

BACHELORPROEF

Effect van “change blindness” op immersie in virtuele omgevingen.

Proefschrift voorgelegd tot het behalen van de graad van bachelor in de wetenschappen, te verdedigen door:

Randy Thiemann

*Promotor: Prof. Dr. Philippe Bekaert
Begeleiders: Patrik Goorts, Steven Maesen*

Inhoudsopgave

1 Literatuurstudie	4
1.1 Inleiding	4
1.2 Redirectietechnieken (RDTs)	4
1.2.1 Rotationele vervorming	5
1.2.2 Translationele vervorming	7
1.2.3 Change blindness	7
1.2.4 Afleiders	9
1.3 Reoriëntatietechnieken (ROTs)	9
1.3.1 Verbale commandos	10
1.3.2 Visuele commandos	11
1.4 Immersie	11
1.5 Conclusie	12
2 Experiment	14
2.1 Pilot study	14
2.2 Ontwerp studie	14
2.2.1 Vragenlijst	15
2.3 Uitvoering	16
3 Virtuele omgeving	17
3.1 Ontwerp	17
3.2 Implementatie	19
3.2.1 Engine	19
3.2.2 Tracking	24
3.2.3 Hardware	25
4 Resultaten	26
4.1 Besprekking feedback	27
5 Besluit en verder onderzoek	28
5.1 Verder onderzoek	28

5.2 Discussie	29
A Meetings	30
A.1 Meeting 1: 2014-01-31	30
A.2 Meeting 2: 2014-02-13	30
A.3 Meeting 3: 2014-02-28	31
A.4 Meeting 4: 2014-03-12	31
A.5 Meeting 5: 2014-06-13	32
B Vragenlijst	33
Bibliografie	37

Hoofdstuk 1

Literatuurstudie

1.1 Inleiding

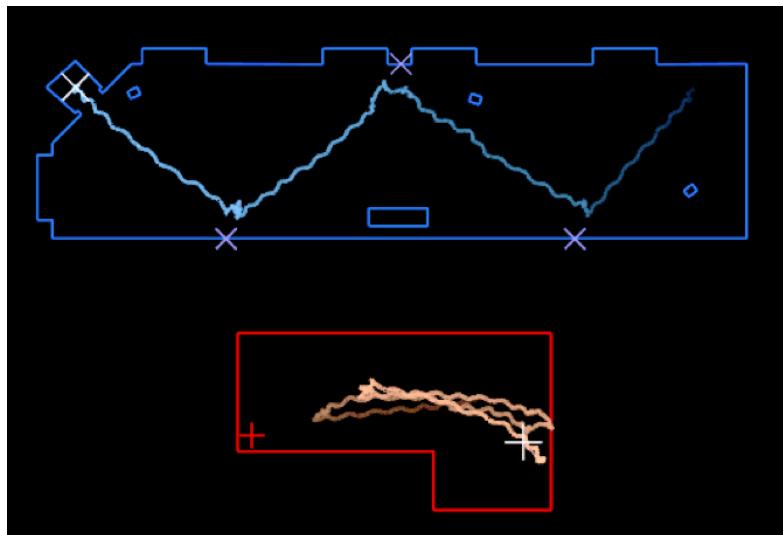
Redirected walking is een techniek waarbij een proefpersoon in een virtuele omgeving weergegeven in een head-mounted display kan rondwandelen door middel van het vervormen van de route die deze proefpersoon in een fysieke omgeving wandelt. Het doel is, door de 1:1 relatie van fysieke beweging en virtuele beweging te ontkoppelen, rondwandelen in grotere tot zelfs arbitrair grote virtuele ruimtes mogelijk te maken. Ik zal diverse technieken bespreken die gebruikt worden om deze ontbinding te bewegen. Naast de redirectietechnieken zijn er ook technieken die de immersie verbeteren door andere zintuigen te betrekken bij het proces.

1.2 Redirectietechnieken (RDTs)

RDTs zijn technieken waar de fysieke bewegingen van een proefpersoon ontkoppeld worden van de resulterende virtuele bewegingen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door de snelheid van de proefpersoon in de virtuele omgeving te versnellen of te vertragen ten opzichte van de snelheid in de fysieke omgeving, of door de rotaties te vertragen of te versnellen zodat de proefpersoon het tracking gebied niet verlaat. Ik beschrijf hier kort enkele van deze technieken samen met onderzoeken die er over gevoerd zijn.

1.2.1 Rotationele vervorming

Bij rotationele vervorming worden de rotaties van de proefpersoon in de virtuele omgeving vertraagd of versneld ten opzichte van de rotaties in de fysieke omgeving, een voorbeeld hiervan kan men zien in Figuur 1.1. In het algemeen is het hier het doel om de proefpersoon indien mogelijk steeds richting het midden van de tracking area te doen wandelen.



Figuur 1.1: Vergelijking van de beweging van de proefpersoon in de virtuele omgeving (blauw) en de overeenkomstige beweging in de fysieke omgeving (rood).[12]

Deze techniek is al in diverse papers onderzocht:

In een onderzoek gevoerd door Razzaque et. al., 2001 [12] werden proefpersonen gevraagd om een virtuele brandoefening uit te voeren. In de opstelling voor dit onderzoek waren er in het fysieke labo twee knoppen geplaatst op dezelfde afstand als in de virtuele omgeving. In de virtuele omgeving waren er echter 4 knoppen met telkens een hoek van 90 graden er tussen, deze opstelling is in bovenaanzicht getoond in Figuur 1.1. In dit onderzoek werd op enkele verschillende manieren rotationele vervorming ingevoegd:

Als de proefpersoon stilstaat werd er een kleine hoeveelheid “drift” toegevoegd, de camera in de virtuele omgeving draaide automatisch zeer traag in de omgekeerde richting van waar men de proefpersoon in de fysieke omgeving heen wilde naar laten kijken. Het bleek dat de proefpersoon hierdoor automatisch in die richting ging draaien om het beeld stil te houden. De rotaties van de proefpersoon werden ook overdreven, of juist gedempt, om de proefpersoon in de fysieke omgeving in

de juiste richting te laten wandelen.

Naast deze vervormingen indien de testpersoon in stilstand was, was het ook mogelijk om een schijnbaar rechte lijn in de virtuele omgeving overeen te laten komen met een curve. Dit effect werd bekomen door het pad in de virtuele omgeving een bepaalde hoeveelheid te buigen, proportioneel met de lineaire snelheid van de proefpersoon in de fysieke omgeving.

Een combinatie van deze methodes werd gebruikt om er voor te zorgen dat als de proefpersoon in de fysieke omgeving voor een knop stond, dit in de virtuele omgeving ook het geval was. Helaas was het voor deze implementatie nodig dat er een voorberekend pad door de virtuele omgeving bestond, en dat de proefpersoon er zo weinig mogelijk van afweek. Later werden er technieken voorgesteld om deze vereisten te verzwakken.

In Engel et. al., 2008 [5] wordt een techniek voorgesteld om deze rotationele vervorming dynamisch te bepalen. Dit werd gedaan door het dynamische-rotatie probleem te reduceren tot een optimisatie probleem, welke in de AI gemeenschap reeds bekend zijn. Dit algoritme maakte het mogelijk om optimale rotationele vervormingen te berekenen maar vereist in ieder geval een gedeeltelijke kennis over het te volgen virtuele pad, en vereist dat het pad een bepaalde hoeveelheid bochten bevat.

In een ander onderzoek in Neth et. al., 2012 [10] werd verder onderzocht wat de precieze relatie tussen bewegingssnelheid en maximaal acceptabele rotationele vervorming is. Uit dit onderzoek bleek dat tragere snelheden grotere vervormingen toelaten, maar dat deze relatie niet lineair is. Aangezien mensen over het algemeen trager wandelen in virtuele omgevingen [9], kan men dit toepassen in redirected walking.

In een tweede experiment uit hetzelfde onderzoek [10] werd onderzocht of deze bevindingen effectief konden gebruikt worden dynamische schalering van vervorming toe te passen in een rijke virtuele omgeving. Er werd hier onderzocht of er een significant verschil is tussen de merkbaarheid van statische rotationele vervorming (als de proefpersoon stil staat) versus dynamische rotationele vervorming (als de proefpersoon beweegt). Naast de technieken van Razzaque et. al., 2001 [12] om rotationele vervorming in te voegen met een constant, een statisch en een dynamisch component, werd er ook gebruik gemaakt van versterking van de effecten nabij de randen van de fysieke omgeving, om het verlaten van het tracking gebied te vermijden. Er werd gemeten wat de mediaanafstand is die een proefpersoon kan wandelen in een grote virtuele omgeving voor de proefpersoon moet geforceerd gehorizonteeerd worden richting het centrum van de fysieke omgeving om het verlaten van het tracking gebied te voorkomen. Uit dit experiment is gebleken dat er

een positief significant verschil is tussen de mediaan gewandelde afstand bij dynamische vervorming versus statische vervorming zonder een significante verhoging in simulatorziekte.

Uit al deze onderzoeken blijkt dat er een trade-off is tussen een virtuele omgeving met een ongekend pad[10] versus een betere immersie wegens minder onderbrekingen[5, 12].

Alle vorige studies behandelden rotationele vervorming in beweging, dus over curves. Het is echter ook mogelijk om rotationele vervorming in stilstand te hebben. In Steinicke et. al., 2009 [16] werd bepaald dat in dit specifieke geval compressies tot 77% acceptabel zijn voor de proefpersoon het merkt.

1.2.2 Translationele vervorming

Naast rotationele vervorming is het ook mogelijk om de lineaire snelheid van een proefpersoon te vervormen daar onderzoek heeft aangetoond dat proefpersonen in virtuele omgevingen afstand [8], snelheid [2] en afgelegde afstand [6] onderschatten. In Steinicke et. al., 2009 [16] werd er een experiment uitgevoerd om onder andere te bepalen wat de maximaal acceptabele translationele vervorming is voor een gegeven snelheid. Er werd bepaald dat de vervorming merkbaar is bij een versnelling tussen 20% en 60% met een ideale waarde van ongeveer 20%.

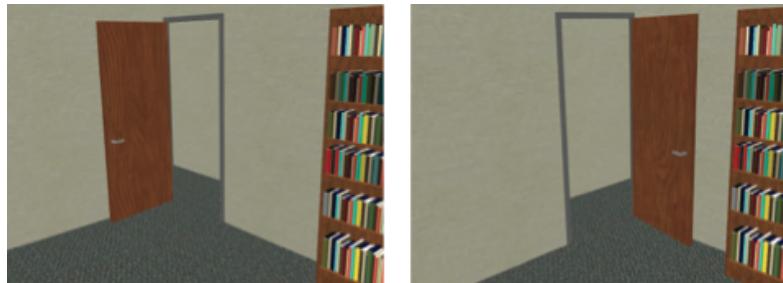
Rotationele vervorming en translationele vervorming vormen de basis van redirected walking, en zijn ook de twee technieken die gebruik maken van ontkoppeling van het fysieke en het virtuele pad van de proefpersoon.

1.2.3 Change blindness

Change blindness slaat op de manier waarop mensen onder bepaalde omstandigheden verrassend grote veranderingen in een omgeving niet merken. In een paper van Simons et. al., 2005 [15] wordt er een breed overzicht gegeven van de diverse experimenten die zijn uitgevoerd rond dit fenomeen. Zo merken veel mensen bijvoorbeeld helemaal niet als een persoon in het midden van een interactie door een totaal andere persoon wordt vervangen[14], of wordt het verschil tussen twee foto's die om de beurt worden getoond pas na een zeer lange tijd opgemerkt[13].

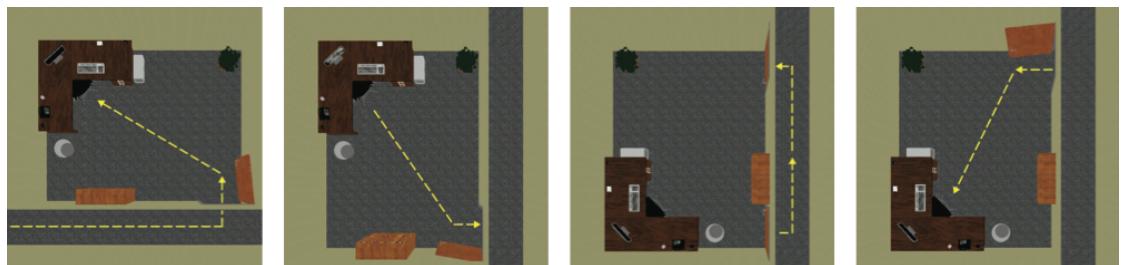
Omdat dit zo een krachtig fenomeen is, wordt het ook toegepast in redirected walking. Waar de vorige technieken het fysieke en het virtuele pad van de proefpersoon ontknoppelden probeert deze techniek de proefpersoon te misleiden, en er voor te zorgen dat hij in de tracking ruimte blijft door de layout van de virtuele

omgeving strategisch aan te passen, bijvoorbeeld door een deur van plaats te laten wisselen zoals in Figuur 1.2.



Figuur 1.2: Voorbeeld van een verandering in een virtuele omgeving.[18]

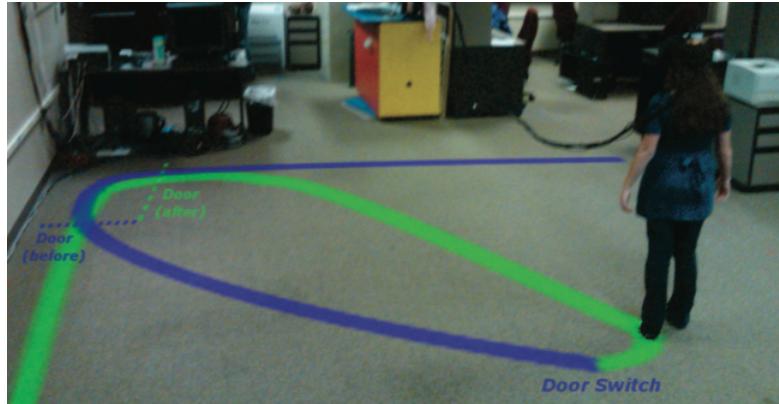
In Suma et. al., 2011 [18] werd er getest of veranderingen in de virtuele omgeving voor de proefpersonen merkbaar waren. De proefpersoon werd gevraagd om in een virtueel kantoor in elke kamer een beeldscherm uit te zetten en vervolgens de kamer verlaten. Dit proces werd dan herhaald voor 16 kamers. Nadat het beeldscherm werd uitgezet veranderde de deur van positie zodat de gang in een hoek van 90 graden verder ging ten opzichte van hoe de proefpersoon de kamer binnenging. Dit hele proces is zichtbaar in Figuur 1.3.



Figuur 1.3: Verandering van de positie van de deur in het onderzoek van Suma et. al., 2011 [18].

Door de veranderingen van de fysieke omgeving op deze manier te laten gebeuren werd de proefpersoon geforceerd cirkels rond de tracking area te wandelen, in Figuur 1.4 is een illustratie van het pad door een kamer te zien.

Uit de afgenummerde vragenlijst is toen gemerkt dat deze verandering voor bijna iedereen compleet onmerkbaar was, en werd er zelfs maar in kleine mate ervaren dat men in cirkels was aan het wandelen.



Figuur 1.4: Voorbeeld van een verandering in een virtuele omgeving.[18]

1.2.4 Afleiders

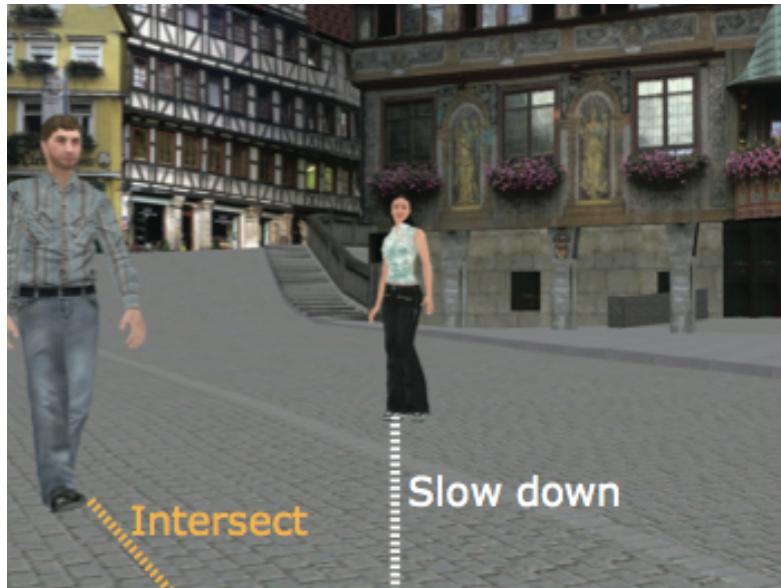
Een laatste techniek die ik zal bespreken is het toevoegen van “afleiders”, dynamisch bewegende voorwerpen of personen die als doel hebben de proefpersoon uit eigen wil zijn pad te laten afbuigen. Afleiders kunnen ook gebruikt worden om de ontkopelingen van het virtuele en het fysieke pad minder te laten opvallen.

In een onderzoek van Neth et. al., 2012 [10] werd er bijvoorbeeld gebruik gemaakt van andere virtuele avatars zoals in Figuur 1.5. Er werd gebruik gemaakt van avatars die recht voor de proefpersoon gingen stilstaan om deze af te dwingen te vertragen indien hij te snel ging om het pad effectief af te buigen. Er werd ook gebruik gemaakt van avatars die op koers wandelden voor een botsing om de proefpersoon te forceren af te buigen.

In Peck et. al., 2009 [11] werd er op een andere manier gebruik gemaakt van afleiders. Er werd gevraagd aan de proefpersoon om een vlinder te volgen om hem de illusie te geven dat hij 360° heeft gedraaid terwijl hij eigenlijk maar 180° heeft gedraaid. Hieruit bleek dat proefpersonen minder het gevoel hadden dat de wereld versneld draaide met een afleiding dan bij andere technieken.

1.3 Reoriëntatietechnieken (ROTs)

Hoewel redirectietechnieken bedoeld zijn om een proefpersoon binnen een tracking area te laten wandelen, kan het soms gebeuren dat een botsing met de rand van de tracking area niet meer te vermeiden is. Als dit het geval is wordt er gebruik gemaakt van “reoriëntatietechnieken”. Dit zijn directe commando’s aan de



Figuur 1.5: Voorbeeld van avatars in een virtuele omgeving, met als doel de proefpersoon te laten vertragen of zijn pad af te buigen.[10]

proefpersoon om van koers te veranderen, en vallen daarom ook behoorlijk op. Ik beschrijf hier de meest voorkomende ROTs.

1.3.1 Verbale commandos

Bij verbale commandos wordt er een geluidssignaal gegeven (meestal een gesproken signaal) waarin de proefpersoon wordt gevraagd om te draaien.

In het onderzoek van Razzaque et. al., 2001 [12] werd, indien de proefpersoon dreigde het tracking gebied te verlaten, de proefpersoon met verbale commando's gevraagd stil te staan en heen en weer te kijken om de proefpersoon in de fysieke omgeving terug in de juiste richting te laten kijken.

Er werd in een andere studie van Peck et. al., 2009 [11] echter bevonden dat verbale commando's niet de beste optie zijn voor redirectietechnieken, omdat deze makkelijk genegeerd kunnen worden.

1.3.2 Visuele commandos

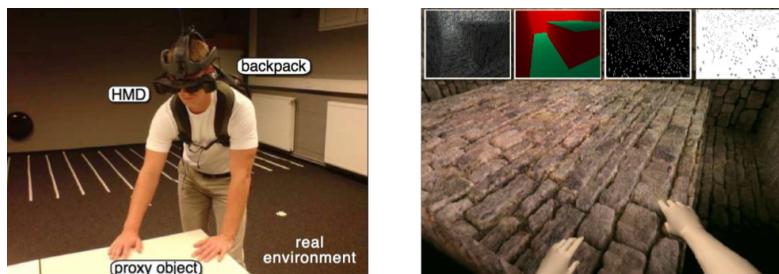
Bij visuele commandos wordt er een signaal op de display weergegeven om de proefpersoon te vragen om te draaien.

In het onderzoek van Neth et. al., 2012 [10] werd onder andere gebruik gemaakt van een stopteken. Als dit werd getoond werd de hele virtuele wereld stil gelegd. Er werd op voorhand aan de proefpersoon gevraagd rond te draaien tot het stopteken verdwijnt indien het getoond werd. Hoewel dit een zeer intrusieve methode is, is ze zeer effectief om het verlaten van het tracking gebied te voorkomen daar ze niet te negeren is.

1.4 Immersie

Hoewel visie voor redirected walking het belangrijkst is, omdat bij conflicten tussen het proprioceptieve¹ en het vestibulaire² systeem en visie, visie vaak dit conflict wint[3, 4, 17], zijn de andere zintuigen toch belangrijk om immersie te verkrijgen. Als men in een virtuele omgevingen geluid realistisch kan positioneel reproduceren helpt dit bijvoorbeeld de immersie enorm[7], maar zelfs het maskeren van geluid van in de fysieke wereld met bijvoorbeeld ruis kan helpen[19].

In Engel et. al., 2008[5] wordt ook opgemerkt dat de hoeveelheid omgevingslicht en omgevingsgeluid dat binnensijpelt een merkbare negatieve invloed heeft op de effectiviteit van redirectietechnieken. Naast audio is het ook mogelijk om de immersie te verhogen met proxy-objecten in de fysieke omgeving die overeen komen met objecten in de virtuele omgeving[16] zoals te zien is in Figuur 1.6.



Figuur 1.6: Voorbeeld van een proxy-object en het overeenkomstige beeld dat de proefpersoon ziet.[16]

¹Het zintuig dat de relatieve afstand tussen lichaamsdelen waarneemt.

²Het zintuig verantwoordelijk voor ons evenwichtsgevoel.

Voor de effectieve weergave van de virtuele omgeving maakt men meestal gebruik van een head mounted display, of een HMD. Voor HMDs is het ideaal om een zo hoog mogelijke field of view te hebben, dit lijkt geen groot effect te hebben op de prevalentie van simulatieziekte[1] maar verhoogt de performantie en immersie drastisch[1].

Traditioneel waren HMDs met grote field of view zeer duur en niet beschikbaar voor consumenten, maar tegenwoordig zijn er enkele betaalbare HMDs beschikbaar met een redelijk grote field of view, zoals de Oculus Rift DK1 (110° diagonaal).



Figuur 1.7: De Oculus Rift Developer Kit 1

Ten laatste is het voor redirected walking ook belangrijk dat de positie van de proefpersoon in de fysieke omgeving geweten is tot in grote precisie. Er zijn hier echter een grote hoeveelheid commerciële systemen voor beschikbaar zoals het OptiTrack systeem. Ik ga hier niet verder op in.

1.5 Conclusie

De technieken voor redirected walking variëren van technieken die een ontkoppeling van de virtuele en fysieke omgeving verwezenlijken om een arbitrair pad in de virtuele omgeving in de fysieke omgeving te laten passen, tot technieken zoals change blindness die gebruik maken van eigenaardigheden van het menselijk brein om de virtuele omgeving aan te passen zodat deze in de fysieke omgeving past.

Hoewel redirected walking een realistische en immersieve omgeving kan creëren zijn

er toch enkele inherente zwaktes waar op zich niet omheen kan gewerkt worden. Zo is het bijvoorbeeld onmogelijk om arbitraire fysieke collisie overeen te laten komen met collisie in de virtuele omgeving tenzij het labo explicet voor die virtuele omgeving is gebouwd. Het is ook niet mogelijk om de textuur van de vloer in de fysieke omgeving overeen te laten komen met deze in de virtuele omgeving als deze verandert van kamer tot kamer.

Ondanks deze relatief kleine beperkingen is redirected walking toch zeer geschikt voor gebruik in toepassingen zoals virtuele rondleidingen, of het doorlopen van een virtuele impressie van een huis voor het effectief gebouwd zal worden.

Hoofdstuk 2

Experiment

In dit onderzoek heb ik er voor gekozen om te kijken hoe effectief “change blindness” is op het behouden van immersie in een virtuele omgeving in een zeer gelimiteerde fysieke omgeving. Voor deze bachelorproef zal ik een experiment uitvoeren om te kijken hoe merkbaar change blindness met afleiders en taken is in een virtuele omgeving.

2.1 Pilot study

Nadat de virtuele omgeving volledig ontworpen was, heb ik aan enkele personen gevraagd om deze op een gewoon computerscherm met toetsenbord en muis te doorlopen. Dit om te kijken of de implementatie functioneel in order was, en ook om informeel te kijken hoe goed de illusie werkt. Uit deze informele studie is gebleken dat niemand van mijn 7 testers de redirectie merkte. Van de 7 testers klonk er bij 4 zelfs ongeloof over mijn verklaring dat de deuren bewogen en werd er verzocht om de omgeving nog eens te mogen doorlopen.

2.2 Ontwerp studie

Om een objectief beeld te krijgen van de effectiviteit van mijn implementatie van change blindness heb ik een simpel experiment opgesteld. Elke testpersoon kreeg een briefing waar hem verteld werd dat hij door een virtueel kantoor zou gaan wandelen. Ik deelde hem mee dat hij in elk kantoor de blinden zou moeten sluiten met de knop naast het raam, en dat hij de foto boven deze knop moest onthouden.

Vervolgens werd hem gevraagd het kantoor te verlaten en de deur achter hem te sluiten en dit proces voor 3 kantoren te herhalen. Er werd ook kort aan de proefpersonen verteld hoe ze moesten interageren met de virtuele omgeving.

Vervolgens werd er gevraagd of er onduidelijkheden waren en begaven we ons naar de startpositie, en werd de proefpersoon de Oculus Rift aangeboden om zelf op te zetten. Na de uitvoering van het experiment werd de proefpersoon een korte vragenlijst voorgelegd.

2.2.1 Vragenlijst

De vragenlijst bestond uit een informatieblok en vijf vragen. Ze was beschikbaar in het Nederlands en het Engels. De Nederlandse versie van de vragenlijst is ingevoegd in Bijlage B. In het informatieblok wordt er gevraagd naar de leeftijd en het geslacht van de proefpersoon, dit om potentieel te analyseren of er verschillen in effectiviteit tussen deze groepen zijn.

Vervolgens wordt er gevraagd om een schema van het grondplan te tekenen, om te zien of er ondanks de onmogelijke ruimte toch een consistent mentaal beeld kon gevormd worden. Daarna wordt er gevraagd om de drie fotos op te noemen, deze vraag is niet verwerkt in de resultaten daar deze een onderdeel uitmaakt van de afleiders. In vraag drie moet de proefpersoon aan acht stellingen een score toekennen van 1 tot 6 waar 1 betekent dat hij het niet heeft gemerkt, en 6 dat het heel duidelijk wel is gebeurd:

1. Ik zag de virtuele omgeving groter of kleiner worden.
2. *Ik voelde alsof ik hetzelfde pad aan het belopen was.*
3. Ik zag de virtuele omgeving flitsen.
4. *Ik merkte dat iets in de omgeving zich van plaats had veranderd.*
5. Ik zag de virtuele omgeving roteren.
6. Ik voelde mezelf groter of kleiner worden.
7. Ik voelde me alsof ik bewogen werd.
8. Ik merkte dat iets in de virtuele omgeving groter of kleiner werd.

Enkel de schuingedrukte stellingen zijn echt gebeurd, de andere stellingen zouden een zeer lage gemiddelde score moeten hebben. De laatste twee vragen bestaan uit een vraag waar wordt gevraagd voor algemene qualitatieve feedback over de

immersie, en een vraag waar wordt gevraagd om de bewogen voorwerpen te identificeren.

De vragenlijst is gebaseerd op de vragenlijst uit het eerdere experiment van Evan A. Suma[18].

2.3 Uitvoering

Het experiment is uitgevoerd met 17 proefpersonen, 4 vrouwen en 13 mannen. Leeftijden varieerden van 21 tot 47 jaar oud met een gemiddelde van 30. Slechts 3 personen hadden geen spelervaring. Omdat zowel de groep van vrouwen als de groep van mensen zonder spelervaring te klein is kunnen deze groepen helaas niet apart bekeken worden. Maar op het eerste zicht lijkt er geen significant verschil te zijn in de resultaten van deze groepen.

Hoofdstuk 3

Virtuele omgeving

3.1 Ontwerp

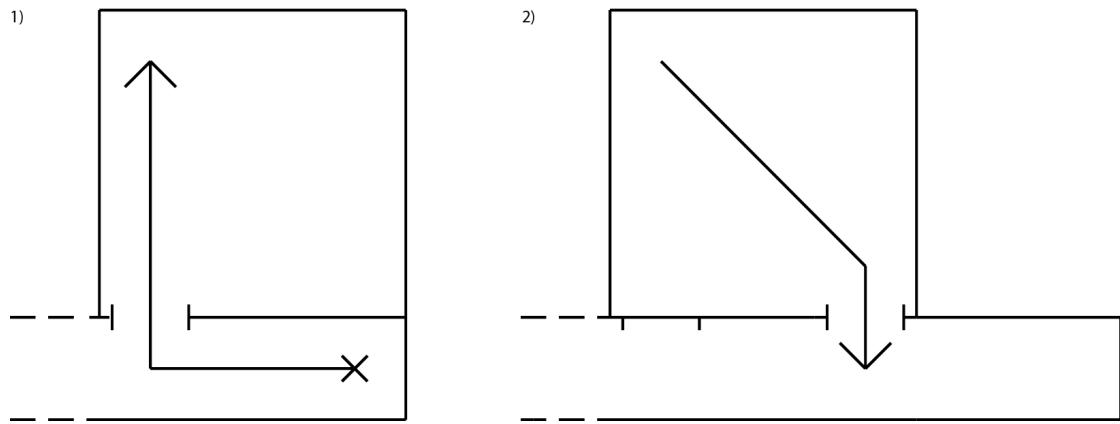
Voor dit onderzoek heb ik een virtuele omgeving ontworpen met meer dan 48m² aan bewandelbare ruimte, de proefpersoon kan deze omgeving volledig verkennen en toch in een 3 m x 4 m tracking area blijven. Deze virtuele omgeving bestaat uit een lange gang met drie kantoren en een uitgang er direct aan verbonden. De kantoren zijn zo ontworpen dat het mogelijk is om de deur te verplaatsen wanneer de proefpersoon deze niet in het zicht heeft. De gang zelf is 1 meter breed met een arbitraire lengte zodat deze oneindig lang lijkt. De kantoren zijn allemaal ontworpen om 3 m x 3 m te zijn.



Figuur 3.1: De drie kantoren.

Bij het betreden van de virtuele omgeving staat de proefpersoon aan het begin van de gang, aan de rechtermuur zijn 4 deuren te zien, 80 cm breed met 80 cm er tussen. Bij het betreden van het kantoor en het sluiten van de blinden wordt de hele gang naar achter verschoven zodat de deur nu aan de andere kant van

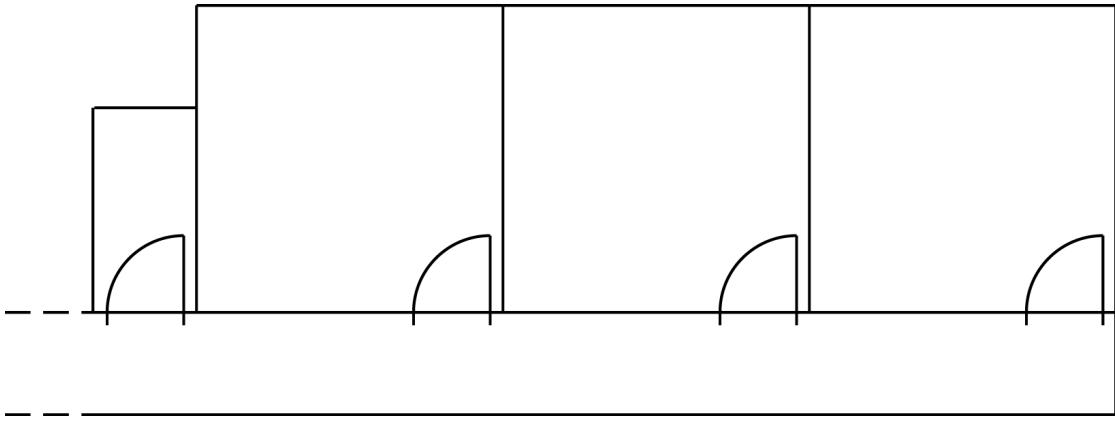
de kamer staat zoals geïllustreerd in figuur 3.2, na het verlaten van het kantoor staat de proefpersoon weer op de exacte locatie waar hij begonnen is. Wegens de beweging van de gang wordt er hier de illusie gecreëerd dat men verder in de gang staat dan eerst. De proefpersoon kan dan de deur van het kantoor sluiten om de volgende deur te openen. Dit geheel wordt drie keer herhaald. Om wat variëteit te behouden zijn de drie kantoren, zoals geïllustreerd in figuur 3.1, lichtjes verschillend ontworpen. Enkel de knop om de blinden te sluiten en het fotokader er boven staat in ieder kantoor op dezelfde plaats.



Figuur 3.2: Verandering van de omgeving.

De beweging van de gang wordt teweeg gebracht door een transformatie in de positie te laten gebeuren na het triggeren van de knop, wegens de implementatie is de deur hier nooit voor in beeld. De vierde kamer dient enkel als markering van het einde, bij het betreden van deze kamer gaan de lichten langzaam uit.

Om een kleine hoeveelheid ruimte rondom de tracking area over te houden heb ik een constante factor van 1.1 op de bewegingssnelheid toegepast daar dit klein genoeg is om onmerkbaar te zijn[16]. Wegens de manier waarop dit systeem werkt is het onmogelijk om een grondplan te tekenen dat overeen komt met de realiteit, in figuur 3.3 is te zien wat het beoogde mentale vloerplan is van de proefpersonen.



Figuur 3.3: Mentaal grondplan van de virtuele omgeving.

3.2 Implementatie

3.2.1 Engine

Voor de implementatie van de virtuele omgeving heb ik er voor gekozen om met de Unity engine te werken. Ik heb deze keuze gemaakt omdat de Unity engine relatief eenvoudig is om mee te werken en mij meer tijd over laat om te werken aan de benodigde algoritmen. Voor het ontwerp van de omgeving heb ik gebruik gemaakt van de Blender 3D editor, wegens eerdere ervaring met deze editor.

Ik beschrijf nu even kort de belangrijke details van mijn implementatie.

Systeem state

Voor de state van het systeem maak ik gebruik van stappen, er is op elk moment slechts een object dat reageert op interactie. Wegens de volledig lineaire aard van het systeem, en de relatief kleine hoeveelheid stappen is dit op de meest voor de hand liggende methode opgelost: Met een switch statement die de correcte animaties dispatcht. Met wat onnodige details weggelaten ziet dit er zo uit:

```
1 // ...
2 private int _ctr = 1;
3 // ...
4
```

```

5 void Update() {
6     // Decrement the delay between actions
7     _timeout -= Time.deltaTime;
8
9     // Check if a transition is requested,
10    // and that it is allowed by position, view and timeout
11    if((Input.GetButtonDown("Activate")) &&
12        _timeout <= 0f &&
13        CanTriggerNextStep()) {
14        // Reset the timeout
15        _timeout = 1.5f;
16
17        // Make the animation happen based on the active step
18        switch(_ctr) {
19            case 1: // Clicking button in room 1
20                StartCoroutine(MoveHallway(0f, 0f, 1.6f));
21                StartCoroutine(DescendBlinds());
22                StartCoroutine(DepressButton());
23                break;
24            case 2: // Closing door of room 1
25                StartCoroutine(RotateDoor(Door1));
26                StartCoroutine(RespawnRoom(0.6f));
27                StartCoroutine(RotateDoor(Door2, 0.6f, false));
28                break;
29            case 3: // Clicking button in room 2
30                StartCoroutine(MoveHallway(0f, 0f, 1.6f));
31                StartCoroutine(DescendBlinds());
32                StartCoroutine(DepressButton());
33                break;
34            case 4: // Closing door of room 2
35                StartCoroutine(RotateDoor(Door2));
36                StartCoroutine(RespawnRoom(0.6f));
37                StartCoroutine(RotateDoor(Door3, 0.6f, false));
38                break;
39            case 5: // Clicking button in room 3
40                StartCoroutine(MoveHallway(0f, 0f, 1.6f));
41                StartCoroutine(DescendBlinds());
42                StartCoroutine(DepressButton());
43                break;
44            case 6: // Closing door of room 3

```

```

45         StartCoroutine(RotateDoor(Door3));
46         StartCoroutine(RespawnRoom(0.6f, 0f, -1f, 0f, -1.6f));
47         StartCoroutine(RotateDoor(Door4, 0.6f, false));
48         break;
49     }
50
51     // Increment the "step" of the process
52     ++_ctr;
53 }
54 }
```

Interactie

Bij de activatie van deuren en knoppen wordt er eerst gekeken of de proefpersoon zich op minder dan een meter afstand van het object bevindt, en of hij het object in beeld heeft. Als aan beide voorwaarden voldaan wordt de animatie geactiveerd.

Voor beide delen van deze check maak ik gebruik van de ingebouwde functionaliteit van Unity. Lichtjes ingekort, ziet de code er zo uit:

```

1 bool CanTriggerNextStep(Transform object) {
2     return InView(object) && Distance(object) <= 1f;
3 }
4
5 // Returns the distance on the XZ plane of our position to a point
6 float Distance(Vector3 pos) {
7     Vector2 v1 = new Vector2(tracker.GetX(), tracker.GetY());
8     Vector2 v2 = new Vector2(pos.x, pos.z);
9     Debug.Log(Vector2.Distance(v1, v2));
10    return Vector2.Distance(v1, v2);
11 }
12
13 // Is Vector3 in view
14 bool InView(Vector3 v) {
15     v.y = Camera.main.transform.position.y;
16     Vector3 vis = Camera.main.WorldToViewportPoint(v);
17     if((vis.x < 0 || vis.x > 1) || vis.z <= 0) {
18         return false;
```

```
19     }
20     return true;
21 }
```

Animatie

Voor de animaties maak ik gebruik van sferische lineaire interpolatie tussen de begin- en de eindpositie van de te animeren objecten.

Sferische lineaire interpolatie wordt standaard door Unity meegeleverd. Volgende stukjes code tonen de implementatie van respectievelijk het laten dalen van de blinden, het indrukken van de knoppen, en het sluiten van de deuren.

```
1 // Play the animation for closing the blinds
2 IEnumerator DescendBlinds(float delay = 0f) {
3     yield return new WaitForSeconds(delay);
4     Vector3 begin = _blinds.transform.position;
5     Vector3 end = begin - new Vector3(0f, 0.995f, 0f);
6
7     for(float i = 0f; i < 1.5f; i += Time.deltaTime) {
8         _blinds.transform.position = Vector3.Slerp(begin, end,
9                 i / 1.5f);
10        yield return true;
11    }
12
13    _blinds.transform.position = end;
14    yield return true;
15 }
16
17 // Play the animation for pressing the button
18 IEnumerator DepressButton(float delay = 0f,
19     bool isRotated = false) {
20     yield return new WaitForSeconds(delay);
21     Vector3 begin = _button.transform.position;
22     Vector3 end = begin + (isRotated ? new Vector3(0.03f, 0f, 0f) :
23             new Vector3(0f, 0f, -0.03f));
24
25     for(float i = 0f; i < 0.25f; i += Time.deltaTime) {
26         _button.transform.position = Vector3.Slerp(begin, end,
```

```

27             i / 0.25f);
28         yield return true;
29     }
30
31     _button.transform.position = end;
32     yield return true;
33 }
34
35 // Open or close a door, meaning a 90 degree rotation in a
36 // certain direction
37 IEnumerator RotateDoor(GameObject door, float delay = 0f,
38     bool close = true) {
39     yield return new WaitForSeconds(delay);
40
41     float angle = door.transform.rotation.eulerAngles.y;
42     float goal = close ? angle - 90 : angle + 90;
43     Quaternion end = Quaternion.AngleAxis(goal, Vector3.up);
44     Quaternion begin = door.transform.rotation;
45
46     for(float i = 0f; i < 0.5f; i += Time.deltaTime) {
47         door.transform.rotation = Quaternion.Slerp(begin, end,
48             i / 0.5f);
49         yield return true;
50     }
51
52     door.transform.rotation = end;
53     yield return true;
54 }
```

Voor de “animatie” van de beweging van de gang wordt er helemaal geen animatie gedaan, omdat deze niet in het zicht van de proefpersoon is. Daar de deuren in het object van de gang verwerkt zitten, is deze beweging de effectieve implementatie van change blindness in deze virtuele omgeving.

```

1 // Move the hallway 1.6m back.
2 IEnumerator MoveHallway(float x, float y, float z,
3     float delay = 0) {
4     yield return new WaitForSeconds(delay);
5     Hallway.transform.Translate(x, y, z);
6     yield return true;
```

7 }

3.2.2 Tracking

Voor integratie met het trackingsysteem heb ik gebruik gemaakt van de gratis editie van de MiddleVR middleware[20]. Deze maakt het mogelijk om via het VRPN protocol te communiceren met de tracking server.

MiddleVR geeft ook toegang tot “virtual trackers” waarmee men de data van een tracker kan transformeren. Het resultaat hiervan is dat ik de pitch en de roll van de HMD heb kunnen gebruiken, en de yaw van het camera tracking systeem. Dit omdat de HMD een kleine hoeveelheid “yaw drift” heeft, en dit zou kunnen zorgen voor botsingen met de fysieke omgeving.

Ik heb dit systeem ook gebruikt om de trillingen in de gerapporteerde yaw van het trackingsysteem te verminderen door een gemiddelde van twee metingen te gebruiken. Daar de *framerate* van het systeem voldoende is, heeft dit bijna geen effect op de latency van de bewegingen (effectief een latency van 16 ms bij een framerate van 60 Hz). In de praktijk werkt dit door te werken met het gemiddelde van de vorige meting en de nieuwe meting in plaats van met de rauwe meting.

```
1 private float getModifiedYaw() {
2     // Get yaw from optitrack tracker.
3     float a = optiTrack.GetYaw() - yawZeroOpti;
4     a = normAngle(a);
5
6     // If not first frame, take avg of last 2 measurements.
7     if(!firstFrame) {
8         if(Mathf.Abs(a - prevYaw) > 180.0f) {
9             if(a > prevYaw) {
10                 prevYaw += 360.0f;
11             } else {
12                 a += 360.0f;
13             }
14         }
15         a = (a + prevYaw) / 2.0f;
16     }
17     a = normAngle(a);
18     prevYaw = a;
19 }
```

```

20     return a - 180.0f;
21 }
22
23 private float normAngle(float a) {
24     while(a < 0) {
25         a += 360;
26     }
27
28     while(a >= 360) {
29         a -= 360;
30     }
31
32     return a;
33 }
```

Ik heb hier uitdrukkelijk geen gebruik gemaakt van een Kalman filter wegens de precisie van het OptiTrack systeem tot op minder dan een millimeter. Hierdoor is mijn techniek ruim voldoende om de zeer kleine hoeveelheid jitter op te vangen.

Aan de serverkant heb ik gebruik gemaakt van de OptiTrack:Motive software om de VRPN data te broadcasten.

3.2.3 Hardware

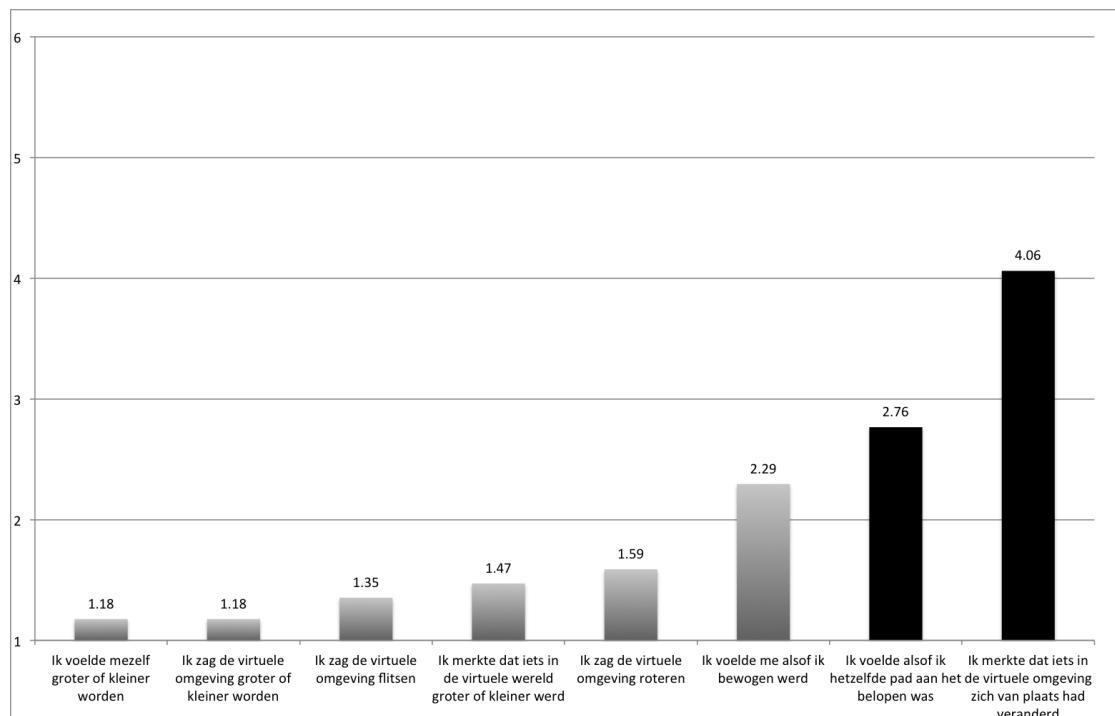
Om een vloeiende werking te verzekeren werd de virtuele omgeving gedraaid op een Apple MacBook Pro met een 2,5 GHz Intel Core i5 processor, 8 GB 1333 MHz DDR3 RAM geheugen en een Intel HD Graphics 4000 GPU. Het beeld werd getoond op een Oculus Rift (Devkit 1) aan 60 fps voor beide ogen. Deze HMD heeft een diagonale FoV van 110° en vult hierdoor bijna het hele zicht van de proefpersonen voor een maximale immersie.

Tracking van positie en rotatie in 3 assen werd gedaan door een 6 camera OptiTrack systeem rondom een 3 m x 4 m omgeving. Om gebruikersinvoer te voorzien heb ik gewoon een bluetooth muis gebruikt, zodat de proefpersoon op eender welke knop kon klikken om het object voor hem te activeren.

Hoofdstuk 4

Resultaten

De geleverde grondplannen kwamen over het algemeen overeen met de realiteit, de enige uitzondering hier op was het grondplan van proefpersoon 17, zijn kaart was gespiegeld over de as die met de gang mee loopt.



Figuur 4.1: Grafiek van de gemiddelde scores van de stellingen, de zwarte kolommen zijn de ware stellingen.

Scores voor de afleidingsstellingen variëren tussen 1.18 en 2.29, de hoge score van “Ik voelde me alsof ik bewogen werd” valt hier op. Vermoedelijk werd die vraag door sommigen verkeerd geïnterpreteerd. Zowel “Ik voelde alsof ik hetzelfde pad aan het belopen was” (\bar{x} : 2.76) als “Ik merkte dat iets in de omgeving zich van plaats had veranderd” (\bar{x} : 4.06) behaalden zeer hoge gemiddelde scores. Dit duidt aan dat de verplaatsing van de deur eerder wel merkbaar was, maar dat de aard van het pad door de fysieke omgeving niet zeer merkbaar was.

De antwoorden op de vraag waar gevraagd werd het bewogen object te identificeren duiden aan dat 53% van de testgroep de verplaatsing van de deuren niet merkte. Indien ik de scores van de personen die het bewegen van de deur niet correct konden identificeren negeer, verlaagt het gemiddelde van de stelling “Ik merkte dat iets in de omgeving zich van plaats had veranderd” naar \bar{x} : 3.18. Deze waarde zou aanduiden dat het verplaatsen eerder niet merkbaar was.

Verder wil ik opmerken dat geen enkele proefpersoon een opmerking heeft gemaakt over de snelheidsschalering van 110%. Hier werd echter niet voor getest, want ik ben er van uit gegaan dat deze waarde onmerkbaar is wegens de resultaten van Steinicke et. al., 2009 [16].

4.1 Bespreking feedback

Een van de vragen op de vragenlijst vroeg of er iets was dat de immersie breekt. Er werd hier feedback gegeven op diverse problemen:

- Fysieke problemen zoals de grootte van de Oculus Rift, het storen van de kabels, en raketings tegen het doek lopen.
- Technische problemen zoals het ontbreken van een realistisch input device en de resolutie van de Oculus Rift.

Als laatste heb ik ook feedback gekregen dat er kleine haperingen in de tracking waren, helaas zijn deze kleine haperingen veroorzaakt door een onvoldoende aantal cameras en kon ik hier niets aan doen. Wegens een kleine hoeveelheid netwerklatency zat er ook een beetje lag op de reactiesnelheid van het systeem. Een van de proefpersonen was ook te groot voor de tracking setup en moest een beetje gebukt door de omgeving lopen. Enkele van de proefpersonen die de verplaatsing van de deur merkten noteerden dit ook als immersiebrekend.

Hoofdstuk 5

Besluit en verder onderzoek

In dit proefschrift heb ik een onderzoek naar de effectiviteit van change blindness beschreven, een techniek om door een grote virtuele omgeving te wandelen in een veel kleinere fysieke omgeving. En de invloed van taken op deze effectiviteit. De resultaten van dit onderzoek duiden er op dat mijn implementatie op ongeveer de helft van mijn testgroep werkte. Maar dat de het toch eerder niet merkbaar was dat de proefpersoon in cirkels was aan het lopen.

5.1 Verder onderzoek

Daar de effectiviteit van deze implementatie een beetje aan de lage kant is, is het in eerste instantie een goed idee om het experiment nog eens uit te voeren om te kijken of het hier gaat om een probleem met mijn implementatie of een andere factor. Verder is het mogelijk om een vergelijkende studie te doen over het effect van taken, met verschillende taken die bijvoorbeeld actief (indrucken van een knop) of passief (onthouden van een foto) uitgevoerd moeten worden.

Verder zou het mogelijk zijn om change blindness met andere technieken te combineren zoals rotationele en dynamische translationele vervorming zoals besproken in de literatuurstudie. Indien alle beschikbare technieken worden gecombineerd zou het zelfs mogelijk kunnen zijn een algemeen toepasbare redirectietechniek te ontwikkelen die met elke arbitraire virtuele omgeving en fysieke ruimte werkt.

5.2 Discussie

Het is opvallend dat mijn implementatie vergeleken met eerder onderzoek zoals dat van Evan A. Suma [18] minder effectief lijkt. Ik kan enkel vermoedens voorleggen betreffende de oorzaak hiervan. Ik vermoed dat het komt wegens een defect in mijn opstelling zoals een gebrek aan camera's waardoor er blinde "spots" zijn in de tracking area die de immersie breken. Het zou ook kunnen komen door een immersieprobleem zoals de laptop die door de uitvoerder van het experiment moet rondgedragen worden, misschien zou het toevoegen van een rugzak met alle apparatuur er in het in dit opzicht verbeteren. Het zou ook kunnen dat mijn veranderingen te extreem zijn vergeleken met het eerder uitgevoerde onderzoek van Evan A. Suma [18]. In dat onderzoek werd enkel de oriëntatie van de deur in de hoek van de kamer veranderd, terwijl ik deze over de volledig lengte van een muur verschuif.

Bijlage A

Meetings

A.1 Meeting 1: 2014-01-31

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

In deze eerste meeting hebben we besproken hoe de bachelorproef van start zal gaan.

Er werd afgesproken dat ik een literatuurstudie zal doen van een aantal geleverde papers met verder nog enkele zelf opgezochte papers, dit om een onderwerp te vinden om de bestaande research verder te zetten.

Ik zal deze literatuurstudie bij de volgende meeting voorleggen.

A.2 Meeting 2: 2014-02-13

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

Er werd in deze meeting kort overlopen wat er verbeterd moest worden aan de al geleverde literatuurstudie. Ik zal deze herschrijven met minder lange zinnen en een betere verdeling van paragrafen. Ook zal ik meer aandacht besteden aan het deel over afleiders voor reoriëntatietechnieken.

Voor het concrete onderwerp van de bachelorproef heb ik een onderzoek naar de effectiviteit van taakgebonden afleiders in reoriëntatie en veranderingsblindheid voorgesteld. Concreet zou dit een gang in een kantoorgebouw zijn met als taak de

blinden in elk kantoor te sluiten (waarna de deur van locatie wisselt) en bij het buiten komen de deur te sluiten (hier gebeurt dan reoriëntatie).

Concreet zal ik nu eerst de komende weken Unity leren en een ruwe versie van dit scenario uitwerken. Deze eerste versie zal bestuurd worden met toetsenbord en de pitch/yaw/roll van de oculus rift.

A.3 Meeting 3: 2014-02-28

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

Er werd in deze meeting kort besproken wat het geleverde werk tot dit punt is. Met name, ik heb de omgeving klaar met uitzondering van kamervulling en ik heb een implementatie van de testen voor change blindness.

Ik heb ook enkele ideeën getoond van hoe ik de overblijvende problemen wil oplossen. Ik wilde het probleem van hoogfrequent ruis oplossen met een gewogen gemiddelde van de twee sensors, maar er werd me ook aangeraden om dit op te lossen met een andere sensor fusion methode. Ten laatste hebben we ook een beetje zitten na te denken over een goed systeem voor collisions in de virtuele omgeving, ik heb gezegd dit voorlopig te willen negeren en als laatste stap te houden.

Steven zal nu het trackinglokaal voor me boeken en me iets laten weten wanneer dit beschikbaar is. Tot dat lokaal beschikbaar is zal ik verderwerken aan de kamervulling en de literatuurstudie.

A.4 Meeting 4: 2014-03-12

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

Ik heb vandaag kort de voortgang in de aankleding van het kantoor getoond. Er werd hier opgemerkt dat ik best enkele verschillende prefabs zou kunnen maken voor de kamers voor variëteit.

Achteraf zijn we de trackingruimte gaan bekijken om te bespreken hoe en wanneer ik daar het best zou kunnen werken rond de basisintegratie van het optitrack systeem in mijn virtuele omgeving. Ik heb gezegd vanaf maandag middag daar te beginnen met het werk aan de integratie.

Ik heb afgesproken zelf contact te nemen om een afspraak te regelen als de integratie compleet is. Dit houdt in dat ik een werkende kalibratie en mapping heb

tussen het systeem en mijn virtuele omgeving. Daarna zal ik beginnen met sensor fusion tussen mijn Oculus Rift en het Optitrack systeem.

A.5 Meeting 5: 2014-06-13

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

Er werd in deze meeting de draft van mijn thesis besproken. Wegens de grote hoeveelheid resterend werk, werd er overeen gekomen dat ik mijn verdediging op de tweede zit zou doen.

Er werd afgesproken dat ik een tweede draft zou insturen in de loop van Juli, ik heb later laten weten dat ik deze rond de 21ste zou insturen.

Bijlage B

Vragenlijst

Vragenlijst

Leeftijd: _____ Geslacht: _____

Heeft u veel, weinig of geen ervaring in 3d spellen? _____

Teken hier onder een schets van het grondplan van de virtuele omgeving zoals u die hebt ervaren.
Duid ook het door u genomen pad aan.

In elk van de kantoren hing er een fotokader boven de knop, wat stond er op deze foto?

Kantoor 1: _____

Kantoor 2: _____

Kantoor 3: _____

Merkte u in het experiment iets raar of onnatuurlijk in de virtuele omgeving? Geef de volgende stellingen een score toe te kennen van 1 (merkte ik niet) tot 6 (was zeer duidelijk). Merk op dat niet al deze stellingen waar zijn.

1. Ik zag de virtuele omgeving groter of kleiner worden. _____
 2. Ik voelde alsof ik hetzelfde pad aan het belopen was. _____
 3. Ik zag de virtuele omgeving flitsen. _____
 4. Ik merkte dat iets in de virtuele omgeving zich van plaats had veranderd. _____
 5. Ik zag de virtuele omgeving roteren. _____
 6. Ik voelde mezelf groter of kleiner worden. _____
 7. Ik voelde me alsof ik bewogen werd. _____
 8. Ik merkte dat iets in de virtuele wereld groter of kleiner werd. _____

Waren er aspecten die wegnamen aan de immersie in de virtuele omgeving? Zo ja, welke?

In elk kantoor werden er bepaalde objecten van plaats veranderd. Indien mogelijke, gelieve te identificeren welke objecten dit waren, en hoe ze van plaats veranderden. _____

Bibliografie

- [1] Kevin Wayne Arthur: *Effects of field of view on performance with head-mounted displays.* proefschrift, University of North Carolina, 2000.
- [2] Tom Banton, Jeanine Stefanucci, Frank Durgin, Adam Fass, en Dennis Pr-offitt: *The perception of walking speed in a virtual environment.* Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 14(4):394–406, 2005.
- [3] Alain Berthoz: *The brain’s sense of movement.* Harvard University Press, 2002.
- [4] Johannes Dichgans en Thomas Brandt: *Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control.* In *Perception*, pagina’s 755–804. Springer, 1978.
- [5] David Engel, Cristóbal Curio, Lili Tcheang, Betty Mohler, en Heinrich H Bülthoff: *A psychophysically calibrated controller for navigating through large environments in a limited free-walking space.* In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pagina’s 157–164. ACM, 2008.
- [6] Harald Frenz, Markus Lappe, Marina Kolesnik, en Thomas Bührmann: *Estimation of travel distance from visual motion in virtual environments.* ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 4(1):3, 2007.
- [7] James R Lackner: *Induction of illusory self-rotation and nystagmus by a rotating sound-field.* Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1977.
- [8] Jack Loomis en Joshua Knapp: *Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments.* 2003.
- [9] Betty J Mohler, Jennifer L Campos, M Weyel, en Heinrich H Bülthoff: *Gait parameters while walking in a head-mounted display virtual environment and the real world.* In *Proceedings of the 13th Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pagina’s 85–88, 2007.

- [10] Christian T Neth, Jan L Souman, David Engel, Uwe Kloos, Heinrich H Bült-hoff, en Betty J Mohler: *Velocity-dependent dynamic curvature gain for redirected walking*. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 18(7):1041–1052, 2012.
- [11] Tabitha C Peck, Henry Fuchs, en Mary C Whitton: *Evaluation of reorientation techniques and distractors for walking in large virtual environments*. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 15(3):383–394, 2009.
- [12] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, en Mary C Whitton: *Redirected walking*. In *Proceedings of EUROGRAPHICS*, volume 9, pagina's 105–106. Citeseer, 2001.
- [13] Ronald A Rensink, J Kevin O'Regan, en James J Clark: *To see or not to see: The need for attention to perceive changes in scenes*. Psychological science, 8(5):368–373, 1997.
- [14] Daniel J Simons en Daniel T Levin: *Failure to detect changes to people during a real-world interaction*. Psychonomic Bulletin & Review, 5(4):644–649, 1998.
- [15] Daniel J Simons en Ronald A Rensink: *Change blindness: Past, present, and future*. Trends in cognitive sciences, 9(1):16–20, 2005.
- [16] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Klaus Hinrichs, Jason Jerald, Harald Frenz, Markus Lappe, Jens Herder, Simon Richir, en Indira Thouvenin: *Real walking through virtual environments by redirection techniques*. Journal of Virtual Reality and Broadcasting, 6(2), 2009.
- [17] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, en Markus Lappe: *Analyses of human sensitivity to redirected walking*. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pagina's 149–156. ACM, 2008.
- [18] Evan A Suma, Seth Clark, D Krum, S Finkelstein, M Bolas, en Z Warte: *Leveraging change blindness for redirection in virtual environments*. In *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, pagina's 159–166. IEEE, 2011.
- [19] Martin Usoh, Kevin Arthur, Mary C Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater, en Frederick P Brooks Jr: *Walking, walking-in-place, flying, in virtual environments*. In *Siggraph*, volume 99, pagina's 359–364, 1999.
- [20] I'm in VR: *MiddleVR*. <http://www.imin-vr.com/middlevr/>.