplikáciu, ktorú som navrhol bolo potrebné, aby sa dala guľa odrážať od ruky a od plochy, a aby guľa bola priťahovaná smerom k ploche. Dovtedy prebiehala manipulácia s guľou, len prostredníctvom chytenia medzi palec a ukazovák.

Pre implementáciu odrážania objektu od ruky som sa inšpiroval scénou z MRTK príkladov pre Unity, kde sa dalo manipulovať s objektom len pomocou dotyku. Na implementáciu som použil skript ktorý bol použitý v ukážkovej scéne. Tento skript som prebral do svojho projektu a upravil, aby hologramy reagovali aj na dotyk dlane, nie len na prsty.

Potom som pridal fyzikálny materiál na guľu, aby sa odrazila po dotyku iného objektu určitou rýchlosťou. Pridal som k ploche priehľadné steny, aby guľa nepadla do prázdna. Teraz bolo možné driblovať s guľou.

Aby som aplikáciu „driblovania“ trochu zatraktívnil, chcel som pridať na plochu od ktorej sa guľa odrážala chrobáky, ktoré by liezli a bolo by potrebné ich zabiť, toto ukazuje obrázok 5.5. Aby to celé malo nejaký cieľ a bola to aj výzva. Chcel som aby chrobáky chodili z jednej strany plochy na druhú a hráč by ich musel stihnúť zabiť pomocou gule, aby to nestihli, inak prehrá. Preto bolo treba vytvoriť objekt chrobáka, ktorý má možnosť pohybovať sa po podlahe. Na to aby sa mohol pohybovať som použil komponentu NavMeshSurface pre podlahu a NavMeshAgent pre chrobáka. Potom som ešte pridal zvuky odrážania lopty, chodenia chrobáka a zabitia chrobáka, aby sa okrem zraku a hmatu zapojil aj sluchový vnem.

Kapitola 5

Implementácia

Implementácia zahŕňa 3 aplikácie, 2 aplikácie sú pre Hololens 2. Jedna z nich je mini hra, kde sa snaží hráč rozmliaždiť guľou chrobáky, druhá je len o jednoduchej manipulácii s guľou. Tretia aplikácia je pre Startos Explore, ktoré reaguje na prekrytie hráčovej ruky s guľou, fungujúca pre obe aplikácie.

Všetky aplikácie som vyvíjal v game engine Unity a na úpravu a vytváranie zdrojových kódov som použil **Visual Studio**. Kód som písal v jazyku C#. Pre obe zariadenia existujú balíčky, ktoré sa dajú do Unity importovať a tým rozšíriť nástroj pre vývoj pre tieto zariadenia.

V projektoch pre Hololens som využil nástroje z **Mixed Reality Toolkit**¹, čo je projekt vedený spoločnosťou Microsoft obsahujúce rôzne komponenty a vlastnosti, ktoré uľahčujú vývoj pre niektoré zariadenia rozšírenej reality. Okrem toho som využil **Vuforia Engine**² na rozpoznanie obrázku pri zisťovaní polohy Stratos Explore.

Pri vývoji a sprevádzkovaní som použil **Leap Motion Orion (V4) SDK** a v projekte pre Startos Explore som využil **Leap Motion Unity Core Assets** vo verzií 4.5.1 a **Ultrahaptics Core Assets**.

Táto kapitola popisuje, ako vyzerá štruktúra projektov, opis jednotlivých komponentov a spôsoby, akými som vyriešil problémy, ktoré sa pri vývoji vyskytli.

5.1 Stratos Explore

Tento projekt sa skladá len z jednej scény, zvanej *SampleScene*. Táto scéna má 5 priamych potomkov, ako možno vidieť na obrázku 5.1.

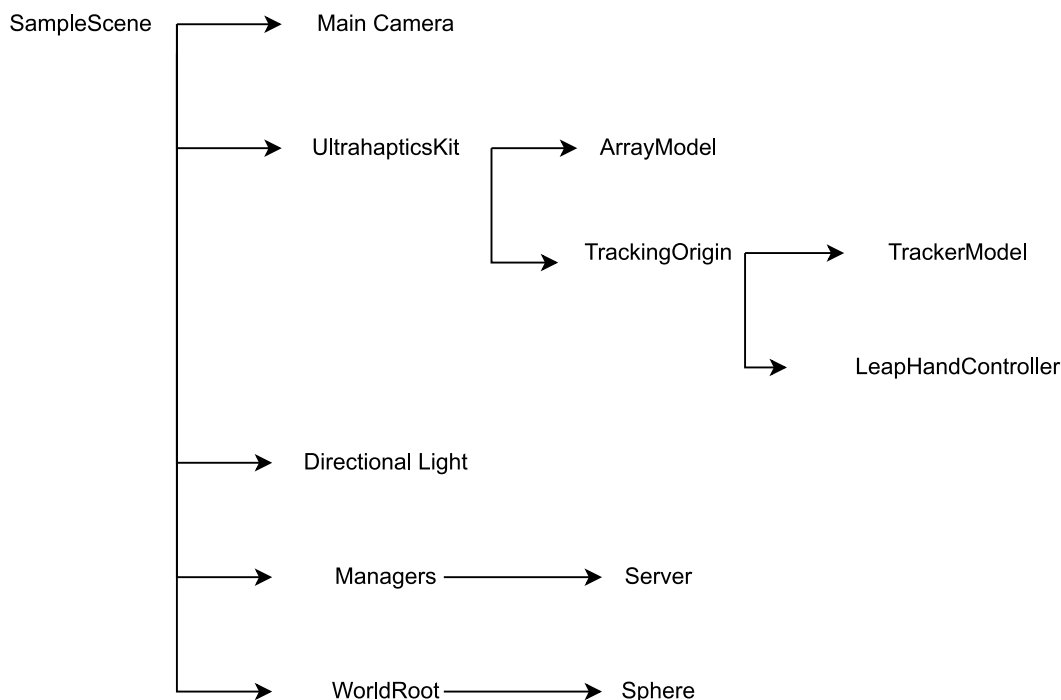
Na to, aby bolo možné vidieť pozíciu gule a ruky hráča aj na monitore slúži *Main Camera* čo je kamera od Unity, na nej som menil len pozíciu a rotáciu. Ďalej scéna obsahuje svetlo *Directional Light*. Pre skripty slúži prázdny objekt *Managers*, ktorý obsahuje *Server*, ktorého komponenta *Server* je môj skript pre komunikáciu klient – server. Viac o implementácii komunikácie v sekcii Architektúra klient – server 5.3.

Haptika

Dôležitý je *UltrahapticsKit* čo je objekt, prefabrikát, reprezentujúci Stratos Explore, objekt som nevytváral, len som ho prebral z *UltrahapticsCoreAssets* balíčku. On a jeho deti obsa-

¹<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/?view=mrtkunity-2021-05>

²<https://library.vuforia.com/getting-started/overview.html>



Obr. 5.1: Zloženie scény pre Stratos Explore.

hujú skripty a nastavenia toho, ako sa bude Stratos Explore správať. Tento objekt má 2 deti, *ArrayModel*, čo je model poľa reproduktorov a *TrackingOrigin*, ktorý má 2 deti. *TrackerModel* predstavuje len model Ultraleap a *LeapHandController*, ktorý sa stará o spracovanie a zobrazenie virtuálnych rúk spolu s *TrackingOrigin*. *LeapHandController* som upravil podľa návodu na stránkach Ultrahaptics³.

Posledný priamy potomok scény *WorldRoot* má potomka *Sphere*.

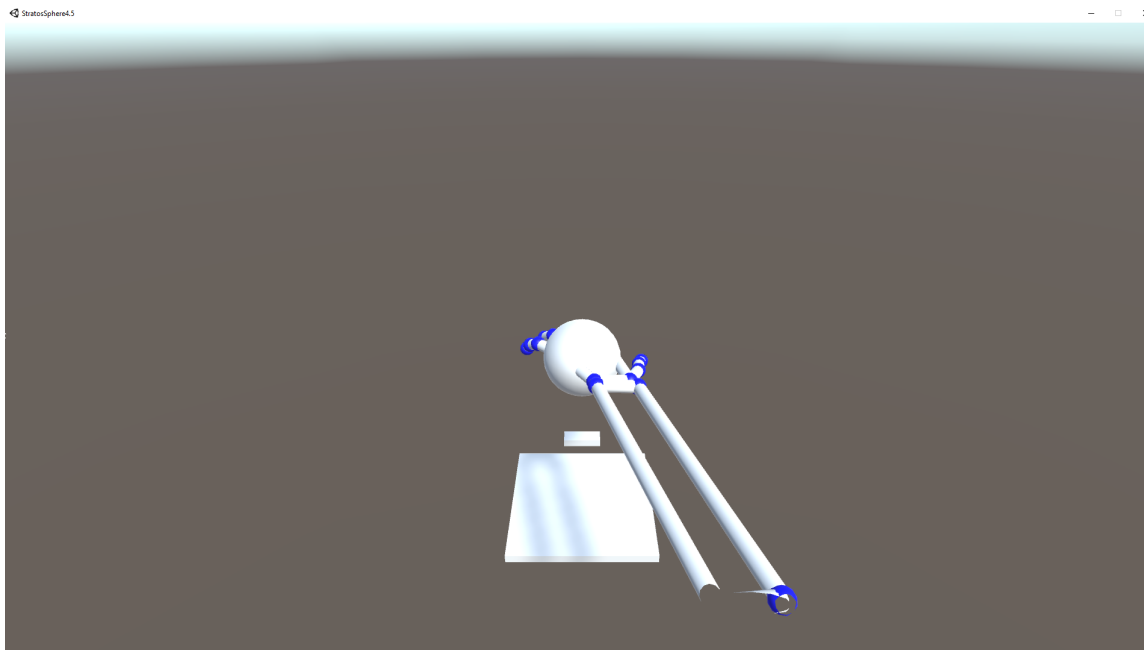
Tento objekt predstavuje guľu, ako objekt nad Stratos Explore, ktorý reaguje na prítomnosť ruky a vyvoláva haptickú odozvu.

Medzi jeho dôležité komponenty patrí *Sphere Collider*, ktorého prepínač *Is Trigger*, je zapnutý, aby pri kolízii s rukou vyvolal udalosť, na ktorú reaguje Stratos, ďalej *Shape Input Updater* je skript, ktorý reaguje na zmenu veľkosti gule, *Sensation Source* skript, ktorý udáva formu a rôzne parametre pre to ako má Stratos Explore reagovať na prítomnosť ruky v objekte, alebo napríklad či má zvuková senzácia stále bežať. Obsahuje aj skript, ktorý formuje senzáciu na guľový objekt. Komponenta *Haptic Trigger Region* je skript, kde môžeme nastaviť, ktorý *Sensation Source* sa má zapnúť prípadne vypnúť pri vstupe, poprípade výstupe ruky z objektu.

Sensation Source a *Haptic Trigger Region* komponenty sú dostupné v *UltrahapticsCoreAssets*, z kadiaľ som ich prebral. V *Sensation Source* *Sensation Block* som využil skript *Sphere*, ktorý bol použitý v príklade *SimpleShapes* v projekte na GitHub⁴. Taktiež som z tadiaľ prebral *Shape Input Updater* a ďalšie skripty, na ktorých boli predchádzajúce závislé.

³<https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/unity-uca-quick-start-guide/>

⁴<https://github.com/ultraleap/UnityExamples>



Obr. 5.2: Screenshot obrazovky s aplikáciou pre Stratos Explore.

5.2 Hololens 2

Keďže je táto scéna trochu komplikovanejšia, do obrázku 5.3 som nenapísal všetky objekty, ale tie podstatné popíšem aspoň stručne.

SampleScene je názov scény, jej potomkovia sú *Directional Light*, *MixedRealityToolkit*, *MixedRealityPlayspace*, *MixedRealitySceneContent*, *HandMenu_Small* a *Mangers*.

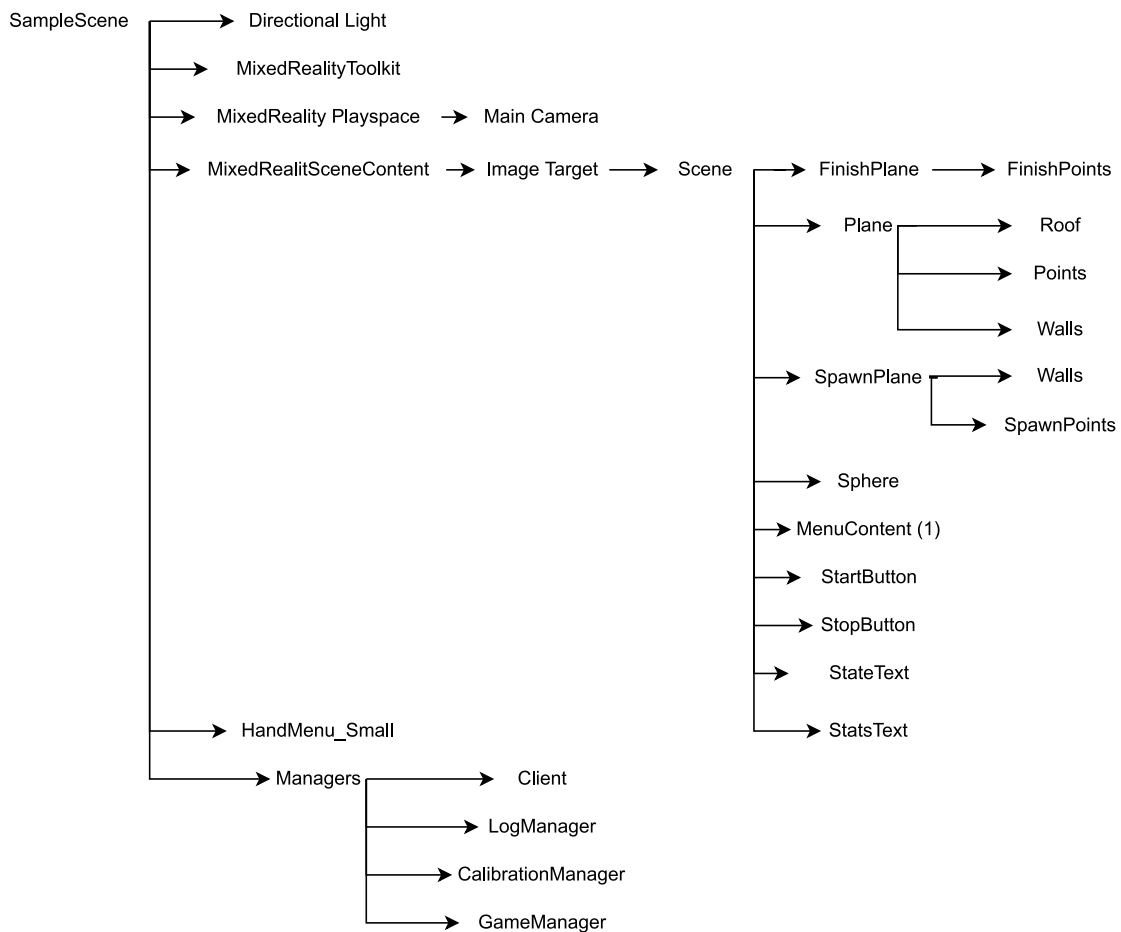
Nastavenia pre rozšírenú realitu

Na nastavenie chovania rozšírenej reality, slúži objekt *MixedRealityToolkit* z **MRTK** balíčku. Obsahuje komponentu s rovnakým názvom, ktorej je možno priradiť profil. Vytvoril som si svoj profil podľa Hololens2 konfiguračného profilu. V Input nastaveniach v Articulated Hand Tracking som zmazal Joint, Palm a Fingertip prefabrikáty, aby bol model ruky jednoduchší. Dôležitou skupinou nastavení je položka Extensions, v nej mám nastavené HandPhysicsService so skriptom HandPhysicsServiceProfile a prefabrikátory pre koniec prsta aj dlaň, aby bolo možné odrážať guľu aj dlaňou. Týmto nastavením som sa inšpiroval v Mixed Reality Toolkit Extensions, v scéne HandPhysics a z tadiaľto som prebral aj spomínané prefabrikáty.

Main Camera je objekt ktorý vznikol po vytvorení scény pomocou **MRTK**, pri ktorom som postupoval podľa návodu⁵. K tejto kamere som ešte pridal skript *Vuforia Behaviour*, aby fungovalo rozpoznávanie obrázkov taktiež podľa návodu⁶.

⁵<https://docs.microsoft.com/en-us/learn/modules/learn-mrkt-tutorials/>

⁶<https://arvrjourney.com/hololens-2-marker-tracking-with-vuforia-engine-and-mrkt-fb582c8f8ac0>



Obr. 5.3: Zloženie scény pre HoloLens 2.

Zobrazený obsah

MixedRealitySceneContent pod sebou obsahuje všetko čo užívateľ tejto aplikácie vidí, teda objekty, ktoré sa vykresľujú okrem *HandMenu*. Ako prvý objekt sa pod *MixedRealitySceneContent*, nachádza *Image Target*, čo je objekt s obrázkom⁷, ktorý sa má rozpoznať. Obsahuje aj nejaké nastavenia pre Vuforia a napríklad aj metódy, ktoré sa majú zavolať pri rozpoznaní obrázka, alebo jeho stratení. Obrázok som prebral⁸.

Pod obrázkom sa nachádza *Scene*, práve preto, lebo na základe polohy obrázka a jeho detekcie, sa budú vykresľovať jeho deti. Patria sem *FinishPlane*, čo je plocha, ktorá obsahuje koncové body pre chrobáky, môžu sa po nej pohybovať, *Plane*, *SpawnPlane*, *Sphere*, *MenuContent (1)*, *StartButton*, *StopButton* a *StateText*.

Plane je plocha, od ktorej sa má guľa primárne odrážať. Taktiež sa po nej pohybujú chrobáky vďaka *NavMeshSurface* a *Mesh Collider*. Medzi jej deti patria steny a strecha, ktoré slúžia na to aby sa guľa neodrazila niekam preč. Obsahuje aj skupinu bodov, medzi ktorými sa chrobáky pohybujú. Textúry plôch pochádzajú z Unity Store balíčku⁹.

⁷https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project_modules/disp/ff48df52384867.590f30d895649.gif

⁸https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project_modules/disp/ff48df52384867.590f30d895649.gif

⁹<https://assetstore.unity.com/packages/2d/textures-materials/floors/outdoor-ground-textures-12555>

SpawnPlane je plocha, ktorá taktiež obsahuje *NavMeshSurface*, aby sa po nej mohli chrobáky pohybovať. Jej deti sú steny a body, kde sa chrobáky zjavujú v náhodných časových intervaloch po spustení hry.

Sphere je guľa, s ktorou je možné rukami manipulovať, na to využíva *Sphere Collider* s fyzikálnym materiálom aby mohla skákať a *Rigidbody*, kvôli gravitácii. Jej deti sú *Hitbox*, aby bolo možné zabíjať chrobáky, tento hitbox je väčší, ako hitbox na odražanie sa, aby bolo možné detektovať prekrytie hitbox – hurtbox, *Sound* obsahuje *Sphere Collider* a môj skript, kvôli prehrávaniu zvuku odrazu gule. Materiál použitý na objekt *Sphere*, zvaný *Earth1kMaterial* som prebral z Unity Asset Store¹⁰. *Sphere* obsahuje aj Audio Source komponentu, ktorá obsahuje *AudioClip*, čo je zvuková nahrávka, ktorá sa prehrá, keď guľa do niečoho narazí. Zvuková nahrávka je prebraná a upravená.¹¹

Užívateľské rozhranie

Táto časť zahŕňa tlačidlá a text s výpismi.

MenuContent (1) je objekt, ktorý spolu s potomkami tvorí 3 tlačidlá. Všetky tlačidlá v scéne je možné stlačiť len gestom na diaľku zvaným **Air tap**¹² a to z dôvodu toho, že bežná interakcia na blízko s hologramami nefunguje kvôli rozšíreniu pre fyziku rúk. Tieto tlačidlá slúžia na pripojenie Hololens 2 k serveru, na vrátenie gule na pozíciu, na ktorej sa objaví po načítaní scény a na zapnutie, prípadne vypnutie detekcie obrázku pomocou Vuforia nástroja. Celý objekt som prebral a neskôr upravil, z *Mixed Reality Toolkit Examples*¹³.

Pre spustenie hry, ďalšieho levelu je v scéne tlačidlo *StartButton*. Keď je scéna načítaná a chcete spustiť generovanie chrobákov, stlačíte toto tlačidlo. Tento objekt s potomkami som taktiež prevzal z *Mixed Reality Toolkit Examples*.

StopButton je tlačidlo, ktoré slúži na zastavenie hry. Tento objekt s potomkami som taktiež prevzal z *Mixed Reality Toolkit Examples*.

StateText 3D text, zobrazujúci názov hry, poprípade a hlavne jej stav. Taktiež prevzatý z *Mixed Reality Toolkit Examples*.

StatsText 3D text, zobrazujúci štatistiky o práve prebiehajúcej hre. Objekt prevzatý z *Mixed Reality Toolkit Examples*.

HandMenu_Small_HideOnHandDrop je malé menu, ktoré sa zobrazí vedľa dlane, keď ju otočíte smerom nahor. Obsah menu je rovnaký ako pri *MenuContent (1)*. Toto menu je tu z dôvodu, keby nastali komplikácie s detekciou obrázka. Taktiež pôvodne bolo v projekte len toto menu, ale pre nutnosť použitia air tap sa stalo horšie použiteľným. Objekt som v projekte deaktivoval, aby nedochádzalo k nechcenému zobrazovaniu, prípadne nechcenému stlačeniu.

Skripty a fungovanie hry

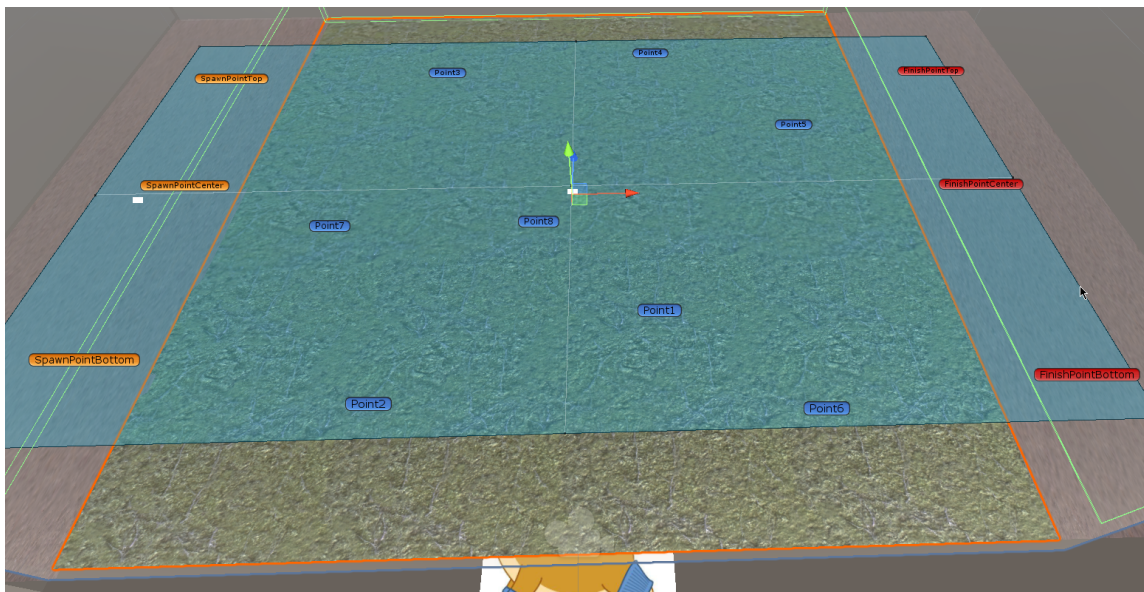
Skripty sa nachádzajú pod objektom *Managers*. *Client* má na starosti pripojenie a odosielanie dát serveru. *LogManager* má hlavne úlohu pri vývoji, lebo zapisuje výskyt niektorých udalostí. *CalibrationManager* slúži na vypnutie, prípadné zapnutie detekcie obrázka. *GameManager* je skript, ktorý riadi hru, ako napríklad spustenie, zastavenie, počítanie živých

¹⁰<https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/sci-fi/planet-earth-free-23399>

¹¹Originál nahrávka má názov Ball bouncing to a stop <https://mixkit.co/free-sound-effects/ball/>

¹²<https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-basic-usage>

¹³<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/running-example-scenes?view=mrtkunity-2021-05>



Obr. 5.4: Tento obrázok ukazuje hraciu plochu, konkrétne modrá plocha predstavuje NavMeshSurface, teda plochu, po ktorej sa môžu chrobáky pohybovať. Oranžové body ukazujú miesta, kde sa chrobáky zjavujú, modré body sú miesta, ku ktorým sa chrobáky pohybujú. Keď prejdú určitý počet modrých bodov, idú k jednému z červeného bodov.

a zabíjajúcich chrobákov a vyhodnocuje stav hry. Objekt, prijíma volania metód od objektov, ako sú tlačidlá, chrobáky a miesta objavovania sa chrobákov.

myBug je prefabrikát, ktorého inštancie sa v scéne objavujú na jednom z troch *SpawnPoint*. Model objektu je chrobák¹⁴. Každý tento chrobák obsahuje komponentu **NavMeshAgent**, ktorá zabezpečuje pohyb objektu po **NavMeshSurface**, obe komponenty pochádzajú aj so skriptami, ktoré k nim patria z projektu na GitHub¹⁵. Chrobáky sa pri pohybe riadia podľa skriptu, ktorým som sa inšpiroval¹⁶, ktorý náhodne vyberie pre každý objekt bod, ku ktorému bude smerovať, body sú rozmiestnené na ploche, po ktorej sa môžu pohybovať. Ak chrobák prejde určitý počet bodov, smeruje k jednému z cieľových bodov.

Chrobáky pri pohybe vydávajú zvuk¹⁷. Keď sú zasiahnuté guľou, tak sa zmení ich komponenta **MeshRenderer**, aby vyzerali, ako rozpučené a vydajú zvuk¹⁸. Model rozpučeného chrobáka som prevzal¹⁹. Pri prekrytí Box Collider, ktorý obsahuje chrobák a Sphere Collider, ktorý obsahuje guľa, je chrobák zabíjaný.

Pri navýšení levelu sa zväčšuje rýchlosť pohybu chrobákov, a skraca sa doba medzi ich objavovaním sa na spawn point. Možné by bolo aj znížiť počet bodov, ktoré musí chrobák prejsť.

¹⁴<https://www.turbosquid.com/3d-models/free-roly-bug-pill-3d-model/746972>

¹⁵<https://github.com/Unity-Technologies/NavMeshComponents#documentation-draft>

¹⁶<https://docs.unity3d.com/Manual/nav-AgentPatrol.html>

¹⁷<https://www.epidemicsound.com/track/mZRt7UBmQb/>

¹⁸Zvuk bol upravený z Gore video game blood splash <https://mixkit.co/free-sound-effects/sword/>

¹⁹<https://www.cgtrader.com/items/3497668/download-page>



Obr. 5.5: Obrázok finálnej mini hry. V strede je herná plocha s chrobákmi a loptou, sú viditeľné aj stopy po mŕtvych chrobákoch, naľavo sú štatistiky, a stav hry, dole v strede a napravo tlačidlá na ovládanie. Na monitore vpravo vidieť program pre Stratos, kde vidieť relatívnu pozíciu Stratos Explore od gule.

5.3 Architektúra klient – server

Na komunikáciu medzi aplikáciami som využil sieťovú komunikáciu typu klient – server. Klient sa nachádza v aplikácii, ktorá má bežať v Hololens 2 a server na počítači, ku ktorému je pripojený Stratos Explore. Pre správne fungovanie, je nutné vypnúť firewall na počítači. IP adresy sú pevne nastavené, pre použitie v inej sieti, alebo na iných zariadeniach, je potrebné ich zmeniť.

Po spustení oboch aplikácií, sa automaticky nadviaže TCP spojenie. Pokiaľ sa nenadviaže, je možné to skúsiť znovu stlačením tlačidla Connect v aplikácii pre Hololens.

Po nadviazaní spojenia klient posiela informácie o veľkosti a pozícií gule vo forme float čísel. Najprv x, y, z súradnice a potom rozmery v rovnakom poradí. To celé je jedna správa, ktorá sa odosiela rýchlosťou vykonávania skriptu.

Server číta 6 float čísel v poradí, v akom ich klient posiela, pripočítava k nim čísla, pretože obrázok, ktorého pozíciu Hololens zisťuje, sa nenachádza na mieste gule, ale na nad Stratos Explore. Vytvára z nich vektory, ktoré potom priraduje do komponenty Transform objektu Sphere.

Skripty Klient sa mierne líšia. Ide hlavne o odosielanú veľkosť gule, pretože v aplikácii, kde sa manipuluje so vznášajúcou gulou sa má vytváranie fokálnych bodov Stratos Explore spustiť, až keď sa ruka prekrýva s objektom. No v aplikácii s mini hrou, by mal užívateľ cítiť haptickú odozvu pri dotyku s gulou, takže v skript v tejto aplikácii posiela informácie o tom že guľa je väčšia, ako v mini hre.

Na skripty som použil nástroj **Unity Transport**²⁰. Inšpiroval som sa ukážkami z dokumentácie pre klient²¹ a server²².

5.4 Spustenie výslednej aplikácie

Pre správne a kompletne fungovanie je nutné:

1. aby bol počítač pripojený k sieti ku ktorej je pripojený aj Hololens 2,
2. aby bol vypnutý firewall na počítači,
3. aby boli nastavené IP adresy PC a Hololens v skriptoch Client a Server,
4. aby bola spustená aplikácia pre Startos Explore, ku ktorému je Stratos Explore pripojený,
5. aby bol Stratos Explore položený ideálne na stole, kde je asi $0,5\text{ m}^2$ štvorcového miesta, pred zariadením bol umiestnený obrázok na rozpoznanie, ako na obrázku 5.6. Ja som použil tento²³, ale nie je komplikované nastaviť iný a použiť ten.
6. Po spustení aplikácie na Hololens, nasmerovať rozšírenú realitu na obrázok, aby bol rozpoznatý.
7. Stlačiť tlačidlo Play, pre spustenie generovania chrobákov.

Cieľom hry je rukami v rozšírenej realite hýbať s guľou, ideálne driblovaním, tak, aby hráč rozpučil všetky chrobáky, skôr ako sa dostanú za pravú stenu. Ak ich prejde určitý počet, hráč prehral. Ak hráč chce hru zastaviť, stlačí tlačidlo stop. V hre je viac levelov, ktoré sa od seba líšia obtiažnosťou. Po tom ako hráč úspešne dokončí level, je možné spustiť ďalší level, stlačením rovnakého tlačidla ako pre začatie hry. Zmena obtiažnosti spočíva, v tom ako rýchlo sa chrobáky objavujú, a ako rýchlo chodia.

V prípade, ak by sa nepodarilo vytvoriť komunikácie, je možné sa o to pokúsiť znova stlačením tlačidla Connect. Refresh Scene slúži na vrátenie gule na hraciu plochu, v prípade, ak by sa dostala mimo. Keby bolo potrebné znova načítať obrázok, je to možné stlačením Vuforia Tracking, čím sa zapne sledovanie obrázka, a následným stlačením sa vypne.

²⁰<https://docs-multiplayer.unity3d.com/transport/current/about>

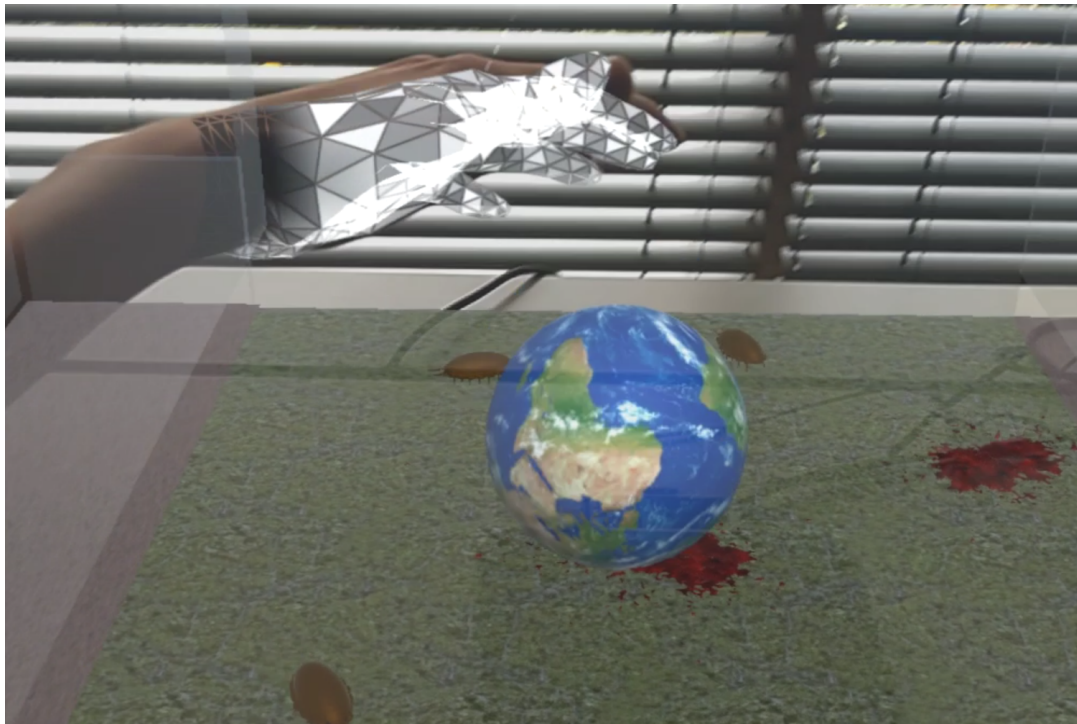
²¹<https://docs-multiplayer.unity3d.com/transport/current/samples/clientbehaviour>

²²<https://docs-multiplayer.unity3d.com/transport/current/samples/serverbehaviour>

²³https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project_modules/disp/ff48df52384867.590f30d895649.gif



Obr. 5.6: Obrázok na rozpoznanie a Stratos Explore.



Obr. 5.7: Obrázok z hry.

Kapitola 6

Užívateľské testy

Táto kapitola popisuje, testy a ich výsledky, ktoré boli vykonané na výslednej aplikácii. Cieľom testov bolo získať informácie, či je výsledná aplikácia zábavná, prehľadná, či nejako vplyva haptická odozva na zážitok, ako zážitok vylepšiť a ďalšie.

6.1 Popis priebehu testov

Test prebiehal nasledovne. Človek, ktorý bol v roli testera si najprv vyskúšal aplikáciu Ultraleap Demo Suite, aby zistil niečo o tom, ako funguje Stratos Explore. Potom spustil a prešiel kalibráciou Hololens 2. Po kalibrácii zapol výslednú aplikáciu, zameral obrázok, mal chvíľu čas na to, aby zistil, ako ovládať guľu a následne mu bolo povedané, nech spustí level. Každý prešiel aspoň prvý level, a kto mal záujem mohol hrať dlhšie. Testerov bolo 5.

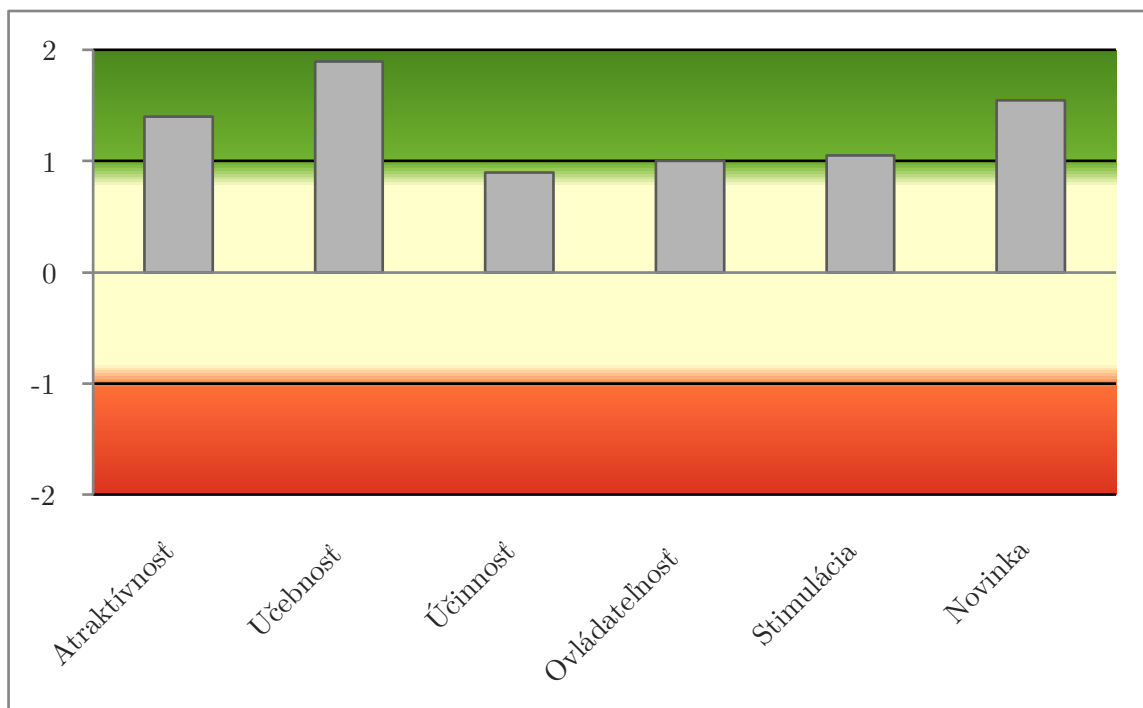
6.2 Získavanie výsledkov

Výsledky testov boli získavané či už pozorovaním účastníkov, alebo vyplnením dotazníku User experience questionnaire (UEQ¹), poprípade poznámkami ktoré má účastník a zodpovedaním mojich otázok.

Tester	Pohlavie	Vek	Študent VŠ	Odbor	Skúsenosť s AR	Hráč videohier
1	Ž	25	áno	IT	áno	nie
2	Ž	22	áno	architektúra	nie	nie
3	M	21	áno	IT	nie (skúšal VR)	áno
4	M	22	áno	IT	áno	áno
5	M	22	áno	IT	nie	áno

Tabuľka 6.1: Základné demografické informácie o testeroch. Za skúsenosť s rozšírenou realitou sa považuje aspoň 15 minút používania tejto technológie pred týmto testom.

¹<https://www.ueq-online.org/>



Obr. 6.1: Tabuľka výsledkov testov podľa dotazníku UEQ.

6.3 Výsledky testov

Väčšina testerov, nemala problém s pochopením hry, ani prejdením levelu. Pri pozorovaní som postrehol, že účastníci si nevšimli tlačidlá a štatistiky hry, pretože boli moc blízko hracej plochy. Ďalší problém bol so stláčaním tlačidiel, hlavne pre tých, ktorí nemali predchádzajúcu skúsenosť s AR, a to kvôli nutnosti použiť air tap, ako to bolo opísané v kapitole o implemetácii 5.2. Z pozorovania som ešte získal, informáciu o tom, že hra bola moc jednoduchá, čo sa ukázalo aj v odpovediach na moje otázky.

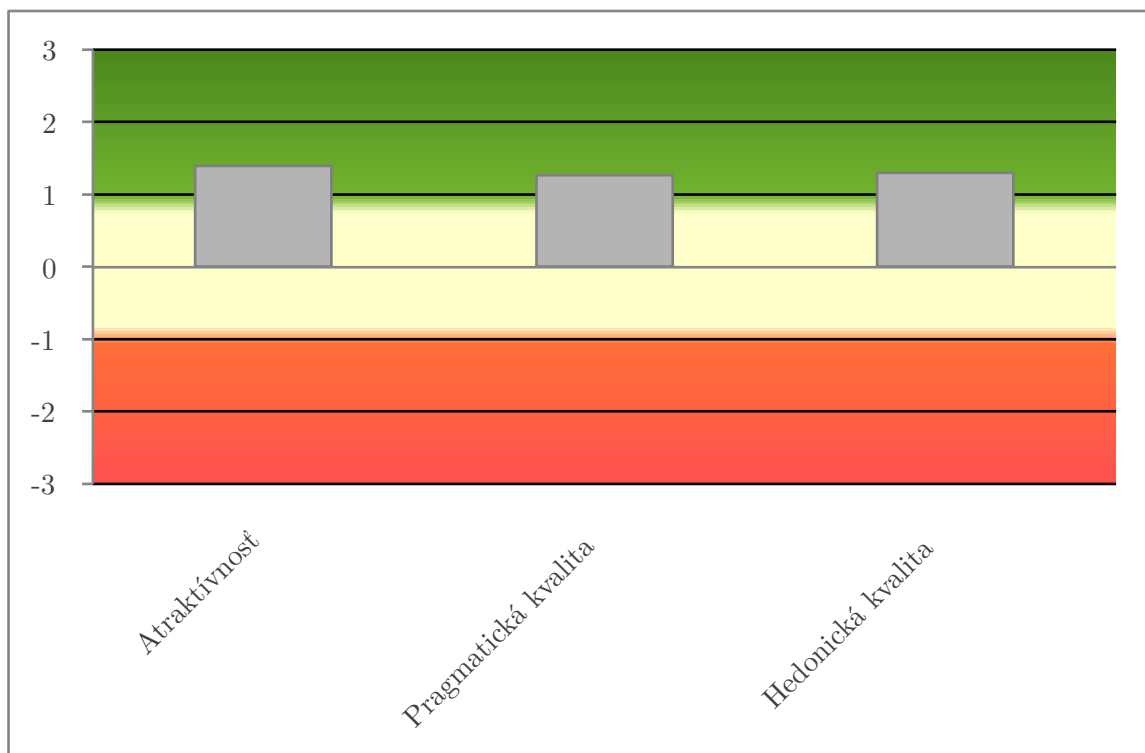
Nasledujúce grafy 6.1, 6.2 a 6.3 sú vygenerované pomocou UEQ data analysis tool².

Z výsledkov z grafu 6.1 vyplýva, že aplikácia je atraktívna, aspoň na krátky časový interval. Bolo jednoduché sa naučiť, ako sa ovláda. Účinnosť, alebo, to či bolo potrebné vynaložiť značné úsilie pre dosiahnutie cieľu, získalo najnižšiu hodnotu, pravdepodobne to bolo spojené s problémom stláčať tlačidlá. No aj tak je hodnotenie tejto vlastnosti nadpriemerne dobré podľa dotazníka. Ovládateľnosť dopadla tiež dobre, asi aj kvôli jednoduchosti hry. Zjavne je hra celkom zábavná, čo vyplýva zo stimulácie. Keďže rozšírená realita a haptická odozva nie je úplne bežná v každodennosti testerov, tak aj hodnota novinka, je celkom vysoká.

Dotazník UEQ sa skladá z 26 otázok, ktoré hodnotia užívateľský zážitok. Na každú otázku je odpoveď zložená z 2 protikladných atribútov, a odpovedajúci sa prikláňa k atribútu pomocou hodnôt od 1 po 7, pričom 1 znamená úplný súhlas s ľavým a hodnotou 7 úplný s pravým.

Trochu iný pohľad na výsledky poskytuje graf 6.2. V tomto grafe sú zoskupené hodnoty z prezieravosti, efektivity a spoľahlivosti do pragmatickej kvality, stimulácie a originality

²<https://www.ueq-online.org/>



Obr. 6.2: Tabuľka výsledkov testov podľa dotazníku UEQ.

do hedonickej kvality. Pragmatická kvalita opisuje aspekty kvality zameranej na vykonanie úlohy. Hedonická kvalita opisuje aspekty kvality, ktoré nesúvisia s vykonávaním úlohy.

Benchmark

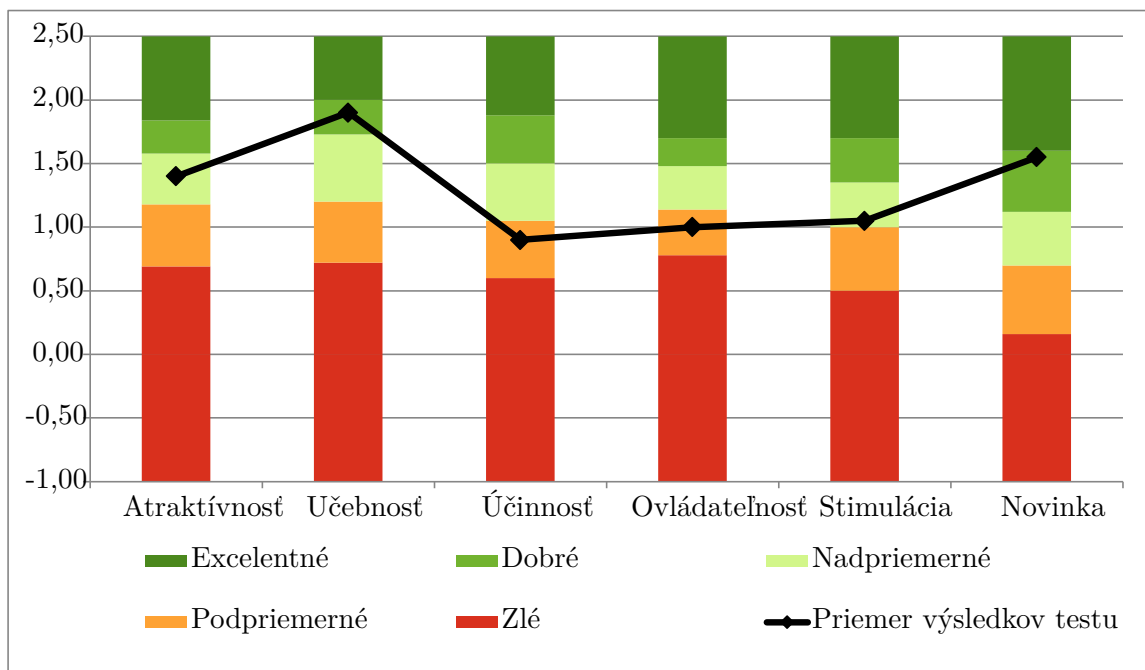
Benchmark popisuje, ako dopadla aplikácia v hodnotí, oproti ostatným aplikáciám v UEQ. Aplikácia podľa hodnotení väčšinou skončila nad priemerom, prípadne vrámci priemeru.

Moje otázky

Mojich vlastných otázok bolo 5, koncipované boli podobným spôsobom ako UEQ dotazník a odpovedalo sa na ne hodnotami 1 až 7. Zneli nasledovne:

1. Aká bola zložitosť prvého levela?
2. Odrážalo sa guľa silno alebo slabo?
3. Boli zvuky vhodné alebo nevhodné?
4. Chceli by ste si zahrať ďalší level?
5. Priniesla haptická odozva do zážitku nejakú hodnotu?

Prvá sa pýtala na zložitosť prvého levela. Druhá na silu odrazu gule. Tretia na vhodnosť zvukov. Štvrtá na to či by si tester chcel zahrať druhý level. Piata na to či priniesla haptická odozva do zážitku nejakú hodnotu. Graf vytvorený na základe odpovedí a popis je vidieť na obrázku 6.4.



Obr. 6.3: Tento graf ukazuje hodnotenie výsledkov oproti ostatným projektom, ktoré využili UEQ a UEQ data analysis tool.

Z odpovedi vidieť, že zložitnosť bola veľmi nízka. Guľa by sa mohla menej odrážať, myslím, že táto odpoveď dopadla preto tak, že tester, sa snažili držať guľu pri zemi a neskúšali driblovanie. Hodnotenie zvukov dopadlo celkom dobre. Je vidieť aj veľký záujem hrať ďalší level. Z hodnotenia haptickej odozvy vidieť, že si ju tester všimli, čo bolo aj cieľom, aby haptická odozva vynikla.

6.4 Možné zlepšenia

Táto sekcia opisuje návrhy na zlepšenia, alebo zmeny vychádzajúce z užívateľských testov.

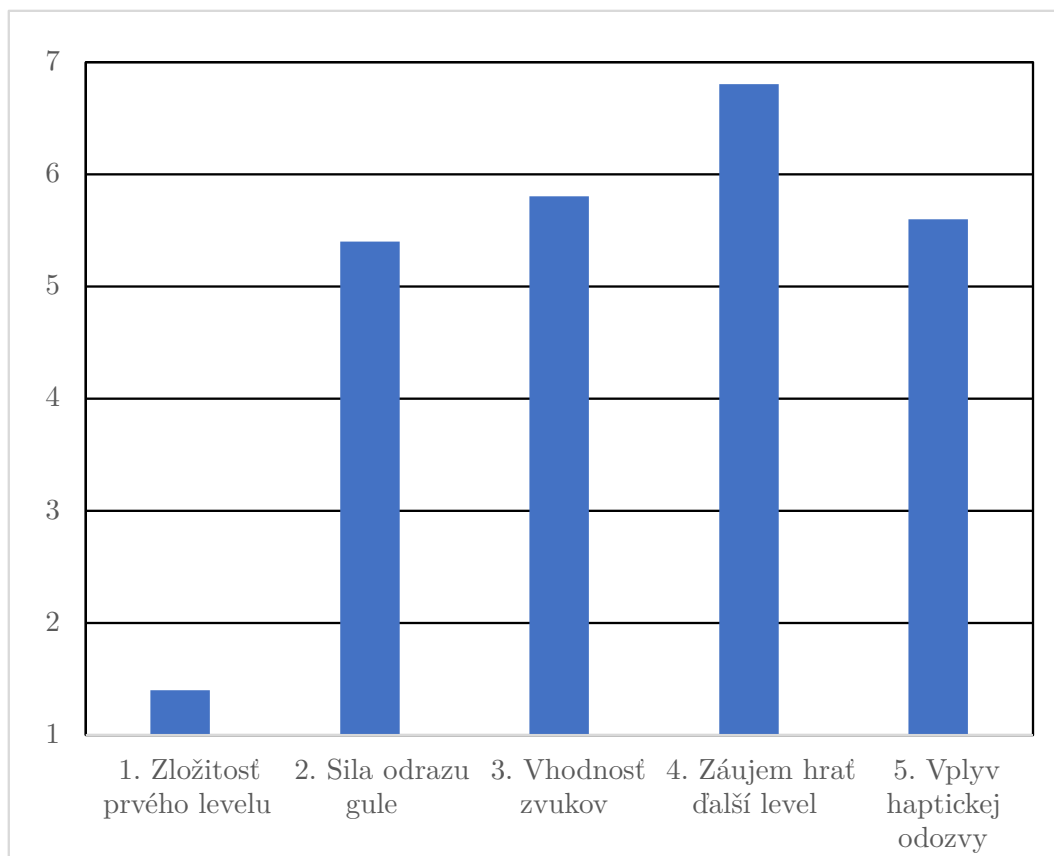
Asi najpodstatnejšou zmenou je zmena obtiažnosti. Všetkým testujúcim sa hra zdala moc jednoduchá, takže by asi bolo vhodné napríklad zvýšiť rýchlosť pohybu chrobákov, alebo skrátiť dobu medzi ich objavovaním sa, alebo skrátiť trasu, ktorú musia prejsť, aby došli do koncového bodu.

Ďalším návrhom na zmenu je presun tlačidiel a textu na iné miesto, možno bližšie k hracej ploche, alebo po jej okrajoch. Pretože tester si tieto prvky nevšimli, až keď boli na ne upozornení.

Problémom bolo aj stláčanie tlačidiel, ale tento problém vyplýva z prevzatého skriptu, ktorý je oficiálnym pre MRTK.

Jeden tester mi povedal, že by sa na guľu hodila iná textúra, napríklad basketbalovej lopty, aby zvuky a správanie odpovedalo objektu z reálneho sveta.

Iný tester pripomenul, že obtiažnosť medzi levelmi rastie dosť pomaly, takže aj tento aspekt by sa mohol upraviť, no možno by stačilo upraviť počiatočnú zložitnosť. V tom prípade by celá hra bol väčšou výzvou a mohla by sa stať zábavnejšou.



Obr. 6.4: Graf hodnôt odpovedí na moje otázky. Odpovede boli hodnotené hodnotami 1 až 7. Hodnota 1 pre prvú otázku znamená, že obtiažnosť prvého levelu bola príliš ľahká, 7 že bola ťažká. Pre druhú otázku 1 je že sa guľa odrážala slabo, 7 že sa odrážala silno. V tretej otázke znamená 1 že zvuky boli nevhodné, naopak 7, že boli vhodné. Pre štvrtú otázku 1 je že záujem hrať ďalší level je malý a 7 je veľký. Pre poslednú odpoveď znamená 7, že haptická hodnota priniesla hodnotu do zážitku a 1 že nepriniesla.

Taktiež som si všimol, že haptická odozva nefunguje v celom hernom priestore. Pri implementácií som sa snažil nájsť kompromis medzi veľkosťou hracej plochy, jej výškou a priestorom, kde bude cítiť haptickú odozvu, ale vnímam priestor na zlepšenie.

Kapitola 7

Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvorenie demonštračnej aplikácie, v ktorej bude prepojenie a využitie haptickej odozvy v rozšírenej realite použitím zariadení Stratos Explore a Hololens 2. Zámer bol splnený vytvorením dvoch aplikácií pomocou Unity pre Hololens 2 a jednej pre Stratos Explore, taktiež použitím Unity. V prvej aplikácii je možné manipulovať s guľou, ktorá sa vznáša. Druhá aplikácia je mini hra, kde hráč odráža skákajúcu guľu svojou rukou a snaží sa tak rozpučiť lezúce chrobáky.

Aplikácie komunikujú sieťovým rozhraním, pomocou architektúry klient – server, s aplikáciou, ktorá ovláda Stratos Explore a zdieľajú transformácie gule, čo umožňuje aby mala guľa haptickejšiu odozvu. Informácia o polohe Stratos Explore pre rozšírenú realitu je riešená pomocou detekcie obrázka systémom Vuforia.

Výsledná aplikácia, mini hra, bola testovaná piatimi ľuďmi. Ohodnotili ju ako jednoduchú a zábavnú. Taktiež cítili určitý prínos haptickej odozvy do zážitku rozšírenej reality.

Myslím že na výslednej demonštračnej mini hre by sa dalo vylepšiť viacero detailov, hlavne obtiažnosť a umiestnenie niektorých prvkov v scéne, možné by ešte bolo upraviť hraciu plochu tak, aby bolo všade cítiť haptickejšiu odozvu. Pravdepodobne by bolo vhodné ešte pridať obmedzenie, aby nebolo možné tlačiť guľu popri zemi, ale aby hráč musel používať techniku driblovania.

Literatúra

- [1] AYYILDIZ, M., SCARAGGI, M., SIRIN, O., BASDOGAN, C. a PERSSON, B. N. Contact mechanics between the human finger and a touchscreen under electroadhesion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. National Acad Sciences. 2018, zv. 115, č. 50, s. 12668–12673.
- [2] AZUMA, R. T. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* Cambridge, MA, USA: MIT Press. aug 1997, zv. 6, č. 4, s. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355. ISSN 1054-7460. Dostupné z: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>.
- [3] CAUDELL, T. a MIZELL, D. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*. 1992, ii, s. 659–669 vol.2. DOI: 10.1109/HICSS.1992.183317.
- [4] FEINER, S., MACINTYRE, B., HÖLLERER, T. a WEBSTER, A. A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Personal Technologies*. Springer. 1997, zv. 1, č. 4, s. 208–217.
- [5] FITZMAURICE, G. W., ZHAI, S. a CHIGNELL, M. H. Virtual Reality for Palmtop Computers. *ACM Trans. Inf. Syst.* New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. jul 1993, zv. 11, č. 3, s. 197–218. DOI: 10.1145/159161.159160. ISSN 1046-8188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/159161.159160>.
- [6] GARCÍA VALLE, G., FERRE, M., BREÑOSA, J. a VARGAS, D. Evaluation of Presence in Virtual Environments: Haptic Vest and User’s Haptic Skills. *IEEE Access*. 2018, zv. 6, s. 7224–7233. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2782254.
- [7] HIRAYAMA, R., MARTINEZ PLASENCIA, D., MASUDA, N. a SUBRAMANIAN, S. A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping. *Nature*. Nature Publishing Group. 2019, zv. 575, č. 7782, s. 320–323.
- [8] JUN, J.-H., PARK, J.-R., KIM, S.-P., MIN BAE, Y., PARK, J.-Y. et al. Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations. *Scientific reports*. Nature Publishing Group. 2015, zv. 5, č. 1, s. 1–16.
- [9] KATO, H. a BILLINGHURST, M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In: *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR’99)*. 1999, s. 85–94. DOI: 10.1109/IWAR.1999.803809.

- [10] LEITHINGER, D., FOLLMER, S., OLWAL, A. a ISHII, H. Shape displays: Spatial interaction with dynamic physical form. *IEEE computer graphics and applications*. IEEE. 2015, zv. 35, č. 5, s. 5–11.
- [11] LOPES, P., YOU, S., ION, A. a BAUDISCH, P. Adding Force Feedback to Mixed Reality Experiences and Games Using Electrical Muscle Stimulation. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, s. 1–13. CHI '18. DOI: 10.1145/3173574.3174020. ISBN 9781450356206. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3173574.3174020>.
- [12] MUN, S., YUN, S., NAM, S., PARK, S. K., PARK, S. et al. Electro-Active Polymer Based Soft Tactile Interface for Wearable Devices. *IEEE Transactions on Haptics*. 2018, zv. 11, č. 1, s. 15–21. DOI: 10.1109/TOH.2018.2805901.
- [13] NEWCOMBE, R. A., IZADI, S., HILLIGES, O., MOLYNEAUX, D., KIM, D. et al. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 2011, s. 127–136. DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6092378.
- [14] NICCI. *How does Ultrahaptics technology work?* [online], 31. júla 2018 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/haptics-overview/>.
- [15] NICCI. *Interaction zones and form factors* [online], 28. júla 2018 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/interaction-zones-form-factors/>.
- [16] NICCI. *What is Amplitude Modulation?* [online], 30. júla 2018 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/amplitude-modulation/>.
- [17] NICCI. *What is the resolution of Ultrahaptics?* [online], 27. júla 2018 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/resolution/>.
- [18] NICCI. *What is Time Point Streaming?* [online], 29. júla 2018 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/time-point-streaming/>.
- [19] NICCI. *The Science of Phased Arrays* [online], 8. januára 2019 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://developer.ultrahaptics.com/knowledgebase/science-phased-arrays/>.
- [20] RASKAR, R., WELCH, G., CUTTS, M., LAKE, A., STESIN, L. et al. The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays. In: *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1998, s. 179–188. SIGGRAPH '98. DOI: 10.1145/280814.280861. ISBN 0897919998. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/280814.280861>.
- [21] SCHMALSTIEG, D., FUHRMANN, A., SZALAVARI, Z. a GERVAUTZ, M. Studierstube-an environment for collaboration in augmented reality. In: *CVE'96 Workshop Proceedings*. 1996, sv. 19.

- [22] SCHMALSTIEG, D. a HÖLLERER, T. *Augmented Reality - Principles and Practice*. 1. vyd. Addison-Wesley Professional, jún 2016. 19 s. ISBN 978-0321883575.
- [23] SODHI, R., POUPYREV, I., GLISSON, M. a ISRAR, A. AIREAL: interactive tactile experiences in free air. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM New York, NY, USA. 2013, zv. 32, č. 4, s. 1–10.
- [24] SUTHERLAND, I. E. The Ultimate Display. In: CUMINCAD, 1965. Dostupné z: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/c58e.content.pdf>.
- [25] TAN, D. W., SCHIEFER, M. A., KEITH, M. W., ANDERSON, J. R., TYLER, J. et al. A neural interface provides long-term stable natural touch perception. *Science Translational Medicine*. 2014, zv. 6, č. 257, s. 257ra138–257ra138. DOI: 10.1126/scitranslmed.3008669. Dostupné z: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scitranslmed.3008669>.
- [26] WAGNER, D. a SCHMALSTIEG, D. First steps towards handheld augmented reality. In: IEEE Computer Society. *Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003. Proceedings*. 2003, s. 127–127.
- [27] YANG, T.-H., KIM, J. R., JIN, H., GIL, H., KOO, J.-H. et al. Recent Advances and Opportunities of Active Materials for Haptic Technologies in Virtual and Augmented Reality. *Advanced Functional Materials*. 2021, zv. 31, č. 39, s. 2008831. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202008831>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202008831>.

Príloha A

Moje otázky pre testerov

Aká bola zložitosť prvého levelu? *								
	1	2	3	4	5	6	7	
malá	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	veľká

Odrážala sa guľa silno alebo slabo? *								
	1	2	3	4	5	6	7	
slabo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silno

Boli zvuky vhodné alebo nevhodné? *								
	1	2	3	4	5	6	7	
nevhodné	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	vhodné

Chceli by ste si zahrať ďalší level? *								
	1	2	3	4	5	6	7	
nie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	áno

Priniesla haptická odozva do zážitku nejakú hodnotu? *								
	1	2	3	4	5	6	7	
nie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	áno

Príloha B

Otázky UEQ

Teraz prosím ohodnotte daný produkt označením jedného krúžku v každom riadku.

	1	2	3	4	5	6	7		
obťažujúci	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	pútavý	1
nepochopiteľný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	pochopiteľný	2
nápaditý	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	tuctový	3
intuitívny	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	neintuitívny	4
hodnotný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	menejcenný	5
nudný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	vzrušujúci	6
nezaujímavý	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	zaujímavý	7
nepredvídateľný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	predvídateľný	8
rýchly	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	pomalý	9
moderný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	tradičný	10
obmedzujúci	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	podporujúci	11
dobrý	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	zlý	12
zložitý	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	jednoduchý	13
odpuďujúci	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	potešujúci	14
bežný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	špičkový	15
nepríjemný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	príjemný	16
spoľahlivý	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nespoľahlivý	17
motivujúci	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	demotivujúci	18
spĺňajúci očakávania	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nesplňajúci očakávania	19
neefektívny	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	efektívny	20
jasný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	mätúci	21
nepraktický	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	praktický	22
prehľadný	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	neprehľadný	23
príťažlivý	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nepríťažlivý	24
sympatický	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nesympatický	25
konzervatívny	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	inovatívny	26

Príloha C

Obsah priloženého pamäťového média

/	
—xdrex104.pdf.....	písomná správa
—tex/.....	zdrojový tvar písomnej správy
—readme.txt.....	návod, ako spustiť aplikácie
—video.mp4.....	video prezentujúce kľúčové vlastnosti
—src.....	zdrojové súbory
—BugKillerAR/.....	pre minihru
—SphereManipulator/.....	pre manipulačnú aplikáciu
—Stratos/.....	pre Stratos Explore
—bin/.....	spustiteľné súbory
—BugKillerAR/.....	pre minihru
—SphereManipulator/.....	pre manipulačnú aplikáciu
—Stratos/.....	pre Stratos Explore