

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	4
1.2.1 Rotationele vervorming	5
1.2.2 Translationele vervorming	7
1.2.3 Change blindness	8
1.2.4 Afleiders	10
1.3 Reoriëntatietechnieken	11
1.3.1 Verbale commandos	11
1.3.2 Visuele commandos	12
1.4 Immersie	12
1.5 Conclusie	13
2 Pilot Study	15
2.1 Virtuele Omgeving	15
2.2 Pilot study	17
3 Immersief Onderzoek	20
3.1 Opstelling	20
3.2 Beschrijving	21
3.3 Vragenlijst	22
3.4 Implementatie	23
3.4.1 Engine	23
3.4.2 Tracking	24
4 Resultaten	26
4.1 Besprekking feedback	27
4.2 conclusie	28
5 Besluit en verder onderzoek	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
A.6 Meeting 6: 2014-08-08	32
A.7 Meeting 7: 2014-08-27	32
B Vragenlijst	33
Bibliografie	37

Hoofdstuk 1

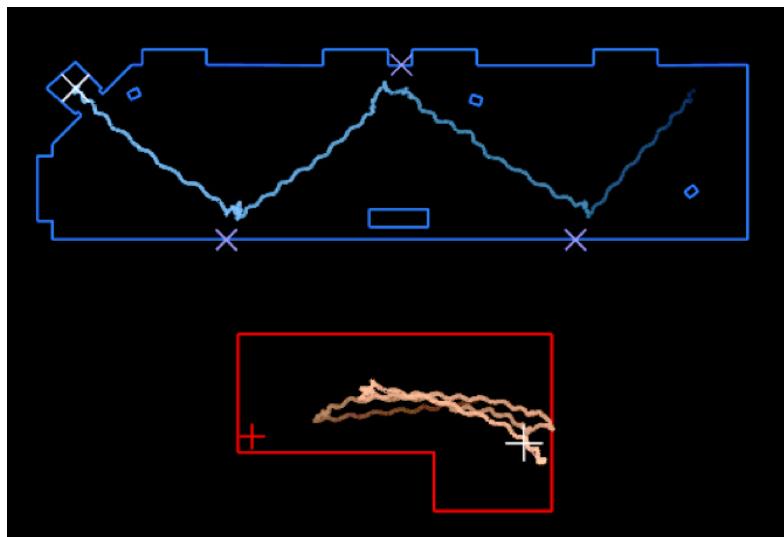
Literatuurstudie

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. Dit heel proces wordt mogelijk gemaakt door een tracking systeem om een koppeling tussen de fysieke locatie van de proefpersoon en de locatie van zijn avatar in de virtuele omgeving mogelijk te maken.

1.2 Redirectietechnieken

Om fysieke bewegingen door een virtuele omgeving mogelijk te maken wordt er gebruik gemaakt van tracking systemen. Dit zijn systemen die bijvoorbeeld camera's gebruiken om een koppeling te creëren tussen de fysieke locatie van een proefpersoon en de positie van zijn avatar in de virtuele omgeving. Omdat deze trackingsystemen een tracking gebied hebben, het gebied waarbinnen ze de locatie van de persoon kunnen waarnemen, is het nodig om technieken toe te passen die de proefpersoon er van weerhouden dit gebied te verlaten.



Figuur 1.1: Vergelijking van de beweging van de proefpersoon in de virtuele omgeving (bovenenaan) en de overeenkomstige beweging in de fysieke omgeving (onderaan).[11]

Redirectietechnieken 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 bespreek hier enkele technieken: Het vervormen van buigingen en rotaties (Paragraaf 1.2.1), het vervormen van de lineaire snelheid van de proefpersoon (Paragraaf 1.2.2), afleiders om een route door de virtuele omgeving te forceren (Paragraaf 1.2.4) en verandering in de virtuele omgeving om een route in de fysieke omgeving te forceren (Paragraaf 1.2.3).

1.2.1 Rotationele vervorming

Bij rotationele vervorming worden de rotaties van de proefpersoon in de virtuele omgeving vergroot of verkleind ten opzichte van de rotaties van de proefpersoon 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.

Deze techniek is al in diverse papers onderzocht:

In een onderzoek gevoerd door Razzaque et. al., 2001 [11] 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, dit deed men door de camera in de virtuele omgeving automatisch zeer traag in de omgekeerde richting van waar men de proefpersoon in de fysieke omgeving heen wilde naar laten kijken te laten draaien. Het bleek dat de proefpersoon hierdoor automatisch in die richting ging draaien om het beeld stil te houden. Omdat dit een zeer kleine (de precisie hoeveelheid werd niet gegeven) vervorming was, merkte de proefpersoon deze niet. 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. Deze vervorming kan, in tegenstelling tot de drift, enkel toegepast worden als de proefpersoon in beweging is.

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.

Om deze vereiste van een statisch pad te ontwijken werd er in In Engel et. al., 2008 [5] een techniek voorgesteld om deze rotationele vervorming dynamisch te bepalen, dus de rotatie werd niet meer vervormd om een statisch pad te volgen, maar om ten alle tijde in het tracking gebied te blijven. 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. Dit onderzoek verzwakte de limitering van een volledig statisch pad, naar een dynamisch pad in een gekende omgeving met voldoende bochten.

Om deze techniek nog verder toepasbaar te maken, werd er in een ander onderzoek in Neth et. al., 2012 [9] verder onderzocht wat de precieze relatie tussen bewegingssnelheid en maximaal acceptabele rotationele vervorming is. Uit dit on-

derzoek bleek dat tragere snelheden grotere vervormingen toelaten, maar dat deze relatie niet lineair is, de relatie is exponentieel. Dit kan toegepast worden om de hoeveelheid geforceerde correcties (zie Paragraaf 1.3) die vereist zijn bij een willekeurige virtuele omgeving te verminderen.

In een tweede experiment uit hetzelfde onderzoek [9] werd onderzocht of deze bevindingen effectief konden gebruikt worden om 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 [11] 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 geheroriënteerd 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 (de hoeveelheid vervorming is afhankelijk van de wandelsnelheid) versus de mediaan gewandelde afstand bij statische vervorming (de hoeveelheid vervorming wordt niet aangepast aan de wandelsnelheid).

In deze studies werd enkel gekeken naar rotationele vervorming in beweging, dus over curves. Het is echter ook mogelijk om rotationele vervorming in stilstand te hebben. In Steinicke et. al., 2009 [15] werd bepaald dat in dit specifieke geval compressies tot 77% acceptabel zijn voordat de proefpersoon het merkt.

Uit al deze onderzoeken blijkt dat er een trade-off is tussen een virtuele omgeving met een ongekend pad[9] versus een betere immersie wegens minder onderbrekingen wegens geforceerde redirectie[5, 11].

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 [15] 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 zonder in te grijpen in de 3d scene. Ze 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

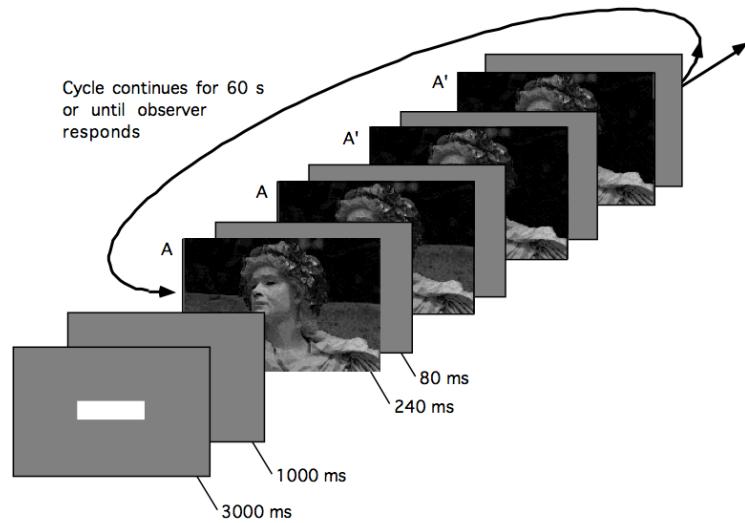
In de vorige technieken werd er enkel ingegrepen in de route door de virtuele omgeving door de route door de fysieke omgeving te ontkoppelen van de route door de virtuele omgeving. Het is echter ook mogelijk om in de route door de fysieke omgeving in te grijpen door de 3d scene van de virtuele omgeving aan te passen.

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 [14] 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[13], of wordt het verschil tussen twee foto's die om de beurt worden getoond (zie Figuur 1.2) pas na een zeer lange tijd opgemerkt[12].

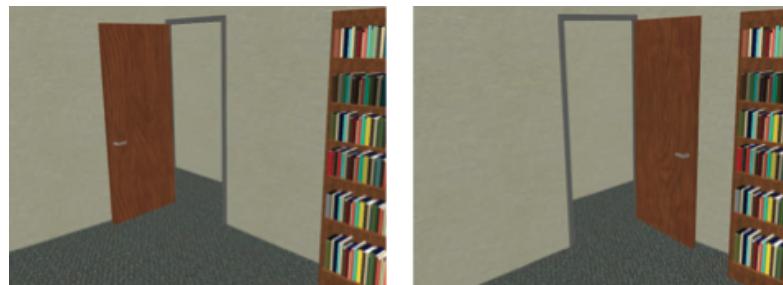
Omdat dit zo een krachtig fenomeen is, wordt het ook toegepast in redirected walking. Waar de vorige technieken het fysieke en het virtuele pad van de proefpersoon ontknoppelden probeert deze techniek de proefpersoon te misleiden. Om er voor te zorgen dat hij in de tracking ruimte blijft, wordt de layout van de virtuele omgeving strategisch aangepast, bijvoorbeeld door een deur van plaats te laten wisselen zoals in Figuur 1.3.

Zo werd er bijvoorbeeld in Suma et. al., 2011 [17] 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 alle 16 kamers in het kantoor. De ingrijping in de omgeving gebeurde hier terwijl de proefpersoon het scherm uitzette, en met zijn rug naar de deur stond. De deur veranderde 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 1.4.

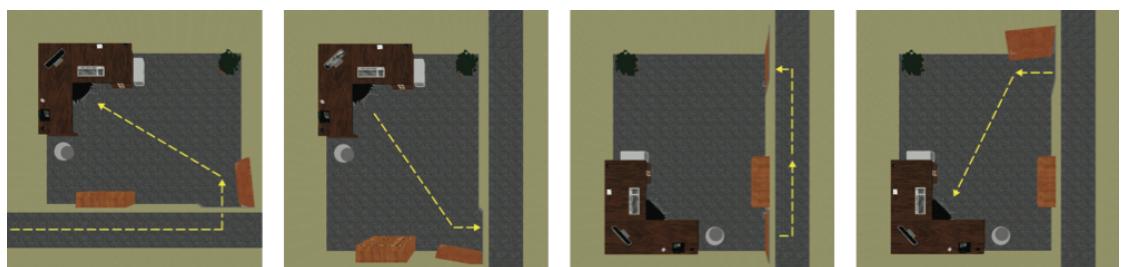
Door de veranderingen van de fysieke omgeving op deze manier te laten gebeu-



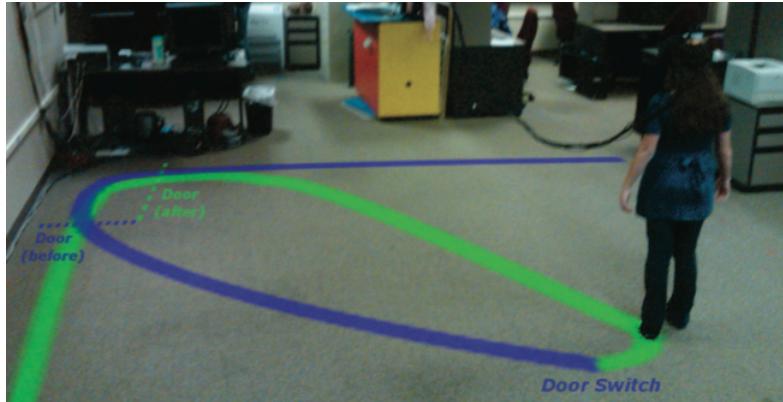
Figuur 1.2: Werkwijze voor het weergeven van 2 verschillende afbeeldingen, om te kijken hoe snel mensen dit merken.[12]



Figuur 1.3: Voorbeeld van een verandering in een virtuele omgeving, de deur werd hier van plaats veranderd terwijl de proefpersoon er niet naar aan het kijken was.[17]



Figuur 1.4: Verandering van de positie van de deur in het onderzoek van Suma et. al., 2011 [17].



Figuur 1.5: Voorbeeld van het pad in de fysieke omgeving wegens de verandering in de virtuele omgeving, dit is het pad dat veroorzaakt werd door de verandering in Figuur 1.4.[17]

ren werd de proefpersoon geforceerd cirkels rond de tracking area te wandelen, in Figuur 1.5 is een illustratie van het pad door de fysieke omgeving te zien, overeenkomstig met het pad door een kamer in de virtuele omgeving.

Na de uitvoering van het experiment werd er een vragenlijst afgenomen, er 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.

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 [9] werd er bijvoorbeeld gebruik gemaakt van andere virtuele avatars zoals in Figuur 1.6. Er werd gebruik gemaakt van avatars die recht voor de proefpersoon gingen stilstaan om hem 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 [10] 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



Figuur 1.6: Voorbeeld van het toevoegen van avatars in een virtuele omgeving, met als doel de proefpersoon te laten vertragen of zijn pad af te buigen.[9]

gedraaid. Hieruit bleek dat proefpersonen minder het gevoel hadden dat de wereld versneld draaide met een afleiding dan bij andere technieken.

1.3 Reoriëntatietechnieken

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 moet de gebruiker op een minder subtile manier duidelijk gemaakt worden dat hij moet omkeren. Er wordt dan gebruik gemaakt van “reoriëntatietechnieken”. Dit zijn directe commando’s aan de proefpersoon om van koers te veranderen, en vallen daarom ook behoorlijk op. In de volgende secties bespreek ik twee reoriëntatietechnieken: Het gebruik van verbale commando’s (Paragraaf 1.3.1) en het gebruik van visuele commando’s (Paragraaf 1.3.2).

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 [11] 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 [10] 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 [9] 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

Het is bij het wandelen door een virtuele omgeving belangrijk dat de gebruiker zich voelt alsof hij echt in de virtuele omgeving is. Dit algemene gevoel wordt immersie genoemd. Ik bespreek hier de invloed van de diverse zintuigen op immersie.

Visie is voor redirected walking het belangrijkst. Dit komt omdat bij conflicten tussen het proprioceptieve systeem (Het zintuig dat de relatieve afstand tussen lichaamsdelen waarneemt), het vestibulaire systeem (Het zintuig verantwoordelijk voor ons evenwichtsgevoel) systeem en visie, visie vaak dit conflict wint[3, 4, 16]. Om immersie visueel te verkrijgen moet er gebruik gemaakt worden van head-mounted displays.

Ook al is visie het belangrijkste 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[18]. In Engel et. al., 2008[5] wordt ook opgemerkt dat de hoeveelheid omgevingslicht



Figuur 1.7: Voorbeeld van een proxy-object en het overeenkomstige beeld dat de proefpersoon ziet.[15]

en omgevingsgeluid dat binnensijpelt een merkbare negatieve invloed heeft op de effectiviteit van redirectietechnieken.

Het is ook mogelijk om de immersie te verhogen met haptische feedback. Dit wordt gedaan met proxy-objecten in de fysieke omgeving die overeen komen met objecten in de virtuele omgeving[15] zoals te zien is in Figuur 1.7.

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 het optreden van simulatieziekte[1] maar verhoogt de performantie en immersie drastisch[1].

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.

1.5 Conclusie

Bij redirected walking is er een trade-off tussen dynamische en statische paden. Bij dynamische paden is de immersie in de omgeving zeer hoog daar de gebruiker niet geforceerd is een pad te volgen, maar aan de andere kant wordt de immersie vaak gebroken omdat het systeem gedwongen is de gebruiker te laten omkeren. Aan de andere kant hebben statische paden weinig risico dat de gebruiker het tracking gebied verlaat, maar wordt de gebruiker zijn immersie verminderd omdat

hij geforceerd een pad door de virtuele omgeving kan volgen.

Ergens in het midden van deze trade-off ligt change blindness. Het pad is statisch, want er wordt verwacht dat de gebruiker de kamers op een bepaalde volgorde doorloopt. Maar in de kamers zelf maakt het gekozen pad niet uit, want de virtuele omgeving is zo gemanipuleerd dat de gebruiker het tracking gebied niet zomaar kan verlaten. Maar change blindness vereist op zich dat de virtuele omgeving zeer specifiek met het tracking gebied in gedachte moet opgebouwd worden.

Juist omdat change blindness in het midden van deze trade-off ligt heb ik ervoor gekozen om dit verder te onderzoeken. Beide extremen brengen veel problemen met zich mee, en hoewel change blindness een zeer specifieke virtuele omgeving vereist denk ik dat hier toch heel veel mee gedaan kan worden.

Voor deze bachelorproef zal ik een experiment uitvoeren om te kijken hoe merkbaar change blindness met afleiders en taken is in een virtuele omgeving.

Hoofdstuk 2

Pilot Study

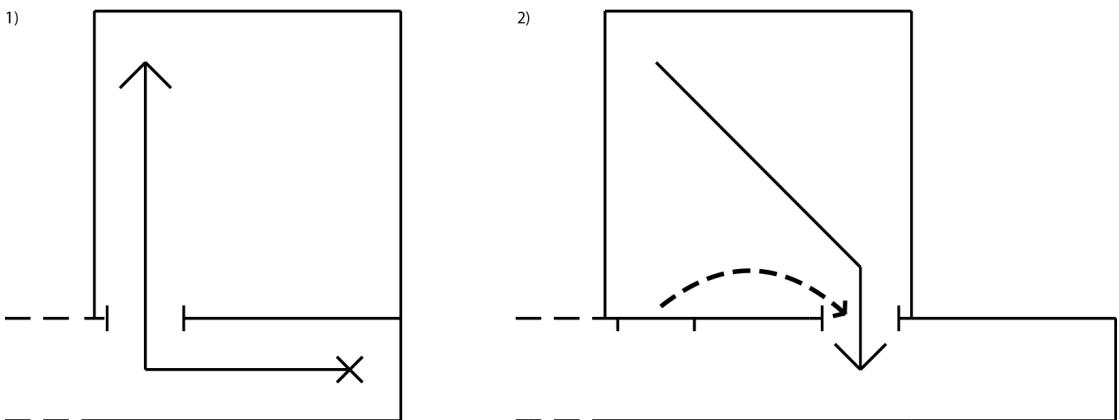
Om de haalbaarheid van mijn onderzoek na te gaan, heb ik eerst een pilot study gedaan. Ik heb hiervoor de virtuele omgeving ontworpen, en dan enkele proefpersonen gevraagd deze met toetsenbord en muis te doorlopen.

2.1 Virtuele Omgeving

Voor dit onderzoek heb ik een virtuele omgeving ontworpen met meer dan $48m^2$ aan bewandelbare ruimte, de proefpersoon kan deze omgeving volledig verkennen en toch in een $12m^2$ 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 $3m \times 3m$ te zijn.



Figuur 2.1: De drie kantoren.

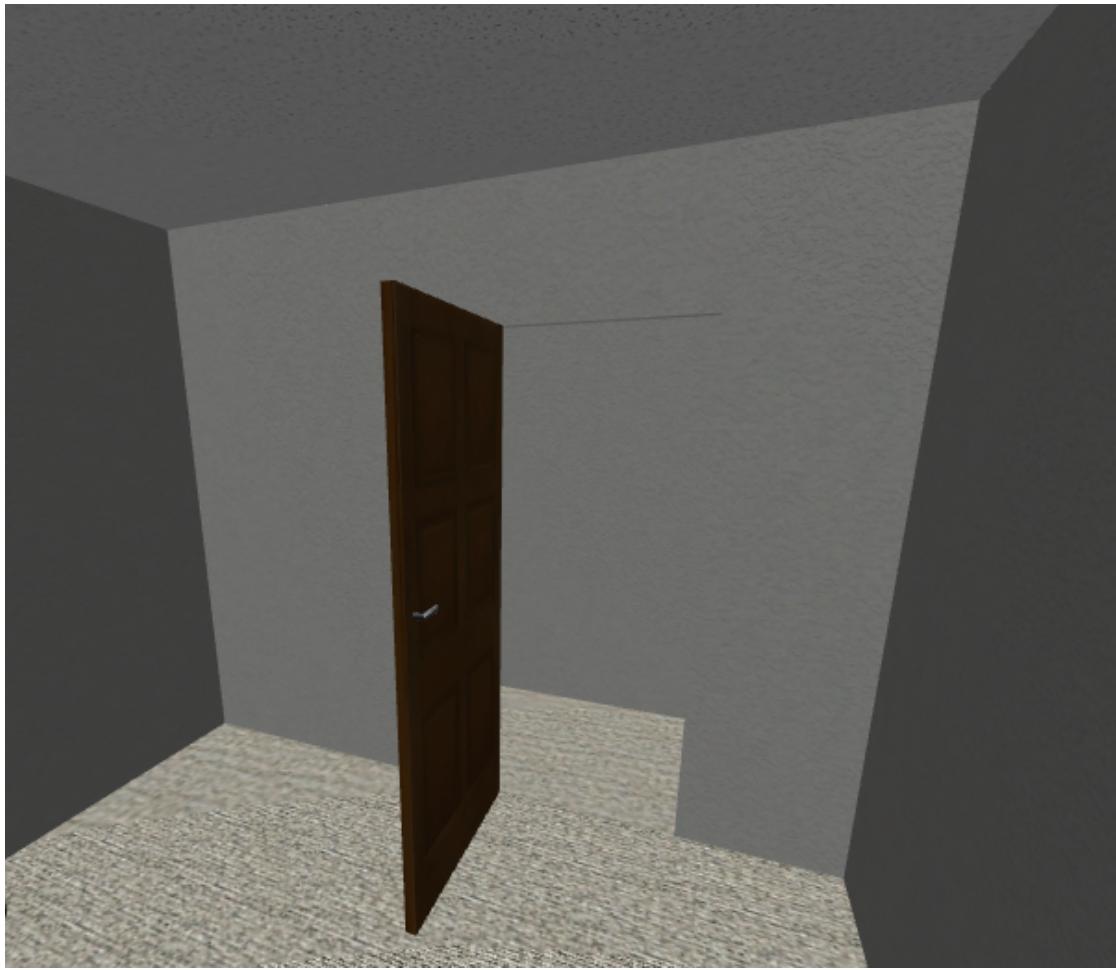


Figuur 2.2: Verandering van de virtuele omgeving (stippellijn) en de route die proefpersoon neemt (volle pijl).

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, zie Figuur 2.5 voor een grondplan van de omgeving. 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 2.2, 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 2.1, lichtjes verschillend ontworpen. Enkel de knop om de blinden te sluiten en het fotokader er boven staat in ieder kantoor op dezelfde plaats.

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 hier een kleine hoeveelheid translationele vervorming toegepast (zie Paragraaf 1.2.2), een constante factor van 1.1 op de bewegingssnelheid, daar dit klein genoeg is om onmerkbaar te zijn[15]. Wegens de manier waarop dit systeem werkt is het moeilijk om een grondplan te tekenen dat overeen komt met de realiteit daar de kamers overlappen, in figuur 2.5 is te zien wat het beoogde mentale vloerplan is van de proefpersonen.



Figuur 2.3: Een kantoor voor de verplaatsing van deur.

2.2 Pilot study

Het doel van deze virtuele omgeving is dat de proefpersoon elke kamer volgens de genummerde volgorde binnen gaat, daar op de knop duwt om de blinden te sluiten, en dan de kamer terug verlaat. Dit proces wordt dan voor alle kamers herhaald.

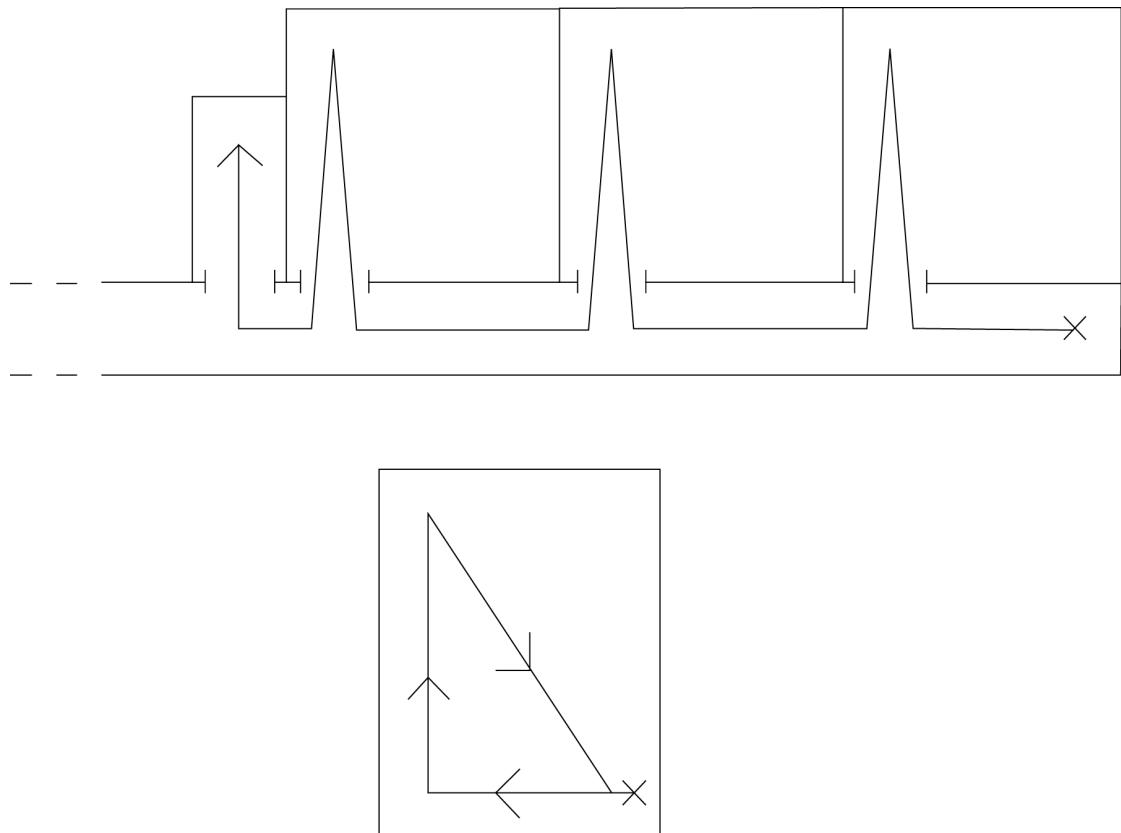
Het grote verschil met het onderzoek van Suma et. al., 2011 [17] is dat de verandering in mijn omgeving veel groter is, de deur wordt volledig naar de andere kant van de kamer verplaatst, in plaats van gewoon van hoek te veranderen.

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



Figuur 2.4: Een kantoor na de verplaatsing van de deur.

ook om informeel te kijken hoe goed de illusie werkt, en of mijn verandering te groot was vergeleken met die in het onderzoek van Suma et. al., 2011 [17]. Uit deze informele studie is gebleken dat geen 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 om dit te bevestigen. Ik heb hier uit geconcludeerd dat het concept zeer goed werkte, en heb ik besloten dezezelfde virtuele omgeving te testen in een immersief onderzoek.



Figuur 2.5: Mentaal grondplan van de virtuele omgeving en de route die de proefpersoon hier door neemt (boven), en de overeenkomstige beweging van de proefpersoon in de fysieke omgeving (onder).

Hoofdstuk 3

Immersief Onderzoek

3.1 Opstelling

Het belangrijkste element voor een immersieve opstelling is een head-mounted display. Traditioneel zijn 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), zie Figuur 3.1.

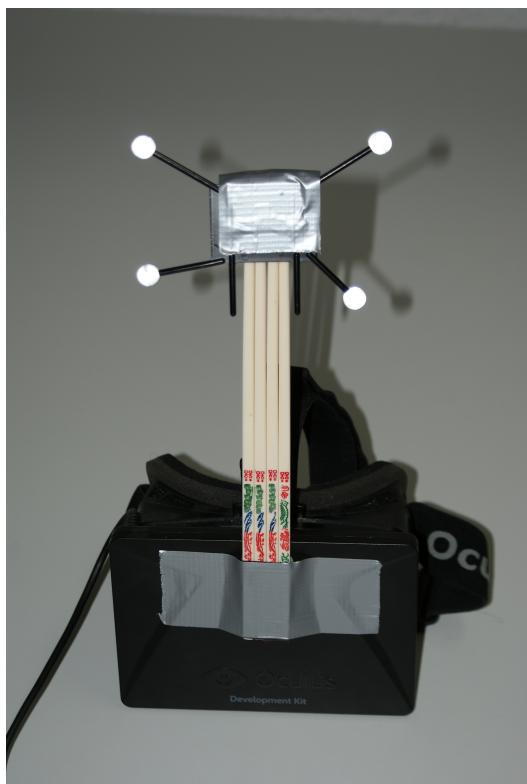
Om een vloeiende werking te verzekeren werd de virtuele omgeving gedraaid op een Apple MacBook Pro met een 2,5 GHz Intel Core i5 processor, 8 GB 1333 MHz DDR3 RAM geheugen en een Intel HD Graphics 4000 GPU. Het beeld werd getoond op een Oculus Rift (Devkit 1) aan 60 fps voor beide ogen. Deze HMD heeft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

Het is voor immersie ook belangrijk dat de positie van de proefpersoon in de fysieke omgeving zeer precies geweten is. Tracking van positie en rotatie in 3 assen werd gedaan door een 6 camera OptiTrack systeem rondom een 3 m x 4 m tracking gebied. Om gebruikersinvoer te voorzien werd er een bluetooth muis gebruikt, zodat de proefpersoon op een knop kon klikken om het object in beeld te activeren. Een foto van deze volledige opstelling, met een proefpersoon die het experiment is aan het ondernemen is te zien in Figuur 3.2

3.2 Beschrijving

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 verder verteld dat interactie met het object in beeld gebeurt door op de muisknop te klikken.

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



Figuur 3.1: De Oculus Rift Developer Kit 1, met de retroreflectieve bolletjes voor het tracking systeem.



Figuur 3.2: Een proefpersoon met de Oculus Rift op, terwijl ze door de virtuele omgeving is aan het wandelen. Merk ook de tracking camera's op die aan het kader hangen.

3.3 Vragenlijst

De vragenlijst bestaat uit een gebied voor algemene informatie en vijf specifieke vragen. Deze vragenlijst werd wegens de diversiteit van de proefpersonen in het Nederlands en het Engels beschikbaar gesteld. De Nederlandse versie van de vragenlijst is ingevoegd in Bijlage B. Als algemene informatie wordt er gevraagd naar de leeftijd, het geslacht en de voorkennis van de proefpersoon, dit om 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[17] om onze resultaten met die van dat onderzoek te kunnen vergelijken.

3.4 Implementatie

3.4.1 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 mijn implementatie.

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 wordt voldaan wordt de animatie

geactiveerd. Unity heeft ingebouwde functionaliteit om een punt via een matrix-transformatie te transformeren van wereldcoördinaten naar viewportcoördinaten.

Animatie

Voor de animaties maak ik gebruik van sferische lineaire interpolatie tussen de begin- en de eindpositie van de te animeren objecten. Ook deze functionaliteit wordt door Unity voorzien.

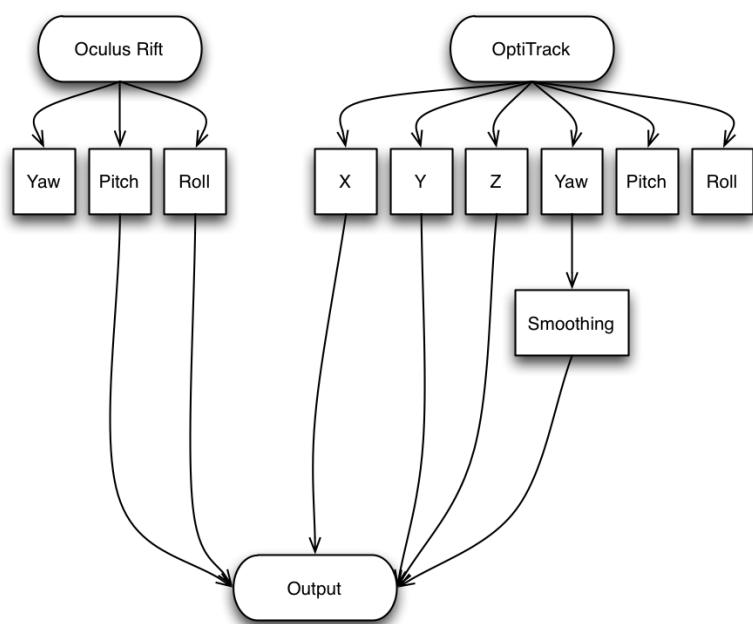
Voor de *animatie* van de beweging van de gang wordt deze gewoon in een keer verplaatst, omdat deze niet in het zicht van de proefpersoon is. Daar de deuren in het object van de gang verwerkt zitten, is deze beweging de effectieve implementatie van change blindness in de virtuele omgeving zoals beschreven in Paragraaf 1.2.3.

3.4.2 Tracking

Voor integratie met het trackingsysteem heb ik gebruik gemaakt van de gratis editie van de MiddleVR middleware[19]. 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. Een schema van de manier waarop ik de verschillende inputs gebruik is te zien in Figuur 3.3. Het ook op dit punt dat de positie in het XY-vlak met 1.1 wordt vermenigvuldigd om een effectieve snelheid van 110% te bekomen.

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



Figuur 3.3: Schema van de samengevoegde sensor inputs.

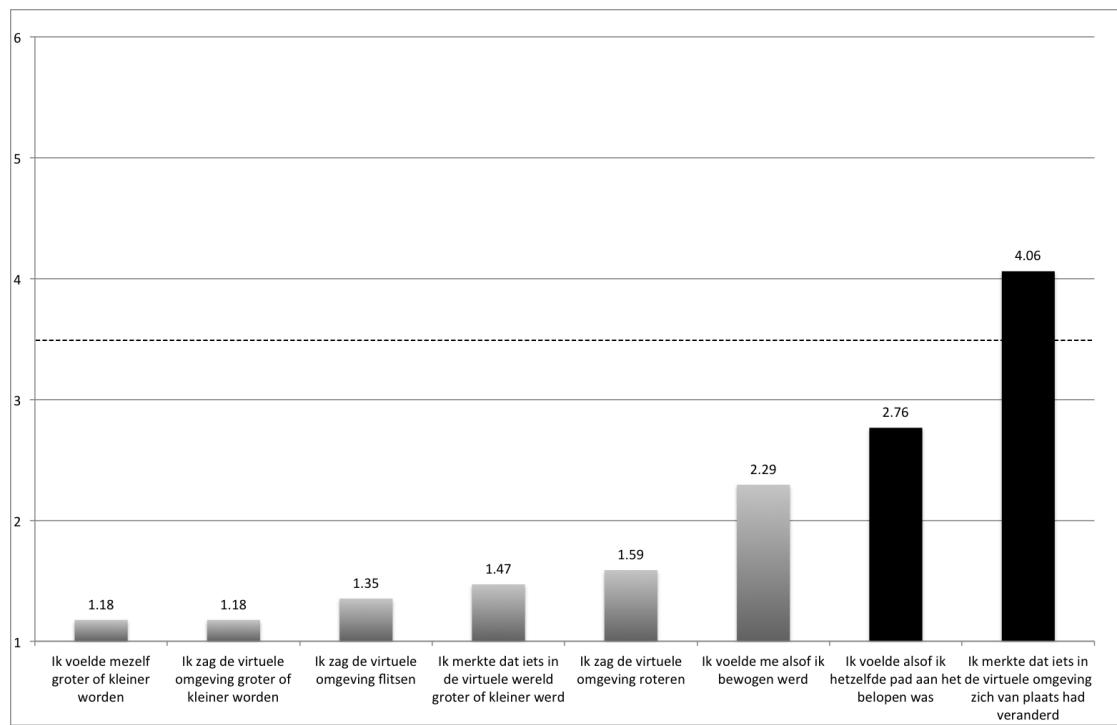
Hoofdstuk 4

Resultaten

Het experiment werd 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.

De geleverde grondplannen uit de vragenlijst 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.

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, het zou ook kunnen dat de 110% snelheidsschalering werd opgemerkt door de proefpersonen. 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 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. Hoewel de proefpersonen over het algemeen merkten dat er een verandering in de scène gebeurd was, kon slechts 47% van de proefpersoon vermelden dat het de deur was die bewogen was.



Figuur 4.1: Grafiek van de gemiddelde scores van de stellingen, de zwarte kolommen zijn de ware stellingen. De stippe lijn duidt 3.5 aan, de gemiddelde waarde.

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.

Deze problemen zouden in de toekomst kunnen opgelost worden door een nieuwere versie van de Oculus Rift te gebruiken (deze heeft minder kabels en heeft een hogere resolutie), door de laptop in een rugzak te steken, en door gebruik te maken van Wi-Fi voor de netwerkverbinding. In de toekomst zou het ook een goed idee zijn om de kamer op andere manier te verduisteren, daar het doek blijkbaar stoerde.

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 netwerkla-

tency zat er ook een beetje vertraging 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, vermoedelijk omdat de deur niet meer stond waar ze deze verwachtte.

4.2 conclusie

Het is opvallend dat mijn implementatie vergeleken met eerder onderzoek zoals dat van Evan A. Suma [17] minder effectief lijkt. Ik kan enkel vermoedens voorleggen betreffende de oorzaak hiervan. Ik vermoed dat mijn veranderingen te extreem zijn vergeleken met het eerder uitgevoerde onderzoek van Evan A. Suma [17]. 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. Het zou ook kunnen komen door een immersieprobleem zoals de laptop die door de uitvoerder van het experiment moet rondgedragen worden of de blinde plekken in de tracking area wegens een gebrek aan camera's.

In een verder onderzoek zou getest kunnen worden hoe extreem een verandering in de scene mag zijn voor deze opvalt. Er zou ook kunnen onderzocht worden wat de invloed van immersie is op de effectiviteit van change blindness.

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.

Hoofdstuk 5

Besluit en verder onderzoek

Na het overlopen van het eerder onderzoek heb ik gekozen om in dit proefschrift een onderzoek te doen naar de effectiviteit van change blindness, een techniek om door een grote virtuele omgeving te wandelen in een veel kleinere fysieke omgeving. En de invloed van taken op deze effectiviteit.

Er werd eerst een pilot study uitgevoerd met zeer positieve resultaten, waarna hetzelfde experiment werd herhaald in een immersieve omgeving. De resultaten van dit onderzoek duiden er op dat mijn implementatie change blindness op meer dan de helft van mijn testgroep werkte. En dat het voor de testgroep over het algemeen eerder niet duidelijk was dat ze in cirkels waren aan het lopen. Er werd ook onderzocht of de testgroep een consistent mentaal beeld kon vormen van de virtuele omgeving, daar deze onmogelijk is wegens overlappende kamers. Op een persoon na hadden alle personen in de testgroep hetzelfde mentale beeld gevormd.

Uit de feedback bleek dat er enkele immersieproblemen waren met mijn opstelling, zoals de resolutie van de Oculus Rift en haperingen in de tracker. Om de invloed van immersie te bekijken zou het experiment opnieuw kunnen uitgevoerd worden met een verbeterde opstelling. Er zou verder nog onderzocht kunnen worden hoeveel veranderingen er precies mogen zijn voor dit merkbaar is voor een proefperoon.

Change blindness blijft een techniek die zeer gespecialiseerd zal blijven omdat de virtuele omgeving ontworpen moet worden met change blindness in gedachte, maar als we andere redirectietechnieken zouden toevoegen kunnen de individuele kamers van de virtuele omgeving groter gemaakt worden, zonder het tracking gebied te moeten vergroten. In de toekomst kan een combinatie van alle redirectietechnieken gebruikt worden om zeer immersieve rondleidingen en virtuele omgevingen te maken.

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.

A.6 Meeting 6: 2014-08-08

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

Er werd in deze meeting de tweede draft besproken van mijn thesis. Ik zal de resulterende nota's over de resterende weken implementeren in de tekst van mijn thesis.

A.7 Meeting 7: 2014-08-27

Aanwezigen: Steven Maesen, Randy Thiemann.

Omdat er nog enkele foto's van het labo moesten gemaakt worden heb ik dat vandaag gedaan. Er werd afgesproken dat ik de final van mijn thesis later vandaag dag 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] Christian T Neth, Jan L Souman, David Engel, Uwe Kloos, Heinrich H Bülthoff, en Betty J Mohler: *Velocity-dependent dynamic curvature gain for redirected walking.* Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 18(7):1041–1052, 2012.

- [10] 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.
- [11] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, en Mary C Whitton: *Redirected walking*. In *Proceedings of EUROGRAPHICS*, volume 9, pagina's 105–106. Citeseer, 2001.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Daniel J Simons en Ronald A Rensink: *Change blindness: Past, present, and future*. Trends in cognitive sciences, 9(1):16–20, 2005.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Martin Ussoh, 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.
- [19] I'm in VR: *MiddleVR*. <http://www.imin-vr.com/middlevr/>.