

**Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Reprezentácia používateľa vo
virtuálno-realitnom systéme pre
neurorehabilitáciu**

Bakalárska práca

2024

Damian Chmura

**Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Reprezentácia používateľa vo
virtuálno-realitnom systéme pre
neurorehabilitáciu**

Bakalárska práca

Študijný program: Informatika
Študijný odbor: 9.2.1. Informatika
Školiace pracovisko: Katedra počítačov a informatiky (KPI)
Školiteľ: Ing. Štefan Korečko, PhD.

Košice 2024

Damian Chmura

Abstrakt v SJ

Táto bakalárska práca predstavuje komplexný prieskum aplikácií virtuálnej reality (VR) v oblasti neurorehabilitácie. Štúdia začína analytickým prehľadom súčasných VR systémov používaných v rehabilitácii, ako sú REAL, Impact VR, VirtualRehab a XRHealth, hodnotiac ich schopnosti a načrtávajúc aktuálny stav projektu. S dôrazom na potrebu zapojenia a personalizovaných metód rehabilitácie práca diskutuje potenciál VR prekonať obmedzenia prítomné v tradičných rehabilitačných procesoch, obzvlášť pre pacientov zotavujúcich sa z cievnych mozgových príhod vedúcich k dlhodobej invalidite.

Kľúčové slová v SJ

virtuálna realita, virtuálna terapia, rozhranie mozog-počítač, inverzná kinematika, lokomócia, animácia

Abstrakt v AJ

This Bachelor's thesis presents a comprehensive exploration of virtual reality (VR) applications within the field of neurorehabilitation. The study begins with an analytical overview of current VR systems used in rehabilitation, such as REAL, Impact VR, VirtualRehab, and XRHealth, assessing their capabilities and outlining the project's current status. Emphasizing the necessity for engaging and personalized rehabilitation methods, the thesis discusses the potential of VR to overcome limitations present in traditional rehabilitation practices, particularly for patients recovering from cerebrovascular incidents leading to long-term disabilities.

Kľúčové slová v AJ

virtual reality, virtual therapy, brain-computer interface, inverse kinematics, locomotion, animation

Bibliografická citácia

CHMURA, Damian. *Reprezentácia používateľa vo virtuálno-reálnom systéme pre neurorehabilitáciu*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2024. 50s. Vedúci práce: Ing. Štefan Korečko, PhD.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
Katedra počítačov a informatiky

Z A D A N I E
B A K A L Á R S K E J P R Á C E

Študijný odbor: **Informatika**

Študijný program: **Informatika**

Názov práce:

**Reprezentácia používateľa vo virtuálno-realitnom systéme pre
neurorehabilitáciu**

User Representation in Virtual Reality Neurorehabilitation System

Študent: **Damian Chmura**

Školiteľ: **Ing. Štefan Korečko, PhD.**

Školiace pracovisko: **Katedra počítačov a informatiky**

Konzultant práce:

Pracovisko konzultanta:

Pokyny na vypracovanie bakalárskej práce:

1. Analyzovať súčasné prístupy k rehabilitácii vo virtuálnej realite.
2. Analyzovať riešenie pre neurorehabilitáciu v zdieľanej virtuálnej realite, vyvinuté na školiacom pracovisku, a požiadavky na jeho rozšírenie z hľadiska reprezentácie používateľa.
3. Na základe analýzy navrhnúť a implementovať vybrané rozšírenia analyzovaného systému.
4. Návrh a analýzu koordinovať s ďalšími riešiteľmi pracujúcimi na systéme.
5. Implementované riešenie overiť a vypracovať dokumentáciu podľa pokynov vedúceho práce.

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský

Termín pre odovzdanie práce: 24.05.2024

Dátum zadania bakalárskej práce: 31.10.2023



L. Z. Vokorokos

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

dekan fakulty

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že som záverečnú prácu vypracoval(a) samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry.

Košice, 24.5.2024

.....

Vlastnoručný podpis

Podakovanie

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu práce Ing. Štefanovi Korečkovi PhD. za jeho vedenie a odbornú pomoc počas riešenia tejto práce. Rovnako by som sa chcel poďakovať mojim spoluriešiteľom práce Petrovi Nehilovi a Andrejovi Dzemidovichovi za ich neoceniteľnú pomoc a podporu pri vývoji tejto práce. Ich odborné znalosti a priateľská spolupráca boli nesmierne dôležité pre úspešné dokončenie tejto práce.

Obsah

Úvod	1
1 Existujúce riešenia	3
1.1 Pozitíva VR v rehabilitácii	3
1.2 Aplikácie VR v medicínskom priestore	3
1.3 VR ako metódi Neurorehabilitácie	4
1.3.1 Systém REAL	4
1.3.2 Impact VR	5
1.3.3 XRHealth	6
1.3.4 Zhodnotenie existujúcich riešení	6
2 Súčasný stav projektu	8
2.1 Analýza	8
2.1.1 Architektúra aplikácie a nastavenie	8
2.1.2 Diagram architektúry	8
2.1.3 Rozhranie virtuálnej reality (VR)	9
2.1.4 Interakcia a ovládanie používateľa	9
2.1.5 Integrácia a komunikácia	10
2.1.6 Rehabilitačný protokol	10
2.1.7 Prispôsobiteľnosť	10
2.1.8 Vizuálna spätná väzba a prostredie	11
2.1.9 Dokumentácia a podpora	12
2.1.10 Záver	12
2.2 Zmeny projektu od publikácie predchádzajúcej práce	12
2.2.1 Refaktorizácia kódu	12
2.2.2 Rozšírenia funkcionalít	13
3 Teleportácia	14
3.1 Analýza	14
3.1.1 Spôsoby pohybu vo VR	14

3.1.2	Prechod na teleportáciu ako riešenie pohybu vo VR	15
3.1.3	Záver	15
3.1.4	Analýza teleportácie v rôznych aplikáciách VR	16
3.2	Návrh	17
3.2.1	Implementácia teleportácie pomocou interakčných nástro- jov XR	17
3.2.2	Zvýšenie komfortu a prístupnosti pre používateľa	17
3.2.3	Optimalizácia výkonu a hardvérovej kompatibility	18
3.2.4	Záver	18
3.3	Implementácia	18
3.4	Implementácia systému teleportácie pre multiplayer	19
3.4.1	Nastavenie systému teleportácie pre multiplayer	19
3.4.2	Presný popis kódu	20
4	Inverzná kinematika	22
4.1	Analýza	23
4.1.1	Riešenia inverznej kinematiky pre Unity	23
4.1.2	Nerealistické prípady animácií a ich možné obmedzenia	25
4.2	Implementácia	27
4.2.1	Implementácia komponentu VRIK	27
4.2.2	Problémy integrácie s pôvodným animation rigging package	27
4.2.3	Výzvy a zmeny v pláne	29
4.2.4	Konfigurácia avatara	30
4.2.5	Integrácia existujúcich interakčných objektov s FinalIK	30
4.2.6	Integrácia triedy ArmAnimationController s FinalIK	32
4.2.7	Implementácia VRIK Lokomócie	33
4.2.8	Riešenie pre automatické nastavenie oddychovej polohy	35
4.2.9	Implementácia obmedzení pohybu zápästí	36
4.2.10	Pokroky v animáciách chôdze s VRIK	37
5	Vyhodnotenie	38
5.1	Úvod	38
5.2	Teleportácia	38
5.3	Animácie	39
5.3.1	Testovanie používateľmi	40
5.3.2	Riešenie novoobjavených problémov	42
5.3.3	Zhodnotenie spätnej väzby	42

6 Záver	44
6.1 Zhrnutie práce	44
6.2 Hlavné výsledky	44
6.3 Výhody nového interakčného systému	44
6.4 Prínos práce	45
6.5 Príručky aplikácie	45
6.6 Obmedzenia a výzvy	46
6.7 Budúca práca	46
Slovník	51
Zoznam príloh	53
Používateľská príručka	57

Zoznam obrázkov

1.1	Systémy Osso VR[6] a Surgical theater[5]	4
1.2	Využitie a headset systému REAL[7]	5
1.3	Príklady využitia systému ImpactVR[8]	5
1.4	Príklady využitia systému XRHealth[9]	6
2.1	Diagram architektúry aplikácie	9
2.2	Menu pre nastavenie avatara	10
2.3	Nastavenia manuálneho cvičenia	11
2.4	Nastavenia sedenia pacienta	11
2.5	Vzhľad virtuálneho prostredia z pohľadu terapeuta	12
3.1	Existujúce riešenia pre teleportáciu	16
3.2	Systémový diagram pre VR teleportáciu	20
4.1	Riešenie IK pre dvojsegmentové robotické rameno s grafom relácii pozícií [19]	22
4.2	Odhady pozícií modelov IK a zodpovedajúce vstupné pozície[22] .	24
4.3	Vizuálne reprezentácia rigu MaleAvatara	25
4.4	Neprirodzený prechod ruky cez pohár	26
4.5	Hierarchia objektu XRRig zobrazujúca ciele pre VRIK solver	28
4.6	Pôvodná funkcia Update()	28
4.7	Systémový diagram pre VR teleportáciu	30
4.8	Príklady bodov úchopu pre objekty kocky a pohára	31
4.9	Krivka interakcie komponentu Interaction Object	32
4.10	StartArmAnimationCoroutine pseudokód s opisom	33
4.11	Možnosti konfigurácie komponentu VRIK pre ruku a lokomóciu . .	34
4.12	Vizualizácia obmedzenia pre pravú ruku	36
4.13	Vizualizácia obmedzenia pre pravú ruku	37

Zoznam tabuliek

4.1	Porovnanie riešení inverznej kinematiky pre Unity	25
-----	---	----

Úvod

Táto práca bola riešená v rámci projektov APVV-21-0105 (Dôveryhodná interakcia človek–robot a terapeut–pacient vo virtuálnej realite) a CHIST-ERA ReHaB (Towards an ecologically valid symbiosis of BCI and head-mounted VR displays: focus on collaborative post-stroke neurorehabilitation)."

Prepojenie technológií a zdravotníctva prinieslo v posledných rokoch značné pokroky v oblasti neurorehabilitácie. Naše poznatky o ľudskom mozgu a jeho pozoruhodnej schopnosti adaptácie sa značne rozširujú, čo nám pomáha objavovať nové zlepšenia v danej oblasti. Medzi najviac sľubné a inovatívne technológie, ktoré je možné implementovať, patrí virtuálna realita VR.

Neurorehabilitácia, teda proces zameraný na obnovu alebo zlepšenie funkčných schopností osôb s neurologickým postihnutím, sa tradične spolieha na konvenčné terapie a cvičenia. Tieto metódy sú v rôznej miere účinné, no často im chýba angažovanosť a individuálne prispôsobenie. Virtuálna realita so svojimi pohlcujúcimi a interaktívnymi schopnosťami ponúka jedinečné riešenie na odstránenie týchto obmedzení.

Cievna mozgová príhoda, ktorá je hlavnou príčinou dlhodobej invalidity, často vedie k strate pohyblivosti a funkcie ruky. Neurorehabilitácia sa v takýchto prípadoch stáva záchranným lanom. Tieto metódy, vrátane fyzickej terapie, ergoterapie a terapie pohybom vyvolaným obmedzením sa ukázali ako účinné pri uľahčovaní procesu zotavenia.

Aj keď tieto konvenčné metódy majú svoje silné stránky, zavedenie virtuálnej reality do neurorehabilitácie ponúka nový rozmer terapeutického potenciálu. Imerzívna a interaktívna povaha technológie VR v kombinácii s jej individuálnym prispôobením môže značne doplniť a zlepšiť tradičné metódy. Pacienti sa teraz môžu zapájať do rehabilitačných cvičení, ktoré odrážajú scenáre reálneho sveta, čo zvyšuje motiváciu a angažovanosť pri zotavovaní.

V tejto úvodnej kapitole položíme základy pre nasledujúce skúmanie, pričom poskytneme prehľad o pozadí, význame a cieľoch štúdie. Poukážeme aj na rastúci počet výskumov, ktoré podporujú účinnosť neurorehabilitácie vo virtuálnej

realite, ako aj na potenciálne výhody, ktoré ponúka pacientom aj poskytovateľom zdravotnej starostlivosti.

Formulácia úlohy

Na základe predchádzajúcej práce Petra Nehilu [1] si táto bakalárska práca dáva za cieľ vylepšiť funkcionálnosť v existujúcej virtuálnej scéne. Tieto ciele sú osobitne riešené v sekciách 3 pre teleportáciu a 4 pre inverznú kinematiku. Hlavným cieľom je implementácia pluginu pre inverznú kinematiku (IK) a riešenie potenciálnych problémov a obmedzení v animáciách. Kľúčovým krokom v tomto procese je hodnotenie a výber najvhodnejšieho IK pluginu pre túto konkrétnu aplikáciu.

Spolupráca má zásadný význam pre tento projekt, preto budem spolupracovať s Andrejom Dzemidovichom. Naša spolupráca by mala viesť k efektívnejšiemu riešeniu komplexných problémov.

Je tiež dôležité zdôrazniť, že technické aspekty týkajúce sa komunikácie medzi aplikáciou a zariadením na spracovanie EEG signálov pacienta už boli vyriešené v predchádzajúcom výskume. Preto cieľom tejto práce je rozšíriť existujúce riešenie v Unity a zabezpečiť, aby virtuálna scéna pre rehabilitáciu bola efektívna, motivujúca a zaujímavá pre pacientov.

Virtual reality (VR) sa v oblasti neurorehabilitácie stáva významným nástrojom s potenciálom zlepšiť výsledky rehabilitačných programov. Výhody VR v tomto kontexte zahŕňajú:

- **Zvýšená motivácia:** Pacienti často nachádzajú motiváciu pri vizualizácii pohybu a interakcii vo virtuálnom svete, čo môže prispieť k aktívnejšej účasti na rehabilitácii - a teda aj jej výsledkov.
- **Personalizácia:** VR aplikácie umožňujú personalizované cvičebné programy, ktoré sú vytvorené na mieru individuálnym potrebám pacienta.
- **Realistické vizualizácie:** Pacienti majú možnosť vidieť svoje pohyby v realistických virtuálnych scénach, teda je dosiahnutá vyššia úroveň pohltienia rehabilitačným procesom.

Tento projekt sa snaží posunúť vývoj v oblasti neurorehabilitácie v prostredí virtuálnej reality, s cieľom zdokonalenia daného systému a integrovania nových technológií v prospech pacientov a ich terapeutov. Virtuálna rehabilitácia ma značný potenciál zvýšiť kvalitu života pacientov a pomáhať im obnoviť ich motorické schopnosti.

1 Existujúce riešenia

Úsilie Petra Nehillu nám položilo významný základ vytvorením riešenia, ktoré zahŕňa komponenty softvéru aj hardvéru na podporu rehabilitačného procesu. Systém, ktorý vytvoril poskytuje interaktívne prostredie pre pacientov a terapeutov. Nižšie je podrobnejšia analýza súčasného stavu práce, ktorá bude ďalej vyvíjaná.

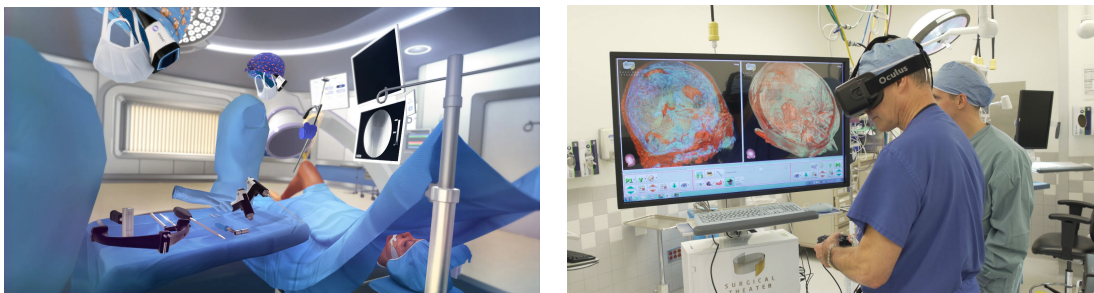
1.1 Pozitíva VR v rehabilitácii

Virtuálna realita (VR) ponúka nové a inovatívne prístupy v oblasti rehabilitácie. Vďaka svojej schopnosti vytvárať pohlcujúce a kontrolované prostredie môže VR poskytnúť pacientom bezpečnú a efektívnu formu terapie. VR má potenciál pomôcť pacientom zlepšiť motorické schopnosti, rovnováhu a koordináciu, čo je zvlášť užitočné pre pacientov, ktorí sa zotavujú po mozgovej príhode[2]. Podľa štúdie [3], je VR technológia schopná poskytnúť okamžitú spätnú väzbu o výkone pacienta, čo sú potrebné vlastnosti pre účinnú rehabilitáciu.

1.2 Aplikácie VR v medicínskom priestore

Integrácia virtuálnej reality (VR) v medicínskom priestore znamená začiatok novej éry zdravotnej starostlivosti a ponúka inovatívne riešenia v rôznych aplikáciách. Lekári čoraz viac využívajú VR [4] pre jeho neporovnateľnú schopnosť poskytovať pohlcujúce, interaktívne zážitky, čím zlepšujú starostlivosť o pacientov a lekárske vzdelávanie.

Platformy ako Surgical Theater[5] a Osso VR[6] znázornené na Obr. 1.1 predstavujú príklady transformácie v oblasti lekárskeho vzdelávania a školenia, poskytujúc virtuálne prostredia, kde si môžu praktici bezpečne osvojiť a zdokonaľiť chirurgické postupy. Táto praktická skúsenosť, získaná v bezpečnom a kontrolovanom prostredí, je neoceniteľná pre budovanie sebadôvery a zabezpečenie pripravenosti, čo priamo vedie k lepším výsledkom pre pacientov a celkovej spokoj-



Obr. 1.1: Systémy Osso VR[6] a Surgical theater[5]

nosti s poskytovanou zdravotnou starostlivosťou.

VR zohráva kľúčovú úlohu v chirurgickom plánovaní s technológiami ako EchoPixel a Surgical Theater[5], umožňujúc lekárom interakciu s 3D rekonštrukciami anatómie pre presnejšie zákroky. VRHealth a Firsthand Technology ďalej ponúkajú riešenia na zmiernenie bolesti.

1.3 VR ako metódiá Neurorehabilitácie

V tejto kapitole predstavíme niektoré systémy používané na neurorehabilitáciu. Tieto systémy sa nezameriavajú na konkrétnu formu rehabilitácie, ktorá je predmetom tejto práce. Využívajú iba headsety neponúkajú rozhranie medzi mozgom a počítačom (brain-computer interface - BCI). Skúmaný systém v tejto práci prístupuje k neurorehabilitácii inovatívnym spôsobom.

1.3.1 Systém REAL

Systém REAL [7] je platforma virtuálnej reality, ktorá sa zameriava na rôzne terapeutické a wellness oblasti. Pri neurorehabilitácii sa využíva na liečbu neurologických stavov poskytovaním prostredia, ktoré simuluje úlohy a scenáre z reálneho života. To môže pomôcť pacientom s neurologickými poruchami, ako sú tí, ktorí sa zotavujú po mozgovej príhode, zlepšiť ich motorické zručnosti, rovnováhu a koordináciu[7].

Schopnosť systému poskytovať spätnú väzbu v reálnom čase pri zachytávaní pohybu používateľa a hodnotení pohyblivosti kĺbov je kľúčová pre rehabilitáciu horných aj dolných končatín. Inkorporovaním kľúčových princípov neurorehabilitácie, ako napríklad postupné zvyšovanie náročnosti, dokáže systém REAL VR významne prispieť k procesu zotavenia.

Potenciálne nevýhody zahŕňajú problémy s prístupnosťou pre niektorých pacientov, náklady na zavedenie systému a potreba technickej odbornosti na nasta-

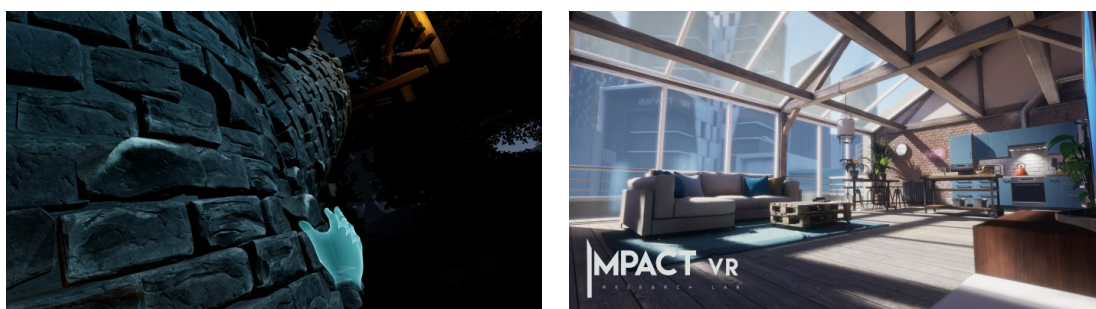


Obr. 1.2: Využitie a headset systému REAL[7]

venie a prevádzku systému, keďže využíva proprietárny hardvér ktorý je znázorňovaný spolu s jeho využitím na Obr. 1.2.

1.3.2 Impact VR

Impact VR [8] posúva hranice v oblasti neurorehabilitácie vytváraním VR scénara špeciálne navrhnutého pre rehabilitáciu dysfágie, viditeľný na Obr. 1.3, bežného neurologického stavu. Tento inovatívny prístup má za cieľ zlepšiť reedukáciu svalov, ktorá je kľúčová pre pacientov s ťažkosťami pri prehĺtaní v dôsledku neurologických poškodení. Systém poskytuje personalizovaný rehabilitačný zážitok, ktorý môže zvýšiť zapojenie pacientov a ponúknuť okamžitú spätnú väzbu ich výkonu. Táto interakcia v reálnom čase je nevyhnutná na prispôsobenie cvičení špecifickým potrebám každého pacienta, čo potenciálne robí prehĺtanie bezpečnejším a rehabilitačné úsilie efektívnejším. Hoci plný dopad VR na rehabilitáciu dysfágie je stále predmetom skúmania, prvotné indície naznačujú, že by to mohol byť významný krok vpred v liečbe porúch prehĺtania v rámci neurorehabilitácie.



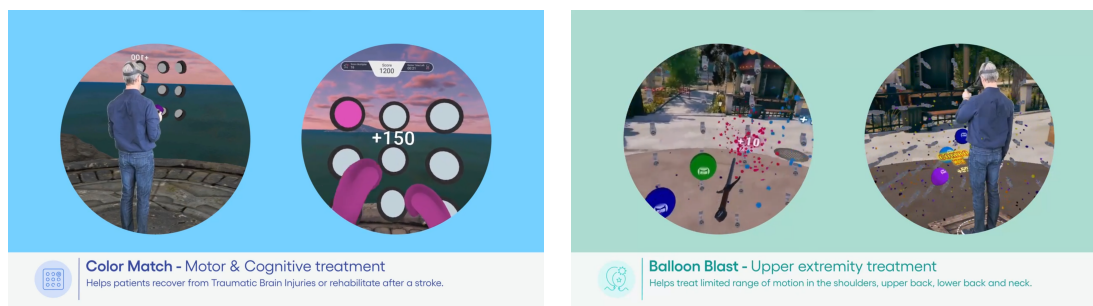
Obr. 1.3: Príklady využitia systému ImpactVR[8]

1.3.3 XRHealth

XRHealth[9] poskytuje terapiu založenú na princípoch neuroplasticity pre liečbu neurologických ochorení. Pacienti sa zapájajú do gamifikovaných terapií, zobrazených na Obr. 1.4, ktoré sú zábavné a zároveň podporujú správnu funkciu nervového systému. Tento prístup môže viesť k lepšiemu dodržiavaniu liečebných plánov.

Personalizovaná liečba v aj v domácom prostredí zvyšuje dostupnosť a pohodlie, čo je výhodné pre pacientov s obmedzenou mobilitou. Systém tiež poskytuje individuálnu podporu prostredníctvom pravidelných konzultácií s licencovaným terapeutom a umožňuje pacientom komunikovať s terapeutom prostredníctvom aplikácie medzi konzultáciami.

Integrácia VR/AR technológií s pokročilou dátovou analytikou ponúka komplexné riešenie starostlivosti, ktoré sa dá prispôbiť v reálnom čase na základe spätnej väzby a pokroku pacienta. Tento moderný prístup k výzvam neurorehabilitácie predstavuje sľubnú možnosť pre pacientov hľadajúcich efektívnu liečbu svojich neurologických stavov.



Obr. 1.4: Príklady využitia systému XRHealth[9]

1.3.4 Zhodnotenie existujúcich riešení

Súčasný VR systém pre neurorehabilitáciu, ako sú REAL, Impact VR a XRHealth, predstavujú významný pokrok v liečbe ochorení. Tieto systémy využívajú najnovšie technológie na poskytovanie inovatívnych terapeutických prístupov, ktoré sú zábavné, angažujúce a personalizované.

Napriek týmto pozitívam však existujú aj určité nevýhody a výzvy. Vysoké náklady na VR zariadenia a softvér môžu byť prekážkou pre široké prijatie týchto systémov, najmä v zdravotníckych zariadeniach s obmedzeným rozpočtom. Ďalším problémom môže byť prístupnosť a kompatibilita s existujúcimi zdravotníckymi protokolmi a infraštruktúrou. Okrem toho, zatiaľ čo VR poskytuje nové

možnosti terapie, potreba technickej odbornosti na správne nastavenie a údržbu systémov môže byť bariérou pre niektoré zdravotnícke personály.

Nami vyvíjaným systém ponúka cenovo dostupnejšie a jednoduchšie riešenie. Na rozdiel od vyššie uvedených systémov, tento nástroj je cenovo efektívnejší, čo umožňuje širšie prijatie a je tiež jednoduchší na používanie, čo znižuje potrebu technickej odbornosti. Integrácia rozhrania medzi mozgom a počítačom (BCI) prostredníctvom OpenViBe navyše umožňuje zber reálnych údajov z mozgu, čo môže potenciálne umožniť lepšie prispôsobené terapeutické prístupy. Nevýhodou je nižšia grafická kvalita, čo môže ovplyvniť úroveň imerzie a angažovanosti pacientov. Taktiež, podobne ako ostatné systémy, môže byť výzvou kompatibilita s existujúcimi zdravotníckymi protokolmi a infraštruktúrou.

2 Súčasný stav projektu

2.1 Analýza

Táto kapitola poskytuje prehľad aktuálneho stavu projektu, vrátane detailného rozboru jeho architektúry a nastavení. Analyzuje sa tu rozhranie virtuálnej reality (VR), interakcia a ovládanie používateľa, ako aj integrácia a komunikácia systému.

2.1.1 Architektúra aplikácie a nastavenie

Aplikácia na systéme Windows nevyžaduje konvenčný inštalačný proces; spúšťa sa spustením súboru NeuroRehabVR.exe, ktorý sa nachádza v konkrétnom adresári obsahujúcom všetky potrebné súbory. VR headsety založené na systéme Android majú špecifický inštalačný proces zdokumentovaný v dokumentácii. Na fungovanie systému je nutné nastavenie servera a správne konfigurované klientké inštancie.

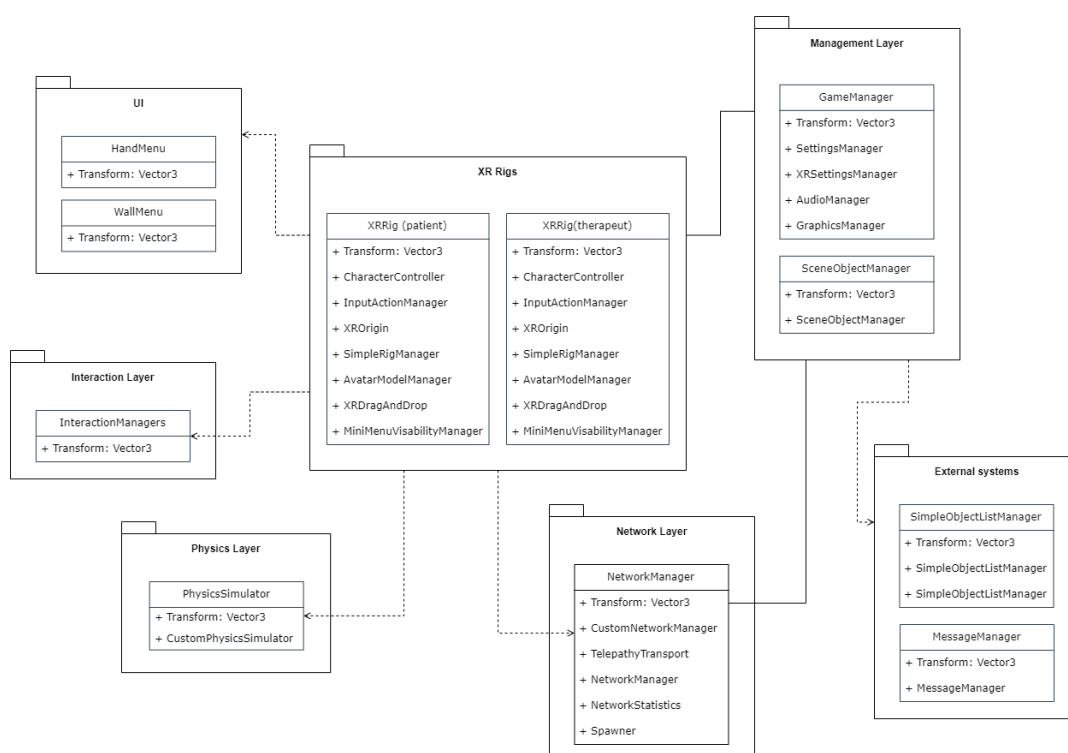
2.1.2 Diagram architektúry

Diagram 2.1 je rozdelený do niekoľkých hlavných vrstiev, z ktorých každá obsahuje špecifické komponenty, ktoré spolupracujú na zabezpečení funkčnosti systému. Vrstvy a ich komponenty sú nasledovné:

Vzťahy medzi vrstvami:

- **Management Layer** interaguje s **Physics Layer**, **Network Layer**, a **XR Rigs** na zabezpečenie správneho nastavenia a konfigurácie.
- **Physics Layer** interaguje s **Interaction Layer** a **Management Layer**, aby poskytla fyzikálnu simuláciu pre interakcie a celkový systém.
- **Interaction Layer** interaguje s **XR Rigs** na spravovanie užívateľských interakcií v rozšírenej realite.

- **Network Layer** interaguje s **UI**, **XR Rigs**, a **External Systems** na zabezpečenie sieťovej komunikácie a synchronizácie dát medzi komponentmi.
- **UI** interaguje s **Network Layer** a **XR Rigs** na poskytovanie užívateľského rozhrania pre užívateľov.
- **XR Rigs** interaguje s **Interaction Layer**, **Network Layer**, a **Management Layer** na zabezpečenie plnej funkčnosti rozšírenej reality pre pacientov a terapeutov.



Obr. 2.1: Diagram architektúry aplikácie

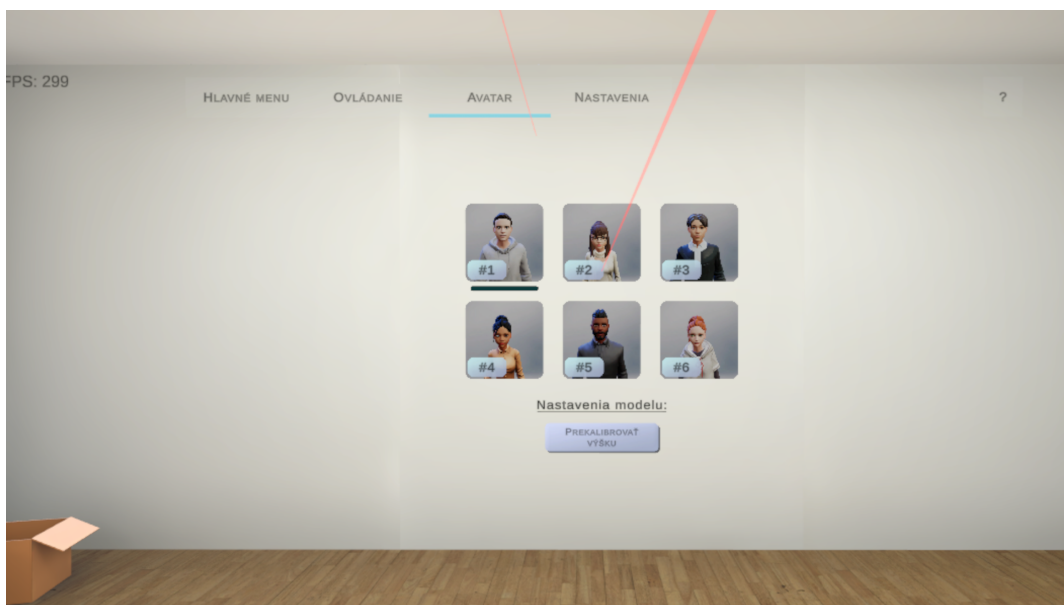
2.1.3 Rozhranie virtuálnej reality (VR)

Oculus Quest je momentálne používaný ako hlavné zariadenie aplikácie. Hoci aplikácia nie je dostupná prostredníctvom konvenčných platforiem ako Oculus Store, možno ju ručne nainštalovať podľa série krokov uvedených v dokumentácii. Zverejnenie aplikácie na Oculus store by značne pomohlo urýchliť deployment nových verzií. Je potrebné overiť kompatibilitu s inými VR headsetmi.

2.1.4 Interakcia a ovládanie používateľa

V priestore VR môžu používatelia meniť nastavenia, prispôbiť vzhľad avatarov, Obr. 2.2, a resetovať výšku avatarov. Schéma ovládania sa líši medzi počítačmi

a VR headsetmi, na počítači je možné využívať klávesnicu a myš zatiaľ čo VR headset využíva ovládače. Menu aplikácie možno prechádzať v 3D alebo 2D, čo poskytuje flexibilitu v interakcii používateľa.



Obr. 2.2: Menu pre nastavenie avatara

2.1.5 Integrácia a komunikácia

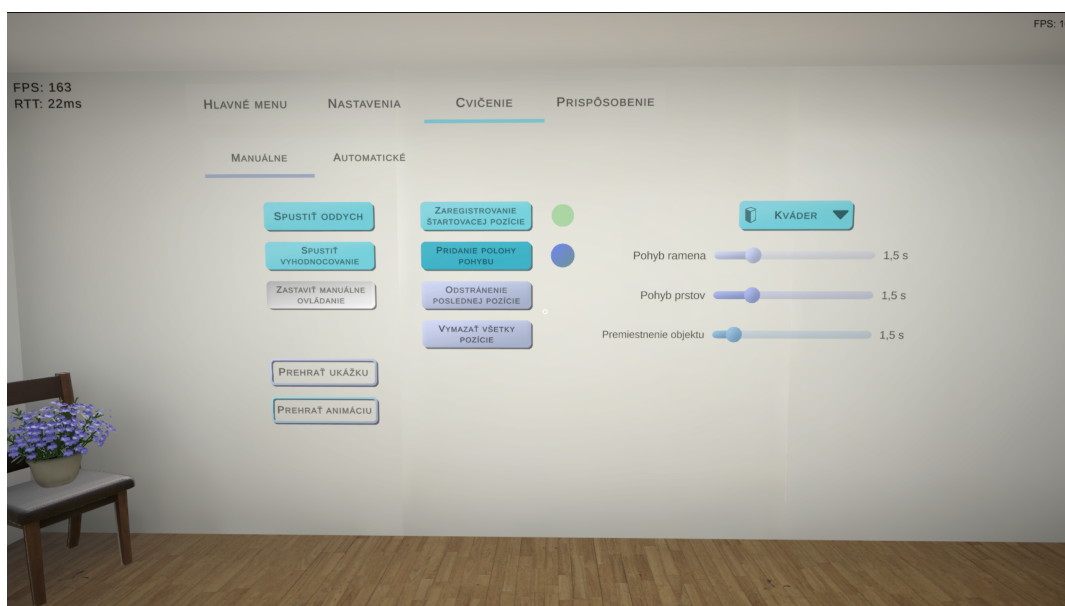
Systém je navrhnutý tak, aby komunikoval s OpenViBe, čo je softvérová platforma určená na navrhovanie, testovanie a používanie rozhraní mozog-počítač.

2.1.6 Rehabilitačný protokol

Systém určuje rozličné role pre pacientov a terapeutov. Pacienti dodržiavajú pokyny dané terapeutmi, ktorí vedú rehabilitačné sedenia. Terapeut má kontrolu nad rôznymi nastaveniami vrátane typu pohybu použitého pre cvičenia, aktívnou rukou na rehabilitáciu a inými parametrami ako časovanie animácií, opakovania a pozície. Do systému sú integrované rôzne animácie, ktoré demonštrujú rôzne pohyby, no animácie a použité objekty sú pomerne jednoduché, je potrebné zvážiť zvýšenie ich realizmu a interaktivity.

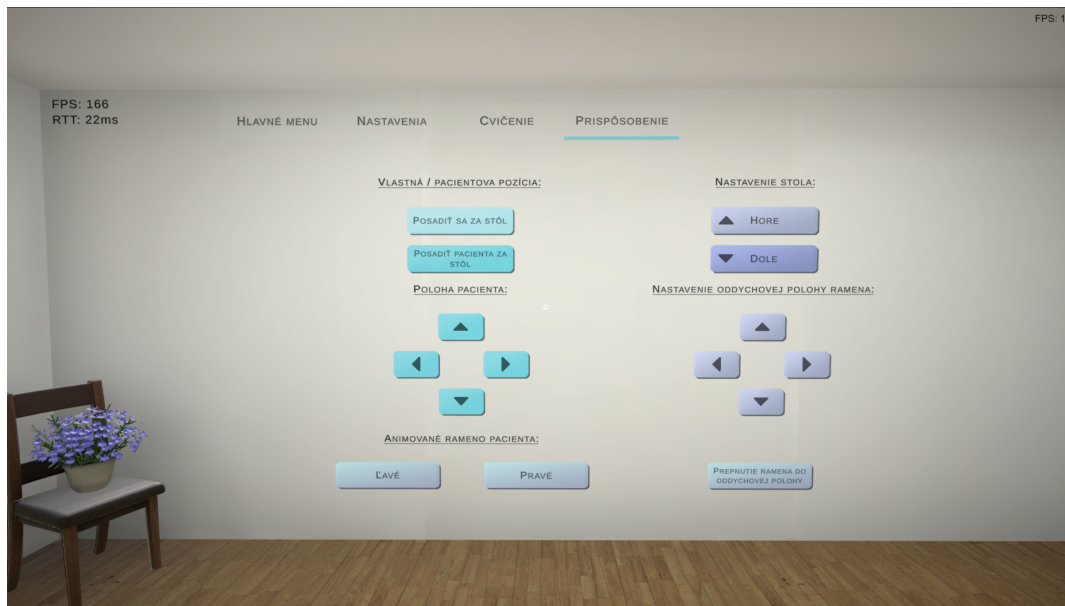
2.1.7 Prispôsobiteľnosť

Systém do určitej miery podporuje prispôsobiteľnosť, umožňuje úpravy pozícií a nastavení, takže umožňuje aj do istej miery vyhovieť individuálnym potrebám pacienta. Avšak maximálny počet pozícií pre pohyby je obmedzený na 10 a určité



Obr. 2.3: Nastavenia manuálneho cvičenia

nastavenia animácií sú málo nastaviteľné. Obr. 2.3 zobrazuje nastavenia manuálneho cvičenia, ktoré využíva terapeut. Terapeut vie taktiež nastaviť pozíciu sedu pacienta, výšku stola, zmeniť aktívnu ruku a posadiť samotného pacienta za stôl. Dané nastavenia sedu sú zobrazené na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Nastavenia sedenia pacienta

2.1.8 Vizuálna spätná väzba a prostredie

Vizuálne prostredie, viditeľné na Obr. 2.5, v ktorom prebieha rehabilitácia, je jednoduché, ale funkčné. Zobrazenie objektov a animácií je priamočiare, čo pomáha

rýchlo pochopiť rehabilitačný proces. Momentálna verzia neobsahuje interaktívny tutoriál pre používateľov.



Obr. 2.5: Vzhľad virtuálneho prostredia z pohľadu terapeuta

2.1.9 Dokumentácia a podpora

Predchádzajúca práca [1] poskytuje dokumentáciu pre nastavenie a používanie aplikácie, ktorú je možné využiť pri oboznamovaní sa so systémom a riešení problémov.

2.1.10 Záver

Táto analýza objasňuje silné a slabé stránky práce Petra Nehillu [1]. Základy, ktoré položil, budú významné pre vytvorenie sofistikovanejšieho, používateľsky príjemnejšieho riešenia virtuálnej rehabilitácie. Nadchádzajúce sekcie sa budú zaoberať konkrétnymi oblasťami zlepšenia, pričom hlavný dôraz bude kladený na vylepšenie animácií s cieľom dosiahnuť atraktívnejší a terapeuticky účinnejší zážitok.

2.2 Zmeny projektu od publikácie predchádzajúcej práce

V tejto časti je zhnutý pokrok, ktorý bol dosiahnutý od publikácie poslednej práce [1]. Zameriava sa na refaktORIZáciu kódu a rozšírenia funkcionalít, ktoré zvyšujú efektívnosť, rozširujú možnosti užívateľov a prispievajú k stabilite a výkonnosti systému.

2.2.1 RefaktORIZácia kódu

Sekcia sumarizuje kľúčové úpravy zamerané na zlepšenie užívateľského rozhrania a efektívnosti správy platforiem. Opisuje vylepšenia stability siete a prispô-

sobeníaa pre výkon a vizuálne aspekty systému.

- **Používateľské rozhranie:** Aktualizácie zamerané na zlepšenie ovládania a menu.
- **PlatformManager:** Vykonané úpravy pre efektívnejšiu správu platforiem.
- **ShortcutMarkers:** Opravené chyby po prepnutí do režimu XR a pridaná lokalizácia.
- **Nastavenie rozlíšenia:** Pridané nové možnosti pre nastavenie rozlíšenia obrazu.
- **Platform Resolver:** Implementovaný pre UI prvky a odstránený HDR z VR režimu pre lepší výkon.
- **Kontrola verzií:** Pridaná kontrola verzií klienta a aktualizované skripty pre zobrazenie verzie a chybové hlášky.
- **Siete:** Zlepšená stabilita a výkon siete vďaka prechodu z KCP na Telepathy (TCP).

2.2.2 Rozšírenia funkcionalít

Táto časť opisuje novú funkcionalitu ako napríklad rozšírené možnosti tréningového režimu, inovácie v dizajne používateľského rozhrania a pridanie podpory pre viaceré miestnosti.

- **Tréningový režim:** Pridaný manuálny režim pre tréning.
- **Dizajn používateľského rozhrania:** Aktualizovaný vzhľad s novými posúvacími panelmi a prepínačmi pre lepšiu navigáciu.
- **Lokalizácia:** Rozšírená podpora lokalizácie pre rôzne UI komponenty a správy.
- **Optimalizácia výkonu:** Vylepšenia výkonu vrátane optimalizovaného komponentu NetworkAvatarWalkingController.
- **Osvetlenie a post-processing:** Pridané "baked in" efekty a separované skripty pre nastavenie.
- **Prepracovanie používateľského rozhrania:** Nové farebné schéma a jednoduchšie UI prvky pre moderný vzhľad.
- **Viacere miestnosti:** Základná funkcionalita pre podporu viacerých miestností.

3 Teleportácia

V tejto časti sú preberané aspekty implementácie teleportácie v Unity pomocou súpravy XR Interaction Toolkit, konkrétne sa zameriava na analýzu existujúcich riešení, komponentov a všetky potrebné kroky, ktoré bolo nutné podstúpiť pre funkčnú implementáciu teleportácie v prostredí pre viacero používateľov.

3.1 Analýza

V oblasti virtuálnej reality (VR) je mechanika pohybu základným kameňom imerzného zážitku. Táto časť sa zaoberá tradičnými metódami pohybu vo VR, rozoberá ich obmedzenia a predstavuje teleportáciu ako lepšiu alternatívu.

3.1.1 Spôsoby pohybu vo VR

- **Prehľad tradičného pohybu:** V minulosti si systémy virtuálnej reality požívali mechaniku pohybu z tradičných videohier, napríklad pohyb pomocou joystickov alebo touchpadov. Tieto metódy pohybu umožňujú používateľom pohybovať sa vo virtuálnom prostredí spôsobom, ktorý je im známy, keďže využívajú ich skúsenosti z konvenčných 2D herných platforiem.
- **Fyzická a kognitívna disonancia:** Pohyb pomocou joystickov často vedie k javu známemu ako "Simulator sickness", prekladom "simulátorová choroba", podobnému pohybovej chorobe. Dochádza k nemu v dôsledku zmyslového konfliktu medzi tým, čo používateľ vidí vo virtuálnom prostredí, a tým, čo vníma jeho telo. Okamžité zrýchlenie alebo spomalenie, ktoré je bežným aspektom pohybu pomocou joysticku, tento problém ďalej znásobuje, pretože vytvára výrazný rozdiel medzi očakávanými a skutočnými fyzickými pocitmi [10].
- **Výskum pohybovej nevoľnosti vo VR:** Štúdie ukázali, že dlhodobé vystavenie prostrediu VR s tradičnou mechanikou pohybu môže viesť k príznakom, ako sú nevoľnosť, závraty a bolesti hlavy. Tieto príznaky sú obzvlášť

výrazné v prostrediach, ktoré si vyžadujú rýchly alebo nepretržitý pohyb, keďže mozog sa snaží vyrovnať s nedostatkom zodpovedajúceho fyzického pohybu [11].

3.1.2 Prechod na teleportáciu ako riešenie pohybu vo VR

- **Úvod do teleportácie vo VR:** Teleportácia ako mechanizmus pohybu vo VR zahŕňa výber cieľa vo virtuálnom prostredí a okamžitý presun používateľa na toto miesto. Táto metóda výrazne znižuje zmyslový nesúladi, ktorý prispieva k pohybovej nevoľnosti, elimináciou nepretržitého pohybu pri presune.
- **Používateľský zážitok a pohodlie:** Teleportácia bola ocenená pre svoju schopnosť poskytnúť pohodlný a pohlcujúci zážitok. Tým, že teleportácia obchádza potrebu nepretržitého pohybu, umožňuje používateľom pohybovať sa vo virtuálnych priestoroch bez nepohodlia spojeného s tradičným pohybom pomocou joysticku.

Zachovanie pohybu joystickom popri teleportácii

- **Používateľské preferencie a inkluzívnosť:** Je veľmi dôležité uvedomiť si, že preferencie používateľov sa v prostrediach VR výrazne líšia. Zatiaľ čo niektorí používatelia môžu uprednostňovať jednoduchosť teleportácie, iní môžu považovať pohyb pomocou joysticku ako ideálnejší. Preto ponuka oboch možností uspokojí širšie spektrum používateľov a herných štýlov.
- **Začlenenie spätnej väzby a prispôsobenia:** Podľa Boletsis, C.[12] vývojári môžu zmierniť niektoré nepríjemné pocity spojené s pohybom pomocou joysticku implementovaním funkcií, ako sú nastaviteľné rýchlosti pohybu, obmedzovače zorného poľa a poskytovanie možností postupného zrýchľovania. Tieto úpravy môžu pomôcť znížiť pohybovú nevoľnosť a zároveň zachovať prieskumnú povahu pohybu založeného na joysticku.

3.1.3 Záver

Vývoj mechaniky pohybu vo VR odráža pokračujúce úsilie o vyváženú imerziu, pohodlie a preferencie používateľa. Zatiaľ čo teleportácia sa ukazuje ako priaznivé riešenie problémov, ktoré predstavuje tradičný pohyb pomocou joysticku, jej zachovanie ako možnosti zdôrazňuje dôležitosť zohľadnenia rôznych potrieb a skúseností používateľov. S rozvojom technológie VR bude skúmanie a integrácia

rôznych mechaník pohybu kľúčové pri formovaní budúcnosti zážitkov z virtuálnej reality.

3.1.4 Analýza teleportácie v rôznych aplikáciách VR

V tejto časti sa zaoberáme porovnávacou analýzou implementácie teleportácie v rôznych VR produktoch, pričom zdôrazňujeme ich jedinečné prístupy a vplyv na používateľský zážitok. Taktiež špekulujeme o budúcom vývoji v oblasti pohybu vo VR.

- **Half-Life: Alyx [13]:** Táto hra sa často uvádza ako najlepší príklad efektívnej implementácie teleportácie vo VR 3.1a. Implementovaný systém teleportácie z bodu do bodu je chválený za intuitívne ovládanie a jasnú vizuálnu spätnú väzbu, tieto vlastnosti výrazne prispievajú k používateľskému komfortu a priestorovej orientácii. Úspech tejto hry ukazuje, ako môže dobre navrhnutá mechanika teleportácie zlepšiť zážitok z VR.
- **The Elder Scrolls V: Skyrim VR [13]:** Prístup Skyrimu VR, ktorý ponúka teleportáciu 3.1b aj tradičný pohyb joystickom, poukazuje na dôležitosť poskytovania možností používateľom. Táto flexibilita umožňuje hráčom zvoliť si štýl pohybu, ktorý najlepšie vyhovuje ich úrovni pohodlia, čo demonštruje prispôsobivosť mechaniky teleportácie v rôznych kontextoch VR.
- **VRChat [14]:** VRChat využíva teleportáciu ako metódu lokomócie aj ako nástroj sociálnej interakcie - tento fakt zdôrazňuje všestrannosť danej technológie. Implementácia vo VRChat demonštruje úlohu teleportácie pri uľahčovaní sociálnych interakcií a jednoduchšej navigácie v priestoroch VR pre viacerých hráčov.



(a) Teleportácia v Half-Life[15]



(b) Teleportácia v Skyrim VR[16]

Obr. 3.1: Existujúce riešenia pre teleportáciu

3.2 Návrh

Táto časť sa zaoberá technickými aspektmi implementácie teleportácie v Unity pomocou súpravy XR Interaction Toolkit, pričom sa zameriava na komponenty, aspekty návrhu a optimalizáciu pre používateľský komfort a výkon systému.

3.2.1 Implementácia teleportácie pomocou interakčných nástrojov XR

- **Konfigurácia platformy XR:** XR Rig v Unity funguje ako ústredný komponent pre polohovanie a pohyb hráča. Správne nastavenie XR Rig je kľúčové, keďže definuje spôsob interakcie hráča s virtuálnym prostredím. Patrí sem nastavenie kamery a sledovacieho priestoru, ich správne nastavenia zabezpečia, že pohyby hráča budú presne reprezentované v hernom svete [17].
- **Mechanika systému teleportácie:** Súbor interakčných nástrojov XR spoločnosti Unity ponúka robustný rámec na implementáciu teleportácie. Súbor nástrojov obsahuje Locomotion System, ktorý riadi spôsob pohybu hráča v priestore. Teleportation provider komponent, ktorý je súčasťou tohto systému, je zodpovedný za spracovanie akcie teleportovania. Tento poskytovateľ funguje tak, že interpretuje vstupy používateľa, ako je napríklad stlačenie a podržanie joysticku, a prekladá ich na akciu teleportovania v rámci virtuálneho sveta [17].

3.2.2 Zvýšenie komfortu a prístupnosti pre používateľa

- **Plynulé prechody:** Proces prechodu počas teleportácie je nevyhnutný na predchádzanie dezorientácii a nepohodliu. Implementácia efektov plynulého nábehu a výbehu alebo krátkych animácií počas teleportácie môže výrazne zlepšiť používateľský zážitok.
- **Prispôsobiteľné nastavenia pre prístupnosť:** Na sprístupnenie zážitkov z VR širšiemu publiku je nevyhnutné zahrnúť prispôsobiteľné nastavenia vzdialenosti, rýchlosti a citlivosti ovládania teleportácie. Tým sa zabezpečí, aby sa používatelia s rôznymi schopnosťami a preferenciami mohli pohodlne pohybovať v prostredí VR [18].

3.2.3 Optimalizácia výkonu a hardvérovej kompatibility

- **Optimalizácia výkonu:** Optimalizácia mechaniky teleportácie je kľúčová pre zachovanie vysokej snímkovej frekvencie a minimalizáciu latencie. Vývojári musia optimalizovať tieto systémy s ohľadom na rôzne hardvérové možnosti VR zariadení aby predchádzali nepríjemným pocitom spôsobených problémami s výkonom vo VR.
- **Prispôsobenie sa rôznemu hardvéru:** Hardvér VR sa výrazne líši v možnostiach a technológiách sledovania. Prispôsobenie teleportačného systému tak, aby efektívne fungoval na rôznych zariadeniach, zabezpečuje konzistentný a príjemný zážitok pre všetkých používateľov [17].

3.2.4 Záver

Komparatívna analýza teleportácie vo VR zdôrazňuje jej potenciál výrazne zlepšiť používateľský zážitok tým, že rieši kritickú otázku pohodlia a zároveň poskytuje intuitívne a flexibilné možnosti navigácie. V budúcnosti integrácia pokročilých technológií a personalizovaných lokomočných systémov ponúkajúcich ešte viac pohlcujúci a pohodlný spôsob navigácie bude pravdepodobne zohrávať jednu z hlavných úloh vo vývoji aplikácií virtuálnej reality

Samotná implementácia teleportácie vo VR pomocou interakčných nástrojov Unity XR si vyžaduje zváženie rôznych technických faktorov a faktorov používateľského zážitku. Kľúčom k úspešnej implementácii je presné nastavenie XR Rig, návrh responzívneho a intuitívneho systému teleportácie a optimalizácia z hľadiska výkonu a prístupnosti.

3.3 Implementácia

V ďalšom štádiu vývoja bol implementovaný systém pohybu, ktorý využíva teleportáciu. Najprv bol k objektu Locomotion, ktorý je súčasťou XR Rig, pridaný komponent Teleportation provider, aby sa zabezpečila správna integrácia s celkovým systémom pohybu v aplikácii.

Následne bolo potrebné vybrať a nastaviť vhodný systém lokomócie. Bola zvolená možnosť Locomotion (Locomotion system) a k objektu Ground bol pridaný komponent Teleportation area. Toto nastavenie určuje oblasť v prostredí, kam sa môžu používatelia teleportovať.

Ďalej bola vytvorená nová interakčná vrstva s názvom TeleportationArea, ktorá bola priradená objektu Ground.

Potom boli nastavené interaktory rúk, pričom sa zameriavalo iba na ľavú ruku. Bol vybraný komponent `LeftHandInteractor` a upravené jeho nastavenia. K jeho komponentu `XR Ray Interactor` bola pridaná vrstva `TeleportationArea` do masky raycastu, čo umožnilo ľavej ruke interagovať s určenými objektmi v prostredí.

Komponent `XR Ray Interactor` umožňuje interakciu s virtuálnym prostredím prostredníctvom lúča vychádzajúceho z ruky používateľa. "Maska raycastu" je nastavenie komponentu, ktoré určuje, s ktorými objektmi môže lúč interagovať alebo ich detegovať. Nakoniec bol objekt „Ground“ pridaný do masky raycastu `LeftHandInteractor`.

3.4 Implementácia systému teleportácie pre multiplayer

Pri ďalšom vývoji bola implementácia rozšírená o podporu pre multiplayerovú funkcionality. Táto úloha zahŕňala úpravu a doplnenie kódu, ktorý zabezpečuje správnu funkčnosť teleportácie aj v režime pre viacerých hráčov. Hlavný dôraz bol kladený na správnu synchronizáciu a konzistenciu medzi klientmi.

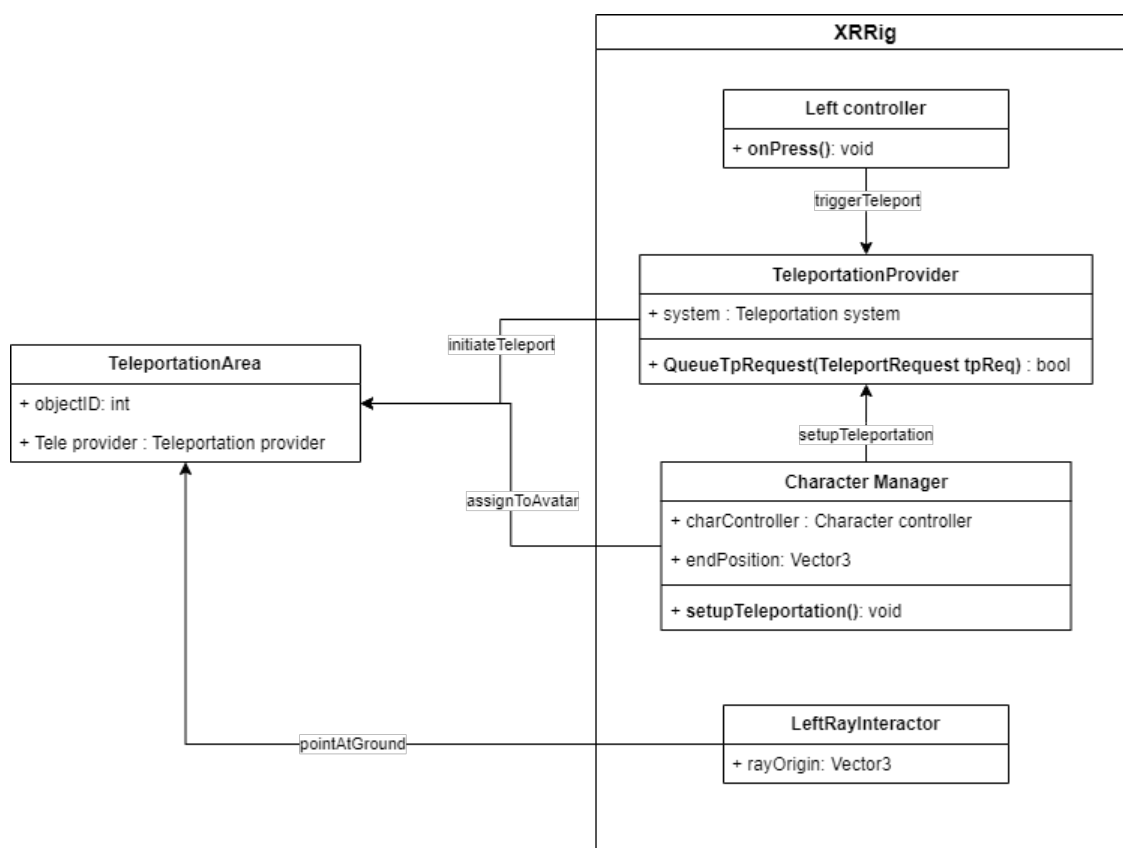
3.4.1 Nastavenie systému teleportácie pre multiplayer

Pre zabezpečenie funkcionality teleportácie v multiplayerovom režime bola implementovaná funkcia `SetupTeleportation`. Jej implementácia sa ukázala ako nevyhnutná z nasledujúcich dôvodov:

- **Konzistentnosť správania teleportácie:** Pri viacerých hráčoch v scéne je nutné zabezpečiť, aby každý hráč videl správnu pozíciu ostatných hráčov po teleportácii. Správne nastavenie poskytovateľa teleportácie pre každú oblasť (`TeleportationArea`) zabezpečí, že sa hráči teleportujú presne tam, kam zmýšľajú.
- **Integrácia s pohybovým systémom:** Komponent `TeleportationProvider` je ústredným prvkom systému teleportácie a jeho priradenie ku každej oblasti teleportácie umožňuje správne fungovanie mechanizmu pohybu naprieč celou VR scénou.

UML diagram teleportačného systému

UML komponentný diagram 3.2 znázorňuje interakcie medzi komponentmi, ktoré zabezpečujú teleportáciu v scéne. Diagram popisuje štandardnú implementáciu



Obr. 3.2: Systémový diagram pre VR teleportáciu

teleportácie pomocou XR a funkciu, ktorá priradzuje teleportovacích poskytovateľov avatarov.

- **Left Controller** spúšťa teleportáciu cez **TeleportationProvider**.
- **TeleportationProvider** iniciuje teleportáciu na **TeleportationArea**.
- **Character Manager** nastavuje teleportáciu a priradzuje teleportovacích poskytovateľov avatarom.
- **LeftRayInteractor** ukazuje na miesto teleportácie.

3.4.2 Presný popis kódu

Funkcia `SetupTeleportation` zabezpečuje správne nastavenie systému teleportácie pre každého hráča a zaisťuje konzistentné správanie v multiplayerovom režime. Umožňuje synchronizované spracovanie teleportácie medzi klientmi a zaručuje, že hráči budú vidieť rovnaké pozície ostatných hráčov po ich teleportácii. Týmto spôsobom sa minimalizujú chyby a zlepšuje sa celkový zážitok z hrania v prostredí virtuálnej reality pre viacerých hráčov.

Algorithm 1 SetupTeleportation

```

1: class CharacterManager
2: {
3:   private void SetupTeleportation() {
4:     Find groundObject with tag "Ground"
5:     if (groundObject is not null) {
6:       Get TeleportationArea component from groundObject
7:       if (teleportationArea is not null) {
8:         Get TeleportationProvider component from children of current object
9:         if (provider is not null) {
10:          Set teleportationArea.teleportationProvider to provider
11:        } else {
12:          Log error "No TeleportationProvider found on the local XR Rig."
13:        }
14:      } else {
15:        Log error "No XRTeleportationArea found on the ground object."
16:      }
17:    } else {
18:      Log error "Ground object not found."
19:    }
20:  }
21: }

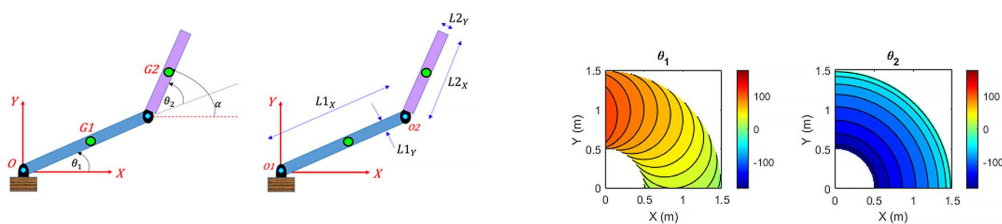
```

Funkcia vykonáva nasledovné kroky:

1. **Vyhľadanie objektu "Ground":** Pomocou funkcie `FindGameObjectWithTag()` sa vyhľadá v scéne objekt so značkou "Ground". Ak sa takýto objekt nenájde, funkcia vypíše chybové hlásenie.
2. **Získanie komponentu `TeleportationArea`:** Z objektu Ground sa získa komponent `TeleportationArea` pomocou funkcie `GetComponent<>()`.
3. **Získanie komponentu `TeleportationProvider`:** Komponent sa získava z lokálneho XR Rig pomocou funkcie `GetComponentInChildren<>()`. Ak komponent nie je dostupný, vypíše sa chybové hlásenie.
4. **Priradenie poskytovateľa teleportácie:** Komponent `TeleportationProvider` je následne priradený k `TeleportationArea`.

4 Inverzná kinematika

Inverzná kinematika (IK) je matematická technika používaná v robotike a počítačovej grafike na výpočet uhlov kĺbov štruktúry, vzhľadom na požadovanú polohu a orientáciu koncového člena (ako je ruka alebo noha). Na rozdiel od prednej kinematiky, ktorá určuje koncovú polohu vzhľadom na uhly kĺbov, inverzná kinematika pracuje opačným spôsobom, nájdením kĺbových parametrov potrebných na umiestnenie koncového člena na požadovanú pozíciu v priestore.



Obr. 4.1: Riešenie IK pre dvojsegmentové robotické rameno s grafom relácii pozícií [19]

Obrázok 4.1 zobrazuje dvojsegmentové robotické rameno s úhlami kĺbov 01 a 02 a ukazuje výpočty inverznej kinematiky[19]. Grafy zobrazujú analytické riešenia inverznej kinematiky pre uhly kĺbov 01 a 02 v závislosti na požadovanej pozícii koncovkej efektora. Každý graf mapuje pozície v X-Y rovine na príslušný kĺbový uhol potrebný na dosiahnutie tejto pozície. Jednotlivé oblasti na grafoch indikujú oblasti s rovnakými hodnotami kĺbových uhlov, teda vysvetľujú, ako sa uhly menia v závislosti od pozície koncovkej efektora.

V kontexte virtuálnej reality (VR) a počítačovej animácie sa IK používa na poskytovanie realistického pohybu a držania tela animovaným postavám alebo avatarom na základe určitých obmedzení. Napríklad, ak má virtuálna postava dosiahnuť a chytiť objekt, algoritmy IK vypočítajú uhly ramena, laktia a zápästia, ktoré umožňujú ruke dotknúť sa objektu, zatiaľ čo dodržiavajú biologické obmedzenia kĺbov.

Jednou z hlavných výhod používania IK vo VR je poskytovanie realistickejšieho a pútavejšieho používateľského zážitku. Presným mapovaním pohybu sku-

točného tela používateľa na virtuálny avatar je možné vytvoriť uveriteľnú interakciu vo virtuálnom prostredí, čo je kľúčové pre aplikácie ako neurorehabilitácia, simulačné tréningy a hry. V našom kontexte je IK obzvlášť významná, pretože umožňuje vytvorenie presných reprezentácií pacientov vo virtuálnom prostredí. To môže potenciálne zvýšiť účinnosť rehabilitačných cvičení a prispieť k intuitívnejšiemu a zaujímavejšiemu terapeutickému zážitku pre pacientov. Prostredníctvom IK môže virtuálny avatar napodobňovať pohyby používateľa v reálnom čase, čím poskytuje okamžitú vizuálnu spätnú väzbu, ktorá je značne cenná pre pacienta.

4.1 Analýza

4.1.1 Riešenia inverznej kinematiky pre Unity

Ako už bolo povedané, vo virtuálnej realite zameranej na rehabilitáciu je kľúčové dosiahnuť realistickú reprezentáciu používateľov. Aplikácia inverznej kinematiky (IK) zohráva v tejto doméne kľúčovú úlohu.

Animation Rigging Package

Unity ponúka riešenie inverznej kinematiky prostredníctvom svojho balíčka Animation Rigging [20], ktorý poskytuje nástroje na ovládanie animácií postáv a iných objektov v scéne. Tento balíček ponúka dve základné riešenia IK: Two Bone IK a Unity IK. Two Bone IK je ideálne pre štruktúry s dvoma kĺbmi alebo dvoma kosťami, ako sú ruky a nohy, zatiaľ čo Unity IK je určené na riešenie celotelových animácií, čo zahŕňa sledovanie pozícií hlavy, rúk a nôh, a umožňuje realistické zobrazenie pohybov používateľa vo virtuálnom prostredí.

FinalIK

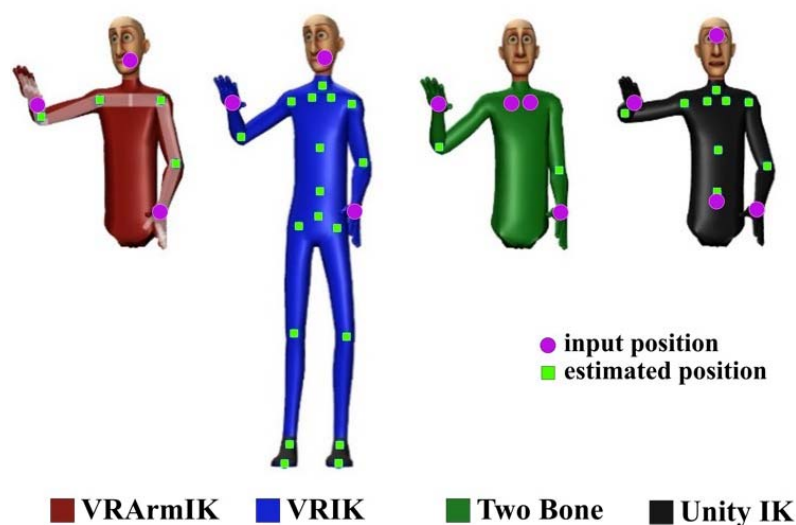
FinalIK [21] je balík od spoločnosti RootMotion, ktorý ponúka rôzne riešenia inverznej kinematiky vrátane VRIK (Virtual Reality Inverse Kinematics). Wagnerberger et al. [22] využili VRIK z FinalIK na integráciu celotelových reprezentácií v ich systéme VR zameranom na rehabilitáciu, a zistili, že celotelová reprezentácia výrazne zvyšuje pocit vtelenia a prítomnosti v porovnaní s reprezentáciou iba rúk.

EasyIK

EasyIK [23] je ďalšie riešenie IK dostupné pre Unity, ktoré ponúka jednoduchý a intuitívny spôsob, ako vytvárať realistické animácie bez nutnosti zasahovania do kódu. Je ideálne pre vývojárov, ktorí hľadajú rýchle a efektívne riešenie pre svoje projekty. EasyIK poskytuje rôzne funkcie, ako sú automatické vytváranie IK cieľov, podpora pre rôzne typy kĺbov a možnosť prispôsobenia riešenia podľa potrieb projektu. V kontexte virtuálnej

Porovnanie riešení

Medzi vyššie uvedenými riešeniami je FinalIK považované za najlepšiu voľbu kvôli svojim rozsiahlym funkciám a prispôbitelnosti, ktorá umožňuje vývojárom dosiahnuť realistické animácie vo virtuálnej realite. FinalIK ponúka širokú škálu solverov a nástrojov, ktoré umožňujú vytvárať komplexné animácie a interakcie v reálnom čase. Na druhej strane, Unity IK a EasyIK sú jednoduchšie a menej prispôbitelné, ale môžu byť vhodné pre menej náročné projekty alebo projekty s obmedzeným rozpočtom.



Obr. 4.2: Odhady pozícií modelov IK a zodpovedajúce vstupné pozície[22]

Vzhľadom na tieto výsledky a potrebu presnej reprezentácie pacienta sa VR IK javí ako najlepšie riešenie IK. Wagnerberger et. Al. [22] zistili, že jeho schopnosť poskytnúť nízku chybu pri odhadovaní polohy lakťa a horného ramena je kritická pre dosiahnutie realistického zobrazenia a prekladu pohybu v aplikáciách VR. Táto schopnosť je znázornená v Tabuľke 4.1, ktorý porovnáva riešenia IK a ich reprezentáciu pozície avatara. VR IK je teda najadekvátnejším riešením pre VR

Funkcia	Animation Rigging	FinalIK	EasyIK
Cena	Bezplatný	\$90	\$50
Typy IK	Two Bone IK, Unity IK	VR IK, FABRIK	FABRIK
Špeciálne vlastnosti		Celotelové IK	Jednoduché nastavenie
Prispôsobiteľnosť	Stredná	Vysoká	Nízka
Určené pre	Základné projekty	Profesionálne projekty	Jednoduché projekty
Automatické vytváranie IK cieľov	Nie	Nie	Áno

Tabuľka 4.1: Porovnanie riešení inverznej kinematiky pre Unity

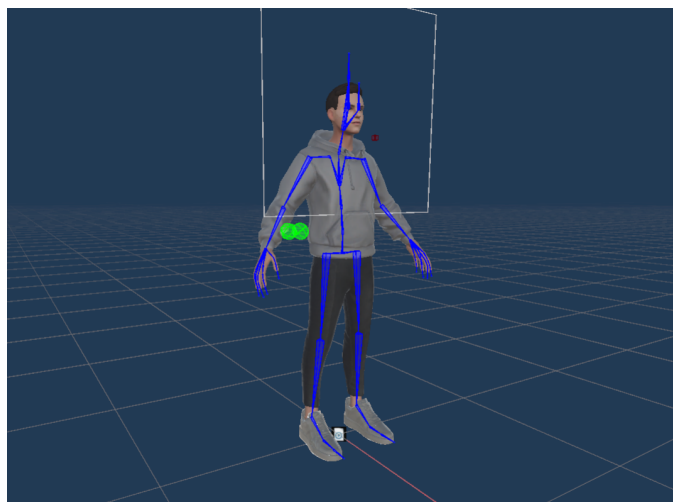
aplikácie, najmä keď je poloha hlavy určená prostredníctvom VR-HMD a poloha rúk je určená polohou ovládača - teda ako v našom prípade.

4.1.2 Nerealistické prípady animácií a ich možné obmedzenia

Nerealistické animácie vo virtuálnych prostrediach, videohrách alebo simuláciách môžu negatívne ovplyvňovať používateľský zážitok, a znižovať mieru imerzie. Nižšie sú uvedené bežné prípady nerealistických animácií, ich pravdepodobné príčiny a stratégie na ich nápravu alebo minimalizáciu:

Chybné Rigovanie a Skinning

Nesprávne rigovanie a skinning môžu spôsobiť nerealistické deformácie počas animácie. Optimalizácia rigu a skinningu, úprava váh kostí alebo zlepšenie celkovej štruktúry rigu môže tieto problémy zmierniť.



Obr. 4.3: Vizuálna reprezentácia rigu MaleAvatara

Na Obr.4.3 je vidieť avatara spolu s jeho kostrovou štruktúrou ktorá je využívaná na jeho animáciu.

Nedostatok anticipácie

Absencia anticipácie môže robiť animácie neživými a nerealistickými. Integrácia anticipácie do animácií zabezpečuje plynulosť a prirodzenosť pohybov. Štúdium reálnych pohybov ľudského tela môže značne pomôcť so správnym vyvážením priebehu animácie.

Nesprávne načasovanie a Rozostupy

Nesprávne načasovanie a rozostupy môžu spôsobiť trhavé alebo neprirodzené pohyby. Štúdium reálnych záberov pohybov človeka by mohlo byť užitočné k pochopeniu a replikácii prirodzeného načasovania a rozostupov v animáciách.

Problémy s pretnutím a kolíziami

Postavy alebo objekty, ktoré prechádzajú cez seba, narušujú ilúziu reálnosti. Takáto situácia je zachytená na Obr. 4.4. Implementácia správnej detekcie kolízií a úprava animácií na odstránenie prekryvania môže tento problém značne zredukovať. Využívanie algoritmov detekcie kolízií môže ďalej pomôcť vytvoriť realistickjšiu interakciu medzi objektami a postavami.



Obr. 4.4: Neprirodzený prechod ruky cez pohár

Nedostatok hmotnosti a rovnováhy

Postavy alebo objekty bez zjavnej hmotnosti alebo rovnováhy pôsobia neprírodzene. Modifikácia animácií tak, aby odrážali hmotnosť a rovnováhu, dynamiky a trajektórie pohybov, môže značne zvýšiť realizmus. Pozorovanie a analýza fyzikálnych zákonov reálneho sveta nám môže znova výrazne zlepšiť implementáciu hmotnosti a rovnováhy pre objekty vo virtuálnom prostredí.

Obmedzený rozsah pohybu

Obmedzený rozsah pohybu môže robiť postavy tuhými a robotickými. Zabezpečenie plného a prirodzeného rozsahu pohybu a použitie referenčných záberov na kalibráciu animácie môže tento problém zmierniť. Pochopiť anatómické obmedzenia a prirodzené rozsahy pohybu postáv je nevyhnutné.

Nedostatok sekundárnych akcií

Animácie bez sekundárnych akcií môžu vyzeráť staticky a nedynamicky. Pridanie sekundárnych akcií a drobných detailov k hlavným pohybom môže zvýšiť realizmus a živosť.

4.2 Implementácia

V tejto časti je zdokumentovaný proces implementácie nového Pluginu FinalIK spolu s ďalšími vylepšeniami. Prebraté su tiež problémy, ktoré boli počas implementácie nájdené.

4.2.1 Implementácia komponentu VRIK

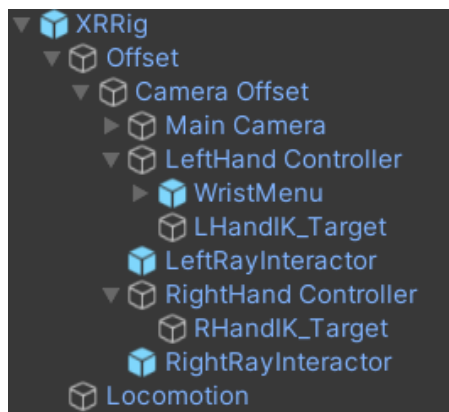
Implementácia VRIK sa začala integráciou pluginu FinalIK do prostredia Unity. Tento plugin prináša do aplikácie pokročilé kinematické schopnosti, ktoré budú využité na zlepšenie realismu pohybov postáv v virtuálnom prostredí.

Následná fáza zahŕňala vytvorenie duplikátov existujúcich objektov ovladačov, ktoré sú potrebné na nastavenie offset-ov pre správne uchopenie ovladačov rukou. Hierarchia objektu XRRig zobrazená na Obr. 4.5, ukazuje umiestnenie daných offsetov. Ďalej slúžia špecifickému účelu, teda ako ciele pre systém VRIK. Vytvorenie a umiestnenie týchto cieľových objektov je dôležité, pretože priamo ovplyvňuje presnosť a prirodzenosť pohybov virtuálnych postáv.

Proces úpravy pozícií týchto cieľových objektov bol iteratívny, zahŕňal testovanie a prepozicionovanie, aby sa zabezpečilo, že pohyby dosiahnuté prostredníctvom VRIK sú čo najbližšie k prirodzeným ľudským pohybom.

4.2.2 Problémy integrácie s pôvodným animation rigging package

Pôvodný plán počítal s integráciou balíka Animation Rigging, ktorý by bol využívaný pri animáciách, s FinalIK, ktorý by zas slúžil na zobrazenia avatara mimo



Obr. 4.5: Hierarchia objektu XRRig zobrazujúca ciele pre VRIK solver

animácie. Práca na projekte odhalila zložitost' adaptácie animácií presunu objektov s novým riešením IK. Pre správne fungovanie pluginu Animation Rigging je nevyhnutné zachovať pôvodnú implementáciu triedy AvatarController, ktorá v metóde Update vypočítava nové pozície avatara. To vedie ku konfliktu, kde sa oba pluginy snažia prevziať kontrolu nad avатарom, čo má za následok trasenie avatara.

```

0 references
void Update() {
    // move avatar based on head position + offset
    transform.position = headTarget.position + new Vector3(0, headOffset.y, 0);
    transform.position += new Vector3(transform.forward.x * headOffset.x, 0, transform.forward.z * headOffset.z);

    // rotate whole avatar based on heads rotation (slowly)
    if (m_turnWholeAvatar) {
        transform.forward = Vector3.Lerp(transform.forward, Vector3.ProjectOnPlane(headTarget.forward, Vector3.up).normalized, Time.deltaTime * turnSmoothness);
    }

    /*if (debug) {
        head.MapTargetsDebug();
        headSpine.MapTargetsDebug();
        leftHand.MapTargetsDebug();
        rightHand.MapTargetsDebug();
    } else { */
        head.MapTargets();
        headSpine.MapTargets();
        leftHand.MapTargets();
        rightHand.MapTargets();
    }
}

```

Obr. 4.6: Pôvodná funkcia Update()

Pri ostránení funkcie Update4.6 sa problémom stáva výpočet vzdialenosti ramena od objektu. Táto vzdialenosť určuje, či je ruka dostatočne blízko k pozícii pohybu objektu - a teda či je možné pozíciu zahrnúť v animácii. Pozícia ramena bez funkcie nie je aktualizovaná, teda animácia a plugin Animation Rigging nemá prístup k informáciám o polohe tela od VRIK. Jedno z možných riešení, ktoré bolo zvážené, bolo dynamické prispôbovanie váh oboch pluginov pre ruku v animácii. Zvyšovanie váhy jedného pluginu by malo zodpovedať zníženiu váhy druhého. No VRIK ovláda umiestnenie a otáčanie celého tela, a aj keď sú váhy pozície a rotácie ruky nastavené na nulu a ruka nie je priradená k žiadnemu objektu, poloha ramena je stále riadená pluginom VRIK.

Dočasné riešenie tohto problému spočívalo v obmedzení funkcie Update tak,

aby aktualizovala pozície len počas animácie. Tým sa odstráni trasenie mimo animácií, ale počas samotnej animácie sa telo pacienta stále trasie.

Bolo potrebné zváženie alternatívnych možností:

- Úplná náhrada pluginu Animation Rigging, čo si vyžaduje rozsiahle prerobenie existujúceho kódu.
- Obmedzenie aktualizácií len na nehybnú ruku, no to by mohlo spôsobiť iné problémy.

4.2.3 Výzvy a zmeny v pláne

Po zvážení bola vybraná prvá možnosť - prechod na úplnú implementáciu balíka FinalIK a jeho interakčného systému. Obmedzenie aktualizácií len na nehybnú ruku síce je jednoduchšie na implementáciu, no takéto riešenie nezeručuje úplnú nápravu problému a potencionálne zo sebou prináša niekoľko nových problémov.

Kroky implementácie nového systému:

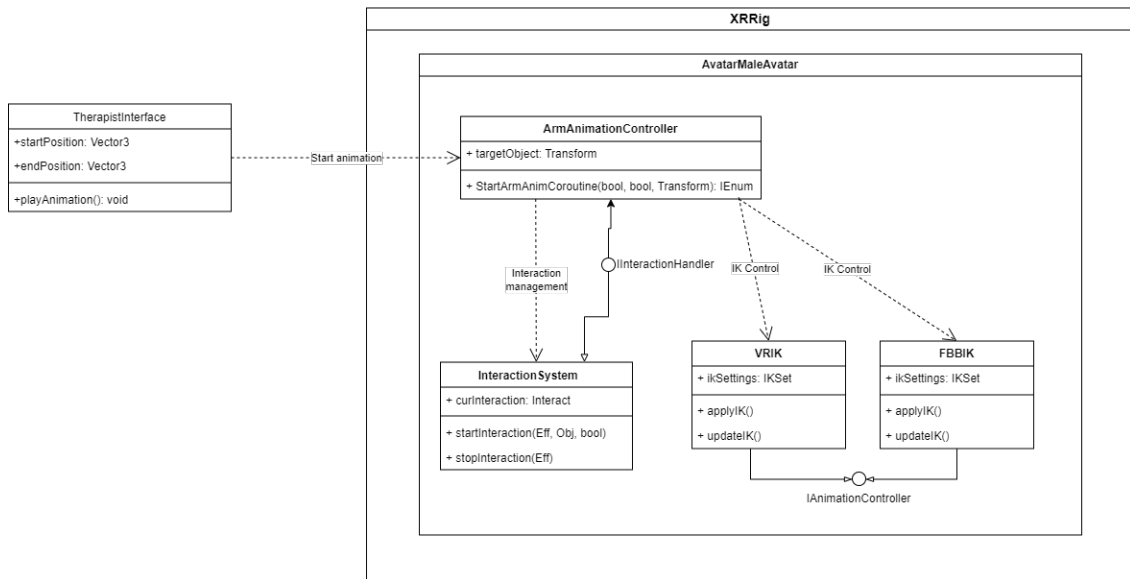
- Odstránenie metódy Update() pre aktualizácie pozícií cieľových objektov, ktoré sú nevhodné pre dynamickú animáciu vo VR.
- Pridanie InteractionSystem k objektu avatara.
- Pridanie InteractionObject a InteractionTarget komponentov k interakčným objektom.
- Konfigurácia daných komponentov a ich interakcie

UML diagram animácie

Diagram na Obr. 4.7 znázorňuje proces animácie v ktorej je využitý interakčný systém FinalIK. Popisuje aj úlohu triedy ArmAnimationController, ktorá riadi animáciu a interakcie.

Priebeh animácie

- TherapistInterface zasiela signál animácie do ArmAnimationController.
- ArmAnimationController riadi prechody medzi komponentmi VRIK a FBBIK, ktoré implementujú IAnimationController.



Obr. 4.7: Systémový diagram pre VR teleportáciu

- **ArmAnimationController** používa **InteractionSystem** na spravovanie interakcií, ktorý implementuje **IInteractionHandler**.
- **VRIK** a **FBBIK** poskytujú implementácie pre **IAnimationController**.

4.2.4 Konfigurácia avatara

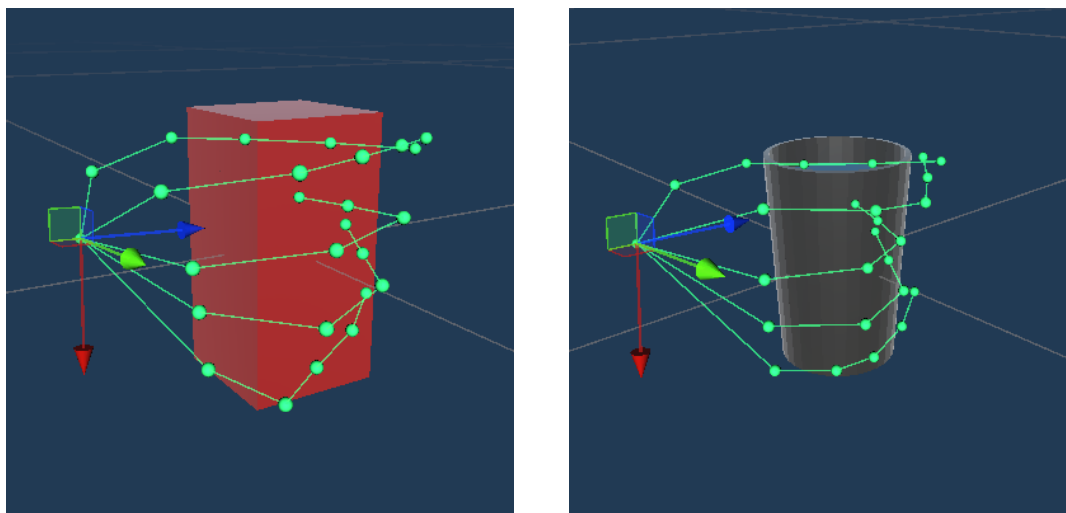
Implementácie nového interakčného systému bolo potrebné začať úpravou kódu, presnejšie odstránením funkcie `Update()`. Tento krok odstránil Animation rigging plugin a teda aj jeho vedľajší negatívny efekt - trasenie avatara.

Komponent **Interaction system** je hlavný ovládač a hlavné rozhranie pre riadenie interakcií. K jeho správnomu fungovaniu s objektom avatara je potrebný komponent **Full body biped IK**. Tento komponent poskytuje detailnejšiu kontrolu celého tela, umožňuje realistickejšie a komplexnejšie interakcie postavy s prostredím, zatiaľ čo **VRIK** zabezpečuje inverznú kinematiku iba pre avatara vo virtuálnom prostredí. Plugin obsahuje automatické priradenie referencií, no v konkrétnom projekte táto funkcia nefungovala. Každá referencia musela byť manuálne pridaná z armatúry avatara. Ďalšie nastavenia nebolo potrebné vykonávať, definícia interakcií je nastavovaná v komponente **Interaction object**, ktorý je priradený k samotnému interakčnému objektu.

4.2.5 Integrácia existujúcich interakčných objektov s FinalIK

K cieľovým objektom boli vytvorené **Pivot points** umiestnením kópie ruky avatara okolo interaktívneho objektu, nastavením jednotlivých kĺbov ruky do realis-

tickej pozície úchopu a následným kopírovaním ruky ako podobjektu každému interakčnému objektu. Tieto body, vyobrazené na Obr. 4.8, sú využívané ako cieľové body umiestnenia pre časti ruky, ktorá interaguje objektom. Taktiež bolo potrebné pridať týmto podobjektom komponent *Interacton Target*, ktorý určuje, pre ktorú ruku je táto pozícia určená.



Obr. 4.8: Príklady bodov úchopu pre objekty kocky a pohára

Používateľska príručka pluginu FinalIK

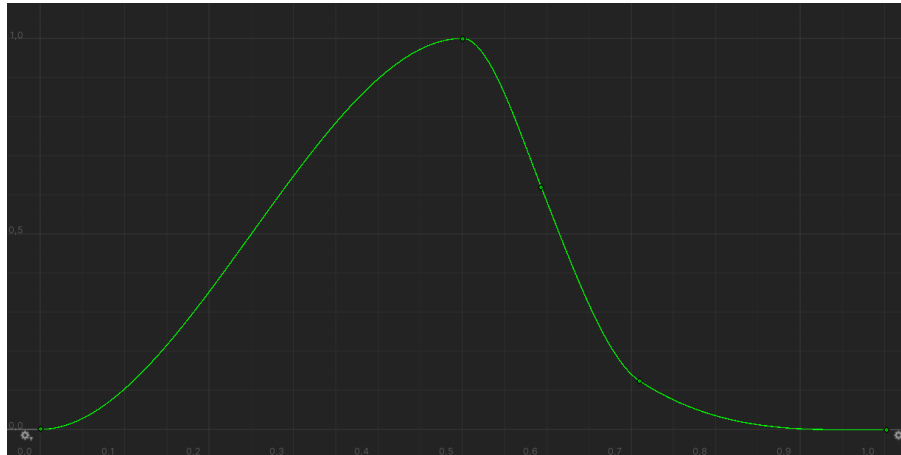
V používateľskej príručke existuje návod, ako pridať interakčný systém do projektu, no obsahuje niekoľko chýb. Menovite, v príručke sa uvádza, že komponent *Interacton Target* nie je nutné využiť, no bez neho systém nefungoval. Ďalej návod nespomína, akú štruktúru má mať objekt pozície ruky. Pôvodná štruktúra obsahovala *Arm Hints*, ktoré boli využívané predchádzajúcim interakčným pluginom. Tieto body boli nesprávne rozpoznané ako objekty prstov, takže ich odstránenie bolo tiež nutné.

Interaction Object komponent

Každý presúvaný objekt potrebuje komponent *Interaction Object*. Tento komponent má niekoľko dôležitých úloh:

1. **Definícia interakcie:** Umožňuje nastavenie parametrov, ktoré definujú, ako možno s objektom interagovať, napríklad či je možné ho zdvihnúť.
2. **Animačná krivka:** Jednou z podstatných premenných v komponente je animačná krivka 4.9. Tá umožňuje definovať, ako sú počas interakcie aplikované sily a pohyby vo vzťahu s časom. Napríklad pri chytení alebo uvoľnení

objektu môže animačná krivka ovládať rýchlosť a plynulosť pohybu ruky, čo robí akciu prirodzenejšou a realistickou.



Obr. 4.9: Krivka interakcie komponentu Interaction Object

3. **Možnosť pauzy animácií:** Komponent poskytuje funkčnosť na pozastavenie a obnovenie animácií. Táto funkcia je obzvlášť užitočná pri vytváraní dynamických animácií, teda úchop a presun objektu.
4. **Nastaviteľnosť interakčných parametrov:** Umožňuje upravovať rôzne interakčné parametre, ako je odpor, sila prichytenia a body pripojenia.

4.2.6 Integrácia triedy ArmAnimationController s FinalIK

Trieda ArmAnimationController obsahuje korutinu StartArmAnimationCoroutine, ktorá je zodpovedná za animáciu interakcie ruky s rôznymi typmi objektov. Podporuje animácie pre lokálnych aj sieťových objektov hráča a spracováva rôzne typy animácií, ako napríklad Key a Cup.

Pre animáciu ruky sa pôvodne používali `lerpUtility.MultiRigLerp` ktorý interpoluje váhy rigov pri prechode ruky z odpočinkovej pozície do aktívnej a `lerpUtility.SimpleRigLerp`. Ten interpoluje váhu rukového rigu, čím sa ruka pohybuje na cieľovú pozíciu.

Zmeny oproti pôvodnej verzii

Nová verzia funkcie začína podobne ako pôvodná verzia, inicializuje premenné a nastavuje počiatočnú pozíciu, vrátane manipulácie s `lockTransform`, ak je typ animácie "Key". Potom používa `lerpUtility.LerpTransforms` na presunutie cieľového objektu na počiatočnú pozíciu. Nové je využitie `InteractionSystem` komponentu a aj `InteractionObject` komponentu. Funkcia spustí interakciu s cieľom

lovým objektom pomocou `interactionSystem.StartInteraction` ešte pred začiatkom animácie.

StartArmAnimationCoroutine (V.2)

```

1: Calculate half duration for cup movement from settings
2: Get animation type and current setup from settings
3: Initialize list of transforms to lerp starting with target object
4: if animation type is Key then
5:   Compute end mapping for lock transform and add to lerp list
6: end if
7: Lerp transforms to initial positions over 1 second
8: Setup interaction system and interaction object
9: Initiate interaction with target object using effector
10: if animation type is Cup then
11:   Move cup up and down post initial position
12: end if
13: Set initial previous mapping
14: for each subsequent mapping in animation setup do
15:   Lerp target from previous to current mapping
16:   if animation type is Cup then
17:     Move cup up and down post current mapping
18:   end if
19:   Update previous mapping
20: end for
21: if animation type is Key then
22:   Handle key animation from last to first mapping
23: end if
24: Terminate interaction with target
25: Finalize animation based on training context

```

- Funkcia začína inicializáciou premenných, získava sa tiež typ animácie, ktorý určí špeciálne prípady, ktoré je potrebné riešiť.
- Začiatok animácie zahŕňa uchopenie cieľového objektu pomocou interakčného systému. Pomocou efektora funkcia spustí interakciu, aby bol uchopený cieľový objekt.
- Nasleduje špecifická časť pre animácie typu "Cup". Funkcia hneď na začiatku pohybuje pohárom hore a dole.
- Potom funkcia prechádza zostávajúcimi mapovaniami animácie a zabezpečí plynulý pohyb medzi jednotlivými pozíciami a rotáciami.
- Ak je typ animácie "Key", funkcia spracuje pohyby kľúča.
- Na konci animácie funkcia zastaví interakciu, čím uvoľní ruku z cieľového objektu.

Obr. 4.10: StartArmAnimationCoroutine pseudokód s opisom

Iteratívne kroky animácie používajú `.LerpTransform` rovnako ako predtým. Špecifické spracovanie pre animáciu s kľúčom zostáva nezmenené. Na konci novej verzie sa využíva `interactionSystem.StopInteraction` na ukončenie uchopenia cieľového objektu.

4.2.7 Implementácia VRIK Lokomócie

Pred integráciou VRIK projekt využíval `AvatarLowerBodyAnimationController` a `AvatarWalkingController` na riadenie animácií spodnej časti tela avatarov.

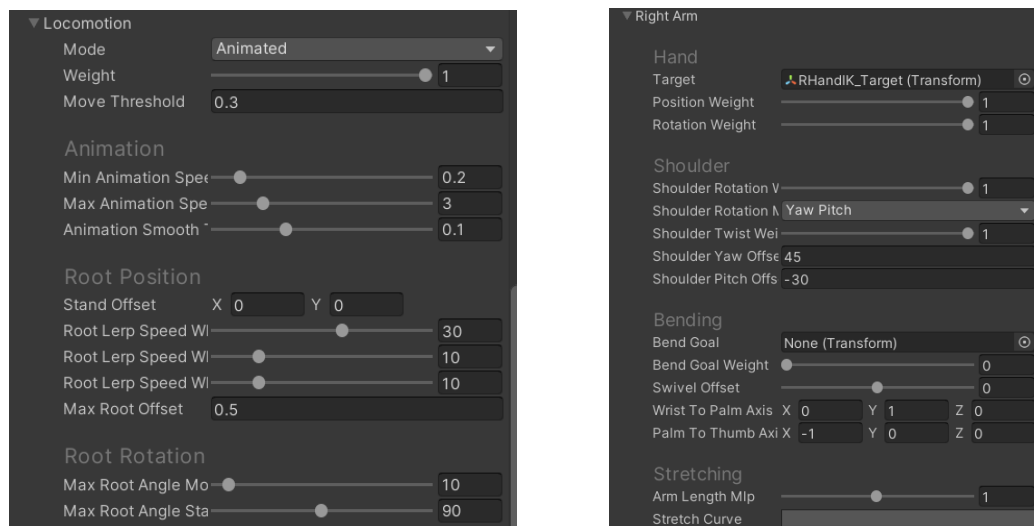
- **AvatarLowerBodyAnimationController:** Upravoval pozície dolnej časti tela avatara, využíval inverznú kinematiku na zarovnanie nôh so zemou počas rôznych postojov a pohybov, ako je napríklad sedenie.
- **AvatarWalkingController:** Riadil chôdzu pomocou vstupov z tradičných vstupných zariadení a kontroloval stav používateľa, napríklad odpočinku

rúk, čo zabránilo neúmyselným animáciám.

Novo zavedený komponent VRIK poskytuje nové možnosti vylepšenia v systéme kontroly animácií, teda aj pri spracovaní animácií chôdze. Systém VRIK ponúka dve hlavné režimy lokomócie:

- **Procedurálna lokomócia:** Tento režim, tiež označovaný ako legacy, si nevyžaduje žiadne zmeny v Unity Animatorovi. Procedurálna lokomócia je vhodná pre scenáre, v ktorých je potrebné dynamické ovládanie pohybu avatara bez priameho zapojenia preddefinovaných animačných sekvencií.
- **Animovaná lokomócia:** Na rozdiel od procedurálneho režimu, animovaná lokomócia poskytuje oveľa realistický a plynulý pohyb avatara. Avšak, na úspešnú integráciu tohto režimu bolo nevyhnutné vykonať významné úpravy v Unity Animatorovi. Veľké množstvo nastavení tohto režimu, ako aj nastavenia IK pre ruku je možné vidieť na Obr. 4.11.

Pre integráciu režimu animovanej lokomócie od pluginu VRIK bolo potrebné vytvoriť vlastný ovládač, nakoľko pôvodný ovládač využíval premenné nekompatibilné s novým systémom. Vývoj alternatívy, pomenovanej "VRIKAvatarMask", využíva ciele určené pre MaleAvatar. Pre tento mask ďalej bolo potrebné vypnúť animácie rúk, keďže boli rušivé.



Obr. 4.11: Možnosti konfigurácie komponentu VRIK pre ruku a lokomóciu

Desktopový režim:

- Pôvodné skripty zostávajú používané pre desktopové interakcie, keďže poskytujú špecifické ovládanie animácií vhodné pre desktopové prostredia.

4.2.8 Riešenie pre automatické nastavenie oddychovej polohy

Nový interakčný systém nedokáže využívať starý systém nastavenia pozície do oddychovej polohy. Tento systém, po aktivovaní terapeutom, nastavil ruku pacienta do oddychovej pozície nad stolom, čo predišlo problémom s prechodom ruky cez objekt stola pri začatí animácie.

Ako riešenie bolo zvolené pridanie funkcie `Update()` existujúcemu komponentu `ArmAnimationController`. Táto funkcia je zobrazená v algoritme 2. Automatizácia tejto funkcie znižuje počet krokov, ktoré musia terapeuti vykonať pred začatím cvičenia - predchádza sa možným chybám a znižuje sa čas potrebný na prípravu.

Algorithm 2 `Update()` and Helper Functions for Arm Resting

```

1: procedure Update() {
2:   if m_animState == ArmAnimationState.Stopped then
3:     float dist = Vector3.Distance(transform.position, restHelper.position);
4:     float ikWeight = CalculateIKWeight(dist);
5:     SetArmWeights(ikArm, ikWeight);
6:   end if
7: }
8:
9: function CalculateIKWeight(distance) {
10:  return Mathf.Clamp01(2.0 - distance);
11: }
12:
13: function SetArmWeights(arm, weight) {
14:  arm.positionWeight = weight;
15:  arm.rotationWeight = weight;
16: }
```

Opis funkcionality

Funkcia najskôr skontroluje, či `ArmAnimationState.Stopped` je aktuálny stav animácie. Ak je animácia zastavená, vypočíta sa vzdialenosť medzi aktuálnou pozíciou ruky a oddychovou pozíciou nad stolom pomocou `Vector3.Distance`. Vzdialenosť sa následne použije na výpočet váhy inverznej kinematiky (IK) pomocou funkcie `CalculateIKWeight`, ktorá využije `Mathf.Clamp01` na výpočet váhy pozície ruky. Výsledná váha IK sa aplikuje na pozíciu a rotáciu ruky pomocou funkcie `SetArmWeights`.

Obr.4.12 zobrazuje oddychovú polohu pacienta, ktorá je cieľom nového systému. Pacientova ruka je správne umiestnená nad stolom v polohe, ktorá umožňuje relaxáciu a podporuje pohodlnú a prirodzenú polohu. Táto odpočinková poloha je dôležitá pre plynulý a bezproblémový priebeh terapeutických cvičení a zlepšuje celkový komfort pacienta počas liečby.



Obr. 4.12: Vizualizácia obmedzenia pre pravú ruku

4.2.9 Implementácia obmedzení pohybu zápästia

Ako reakcia na potrebu viac anatomicky korektných pohybov boli implementované obmedzenia. S využitím funkcionality Unity určenej na obmedzenia, bolo úspešne implementované riešenie, ktoré obmedzuje artikuláciu zápästia a zabráňuje vzniku situácie, keď ruka preniká do zápästia.

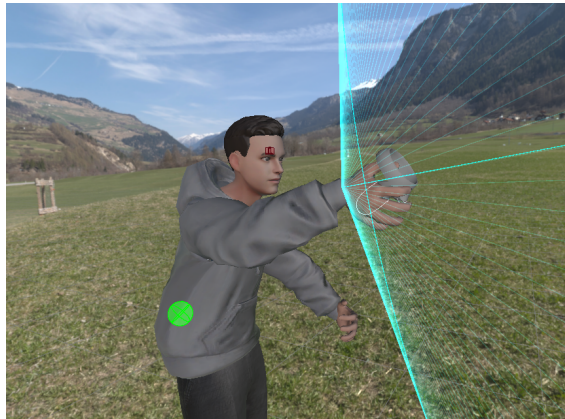
Algorithm 3 VRIKRotationLimitsController.cs

```

1: class VRIKRotationLimitsController extends MonoBehaviour
2: {
3:     public VRIK ik;
4:     public RotationLimit[] rotationLimits;
5:     void Start() {
6:         foreach (RotationLimit limit in rotationLimits) {
7:             limit.enabled = false;
8:         }
9:         ik.solver.OnPostUpdate += AfterVRIK;
10:    }
11:    private void OnDestroy() {
12:        ik.solver.OnPostUpdate -= AfterVRIK;
13:    }
14:    private void AfterVRIK() {
15:        foreach (RotationLimit limit in rotationLimits)
16:            limit.Apply();
17:    }
18: }

```

Na Obr. 4.13 je možno vidieť limit pohybu ruky kužeľovitého tvaru, tento tvar bol presne nastavený podľa reálnych obmedzení pohybu ľudskej ruky. Avšak, tento prístup si vyžiadala deaktiváciu natívnych obmedzení zápästia vo VRIK, aby sa predišlo akémukoľvek konfliktu s novopridanými obmedzeniami. Kód VRIK-RotationLimitsController deaktivuje obmedzenia pri inicializácii a aplikuje ich po vyriešení VRIK (Algoritmus 3).



Obr. 4.13: Vizualizácia obmedzenia pre pravú ruku

4.2.10 Pokroky v animáciách chôdze s VRIK

Prechod na animovaný režim lokomócie VRIK výrazne zlepšil kvalitu animácií chôdze. Na rozdiel od predchádzajúceho systému, ktorý bol silne závislý na manuálnych úpravách a skriptovaní prechodov animácií, VRIK automatizuje mnohé z týchto procesov, čo vedie k plynulejším pohybom a menej zaťaženému systému. Zlepšenia sú zvlášť viditeľné pri plynulých prechodoch medzi rôznymi rýchlosťami a smermi chôdze, ako aj pri prirodzenej synchronizácii krokov avatara, ktoré VRIK dobre zvláda vďaka svojmu efektívnemu systému.

5 Vyhodnotenie

5.1 Úvod

Táto sekcia vyhodnocuje účinnosť riešení implementovaných na adresovanie dvoch hlavných problémov identifikovaných v analýze: nedostatočné možnosti pohybu a neperfektné animácie. Kombinácia testovania dotazníka bola použitá na zber spätnej väzby od používateľov a na vyhodnotenie úspešnosti implementovaných zmien.

5.2 Teleportácia

V pôvodnej verzii aplikácie bol ako jeden z problémov identifikovaný pohyb pomocou joysticku. Tradičné metódy pohybu môžu často vyvolať pohybovú nevoľnosť, najmä ak daná osoba nie je pravidelne vystavená virtuálnej realite.

Na riešenie problému bol implementovaný nový systém teleportácie, ktorý zabezpečuje efektívny a pohodlný spôsob navigácie v rámci virtuálneho prostredia. Tento systém bol implementovaný s využitím XR Interaction Toolkit a ponúka niekoľko významných výhod:

Zníženie pohybovej nevoľnosti

Implementácia teleportácie výrazne znížila tento nežiaduci efekt tým, že používateľom umožňuje okamžité presunutie na požadované miesto bez pocitu pohybu.

Jednoduchosť a efektívnosť použitia

Systém bol navrhnutý tak, aby bol intuitívny a jednoduchý na použitie. Používatelia môžu vybrať cieľové miesto pomocou laserového ukazovateľa a aktivovať teleportáciu jednoduchým stlačením tlačidla. Tento proces je rýchly a prispieva k celkovej použiteľnosti aplikácie.

Zvýšenie imerzie VR prostredia

Použitie teleportácie zvyšuje úroveň ponorenia používateľov do VR prostredia. Umožňuje im rýchlo a efektívne preskúmať virtuálny svet, zvyšuje ich interakciu a celkový zážitok z aplikácie.

5.3 Animácie

Na minimalizáciu problémov s nerealistickými animáciami bolo prejdené na použitie VRIK a Interaction System z balíka FinalIK spolu s využitím rotačných limitov. Tieto nástroje poskytnú nasledujúce výhody:

Anticipácia a sekundárne akcie

Predchádzajúca verzia nevyužívala akceleráciu pri animácii. To spôsobovalo, že animácia pôsobila tuho a neprirodzene, keďže bola nastavovaná iba pozícia ruky nižšie od ramena. Nová spôsob animácie spolu s komponentom VRIK nastavuje pozíciu celého tela, teda do pohybu je zahrnuté aj rameno. Vďaka krivke animácie je ruka počas pohybu akcelerovaná a deakcelerovaná.

Anticipácia bola zlepšená aj mimo animácie vďaka využitiu animovaného režimu lokomócie, ktorý je zahrnutý v komponente VRIK.

Načasovanie a rozostupy

Pôvodná animácia nebola náchylná na nesprávne načasovanie alebo rozostupy, no úprava korutín spolu s interakciou pomocou nového interakčného systému odstránila oneskorenie medzi akciou úchopu objektu a jeho začatím presunu.

Detekcia kolízií

Ku kolíziám dochádzalo hlavne počas prechodu z nečinnnej pozície ruky do pozície úchopu, kedy ruka niekedy pri presune prechádzala cez stôl. Tento problém bol vyriešený pridaním automatického nastavenia ruky do odpočinkovej polohy na stole, čo zabezpečuje, že sa ruka nikdy neocitne pod stolom.

Hmotnosť a rovnováha

VRIK zlepšuje vnímanie hmotnosti a rovnováhy virtuálnych postáv tým, že zohľadňuje fyzikálne zákony a dynamiku. Systém dynamicky upravuje postoj a rovnováhu postavy v reakcii na rôzne akcie, čo vedie k realistickejším pohybom.

Rozsah pohybu

Rozsah a realistickosť pohybov tela bola zlepšená vďaka komponentu VRIK, ktorý, ako bolo zistené v analýze, vypočítava presnejšie pozície tela ako pôvodný plugin. Rozsah pohybu bol tiež limitovaný tak, aby nedochádzalo k prípadom, kedy ruka pretína zápästie, čo bolo viditeľné hlavne pri pustení alebo položení ovládača.

Zlepšené rigovanie a skinning

Hlavné vylepšenie rigovania a skinningu nastavlo v pozícii úchopu ruky - ruka už neprechádza cez presúvaný objekt. Novo vytvorené body úchopu boli vytvárané podľa reálnych obmedzení kĺbov ruky, takže nedochádza k neprirodzenému vývrtu ruky a prstov.

5.3.1 Testovanie používateľmi

Po pridaní novej funkcionality prebehlo testovanie spolu s novými riešiteľmi projektu. Boli vyskúšané oba systémy a poskytli spätnú väzbu prostredníctvom dotazníkov.

Počas testovania bolo nájdených niekoľko problémov. Prvý problém sa týkal synchronizácie používateľov pri kolaborácii v multiplayerovej scéne. Po pripojení druhý používateľ nevidel prvého používateľa na jeho pozícii, ale v strede miestnosti. Ďalší problém bol nájdený v offline scéne. Avatar sa po zapnutí zobrazoval v zemi. Tieto problémy sú rozobraté v sekcii 5.3.2.

Hodnotenie Teleportácie

- **Ako by ste ohodnotili celkovú použiteľnosť teleportácie?**
 - Obaja respondenti ohodnotili použiteľnosť metódy teleportácie hodnotením 5.
- **Bola metóda teleportácie ľahko pochopiteľná a použiteľná?**
 - Obaja respondenti uviedli, že metóda teleportácie bola ľahko pochopiteľná a použiteľná, ich hodnotenie bolo 5 z 5.
- **Zdali sa vám pohyby prostredníctvom teleportácie presné a pohotové?**
 - Obaja respondenti považovali pohyby prostredníctvom teleportácie za presné a pohotové, hodnotili ich 5 z 5.
- **Pocítili ste pri používaní teleportácie nejaké nepríjemné pocity (napr. nevoľnosť, závraty)?**

- Obaja respondenti uviedli, že pri používaní teleportácie nepocítili nepríjemné pocity, ako nevoľnosť alebo závraty, hodnotenie 2 z 5.
- **Ako by ste porovnali metódu teleportácie s inými metódami pohybu?**
 - Prvý tester bol viac oboznámený s virtuálnou realitou a teda prínos teleportácie nebol až tak značný. Hodnotenie 3.
 - Druhý tester nemá s VR skoro žiadne skúsenosti, spôsob pohybu pomocou teleportácie sa mu zdal príjemnejší. Hodnotenie 4 z 5.
- **Aké zlepšenia by ste navrhli pre metódu teleportácie?**
 - Raycast by mohol byť pri možnosti teleportovania a pri možnosti uchytenia alebo namierenia na objekt inej farby.
 - Väčšie priestory by pomohli, nakoľko miestnosť bola príliš malá.
 - Teleportácia je veľmi príjemná na použitie, zvlášť pre používateľov, ktorí dlhší čas nepoužívali VR headset. Tento spôsob výrazne zlepšil použiteľnosť aplikácie v porovnaní s voľným pohybom, ktorý spôsoboval nevoľnosť.
- **Voliteľná spätná väzba.**
 - Teleportácia je veľmi príjemná na použitie, zvlášť pre používateľov, ktorí dlhší čas nepoužívali VR headset. Tento spôsob výrazne zlepšil použiteľnosť aplikácie v porovnaní s voľným pohybom, ktorý spôsoboval nevoľnosť.

Hodnotenie Animácií

- **Ako by ste ohodnotili celkovú kvalitu aktualizovaných animácií?**
 - Obaja respondenti hodnotili celkovú kvalitu animácií veľmi pozitívne, s priemerným hodnotením 4,5 z 5.
- **Zdali sa vám aktualizované animácie plynulé a synchronizované s akciami?**
 - Obaja respondenti považovali animácie za plynulé a synchronizované s ich akciami, s priemerným hodnotením 4,5 z 5.
- **Zlepšili aktualizované animácie váš celkový zážitok z aplikácie?**
 - Obaja respondenti uviedli, že aktualizované animácie zlepšili ich celkový zážitok z aplikácie, hodnotenie 5.
- **Aké zlepšenia by ste navrhli pre aktualizované animácie?**
 - Pri synchronizácii u mužských avatarov sa vyskytuje problém s laktami, keď ruka nie je úplne vystretá, avatar ruku vystretú má.

- Pri synchronizácii pohybu s otáčaním by bolo vhodné buď zvýšiť rýchlosť pohybu alebo znížiť rýchlosť otáčania.
- Avatár pri pohľade do zrkadla mal tvár zdvihnutú do vzduchu a neodpovedala pozícii hlavy používateľa. Taktiež bola pozícia hlavy vysunutá veľmi dopredu.

5.3.2 Riešenie novoobjavených problémov

Synchronizácia v kolaboratívnej scéne

Pri pripojení prvého používateľa systém funguje správne a daný používateľ sa môže pohybovať na rôzne pozície. No druhý pripojený používateľ vidí prvého používateľa v jeho východzej pozícii namiesto jeho aktuálnej pozície v scéne.

Tento problém pravdepodobne súvisí so synchronizáciou údajov medzi klientmi v multiplayerovom prostredí. Možnou príčinou môže byť nesprávne nastavenie mechanizmov pre prenos údajov o pozícii hráčov medzi klientmi alebo nedostatočné aktualizovanie pozícií pri pripojení nového hráča.

Aj po vykonaní viacerých krokov na identifikáciu a riešenie tohto problému, trvalá náprava nebola v rámci tohto projektu implementovaná.

Nesprávne zobrazenie v offline scéne

Avatar hráča sa po spustení aplikácie na platforme Oculus objavil pod zemou. Tento problém bol spojený s komponentom `AvatarController`, ktorý upravuje veľkosť avatara na základe výšky hráča.

Nesprávne pozicionovanie nastávalo kvôli interakcii medzi logikou škálovania a získavanými hodnotami zo systému Oculus. Problém bol nakoniec vyriešený zmenou spôsobu, akým `AvatarController` škáluje avatara.

5.3.3 Zhodnotenie spätnej väzby

V tejto sekcii je zhodnotená spätná väzba testerov a opisuje, ako boli jednotlivé problémy riešené a aké zlepšenia boli implementované na základe ich návrhov.

Zlepšenia animácií

Tester navrhli niekoľko zlepšení pre aktualizované animácie, ktoré boli následne implementované:

- **Problém so synchronizáciou lakťov avatarov:** Tester hlásili problém, pri ktorom mal avatar vystreté ruky, aj keď ruky testera neboli úplne vystreté.

Tento problém bol vyriešený dodatočným nastavením cieľov rúk pre plugin VRIK.

- **Pozícia hlavy avatára v zrkadle:** Testeri uviedli, že tvár avatára v zrkadle bola zdvihnutá do vzduchu a neodpovedala pozícii hlavy používateľa. Tento problém bol taktiež riešený upravením pozície cieľa hlavy pre VRIK.
- **Synchronizácia pohybu s otáčaním:** Bolo navrhnuté zvýšiť rýchlosť pohybu alebo znížiť rýchlosť otáčania. Pomocou nastavení pluginu XR bola rýchlosť otáčania upravená.

Zlepšenia metódy teleportácie

Na základe spätnej väzby od testerov sme vykonali nasledovné zlepšenia metódy teleportácie:

- **Farba raycastu pri teleportovaní:** Testeri navrhli, aby mal raycast inú farbu pri teleportovaní a pri interakcii s objektmi. Implementované bolo farebné rozlíšenie raycastu, aby bol jasne odlíšený pri rôznych akciách, čím bola zlepšená vizuálna spätná väzba.

6 Záver

6.1 Zhrnutie práce

Táto práca sa zaoberala riešením dvoch hlavných problémov vo virtuálnej realite pre neurorehabilitáciu: nedostatok teleportácie ako spôsobu pohybu a nerealistické animácie. Cieľom bolo zlepšiť používateľský zážitok a efektívnosť aplikácie a teda pomôcť pacientom v procese rehabilitácie.

6.2 Hlavné výsledky

- **Identifikované problémy a riešenia:** Nedostatok teleportácie a nerealistické animácie boli identifikované ako hlavné problémy.
- **Hlavné vylepšenia a nové funkcie:** Na ich riešenie bol implementovaný mechanizmus teleportácie spolu s VRIK a Interaction System z balíka FinalIK. Kombinácia týchto riešení zlepšila plynulosť a realizmus pohybov. Automatické nastavenie ruky pacienta do oddychovej pozície predchádza prípadom, v ktorých počas animácie ruka prešla cez objekt stola. Obmedzené boli aj prípady, kedy objekt ruky vošiel do objektu zápestia, napríklad pri položení ovládača alebo jeho nesprávnym uchopením.
- **Výsledky testovania a dotazníkov:** Testovanie a dotazníky preukázali zlepšenie v hodnotení použiteľnosti a užívateľskej prívetivosti aplikácie.
- **Celkové zlepšenie aplikácie a užívateľského zážitku:** Implementované riešenia výrazne zlepšili celkový užívateľský zážitok, znížili pocit nevoľnosti pri pohybe vo VR a zvýšili realizmus animácií.

6.3 Výhody nového interakčného systému

- **Zjednodušená tvorba interakcií:** Systém FinalIK Interaction zjednodušuje proces nastavovania nových interakcií. Programátori môžu ľahko definovať

a prispôbiť interakcie bez potreby rozsiahleho kódovania. Toto zníženie komplexnosti umožňuje rýchlu tvorbu prototypov a iteráciu, čo umožňuje vývojárom sústrediť sa na zdokonaľovanie užívateľského zážitku namiesto spravovania zložitých kódových základní.

- **Zlepšená správa scén:** Modulárna povaha FinalIK uľahčuje správu scén. Interakcie môžu byť definované a upravované pre jednotlivé objekty, čo zabezpečuje, že každá scéna môže byť prispôsobená špecifickým rehabilitačným cvičeniam bez výraznejších úprav.
- **Vylepšená flexibilita:** FinalIK poskytuje rozsiahlu sadu nástrojov a parametrov na doladenie interakcií. Programátori môžu upravovať faktory ako dosah, rotácia a časovanie, aby vytvorili veľmi realistické a responzívne interakcie.
- **Zníženie času vývoja:** Využitím robustného interakčného rámca FinalIK sa významne skracuje čas vývoja. Programátori už nemusia budovať interakčné systémy od základov alebo riešiť problémy s kompatibilitou, ktoré sú inherentné v menej sofistikovaných pluginoch.
- **Konzistentnosť a spoľahlivosť:** Systém FinalIK Interaction ponúka spoľahlivý a konzistentný prístup k spracovaniu interakcií, čím minimalizuje potenciál pre chyby a nekonzistentnosti, ktoré môžu vzniknúť z vlastnoručne vytvorených riešení. Táto spoľahlivosť je kľúčová v kontexte neurorehabilitácie, kde predvídateľné a presné interakcie priamo ovplyvňujú efektívnosť terapie.

6.4 Prínos práce

Táto práca ponúka riešenia na zlepšenie používateľského zážitku a efektívnosti VR aplikácií. Implementované riešenia môžu pomôcť pacientom dosiahnuť lepšie výsledky v rehabilitácii a terapeutom poskytnúť efektívnejšie nástroje na prácu s pacientmi.

6.5 Príručky aplikácie

K aplikácii bola vytvorená Používateľská príručka a Systémová príručka. Používateľská príručka nadväzuje na príručku v diplomovej práci Petra Nehilu [1], bola aktualizovaná a rozšírená s novými časťami, ktorých obsahom je dokumentácia

novej funkcionality. Dôvodom pre tento krok je relatívne malá zmena funkcionality a obsahovo je pôvodná príručka zväčša stále relevantná.

Systémová príručka je zahrnutá v bakalárskej práci spoluriešiteľa Andreja Dzemidovicha [24] a API Dokumentácia je dostupná na tomto odkaze, prípadne v prílohe B.

6.6 Obmedzenia a výzvy

Počas práce sme sa stretli s viacerými výzvami:

1. Existujúci projekt

Tento projekt bol už v pokročilom štádiu vývoja. Upravovať jednotlivé funkcie bolo náročné, pretože v kóde sa už nachádzalo veľa funkcionality a závislostí. Tým pádom malé zmeny často spôsobovali nové chyby.

2. Debugging Android verzie

Android verzia aplikácie trpela problémom s čiernou obrazovkou, zatiaľ čo Windows verzia fungovala správne. Bolo potrebné prejsť mnoho starších verzií aplikácie, keďže Android verzia nebola dlhodobo testovaná a nevedeli sme, kde sa nachádza príčina problému. Oprava si vyžadovala veľa času a úsilia, ktorá mohla byť využitá pri implementácii nových funkcionalít.

3. Avatar sa zobrazoval v strope

Na Android zariadeniach sa avatar spawnoval v strope. Tento problém bol spôsobený nesprávnym načítaním údajov z triedy, kde verzia aplikácie nebola načítaná včas. To spôsobilo načítanie nesprávnej hodnoty výšky avatara a spolu s tým aj jeho nesprávne zobrazenie v scéne.

4. Konflikty pri mergeovaní Unity projektu

Všetci členovia tímu vytvorili množstvo zmien, ktoré bolo potrebné zlúčiť, vrátane aktualizácií Unity a verzií pluginov. Tieto zmeny spôsobili značné konflikty, ktoré si vyžiadali dlhodobé riešenie a koordináciu medzi členmi tímu na zabezpečenie správnej integrácie všetkých zmien.

6.7 Budúca práca

Na základe našich zistení a skúseností by bolo vhodné zamerať sa na nasledujúce možnosti pre budúci vývoj:

- **Opravy problému:** Počas testovania bol identifikovaný problém so synchronizáciou používateľov v kolaboratívnej scéne. Tento problém je nutné čo najskôr odstrániť.
- **Technické vylepšenia a nové funkcie:** Ďalšie zlepšenie animácií, pridanie nových pohybov a rozšírenie funkcionality, napríklad implementácia haptickej odozvy a vizuálnych indikátorov.
- **Nové scény:** Súčasná scéna je takmer dokončená. Zváženie vytvorenia nových scén s novými scénarmi, ktoré budú vhodné pre pacientov a neurorehabilitáciu, by malo byť časťou ďalších diskusií.
- **RefaktORIZÁCIA KÓDU:** V kóde vznikli nové závislosti, preto by bolo vhodné niektoré triedy prepracovať a optimalizovať. RefaktORIZÁCIA kódu tiež pomôže zvýšiť udržateľnosť projektu, zjednodušila budúce aktualizácie a zlepšila čitateľnosť spolu s organizáciou kódu.
- **Vydanie na Oculus Store:** Momentálne aplikácia nie je dostupná k stiahnutiu na verejnej platforme - jej zverejnenie na Oculus Store by umožnilo ľahší prístup k aplikácii pre používateľov a zjednodušilo by distribúciu.

Literatúra

1. NEHILA, Peter. Neurorehabilitácia v zdieľanej virtuálnej realite. 2023. Dostupné tiež z: <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioFormChildCRIDA&sid=880D977B60C8641DD3EE229C4FC3>.
2. GEORGIEV, Georgi V. Virtual Reality for Neurorehabilitation and Cognitive Enhancement. *National Library of Medicine*. 2021. Dostupné tiež z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7918687/>.
3. LISIŃSKI, Przemysław. Perspectives of Motor Functional Upper Extremity Recovery with the Use of Immersive Virtual Reality in Stroke Patients. *MDPI*. 2022. Dostupné tiež z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/712>.
4. MARCHIONNE, Francesca. Virtual Reality Rehabilitation – The Future of Physical Therapy. *iMotions*. 2019. Dostupné tiež z: <https://www.imotions.com>.
7. *The REAL System, Virtual Reality Rehabilitation Tool*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.realsystem.com>.
8. UNIVERSITY, Sheffield Hallam. *Impact VR - Sheffield Hallam University*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.shu.ac.uk/centre-culture-media-society/impact-vr>.
9. XRHEALTH. *What We Treat - XRHealth*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.xr.health/what-we-treat/>.
10. LANGBEHN, E.; LUBOS, Paul; STEINICKE, Frank. Evaluation of Locomotion Techniques for Room-Scale VR: Joystick, Teleportation, and Redirected Walking. *Proceedings of the Virtual Reality International Conference - Laval Virtual*. 2018. Dostupné tiež z: https://consensus.app/papers/evaluation-locomotion-techniques-roomscale-joystick-langbehn/38174b513dd85d22866eed6d980a2b96/?utm_source=chatgpt.

11. KENNEDY, R. S. et al. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *Taylor and Francis Online*. 2009. Dostupné tiež z: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0303_3.
12. BOLETISIS, C. The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Review of Techniques and a Proposed Typology. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2021, roč. 5, č. 4, s. 28. Dostupné tiež z: <https://www.mdpi.com/2414-4088/1/4/24>.
13. CORPORATION, Valve. *Half-Life: Alyx* [Video game]. 2020. Dostupné tiež z: https://store.steampowered.com/app/546560/HalfLife_Alyx/.
14. VRCHAT INC. *VRChat*. VRChat Inc., 2017. Dostupné tiež z: <https://hello.vrchat.com/>.
17. UNITY TECHNOLOGIES. *XR Interaction Toolkit Documentation*. Unity Technologies, 2023. Dostupné tiež z: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.interaction.toolkit@3.0/manual/index.html>.
18. CHOUAIB, Saleh. Virtual Reality in 3D Slicer. *Inquiry@Queen's Undergraduate Research Conference Proceedings*. 2019. Dostupné tiež z: https://consensus.app/papers/reality-slicer-choueib/693e4845fbca593d9443781d6a4d9a2b/?utm_source=chatgpt.
19. Inverse Kinematics [<https://www.mathworks.com/discovery/inverse-kinematics.html>]. [B.r.]. Accessed: 2023-05-11.
20. UNITY. *Animation Rigging User Guide*. 2023. Dostupné tiež z: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.animation.rigging@1.0/manual/index.html>.
21. ROOTMOTION. *Final IK*. 2023. Dostupné tiež z: <http://root-motion.com/>.
22. WAGNERBERGER, Larissa. Inverse kinematics for full-body self representation in VR-based cognitive rehabilitation. *IEEE Xplore*. 2022. Dostupné tiež z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9666140>.
23. STORE, Unity Asset. *EasyIK on GitHub*. 2023. Dostupné tiež z: <https://github.com/joaen/EasyIK>.
24. DZEMIDOVICH, Andrei. Aplikčné vylepšenia virtuálno-realitného systému pre neurorehabilitáciu. 2024. Unpublished.

Zoznam obrázkových zdrojov

5. *Použitie Surgical Theater* [https://globetechcdn.com/mobile_hospimedia/images/stories/articles/article_images/2019-04-23/DJB-173A.jpg]. [B.r.].
6. *Použitie Osso VR* [<https://api.time.com/wp-content/uploads/2022/11/best-inventions-2022-VR-surgical-training-platform.jpg>]. [B.r.].
15. *Half-Life Alyx teleportácia* [<https://www.realitevirtuelle.com/wp-content/uploads/2020/04/half-life-alyx-040701.jpg.webp>]. [B.r.].
16. *Skyrim VR teleportácia* [https://img.nerdburglars.net/wp-content/uploads/2017/11/Skyrim-VR_20171123184219.jpg]. [B.r.].

Slovník

Anticipácia v kontexte animácie je technika, ktorá naznačuje nadchádzajúci pohyb alebo akciu, čím sa zvyšuje vierohodnosť a dynamika animácie.

Avatar je virtuálna reprezentácia užívateľa v počítačových hrách, virtuálnej realite alebo online prostredí.

Brain-computer interface je technológia, ktorá umožňuje priame spojenie medzi mozgom a počítačom, čo umožňuje užívateľom ovládať zariadenia iba pomocou mozgových signálov.

deployment je proces zavedenia alebo uvedenia do činnosti systému, aplikácie alebo služby v produkčnom prostredí, v ktorom bude používaný koncovými užívateľmi..

Dysfágia je zdravotný stav charakterizovaný ťažkosťami s prehĺtaním, čo môže byť výsledkom neurologických porúch alebo svalových problémov.

Effector je v robotike a virtuálnej realite zariadenie alebo mechanizmus, ktorý vykonáva akcie alebo pohyby, často predstavovaný rukami alebo nástrojmi avatara.

Imerzia je stav ponorenia do zážitku vo virtuálnej realite, kde užívateľ cíti plnú angažovanosť a prítomnosť v simulovanom prostredí..

Interagovať znamená vzájomne pôsobiť alebo komunikovať s objektmi alebo užívateľmi v prostredí, často používané v kontexte virtuálnej reality a počítačových hier.

Joystick je vstupné zariadenie, ktoré umožňuje užívateľovi ovládať pohyb v počítačových hrách alebo simuláciách prostredníctvom nakláňania páčky.

Lokomocia je proces pohybu alebo spôsob, akým sa užívateľ alebo avatar pohybuje v prostredí virtuálnej reality alebo v počítačovej hre.

Multiplayer je režim hry alebo aplikácie, ktorý umožňuje viacerým užívateľom súčasne sa zúčastniť a interagovať v tom istom virtuálnom prostredí.

Načasovanie v kontexte animácie je rozloženie a tempo jednotlivých pohybov a akcií, ktoré ovplyvňuje plynulosť a realistickosť animácie.

Neurorehabilitácia je terapeutický proces zameraný na obnovu funkcií nervového systému, často využívaný pri liečbe pacientov po mozgových príhodách alebo iných neurologických poruchách.

OpenVibe je softvérová platforma na vývoj aplikácií pre mozgové počítačové rozhrania, používaná na experimentovanie a vývoj neurorehabilitačných nástrojov.

Raycast je technika v počítačovej grafike a programovaní, ktorá slúži na detekciu kolízií a interakcií v trojrozmernom priestore pomocou vysielania lúčov.

Rig je kostra alebo štruktúra, ktorá sa pridáva k 3D modelu, aby sa mohol pohybovať a animovať.

Rigging je proces vytvárania a nastavovania kostry (rigu) pre 3D model, čo umožňuje jeho animáciu a pohyb.

Rozostupy v kontexte animácie je technika, ktorá určuje vzdialenosť medzi jednotlivými kľúčovými snímkami, čím ovplyvňuje rýchlosť a plynulosť pohybu.

Simulator sickness je nevoľnosť, ktorú môžu užívatelia pociťovať pri používaní simulátorov alebo virtuálnej reality, podobná pohybovej chorobe.

Skinning je proces pripojenia 3D modelu k jeho kostre (rigu), čo umožňuje, aby sa model pohyboval spolu s kostrou.

VR je skratka pre virtuálnu realitu, čo je technológia, ktorá umožňuje užívateľom zažiť a interagovať s trojrozmerným počítačom generovaným prostredím.

VR headset je zariadenie, ktoré sa nosí na hlave a umožňuje užívateľovi vstúpiť do virtuálnej reality tým, že zobrazuje trojrozmerné prostredie a sleduje pohyby hlavy, ako napríklad Oculus Rift alebo HTC Vive.

Zoznam príloh

Príloha A Používateľská príručka

Príloha B CD médium – záverečná práca v elektronickej podobe

**Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Reprezentácia používateľa vo
virtuálno-realitnom systéme pre
neurorehabilitáciu
Používateľská príručka
Príloha A**

Táto používateľská príručka nadväzuje na príručku v diplomovej práci Petra Nehilu [1], bola aktualizovaná a rozšírená novými časťami, ktorých obsahom je dokumentácia novej funkcionality. Dôvodom pre tento krok je, že sa veľká časť funkcionality nezmenila a obsahovo je stále relevantná.

Inštalácia softvéru

Aplikácie aktuálne nie je na žiadnej platforme, bežne používanej na šírenie softvéru. Je preto potrebné zabezpečiť prístup k potrebným súborom cez priame spojenie. Kontaktné adresy: `peter.nehila@student.tuke.sk`, `stefan.korecko@tuke.sk`, `damian.chmura@student.tuke.sk`, `andrei.dzemidovich@student.tuke.sk`. Pre fungovanie je potrebné mať zabezpečený funkčný server a správne nastavené klientske inštancie (IP adresa servera). Aktuálne server nie je verejne dostupný.

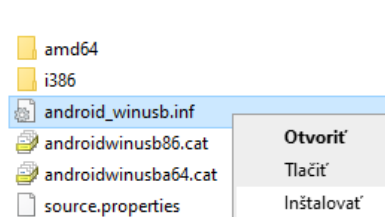
Osobný počítač

Aplikáciu nie je potrebné inštalovať. Spúšťa sa otvorením `NeuroRehabVR.exe`, ktorý je súčasťou priečinka so všetkými súborami.

Oculus Quest 2

Aktuálne nie je možné spúšťať a inštalovať aplikáciu cez platformu na šírenie softvéru (ako napríklad Oculus Store). Je potrebné ju ručne nainštalovať. Postup inštalácie obsahuje niekoľko krokov, na inštaláciu softvéru je potrebné použitie stolového počítača. Postup je nasledovný:

1. **USB debugging** - na inštaláciu aplikácií je potrebné zapnúť developer mode. Je možné ho zapnúť dvoma spôsobmi: použitím aplikácie v smartfóne alebo zmenou nastavení priamo v zariadení Oculus. Pri použití aplikácie Meta Quest na smartfóne je potrebné spárovať zariadenia, následne vybrať zariadenie a prejsť do nastavení zariadenia, kde je možné povoliť developer mode. V prípade nastavenia na headsete priamo, je postup nasledovný: je potrebné prejsť do nastavení "Settings", následne otvoriť kartu "System". Ako posledný krok je potrebné prejsť do karty "Developer" na ľavej strane. V tejto karte je potrebné povoliť možnosť "USB Connection Dialog". Následne sa po pripojení zariadenia do počítača na headsete objaví dialóg "Allow USB debugging?". Je potrebné povoliť túto možnosť. Ak plánujete po-



Obr. 1: Inštalácia ovládača Oculus Go

užívať počítač v spojení s helmou častejšie, odporúčame povoliť možnosť “Always allow from this computer”,

2. **inštalácia ovládačov** - na stolovom počítači je potrebné nainštalovať Oculus Go ovládač¹. Po stiahnutí adresára, je potrebné ho rozbaľiť. Po rozbalení je možné nainštalovať ovládač. Pravým tlačidlom myši na `android_winusb.inf` sa zobrazí možnosť “Inštalovať” (obr. 1),
3. **Android Debug Bridge** - skratene ADB, slúži na komunikácia s android zariadeniami, pripojenými k počítaču. Keďže Oculus Quest využíva android ako operačný systém, je možné tento nástroj použiť na inštaláciu softvéru. ADB je možné stiahnuť z oficiálnej stránky android². Po stiahnutí a rozbalení priečinka je potrebné prejsť do cieľového priečinka, kde sú potrebné súbory rozbalené (odporúčame použiť iný priečinok než ten z predošlého kroku),
4. **inštalácia aplikácie** - inštaláciu je potrebné uskutočniť cez príkazový riadok. Prejdite do priečinka, kde ste rozbalili ADB nástroje v predošlom kroku. Podržaním tlačidla Shift a stlačením pravého tlačidla myši otvoríte dialógové menu. Zvoľte možnosť “Otvoriť tu okno prostredia PowerShell”, prípadne “Otvoriť tu príkazový riadok”. Môže sa to líšiť v závislosti od zariadenia. Následne je potrebné zadať príkaz:


```
.\adb.exe install -r .\Build.apk
```

 “.\Build.apk” je potrebné nahradiť celou cestou k súboru aplikácie. Príkaz s celou cestou by mohol vyzeráť nasledovne:


```
.\adb.exe install -r D:\Unity\NeuroRehabVR\Oculus\Build.apk
```

 Pre jednoduchosť je preto možné uložiť inštalačný súbor “Build.apk” do rovnakého priečinka, v ktorom sú uložené ADB nástroje. Následne je možné použiť relatívnu cestu, ako je ukázané v prvom príklade príkazu,

¹<https://developer.oculus.com/downloads/package/oculus-go-adb-drivers/>

²<https://developer.android.com/studio/releases/platform-tools>

5. **spustenie aplikácie** - po inštalácii sa aplikácia objaví medzi nainštalovaným softvérom. Je možné ju nájsť v priečinku "Unknown sources".

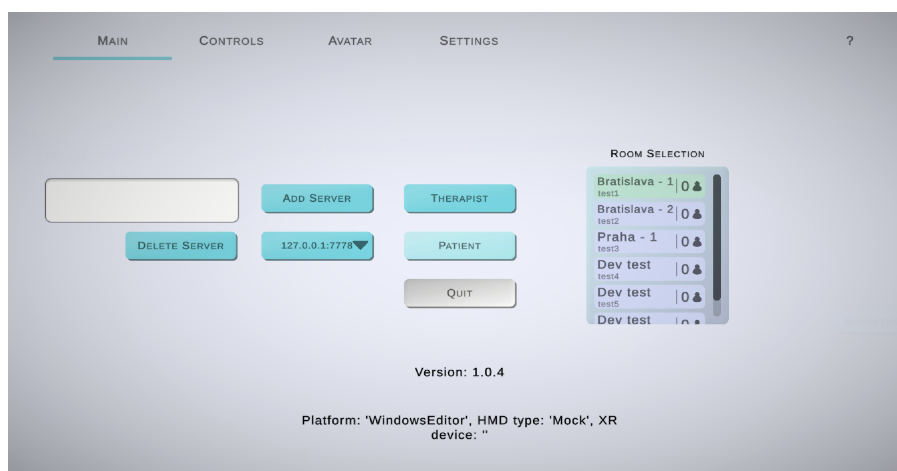
Použitie a ukážka aplikácie

Po spustení aplikácie sa používateľ nachádza v offline lobby scéne. Používateľ môže pridať novú IP adresu a port servera na pripojenie, meniť nastavenia, prispôbiť vzhľad avatara, ako aj resetovať výšku avatara. Pohyb v prostredí závisí od platformy, na ktorej sa nachádzame.

V prípade **osobného počítača** je možné ovládať pohyb pomocou klávesov “WASD” alebo kurzorových šípok, otáčanie funguje pomocou myši, interakcia s objektmi (UI aj 3D objekty) pomocou ľavého tlačidla myši. Menu je možné ovládať priamo stlačením tlačidiel v 3D priestore, alebo je možné zobrazíť 2D menu na vrchu obrazu. Po stlačení skratky na zobrazenie menu (klávesa “M”) sa odomkne myš a ovládanie menu je možné štandardným spôsobom. Presúvanie objektu je implementované jeho presúvaním myšou a zároveň držaním ľavého tlačidla myši. Presúvať objekt je možné v bežnom móde pohybu, stlačením klávesy “G” je možné uzamknúť rotáciu kamery. Zároveň sa odomkne kurzor myši. Pred pripojením má používateľ možnosť voľby roly, v ktorej bude vystupovať počas rehabilitácie. Vzhľad úvodného menu je na obr. 2. Po pripojení sa prihlásite do hlasového chatu.

Počas používania **VR helmy** je možný pohyb pomocou chôdze, teleportácie alebo použitím páčky ľavého ovládača. Otáčanie je možné pomocou páčky pravého ovládača, ale vzhľadom na pocit nevoľnosti, ktorý spôsobuje odporúčame otáčať sa len celým telom. Interakcia s menu elementami je možná stlačením hlavného tlačidla ovládača, alebo použitím “Trigger” tlačidla. Interakcia funguje oboma ovládačmi. Presun objektov je možný zamierením ovládača na objekt, alebo dotknutia sa objektu a držaním tlačidla “Grip” ovládača (V prípade Oculus Quest ovládačov to sú tlačidlá na stranách). Zobrazenie menu nad ovládačom je možné pomocou tlačidla menu na ľavom ovládači. Podržaním tohto tlačidla sa objaví menu pred používateľom, ktoré zostane prilepené na danej pozícii.

Systém teleportácie umožňuje rýchly a jednoduchý pohyb v rámci virtuálneho prostredia. Tento spôsob pohybu je určený hlavne pre používateľov, ktorým klasický pohyb pomocou joysticka spôsobuje nevoľnosti.



Obr. 2: Úvodné menu

Kroky pre správne využitie teleportačného systému sú nasledovné:

1. Aktivácia Teleportácie:

- Uchopte ľavý ovládač VR systému.

2. Výber Teleportačného Miesta:

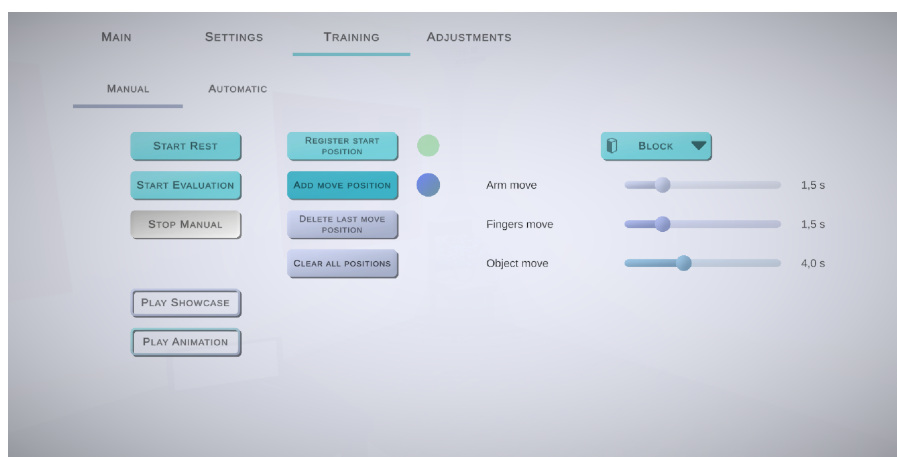
- Nasmerujte ľavý ovládač na miesto, kam sa chcete teleportovať. Farba ukazovateľa sa zmení na žltú, ak sa je na dané miesto možné presunúť.

3. Teleportácia:

- Stlačte tlačidlo uchopenia na ľavom ovládači, keď je laserový ukazovateľ nasmerovaný na platnú teleportačnú oblasť.
- Po stlačení tlačidla sa okamžite presuniete na zvolené teleportačné miesto.

Rola pacienta

Pacient má počas cvičenia značne obmedzené možnosti. Môže sa hýbať v prostredí, no jeho prácou je len počkať na pokyny terapeuta. Po pripojení je automaticky zvolená ruka, ktorou sa vykonáva cvičenie pravá. Toto nastavenie môže meniť terapeut po pripojení do online prostredia. Terapeut môže pacientovi zafiť zdravú ruku. Pacient to môže urobiť sám stlačením “N” na klávesnici alebo “Y” a “B” na ovládači.



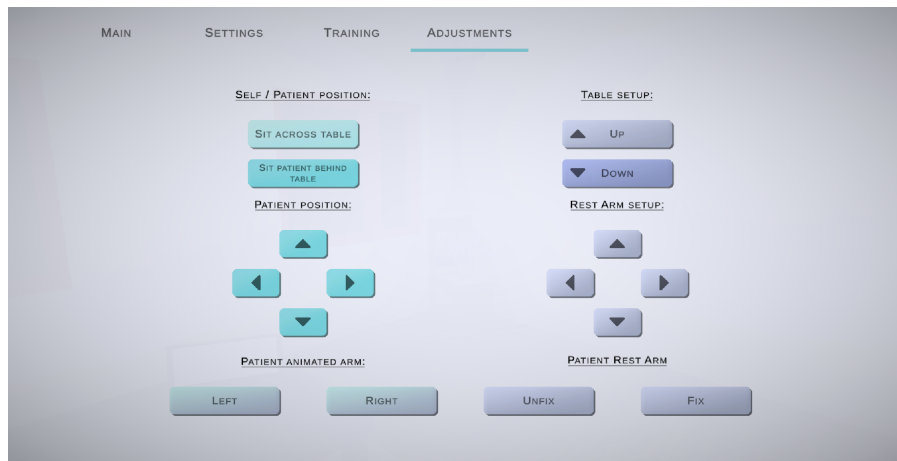
Obr. 3: Menu nastavení rehabilitácie

Rola terapeuta

Terapeut má za úlohu viesť celú rehabilitáciu. V porovnaní s rolou pacienta má tiež po pripojení svoje vlastné menu, kde sa nachádzajú nastavenie týkajúce sa rehabilitácie, ako aj pozícií počas cvičenia. Terapeut môže zmeniť aktívnu ruku pacienta, ktorá je rehabilitovaná alebo zafixovať zdravú. Na obr. 3 je možné vidieť nastavenia, ktoré sú dostupné počas cvičenia terapeutovi. Môže meniť typ pohybu, ktorý je aktuálne používaný. Na výber je zo štyroch rôznych pohybov. Každý pohyb je špecifický predmetom, ktorý sa pri pohybe používa. Terapeut je taktiež schopný presúvať predmet a pridávať ďalšie pohyby pre rehabilitáciu. Dôležité je aj nastavenie časovania pre animácie, čas čakania alebo aj počet opakovaní. Tieto nastavenia je možné meniť v pravej časti menu. Pred spustením rehabilitácie môže terapeut tiež aj zobrazíť ukážkovú animáciu. Po spustení rehabilitácie bude následne server čakať na udalosť z prostredia OpenVibe. Po prijatí správy sa spustí animácia na každom klientovi. Ak sa nepošle animácia v rozmedzí čakania, celé aktuálne cvičenie sa preruší a je potrebné ho znova spustiť.

Podstatnú časť nastavení ešte pred rehabilitáciou tvorí prispôsobenie správnych pozícií. Na obr. 4 je možné vidieť možnosti, ktoré terapeut má. Môže presunúť svoju postavu bez nutnosti pohybu za stôl. Taktiež dokáže presunúť za stôl aj pacienta. To znamená, že pacient a terapeut sa nemusia fyzicky presúvať. Nie je potrebné sa presúvať ani pomocou ovládačov. Terapeut taktiež dokáže precíznejšie meniť pozíciu pacienta jeho posúvaním vpred, vzad a do strán. Systém taktiež ponúka aj možnosť kalibrácie výšky stola a zmenu oddychovej polohy ruky pacienta.

Terapeut je schopný nastaviť viacero pozícií pre pohyb počas animácie. Systém ale má nastavených niekoľko obmedzení. Maximálny počet pozícií pre pohyb



Obr. 4: Menu s nastaveniami pozícií

je 10, animácia potrebuje mať nastavenú aspoň jednu pozíciu (začiatočnú) aby ju bolo možné spustiť, pozícia sa použije len v prípade, že je v dosahu ruky pacienta. To znamená, ak sa pacient pohne počas rehabilitácie a pozícia už nie je v jeho dosahu, pozícia sa preskočí. Animácia s kľúčom a zámkom má trochu iné nastavenia. Animácia musí mať vždy dve pozície, aby ju bolo možné spustiť začiatočnú pozíciu a cieľovú pozíciu zámku.

Ukážka systému

V tejto časti ukážeme zopár obrázkov, kde je možné vidieť systém a niektoré vlastnosti, ktorými disponuje.

Vzhľad prostredia

Na obr. 5 a 6 je vyobrazené prostredie, v ktorom prebieha rehabilitácia. Na stole je možné vidieť objekt, ktorý sa aktuálne používa počas rehabilitácie. Pri zmene typu animácie sa nový objekt zobrazí na stole.

Ukážka animácií

Na pod-obrázkoch obr.7 je možné vidieť rozdielne pohyby počas vykonávania animácií. Na obr. 7d je taktiež možné vidieť ukazovatele, ktoré vyznačujú pozície pre pohyby. Zelená guľa predstavuje štartovaciu pozíciu, modrá ostatné pozície. Tieto značky vidí len terapeut. Ako bolo spomenuté v predošlej kapitole, pozície animácií sú obmedzené dosahom ruky pacienta. Na obr. 8 je možné vidieť ukazovateľ dosahu. Tento ukazovateľ je viditeľný len terapeutom počas presúvania objektu. Na obr. 9 je vidieť animáciu z pohľadu pacienta.



Obr. 5: Prostredie s pohľadom na stôl



Obr. 6: Zvyšok miestnosti



(a) Uchopenie a presun kvádra



(b) Uchopenie kocky



(c) Zdvihnutie pohára



(d) Presunutie kľúča do zámky

Obr. 7: Ukážka rôznych typov animácií



Obr. 8: Dosah ruky pacienta



Obr. 9: Animácia z pohľadu pacienta