



UHASSELT



Maastricht University

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Wetenschappen **School voor Informatietechnologie**

master in de informatica

Masterthesis

Exploration and comparison of mid-air menus in virtual reality

Steffen Lenaerts

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de informatica

PROMOTOR :

dr. Gustavo Alberto ROVELO RUIZ

De transnationale Universiteit Limburg is een uniek samenwerkingsverband van twee universiteiten in twee landen: de Universiteit Hasselt en Maastricht University.



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be

Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2021
2022



Maastricht University

Faculteit Wetenschappen

School voor Informatietechnologie

master in de informatica

Masterthesis

Exploration and comparison of mid-air menus in virtual reality

Steffen Lenaerts

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de informatica

PROMOTOR :

dr. Gustavo Alberto ROVELO RUIZ

UNIVERSITEIT HASSELT

MASTERPROEF VOORGEDRAGEN TOT HET BEHALEN VAN DE GRAAD
VAN MASTER IN DE INFORMATICA

Exploration and comparison of mid-air menus in virtual reality

Auteur:

Lenaerts Steffen

Promotor:

dr. Gustavo Roveló Ruiz

Begeleider(s):

Bram Van Deurzen

Academiejaar 2021-2022



Dankwoord

Deze thesis was niet mogelijk geweest zonder de steun en medewerking van een aantal personen. Daarom wil ik hen hiervoor bedanken.

Als eerste wil ik graag mijn begeleider meneer Bram Van Deurzen bedanken voor zijn steun en aanmoediging tijdens mijn studieproces en bij de totstandkoming van deze thesis. Hij stond open voor mijn technische vragen en gaf mij regelmatig feedback op de thesis tekst. Dankzij de constructieve feedback heb ik mijn thesis succesvol kunnen afronden.

Vervolgens zou ik ook mijn promotor meneer Gustavo Roveló Ruiz willen bedanken voor de fijne samenwerking en begeleiding. Hij heeft mij regelmatig de juiste tips gegeven om met mijn thesis de goede richting uit te gaan.

Ook wens ik mijn ouders te bedanken voor alle steun die ze mij hebben gegeven. Ze konden me steeds tot rust brengen en de nodige aanmoediging geven om indien nodig nog een tandje bij te steken.

Tot slot wil ik nog alle deelnemers van beide studies bedanken. Zonder hun deelname had ik niet de nodige inzichten kunnen verwerven.

Samenvatting

Binnen het virtual reality onderzoeksgebied wordt er volop onderzoek gedaan naar de meest geschikte interactiemethode. De interactiemethode is enorm belangrijk om vlotte en realistische ervaringen te hebben. Een specifiek onderdeel van interactie binnen VR is menu interactie. Op dit moment gebeurt menu interactie meestal aan de hand van een point menu. Hier moet de gebruiker met de controller wijzen naar het juiste menu item. Deze techniek kan nog vermoeiend, niet accuraat en niet efficiënt zijn. Daarom wordt er binnen deze thesis onderzoek gedaan naar een nieuw type menu.

In het eerste deel van deze thesis werd er literatuur geraadpleegd om een overzicht te krijgen van de huidige interactiemethoden. Op basis van de literatuurstudie werden de sterke en zwakke punten van de verschillende technieken duidelijk.

Vervolgens is er een studie uitgevoerd. Deze studie onderzocht de mogelijkheden van de mens om een mid-air target te bereiken. In deze studie is de accuraatheid, vermoeidheid en snelheid onderzocht. Buiten deze drie metrieken gaf deze studie ook een goed beeld over de beste positie voor de verschillende targets. Uit deze studie bleek dat de deelnemers op dit moment nog niet accuraat genoeg zijn, maar wel in staat zijn om de structuur van de targets te herkennen. De vermoeidheid en snelheid gaven geen problemen.

Op basis van de resultaten van de studie werd er een menu ontwikkeld dat mid-air targets gebruikt. De resultaten van de studie gaven aan dat onzichtbare targets nog niet geschikt waren om te gebruiken. Daarom werd er geprobeerd om het voor de gebruiker zo gemakkelijk mogelijk te maken om een menu item te selecteren. Hiervoor zijn een aantal hulpmiddelen voorzien. Zo zijn de targets bijvoorbeeld niet altijd onzichtbaar, maar enkel wanneer de targets buiten het zicht zijn van de gebruiker. Verder zijn de targets op de beste positie geplaatst op basis van de studie. Ook zijn de targets vergroot, zodat de gebruiker minder accuraat hoeft te zijn. Dit menu is vervolgens geïntegreerd in de PROROB applicatie.

Tot slot is er nog een usability studie uitgevoerd. In deze studie werd het mid-air menu vergeleken met een point menu. Er werd onderzoek gedaan naar verschillende aspecten van usability, zoals efficiency, error, learnability en memorability. Verder werd er ook onderzocht hoe lang de gebruikers nodig hebben om een menu item te selecteren. De voorkeur van de deelnemers was ongeveer gelijk verdeeld tussen het mid-air en point menu. De deelnemers waren wel sneller met het point menu dan met het mid-air menu. Op de usability aspecten scoorde het mid-air menu dan wel weer goed. Verder zagen de deelnemers wel het nut van het mid-air menu in en voorspelden ze dat het mid-air menu met meer training efficiënter kan zijn dan het point menu.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
2	Literatuurstudie	9
2.1	Interactie methoden	9
2.1.1	Selectie	9
2.1.2	Object manipulatie	9
2.1.3	Bewegen in virtual reality	10
2.2	Hand interactie	10
2.2.1	Virtuele hand	10
2.2.2	Arm-extension technieken	11
2.3	Virtual pointing	12
2.3.1	Ray-Cast	12
2.3.2	HOMER techniek	15
2.4	Gaze interaction	15
2.4.1	Gaze selectie	15
2.4.2	Gaze manipulatie	15
2.5	Menu interactie	16
2.5.1	Positionering menu	16
2.5.2	TULIP menu's	17
2.5.3	Open Palm menu	17
2.5.4	Menu op het lichaam	17
2.5.5	Gesture gebaseerd menu's	17
2.5.6	Fitt's law	18
2.5.7	Beating Fitt's law	18
2.6	Combinatie interactiemethoden	18
2.6.1	Handlebar	18
2.6.2	Smartpin	19
2.6.3	World in miniature	19
2.7	Haptic feedback	20
2.7.1	Active haptics	20
2.7.2	Passive haptics	20
3	Discussie interactiemethoden	21
3.1	Probleem	21
3.1.1	Algemene interactie	21
3.1.2	Menu interactie	21
3.2	Oplossing	22
3.2.1	Doel	22
3.2.2	Positie	22
3.2.3	Interactie	23
3.3	Studie	23
4	Studie 1: mid-air targets	24
4.1	Wat wordt er onderzocht?	24
4.2	Methodologie	25
4.2.1	Deelnemers	25

4.2.2	Apparatuur	25
4.2.3	Positionering targets	25
4.2.4	Fases Studie	26
4.2.5	Structuur studie	28
4.2.6	Gemeten data	28
4.3	Analyse	30
4.3.1	Hypotheses	30
4.4	Resultaten	31
4.4.1	Afstand	32
4.4.2	Vermoeidheid	41
4.4.3	Snelheid	41
4.4.4	Interview	42
4.4.5	Hypotheses	44
5	Discussie studie 1	45
5.1	Discussie locatie targets	45
5.1.1	Verdeling	45
5.1.2	Positionering	45
5.2	Discussie afstand	46
5.2.1	Grootte target	46
5.2.2	Optimale targets	47
5.3	Discussie vermoeidheid	47
5.4	Discussie snelheid	47
5.5	Discussie interview	48
5.6	Conclusie studie	48
6	Mid-air menu implementatie	50
6.1	Technologieën	50
6.2	Structuur	50
6.3	Menu principe	51
6.4	Design keuzes	52
6.4.1	Positie	52
6.4.2	Grote van targets	52
6.4.3	Fading targets	53
6.4.4	Bewegende bol	53
6.4.5	Menu status	54
6.5	Target keuze	54
7	Studie 2: vergelijking mid-air en point menu	56
7.1	Methodologie	56
7.1.1	Doel	56
7.1.2	Deelnemers	56
7.1.3	Apparatuur	57
7.1.4	Taakomschrijving	57
7.2	Analyse	57
7.3	Resultaten	58
7.3.1	Kwantitatieve resultaten	58
7.3.2	Kwalitatieve resultaten	60
7.3.3	NASA-TLX	62
8	Discussie	63
8.1	Overzicht	63
8.2	Future work	64
8.2.1	Mid-air studie	64
8.2.2	Menu design	64
8.2.3	Usability studie	65
8.3	Bijdrage	65
9	Conclusies	66

Hoofdstuk 1

Inleiding

In de afgelopen jaren is de populariteit van Virtual Reality (VR) enorm toegenomen. Vroeger was VR vooral beperkt tot het onderzoeksgebied. Door de steeds betere hardware en de beschikbaarheid van commerciële head mounted displays (HMD) is VR tegenwoordig ook beschikbaar voor een breder publiek.

Virtual reality is een technologie waarbij een computer een virtuele wereld genereert. In tegenstelling tot andere virtuele omgevingen, zoals bijvoorbeeld videogames, wordt de gebruiker zelf in de virtuele omgeving geplaatst. Dit gebeurt door middel van een VR-bril of een Head Mounted Display (HMD). Door middel van de head mounted display krijgt de gebruiker het gevoel alsof hij zich in de virtuele wereld bevindt.

Het doel van VR is om gebruikers het gevoel te geven dat ze echt fysiek in de computer-gegenereerde wereld aanwezig zijn. Er zijn een aantal factoren die belangrijk zijn om ervoor te zorgen dat gebruikers een realistisch gevoel ervaren. Natuurlijk is het belangrijk dat de virtuele wereld er op grafisch niveau realistisch uitziet. Indien dit niet het geval is, valt het meteen op dat de wereld een computer- gegenereerd beeld is en wordt de immersie verbroken.

VR kan voor een groot aantal toepassingen gebruikt worden; dit kan variëren van recreatieve toepassingen tot training simulators voor bijvoorbeeld chirurgen of piloten.

Buiten de grafische eigenschappen is interactie binnen de virtuele wereld enorm belangrijk om een realistisch gevoel te ervaren. In een training simulator bijvoorbeeld is het van levensbelang dat de interactie volledig overeenkomt met de handelingen in de echte wereld. Als dit niet het geval zou zijn, kan dit voor een patiënt mogelijks slechte gevolgen hebben. Voor recreatieve toepassingen in VR is het minder belangrijk dat de interactie realistisch is. In deze toepassingen is het vooral belangrijk dat de gebruiker zijn handelingen efficiënt kan uitvoeren.

Interactie binnen een virtuele wereld gebeurt meestal met behulp van de controllers die bij de HMD horen. Met deze controllers zijn er al veel interactiemethoden mogelijk. Een vaak voorkomende interactiemethode is virtual pointing met de controllers. Hierbij zijn er verschillende acties mogelijk. Zo kan het pointeren gebruikt worden om te teleporteren binnen de scène. Dit zorgt ervoor dat de gebruiker zich op een snelle en efficiënte manier kan verplaatsen binnen de virtuele wereld, zonder dat er in de echte wereld een grote ruimte moet voorzien worden. Buiten het teleporteren wordt pointing ook vaak gebruikt om objecten te selecteren. Met behulp van virtual pointing is het mogelijk om objecten die buiten handbereik liggen te selecteren, hierdoor kan er ook weer efficiënt gewerkt worden. Virtual pointing kan een handige interactiemethode zijn, maar heeft ook een aantal beperkingen. Zo is het natuurlijk moeilijker om kleine en objecten op een afstand te selecteren. De gebruiker moet hiervoor veel preciezer zijn. Ook kan vermoeidheid van de armen een negatieve factor zijn. Als de gebruiker continu moet richten met de controller, wordt dit na een bepaalde tijd vermoeiend voor de armen. Hierdoor verloopt de interactie minder vlot.

Buiten virtual pointing kunnen met behulp van controllers ook virtuele handen bediend worden. Dit lijkt meer op de interactie in de echte wereld. De gebruiker kan objecten vastnemen en manipuleren op een zeer gelijkaardige manier als hij dit zou doen in de echte wereld. Dit zorgt er ook voor dat er gelijkaardige

beperkingen zijn zoals in de echte wereld. De objecten die de gebruiker wil selecteren moeten bijvoorbeeld binnen handbereik liggen om ze te kunnen selecteren.

Wanneer controllers gebruikt worden, moet de gebruiker natuurlijk continu deze controllers vasthouden. Als de gebruiker zijn handen voor een andere taak wil gebruiken, moet hij telkens de controllers neerleggen en nadien terug oppakken. Met een VR-bril op is dit niet altijd even gemakkelijk. Daarom is het ook mogelijk om zonder controllers te werken. De handen van de gebruiker moeten dan getracked worden. Indien dit op een accurate manier kan gebeuren, kan de gebruiker met zijn handen virtuele objecten vastnemen en manipuleren. Deze interactiemethode zorgt ervoor dat de handen van de gebruiker vrij zijn. Ook komt dit sterk overeen met de handelingen in de echte wereld. Een belangrijk verschil is dat haptic feedback ontbreekt wanneer de gebruiker bijvoorbeeld een object wil vastnemen. Dit kan ervoor zorgen dat de gebruiker een minder realistisch gevoel ervaart en dat precieze handelingen moeilijker zijn om uit te voeren.

Buiten deze veel voorkomende interactiemethoden, wordt er nog volop onderzoek gedaan naar ideale interactiemethoden in de virtuele wereld. Om een goede interactiemethode te voorzien is het belangrijk dat deze natuurlijk en efficiënt is om te gebruiken. Vaak worden de huidige interactiemethoden gebaseerd op bestaande metaforen. Zo is virtual pointing gebaseerd op het wijzen met een laserpointer. Een voordeel van interactie binnen een virtuele wereld is dat de interactie niet gelimiteerd wordt door beperkingen van de echte wereld. Hierdoor kan men veel creatiever zijn om nieuwe interactiemethoden te bedenken en ontwikkelen. Zo kan men bijvoorbeeld gebruik maken van gaze selectie; hiermee kan de gebruiker een object selecteren door er naar te kijken.

Het doel van deze thesis is om een interactiemethode te ontwikkelen in de context van Flanders Make. In verschillende Flanders Make toepassingen is er vaak een combinatie van menu interactie waarbij controllers gebruikt worden en het uitvoeren van complexe taken met de handen van de gebruiker. Met de beschikbare interactiemethoden op dit moment is het niet altijd efficiënt om deze twee soorten interacties met elkaar te combineren. Indien de operator een menu selectie wil maken moet hij de controllers zoeken en vastnemen om dan in een menu naar het gewenste item te zoeken. Hierdoor wordt de workflow met zijn complexe taak verbroken.

Het idee van de nieuwe interactiemethode is dat de operator veel sneller en zonder de workflow te doorbreken het gewenste menu item kan selecteren. Hierdoor kan de operator gefocust blijven op zijn complexe taken, maar toch nog interactie hebben met een menu.

Een voorbeeld van een mogelijke context is de PROROB applicatie. Hierin moet de operator paden tekenen die een robot moet volgen om een 3D object in te kleuren. De operator moet met behulp van transformaties de paden tekenen zodat het volledige object door de robot kan ingekleurd worden. Hierin zijn dus duidelijk twee verschillende soorten interacties zichtbaar. De hoofdtaak is het tekenen van de paden. De subtaak is het selecteren van de juiste transformaties met behulp van een menu. Deze taak kan versneld worden indien de tijd dat de operator spendeert in het menu verkort wordt. Het idee hier is dus dat de gebruiker snel en zonder focusverlies het gewenste menu item kan selecteren.

Het doel van de nieuwe interactiemethode is dat de gebruiker met zijn handen interactie kan hebben met een menu in de VR omgeving. De interactiemethode maakt gebruik van de ruimte rondom de gebruiker om het menu te positioneren. Het is de bedoeling dat de gebruiker met een vlotte en eenvoudige beweging het juiste menu item kan selecteren zonder dat hij naar het menu moet kijken. Hiervoor moet de gebruiker vertrouwen op muscle memory om het gewenste item te selecteren.

Om dit soort menu te kunnen gebruiken, moet de gebruiker in staat zijn om herhaaldelijk een bepaald punt in de ruimte te kunnen bereiken. Ook is het belangrijk dat de gebruiker dit met genoeg precisie kan doen. Om te achterhalen of dit mogelijk is, wordt er in eerste instantie een onderzoek uitgevoerd waarbij er gefocust wordt op de accuraatheid om verschillende targets te bereiken.

In de studie wordt er vooral onderzoek gedaan naar precisie, vermoeidheid en snelheid. De precisie is belangrijk om te bepalen hoe accuraat een deelnemer een target in de ruimte kan vinden. Dit geeft inzicht in de grootte van de targets. Ook kan hieruit afgeleid worden wat de optimale positie is voor de verschillende targets. De vermoeidheid geeft informatie over de mogelijke posities van een target. Indien een target vermoeiend is om continu te bereiken, kan er besloten worden dat die positie niet geschikt is om te gebruiken, zelfs als de precisie wel hoog genoeg is. De snelheid toont aan of de interactie al dan niet efficiënt kan uitgevoerd worden.

Met deze informatie wordt dan rekening gehouden om vervolgens een interactiemethode te ontwikkelen voor een VR painting applicatie genaamd PROROB.

Om een mid-air menu te implementeren is het belangrijk dat de gebruiker zo weinig mogelijke foute menu items kan selecteren. Daarom zijn er een aantal hulpmiddelen voorzien om het mid-air menu gebruiksvriendelijker te maken. De targets zijn beter gepositioneerd en groter gemaakt om het selecteren gemakkelijker te maken. Omdat het menu niet voortdurend onzichtbaar moet zijn, is er ook voor gekozen om de targets te laten faden op basis van de kijkrichting van de gebruiker. Ook wordt er met kleur en tekst gewerkt om duidelijk te maken welke menu items de gebruiker geselecteerd heeft.

Om de usability van het mid-air menu te testen is er opnieuw een studie uitgevoerd. In deze studie wordt het gecreëerde mid-air menu vergeleken met een vaak gebruikt point-menu. Het doel van deze studie is om te kijken hoe gebruiksvriendelijk het mid-air menu is ten opzichte van het point-menu.

Uit de analyse blijkt dat de tijd die de deelnemers nodig hebben om een menu item te selecteren, groter is in het mid-air menu dan in het point menu. Dit komt waarschijnlijk door de beperkte trainingstijd en omdat de deelnemers vaak nog naar de menu items moesten kijken.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

Doorheen de jaren is er al veel onderzoek uitgevoerd rond virtual reality. Een belangrijk onderzoeksonderwerp binnen virtual reality is op welke manier de gebruiker een zo realistisch mogelijke ervaring krijgt. Om een zo groot mogelijk gevoel van realisme te simuleren is de interactie met de virtuele wereld enorm belangrijk. Doorheen de jaren zijn er veel nieuwe interactiemethodes voorgesteld die proberen om de interactie zo intuïtief mogelijk maken. In dit onderdeel worden een aantal interactietechnieken besproken die gepubliceerd zijn in wetenschappelijke papers.

Om te beginnen wordt er eerst gekeken wat de belangrijkste interactiemethoden zijn om nadien te kijken op welke verschillende manieren deze interactiemethoden geïmplementeerd en verbeterd kunnen worden.

2.1 Interactie methoden

In dit onderdeel worden de belangrijkste interactiemethoden binnen een virtuele wereld besproken.

2.1.1 Selectie

Vooraleer een gebruiker interactie kan hebben met een object in de virtuele wereld, moet het object eerst op een bepaalde manier geselecteerd worden. Mine et al. [27] hebben verschillende selectie technieken beschreven. Traditioneel gebeurt de interactie in VR met behulp van twee controllers. De controllers voorzien standaard twee mogelijkheden om een object te selecteren. In eerste instantie kan de gebruiker het object rechtstreeks vastnemen. Dit gebeurt door met de controller naar het virtuele object te bewegen. Wanneer deze elkaar snijden, heeft de gebruiker het object vast. Dit is een zeer natuurlijke manier om een object vast te nemen. Toch heeft deze methode een aantal beperkingen. Zo moet de gebruiker binnen handbereik zijn van het object. Als het object zich aan de andere kant van de scène bevindt, kan de gebruiker dit niet op deze manier selecteren.

De tweede mogelijkheid laat de gebruiker via pointing een object selecteren. De gebruiker richt met de controller naar een object om zo het object te selecteren. Doordat de gebruiker enkel moet richten naar het object is de afstand geen beperking meer. Deze methode heeft ook een aantal beperkingen. Als de gebruiker vaak een object moet selecteren, gaat hij constant met de controller moeten richten naar het object. Dit wordt na een tijd vermoeiend voor de armen. Een tweede beperking is de occlusie door andere objecten. Als een object achter een ander object ligt, is het onmogelijk om het achterste object te selecteren zonder dat de gebruiker zich moet verplaatsen. Ten slotte is de afstand en grootte van een object een belangrijke factor. Als het object te klein is of te ver van de gebruiker verwijderd is, gaat de gebruiker heel precies moeten zijn. Accuraat genoeg zijn om een klein object te selecteren is voor de gebruiker niet altijd even gemakkelijk.

2.1.2 Object manipulatie

Nadat een object geselecteerd is, kan de gebruiker het object manipuleren. De drie belangrijkste manipulaties zijn: rotatie, translatie en schalen.

De meest gebruikte manier om object manipulaties uit te voeren met behulp van twee controllers, is een directe mapping van de interactie in de echte wereld. Een translatie kan simpelweg uitgevoerd worden door het object vast te nemen en te verplaatsen. Een rotatie werkt op dezelfde manier. Het schalen van een object kan door het object met twee controllers vast te nemen om dan een scale gesture uit te voeren.

Voor de gebruiker is dit een intuïtieve mapping van de acties in de echte wereld naar de acties in de virtuele wereld. De bewegingen die de gebruiker moet maken, komen bijna volledig overeen met de echte beweging. Toch heeft deze mapping ook een aantal beperkingen. De gebruiker heeft continu de twee controllers vast en moet in de lucht grijpen naar objecten. Hierdoor ontbreekt er haptic feedback, wat het realistische gevoel kan doorbreken. Een ander nadeel dat ook deels in de echte wereld aanwezig is, is dat het moeilijk is om fijne, precieze object manipulaties uit te voeren. Als de gebruiker een object bijvoorbeeld dubbel zo groot wil maken in de lengte is dit bijna onmogelijk. Deels omdat er geen haptic feedback is, maar ook omdat er meestal geen visuele indicator is over hoe groot een object op een bepaald moment is. In de echte wereld wordt dit opgelost door een meetinstrument te gebruiken [27].

2.1.3 Bewegen in virtual reality

Een gebruiker kan natuurlijk ook bewegen in de virtuele wereld. In veel scenario's komt de verplaatsing in de virtuele wereld overeen met de verplaatsing in de echte wereld. De ruimte in de echte wereld en de ruimte in de virtuele wereld moeten hierdoor dan wel overeenkomen. Dit is helaas zelden het geval. Hiervoor zijn er een aantal oplossingen voorzien. Langbehn et al. [25] hebben een aantal locomotion technieken in virtueel reality geëvalueerd.

In eerste instantie is er smooth locomotion. Hier kan de gebruiker met behulp van een controller door de virtuele omgeving bewegen. Dit komt overeen met de manier waarop een karakter in een 3D game bestuurd moet worden. Een deel van de mensen zijn dus al bekend met deze besturing. Bij deze techniek ervaart de gebruiker tegenstrijdige bewegingssignalen. De gebruiker ziet met zijn ogen de beweging gebeuren, maar het evenwichtsorgaan ervaart de beweging niet. Hierdoor kan het zijn dat de gebruiker zich misselijk gaat voelen. Ook kan dit verschil de ervaring van de gebruiker minder realistisch laten aanvoelen.

Verder wordt er tegenwoordig ook onderzoek gedaan naar redirected walking. Redirected walking is een techniek ontwikkeld door Jonathan et al. [22] waarbij de getoonde virtuele wereld aangepast wordt. De gebruiker gaat zijn beweging onbewust compenseren aan de aanpassingen van de virtuele wereld. Door de aanpassing heeft de gebruiker in de echte wereld slechts een klein gebied nodig om te bewegen, maar kan hij toch de volledige virtuele wereld ontdekken.

Een meer voorkomende techniek is teleporteren. Met behulp van de controller richt de gebruiker op de plaats waarheen hij wil teleporteren. Deze methode is efficiënt om snel grote afstanden te overbruggen. Helaas zorgt deze techniek wel voor een minder realistisch gevoel.

2.2 Hand interactie

Handen gebruiken als interactie is een van de eenvoudigste interactiemethoden voor de gebruiker. Door de handen te tracken, kan de gebruiker zonder controllers interageren met de virtuele wereld. Handinteractie en mogelijke verbeteringen worden in deze sectie besproken.

Peng et al. [29] hebben onderzoek gedaan rond bimanual interaction en observeerden dat de dominante en niet-dominante hand van de gebruikers een andere rol hebben tijdens de interactie. Ook indien elke hand dezelfde taak krijgt, kan dit op een andere manier worden uitgevoerd.

2.2.1 Virtuele hand

De virtuele hand metafoor is een interactiemethode die regelmatig gebruikt wordt voor het selecteren en manipuleren van objecten die binnen handbereik liggen van de gebruiker. De virtuele hand is gebaseerd op de manier waarop de gebruiker interactie heeft met objecten in de echte wereld.

In de virtuele hand metafoor [32] bedient de gebruiker een virtuele hand om een object te selecteren en te manipuleren. Om de virtuele hand te bedienen is er een input methode nodig die zes degrees of freedom voorziet. Dit is nodig om de translatie en rotatie van de echte hand overeen te laten komen



Figuur 2.1: Voorbeeld van virtuele handen in een virtuele omgeving.

met de virtuele hand. Hiervoor worden vaak de controllers die bij de Head Mounted Display horen gebruikt, voorbeelden hiervan zijn de HTC Vive Controller of de Oculus Touch. Doordat de gebruiker de controllers moet vast houden, zijn de handen van de gebruiker bezet. In sommige contexten kan het echter zo zijn dat de gebruiker zijn handen vrij wenst te houden. Om dit op te lossen is het mogelijk om de virtuele hand te voorzien door de handen van de gebruiker te tracken. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. Zo zijn er enerzijds marker gebaseerde tracking systems zoals VICON. Anderzijds zijn er ook markerless gebaseerde systemen zoals Leap Motion of Microsoft Kinect. Verder is het ook nog mogelijk om wearables te dragen. Voorbeelden van wearables zijn een smartwatch zoals in WatchCasting [33] of een handschoen met sensoren zoals bijvoorbeeld de Senso glove. Deze methoden verschillen vaak enkel qua precisie ten opzichte van elkaar.

In de meeste gevallen wordt de virtuele hand geïmplementeerd als een één op één mapping van de beweging in de echte wereld naar de beweging in de virtuele wereld. Door de overeenkomsten is het voor de gebruiker niet moeilijk om de virtuele hand te bedienen. Ook zorgt het tonen van de virtuele handen voor een realistischer gevoel bij de gebruiker. Doordat de virtuele hand sterk overeenkomt met een hand in de echte wereld, worden zowel de positieve als negatieve eigenschappen overgenomen. De grootste negatieve eigenschappen zijn dat de gebruiker maar een beperkt bereik heeft en dat langdurige virtual reality sessies voor vermoeidheid kunnen zorgen.

2.2.2 Arm-extension technieken

Om de problemen van de standaard virtuele hand op te lossen zijn er een aantal andere technieken ontwikkeld gebaseerd op de arm-extension metafoor. In deze metafoor kan de virtuele arm van de gebruiker groeien om objecten op een bepaalde afstand te selecteren.

Go-Go techniek

Zo is er bijvoorbeeld de Go-Go techniek [34]. De Go-Go techniek is gebaseerd op de metafoor waarbij de arm van de gebruiker verlengd wordt om objecten buiten het bereik van de gebruiker te selecteren of manipuleren. Deze techniek zorgt ervoor dat het bereik van de gebruiker vergroot ten opzichte van de standaard virtuele hand. Doordat het bereik groter is, kan de gebruiker zowel objecten die dichtbij zijn als objecten die verder weg zijn op een natuurlijke manier manipuleren.

De Go-Go techniek maakt gebruik van een niet-lineaire mapping tussen de beweging van de gebruiker in de echte wereld en de beweging van de virtuele hand in de virtuele wereld. De ruimte rond de gebruiker wordt verdeeld in twee delen. Het eerste deel, dat dicht bij de gebruiker is, voorziet een lineaire mapping tussen de echte en virtuele hand. Het tweede gedeelte is verder weg van de gebruiker en voorziet de niet-lineaire mapping; hierdoor kan de gebruiker objecten die op een bepaalde afstand liggen manipuleren. Het voordeel van deze techniek is dat de gebruiker ook objecten die niet dicht bij de gebruiker zijn kan manipuleren. Binnen Go-Go is er wel een maximale afstand waarin dat de gebruiker een object kan vastnemen. Het is dus niet mogelijk om objecten op een oneindige afstand te manipuleren.

Stretch Go-Go techniek

De Stretch Go-Go techniek [6] is een verbetering van de standaard Go-Go techniek. In de standaard Go-Go techniek is er een beperking op de afstand waarin een object geselecteerd kan worden. De Stretch Go-Go

techniek laat toe om eender welk object te selecteren. De virtuele arm kan oneindig ver uitgetrokken worden. De ruimte rond de gebruiker is verdeeld in drie concentrische gebieden met als middelpunt de gebruiker zelf. Het middelste gebied is de natuurlijke handpositie van de gebruiker. Wanneer de gebruiker zijn armen strekt zodat zijn handen in het buitenste gebied zijn, worden de virtuele armen langer. Als de handen in het binnenste gebied zijn, worden de virtuele armen terug korter. Deze techniek is moeilijker om aan te leren aan de gebruiker, maar laat wel toe om objecten op eender welke afstand te manipuleren.

De indirect stretching techniek maakt van hetzelfde principe gebruik als de Stretch Go-Go techniek. De virtuele armen kunnen ook verlengd of verkort worden. In plaats van de beweging van de armen van de gebruiker als trigger te gebruiken, worden er bij de indirect stretching techniek knoppen op bijvoorbeeld een controller of muis gebruikt om de virtuele arm te bedienen. Deze techniek is gemakkelijker en preciezer om te gebruiken maar neemt de natuurlijke metafoor weg van het strekken van de arm om de virtuele hand te verlengen.

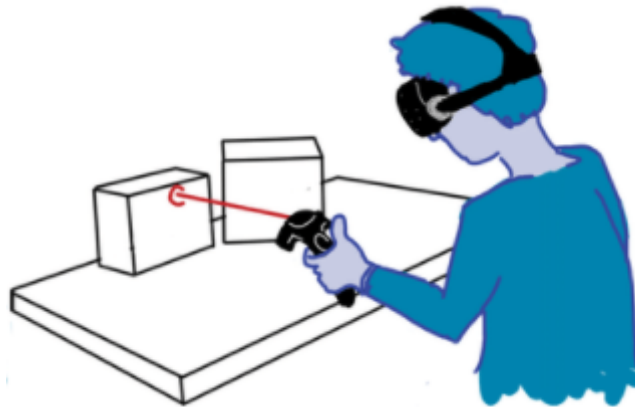
2.3 Virtual pointing

De virtuele hand is een natuurlijke interactiemethode maar heeft als grootste beperking het selecteren van objecten op een afstand. Er zijn een aantal varianten ontwikkeld om dit probleem op te lossen.

Een andere interactiemethode om dit probleem op te lossen is virtual pointing. Virtual pointing zijn technieken die gefocust zijn op het selecteren van objecten op een afstand. Deze technieken zijn gebaseerd op de laserpointing metafoor in het echte leven.

2.3.1 Ray-Cast

De meest bekende implementatie van virtual pointing is de ray-cast techniek [31]. In ray-casting richt de gebruiker een virtuele laser naar het object, zoals te zien is in figuur 2.2. Wanneer de laser op een virtueel object gericht is, kan het object geselecteerd worden. Dit gebeurt aan de hand van een bepaalde trigger, in de meeste gevallen is deze trigger een druk op een knop of een gesture.



Figuur 2.2: Afbeelding [12] waarop een persoon een object selecteert door middel van ray-casting.

Ray-cast is een techniek die enkel geschikt is om objecten te selecteren. De ray heeft meestal een oneindige lengte. Hierdoor is het mogelijk om eender welk object in de virtuele wereld te selecteren. Het object dat geselecteerd wordt, is het object dat als eerste geraakt wordt door de virtuele ray. Indien er meerdere objecten achter elkaar liggen, zal dus altijd het eerste object geselecteerd worden. Dit is een nadeel van ray-casting. Het is voor de gebruiker dus niet altijd even makkelijk om elk object te selecteren.

Ray-casting krijgt ook te maken met het zogenaamde hefboom arm probleem [6]. Nadat het object geselecteerd is, hangt het object vast aan de straal. De afstand tot de gebruiker blijft constant, waardoor complexe manipulaties moeilijk blijven. Om dit probleem op te lossen is er een variant van ray-casting ontwikkeld, genaamd ray-casting with reeling [6]. In deze techniek kan de gebruiker de objecten dichterbij of verderaf brengen door twee knoppen te gebruiken.

Ook voor de ray-cast is er een input methode nodig die zes degrees of freedom voorziet. Dit kunnen bijvoorbeeld de handen van de gebruiker zelf zijn als deze getracked worden of de controllers die bij de Head Mounted Display horen.

Hoe gemakkelijk ray-casting te gebruiken is hangt af van de motorische vaardigheden van de gebruiker en van de accurraatheid van de input methode. Ook is het moeilijk om kleine objecten of objecten die op een grote afstand van de gebruiker liggen te selecteren.

Heuristic ray

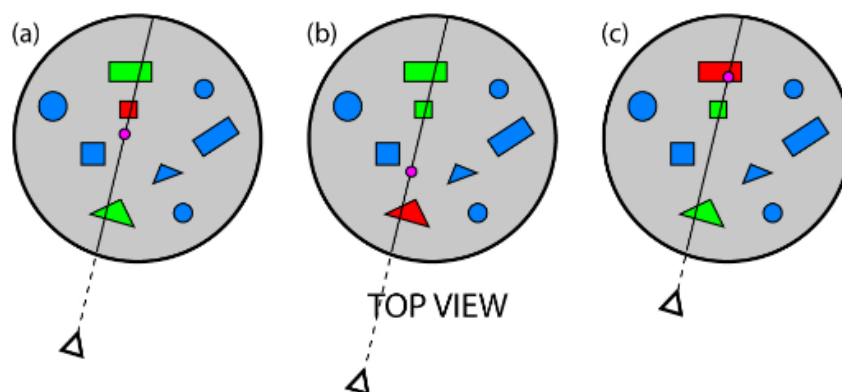
Om het voor de gebruiker gemakkelijker te maken om kleine objecten te selecteren zijn er heuristieken ontwikkeld. De heuristic-ray [18] is een verzameling van technieken die aan de hand van een score het beste object gaan selecteren.

Cone-casting

Doordat de breedte van de straal beperkt is, is het moeilijk om kleine objecten te selecteren. Hiervoor zijn er oplossingen die een bredere straal gebruiken. Een mogelijkheid is cone-casting of de spotlight techniek [26], hier heeft de straal een vorm van een kegel, die breder wordt naarmate de afstand toeneemt. Door het bredere gebied is het gemakkelijker om kleine of objecten op een afstand te selecteren. Deze techniek is dan weer minder geschikt indien er veel objecten in de virtuele wereld zijn die dicht bij elkaar zijn. In dit geval moet de gebruiker toch nog precies richten, zoals bij de standaard ray-cast.

Depth-ray

De depth-ray [17] is een uitbreiding van de standaard ray-casting techniek. Op de straal bevindt er zich een kleine bol die dient als een soort cursor. Deze kleine bol dient om een object in de diepte te selecteren. Wanneer de straal meerdere objecten kan snijden, kan er met behulp van de cursor het juiste object geselecteerd worden. Het object dat het dichtst bij de cursor is wordt geselecteerd. De gebruiker kan de cursor bewegen door de controller naar voor of naar achter te bewegen. In figuur 2.3 wordt er een bovenaanzicht getoond van de depth-ray. Hierin wordt de cursor voorgesteld als een roze cirkel. Zoals te zien in de afbeelding wordt het dichtstbijzijnde object, op de afbeelding in het rood weergegeven, geselecteerd.



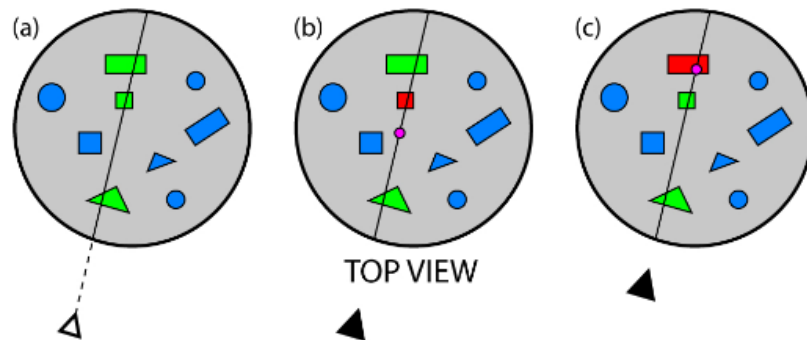
Figuur 2.3: Bovenaanzicht van de depth-ray [17]. De cursor op de ray wordt getoond als een roze cirkel. Het object dat geselecteerd wordt, is in het rood ingekleurd.

Een object selecteren bestaat uit twee fases; het verplaatsen van de straal en nadien het verplaatsen van de cursor op te straal. Deze twee fases kunnen overlappen. Wanneer de gebruiker bijvoorbeeld de straal aanpast, kan de positie van de cursor ook verplaatsen. Om dit op te lossen is er lock-ray ontwikkeld.

Lock-ray

De lock-ray [17] is gebaseerd op hetzelfde principe als de depth-ray. Het verschil met de depth-ray is dat de twee fases op een sequentiele manier gebeuren bij de lock-ray. De gebruiker dient in eerste instantie de straal juist te positioneren. Na een bepaalde trigger, zoals bijvoorbeeld een druk op een knop, blijft

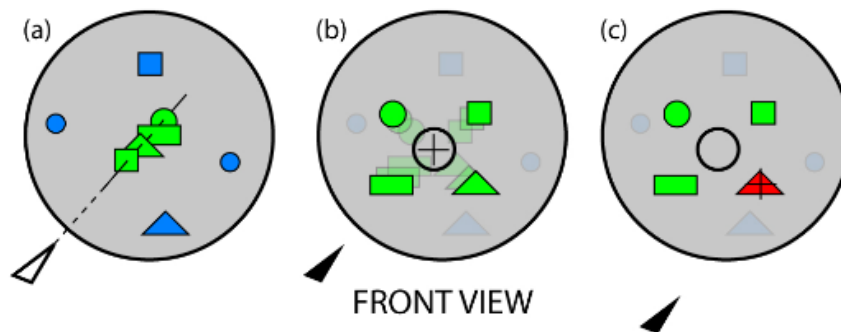
de straal op een vaste positie staan en verschijnt de cursor op de straal. Vervolgens kan de gebruiker de cursor op de straal bedienen om het juiste object te selecteren. Een bovenaanzicht van de lock-ray wordt getoond op figuur 2.4.



Figuur 2.4: Bovenaanzicht van de lock-ray [17]. In figuur a worden alle objecten die snijden met de straal in het groen getoond. Nadat de ray gelocked wordt, kan de cursor op de ray bediend worden zoals in figuur b en c.

Flower-ray

Ook voor de lock-ray is er een verbetering voorzien, namelijk de flower-ray [17]. De flower-ray bestaat net zoals de lock-ray ook uit twee fases. De tweede fase van de flower-ray is verschillend van deze van de lock-ray. In plaats van de cursor selectie worden alle objecten waar de straal mee snijdt in een soort cirkel menu geplaatst. Dit zou sneller moeten zijn dan het verplaatsen van de cursor. Een nadeel van dit menu is dat de gebruiker elke keer moet zoeken in het menu waar het gewenste object gepositioneerd is. De volgorde van items in het menu kan elke keer verschillen. Een visuele voorstelling van de flower-ray is zichtbaar in figuur 2.5.



Figuur 2.5: Vooraanzicht van de flower-ray [17]. In figuur a worden alle objecten die snijden met de straal in het groen getoond. In figuur b wordt getoond hoe de objecten in een marking menu getoond worden. Figuur c toont welk object geselecteerd wordt.

2.3.2 HOMER techniek

Uit een studie [6] waarbij ray-casting en arm-extension technieken bestudeerd zijn, blijkt dat beide categorieën toch op een aantal gebieden onvoldoende scores. Ray-casting technieken maken het makkelijk om objecten te selecteren, maar zijn minder geschikt om object manipulaties uit te voeren. Arm-extension technieken zijn daarentegen wel geschikt voor object manipulaties, maar het bedienen van de hand zorgt voor moeilijkheden.

Daarom is er een nieuwe techniek ontwikkeld die probeert om het beste van beide technieken te combineren. Dit worden de HOMER [6] technieken genoemd, waarbij HOMER staat voor Hand-Centered Object Manipulation Extending Ray-casting. In de HOMER techniek wordt het object geselecteerd door middel van ray-casting. In plaats van dat het object naar de virtuele hand teleporteert, gaat de virtuele hand naar het object. Hierdoor kan de gebruiker gemakkelijk object manipulaties uitvoeren. Wanneer de gebruiker het object loslaat, gaat de virtuele hand terug naar zijn originele positie. Deze techniek zorgt ervoor dat het voor de gebruiker intuïtief is om objecten te selecteren en manipuleren. Toch lost het ook een aantal beperkingen van andere interactietechnieken op. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om objecten op alle afstanden te selecteren.

2.4 Gaze interaction

Een andere methode om objecten op afstand te selecteren is gaze interactie. Mensen gaan voortdurend de wereld rondom hun ontdekken door met hun ogen te bewegen. Zonder dat de persoon het zelf beseft, is hij continu en zonder moeite aan het rondkijken. Uit onderzoek [11] blijkt dan ook dat mensen kijken naar hetgene waar ze mee bezig zijn. Het is voor een persoon dan ook heel natuurlijk om zowel te kijken naar de wereld als bepaalde handelingen uit te voeren. Daarom is het niet onlogisch om gaze voor verschillende toepassingen te gebruiken.

Gaze interactie is eerder al gebruikt in de context van menu's. De gebruiker gebruikt zijn ogen in plaats van een standaard cursor om een menu item te selecteren. [23]

2.4.1 Gaze selectie

Met gaze interactie wordt meestal bedoeld dat de ogen gebruikt worden om een object te selecteren. Een gebruiker dient dus alleen maar te kijken naar een object om het te selecteren. Dit zorgt ervoor dat dit een eenvoudige en efficiënte interactiemethode is. Doordat de ogen enkel gemaakt zijn om dingen waar te nemen, is er geen natuurlijke manier om een selectie te bevestigen. Indien er geen manier is om een selectie te bevestigen is gaze interactie ook gevoelig aan het midas touch probleem [20]. Dit wil zeggen dat de gebruiker per ongeluk andere objecten gaat selecteren. Er zijn verschillende manieren om dit op te lossen. Zo kan er een explicitie trigger voorzien worden zoals bijvoorbeeld een druk op een knop. Dit wordt ook wel gaze trigger genoemd. Het nadeel hiervan is dat de handen van de gebruiker niet vrij zijn.

Een andere vaak gebruikte mogelijkheid is gaze dwell. In deze methode wordt een dwell time gebruikt. Dit wil zeggen dat de gebruiker voor een bepaalde tijd naar het object moet kijken. Nadat de dwell time is afgelopen wordt de selectie bevestigd en het object waar de gebruiker naar kijkt geselecteerd.

2.4.2 Gaze manipulatie

Gaze interactie is voornamelijk bedoeld om objecten te selecteren. Toch zijn er ook een aantal interactiemethoden ontwikkeld waarmee het mogelijk is om object manipulaties uit te voeren. Door het feit dat de ogen een zintuig zijn die enkel dienen om dingen waar te nemen, dient dit gecombineerd te worden met andere interactiemethoden.

Uit een samenwerking tussen de universiteit van Liverpool en Melbourne [40] zijn een aantal object manipulatie technieken ontstaan met behulp van gaze interactie. Deze technieken combineren gaze selectie met een virtuele hand om de manipulatie uit te voeren.

GazeGrab

De eerste techniek genaamd GazeGrab, is een techniek die gaze selectie en de virtuele hand bijna letterlijk combineert. De gebruiker moet in eerste instantie via gaze selectie een object selecteren. Nadat de selectie

bevestigd wordt, door bijvoorbeeld een gesture of druk op een knop, teleporteert het object in de virtuele hand van de gebruiker. De gebruiker kan dan via de virtuele hand het object manipuleren.

RemoteHand

RemoteHand is zeer gelijkaardig aan GazeGrab. De gebruiker dient ook via gaze selectie een object te selecteren. In tegenstelling tot GazeGrab wordt het object niet geteleporteerd naar de virtuele hand, maar blijft het object op zijn oorspronkelijke positie. Het geselecteerde object volgt de rotatie en de beweging van de hand.

3DMagicGaze

De derde techniek is 3DMagicGaze. Deze techniek voorziet een onzichtbaar gebied rond de target nadat het via gaze selectie geselecteerd is. Wanneer het kijkpunt van de gebruiker in dit gebied valt, kan het object net zoals bij RemoteHand met de virtuele hand bediend worden. In het geval dat het kijkpunt van de gebruiker niet in het gebied valt en de gebruiker een beweging maakt met zijn hand, dan teleporteert het object naar het kijkpunt van de gebruiker.

ImplicitGaze

ImplicitGaze is een interactiemethode die gelijkaardig is aan 3DMagicGaze. Het enige verschil is dat er geen expliciete trigger is om te wisselen tussen het bedienen met de virtuele hand of het teleporteren naar het kijkpunt.

De universiteit van Tampere heeft een onderzoek [28] uitgevoerd om gazedwell, gazetrigger en ray-casting in een 3D omgeving met elkaar te vergelijken. Uit dit onderzoek bleek dat ray-casting beter is dan de twee gaze methodes. De gazedwell methode had de minste voorkeur en bleek ook trager te zijn dan de andere technieken. Zoals eerder vermeld is gaze ook gevoelig aan Midas Touch, hierdoor wordt voor de meeste toepassingen gaze niet gebruikt.

2.5 Menu interactie

Een andere belangrijke interactiemethode binnen virtual reality is menu interactie. Binnen virtual reality wordt er veel gewerkt met gesture interactie. Gesture interactie binnen VR is nog altijd niet optimaal. Hierdoor wordt er vaak nog een menu gebruikt om de gesture interactie gemakkelijker te maken [1].

Er zijn een aantal belangrijke factoren waarmee rekening gehouden moet worden om een menu op een goede manier te voorzien. Deze factoren zijn bijvoorbeeld de positie van het menu, de interactie met het menu en de manier waarop er haptic feedback voorzien wordt. Tegenwoordig zijn er al heel wat menu implementaties die met deze factoren op een unieke manier rekening houden.

2.5.1 Positionering menu

Eén van de eerste pogingen om menu's te gebruiken binnen een virtuele wereld is een bijna letterlijke vertaling van de standaard menu's die gekend zijn in een 2D interface. Vaak worden de menu's op een willekeurige plaats in de virtuele wereld gepositioneerd. In een onderzoek van het NASA research center [21] werd een standaard pull-down menu op een willekeurige plaats in de virtuele omgeving getoond. Dit menu kon bediend worden met de standaard ray-casting methodes. In deze implementatie staan de menu's los in de virtuele wereld, dit heeft als nadeel dat de menu's niet altijd vlot bereikbaar zijn. Dit kan opgelost worden door een menu vast te koppelen aan de gebruiker, zodat het altijd zichtbaar is.

Calaço et al. [13] heeft een touch menu gebruikt dat gepositioneerd werd in het midden van het gezichtsveld van de gebruiker. Dit menu is makkelijk bruikbaar voor de gebruiker omdat alles zichtbaar en gemakkelijk bereikbaar is voor de gebruiker. Aangezien het menu in het midden van het gezichtsveld van de gebruiker staat, verliest de gebruiker het zicht van de virtuele wereld. Een oplossing hiervoor zou zijn om het menu meer naar de rand van het gezichtsveld te plaatsen. Dit zorgt er wel voor dat het moeilijker is om het menu te gebruiken omdat niet alles duidelijk zichtbaar is. Binnen dit soort menu's ontbreekt er ook haptic feedback, wat het moeilijk maakt om te weten wanneer een menu actie uitgevoerd wordt.

2.5.2 TULIP menu's

Een manier om de menu's vast te koppelen aan de gebruiker is door de menu's aan de handen van de gebruiker te hangen. Er is een implementatie genaamd TULIP menu's [7] ontwikkeld met behulp van de pinch gloves. Aan elke vinger kan een menu item gekoppeld worden. Door middel van een pinch gesture kan een menu item geselecteerd worden. Een nadeel van deze methode is dat er slechts een beperkt aantal menu items zichtbaar kan zijn. Dit is opgelost in een tweede iteratie, door middel van een vast menu item te voorzien met meer opties. Indien dit menu item gekozen werd, kunnen de volgende set menu items getoond worden. Dit heeft nog steeds de beperking dat niet alle menu items gelijktijdig getoond kunnen worden.

2.5.3 Open Palm menu

Wanneer de handen of armen gebruikt worden als een menu zoals bijvoorbeeld bij de Tulip menu's, zijn er een aantal nadelen. In eerste instantie is het zo dat het aantal menu items gelimiteerd is. De handen van de gebruiker hebben maar een beperkte grootte, waardoor er spaarzaam moet omgegaan worden met de hoeveelheid menu items. Wanneer de gebruiker interactie heeft met het menu op zijn hand of arm, wordt zijn gezichtsveld grotendeels opgevuld met de hand of arm. Hierdoor is het moeilijk om het menu en virtuele objecten tegelijkertijd in beeld te hebben. Als gevolg hiervan is er een methode ontwikkeld waarbij het menu voor de hand van de gebruiker gepositioneerd wordt. Deze methode heet Open Palm Menu [1]. Doordat het menu voor de gebruiker getoond wordt, is het mogelijk om meer menu items te voorzien. Ook heeft de gebruiker meer controle over het renderen van het menu. Door de hand te bewegen wordt het menu verplaatst en door de handpalm te sluiten verdwijnt het menu. Hierdoor is het gemakkelijker om virtuele objecten te bekijken. Bij deze methode ontbreekt er wel haptic feedback. Volgens [37] is een belangrijk probleem deze afwezigheid van haptic feedback. Door de aanwezigheid van haptic feedback zou de gebruiker een veel realistischer gevoel ervaren.

2.5.4 Menu op het lichaam

Er bestaan ook implementaties die gebruik maken van het menselijke lichaam om interactie te hebben met het menu. Door het menu op het lichaam te plaatsen, is er standaard haptic feedback aanwezig. Dit is gebaseerd op de proprioceptieve vaardigheden van de mens. Proprioceptie betekent dat een persoon in staat is om een lichaamsdeel te kunnen aanduiden zonder dat hij ernaar kijkt. Mine [16] is een implementatie waarin proprioceptie gebruikt wordt om menu interactie te voorzien. De menu items worden altijd op dezelfde positie op het lichaam geplaatst. Door proprioceptie kan de gebruiker leren waar de menu items staan en kan hij zonder te kijken een menu bedienen. Ook heeft de gebruiker een frame of reference waarin hij kan werken. Door de vaste positie van de items op het lichaam kan de gebruiker ook blindelings het item selecteren. Deze methode is wel minder geschikt voor menu's met veel menu items omdat de precisie een probleem kan zijn.

2.5.5 Gesture gebaseerd menu's

Binnen virtual reality is het mogelijk om met gestures te werken in plaats van meer traditionele input methodes. Gestures laten het toe om snelle interactiemethoden te voorzien. Een probleem van gesture interactie is dat het in veel contexten niet heel sociaal acceptabel is [35]. In deze paper wordt er besproken dat het type gesture enorm afhangt van de context waarin deze gesture gebruikt wordt. Een belangrijk onderdeel binnen gesture gebaseerde interactie is het voorzien van logische gestures. Een goede mapping voorzien tussen de gestures en de actie is niet altijd even gemakkelijk.

Ook in traditionele 2D interfaces kan er gewerkt worden met gestures. Dit maakt het mogelijk om voor ervaren gebruikers een zeer efficiënte interactiemethode aan te bieden. Een voorbeeld van zo een 2D gesture menu is het marking menu [24]. Wanneer een marking menu geactiveerd wordt, verschijnt er een pop-up in de vorm van een pie menu. Dit pie menu kan ook uit meerdere niveaus bestaan. Een gebruiker zonder ervaring kan dan op een standaard manier het menu gebruiken, door zijn optie te zoeken. Een meer ervaren gebruiker kent de posities van de verschillende menu items die hij vaak gebruikt en kan dan door een snelle gesture het juiste item selecteren.

De moeilijkheid hier voor de ervaren gebruiker is om de mapping tussen de gesture en de actie te leren en te onthouden. Hiervoor is OctoPocus [4] ontwikkeld, OctoPocus is een dynamische guide die gebruiker helpt om gestures te leren, uit te voeren en onthouden. Dit wordt gedaan door feedforward en feedback

te combineren. Net zoals bij marking menu's wordt OctoPocus geactiveerd na een 'press en wait' gesture. Na de activatie wordt de feedforward en feedback continu geüpdatet tijdens de gesture van de gebruiker. Rond de cursor van de gebruiker worden alle mogelijke gestures getoond. Wanneer de gebruiker dan een bepaalde gesture kiest, verdwijnen de paden van de gestures die de gebruiker waarschijnlijk niet wil uitvoeren. Verder gaat OctoPocus voortdurend de dikte van de paden van de gestures updaten, dit toont de gebruiker welke gestures het systeem herkent.

2.5.6 Fitt's law

In 1954 heeft een psycholoog genaamd Paul Fitt [15] onderzoek gedaan naar het motorsysteem van de mens. In het onderzoek vond hij dat de tijd die nodig is om naar een target te bewegen afhankelijk is van de afstand en de grootte van de target. Dit komt er dus op neer dat hoe groter de afstand en hoe kleiner de target, hoe langer het duurt vooraleer de gebruiker de target bereikt. Dit is ook wel bekend als Fitt's law.

Onderzoekers zoals Card et al. [10] hebben aangetoond dat de performantie van virtual pointing met bijvoorbeeld een muis ook gemodelleerd kan worden met behulp van Fitt's law. Het verschil ligt erin dat virtual pointing niet gelimiteerd is door fysieke beperkingen en dat het mogelijk is om betere resultaten te krijgen.

2.5.7 Beating Fitt's law

Er is een paper gepubliceerd door Balakrishnan et al. [3] waarin er verschillende methodes beschreven zijn om Fitt's law te verbeteren. In deze paper worden de mogelijke verbeteringen opgedeeld in een aantal categorieën op basis van de manier waarop ze Fitt's law verbeteren. De eerste manier is om de afstand tot de target te verkleinen. De tweede manier is om de target te vergroten. Tot slot de derde manier: een combinatie van de vorige twee categorieën.

Een bekend voorbeeld is om in plaats van een standaard linear menu een pie menu te gebruiken. Door het feit dat alle menu opties rondom de cursor staan, wordt de afstand tot elk menu item geminimaliseerd. Een andere implementatie is de areacursor. Het gebied van de cursor wordt vergroot waardoor het gemakkelijker wordt om een target te selecteren.

Gelijkaardige oplossingen kunnen ook in virtual reality gebruikt worden om het gebruik van het virtuele menu te kunnen optimaliseren.

2.6 Combinatie interactiemethoden

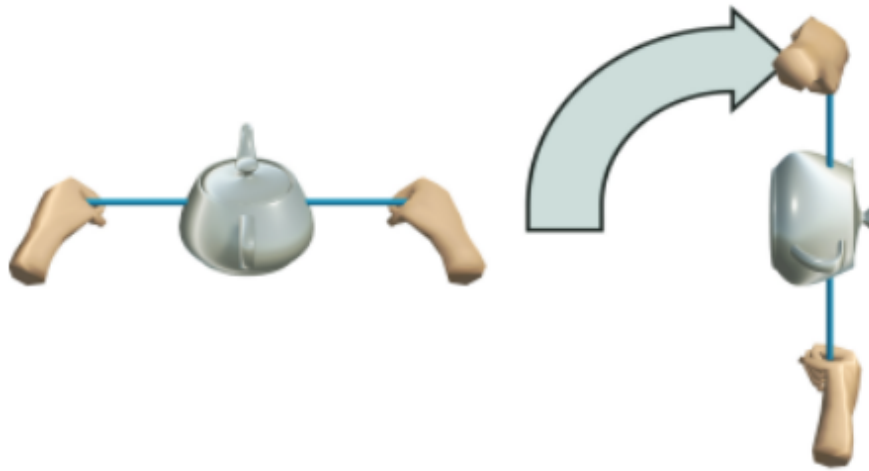
De interactiemethoden binnen virtual reality worden vaak gebaseerd op bestaande metaforen, zoals de virtuele hand. Ook is het vaak zo dat een bepaalde interactiemethode slechts gefocust is op één bepaalde interactietechniek. Gaze interactie is zo bijvoorbeeld enkel bedoeld om objecten te selecteren. Toch zijn er een aantal technieken die gebaseerd zijn op metaforen en toch meerdere interactietechnieken ondersteunen, zoals bijvoorbeeld de handlebar en smartpin.

2.6.1 Handlebar

Een eerste metafoor is de handlebar [36]. Dit is een mid-air techniek die gebaseerd is op een situatie waarbij er een staaf door de objecten steekt. Het object hangt vast aan deze staaf waardoor de object manipulaties nu op deze virtuele staaf uitgevoerd kunnen worden. Beide handen van de gebruiker zijn nodig om het object te manipuleren. Elke hand neemt een uiteinde van de staaf vast.

Uit onderzoek blijkt dat deze techniek intuïtief is voor de gebruikers, er is namelijk een goede semantische mapping met de echte wereld. Zo wordt bijvoorbeeld de handlebar vastgenomen met beide handen om een object manipulatie uit te voeren. Om de manipulatie te stoppen kan de handlebar gewoon losgelaten worden.

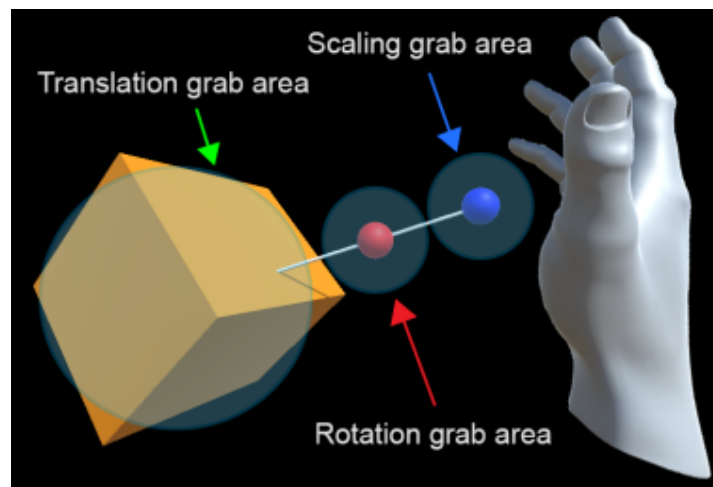
Doordat deze interactiemethode een mid-air techniek is, zorgt dit ook voor vermoeide armen bij langdurig gebruik. Ook kan de rotatie soms moeilijk verlopen als de armen van de gebruiker gekruist moeten worden.



Figuur 2.6: Voorbeeld van de handlebar [36] interactietechniek. Deze afbeelding toont hoe de handlebar vastgenomen moet worden en hoe een rotatie uitgevoerd kan worden.

2.6.2 Smartpin

De handlebar is een interactiemethode waarin de beide handen van de gebruiker nodig zijn. Er bestaan ook technieken die ervoor zorgen dat de gebruiker maar één hand nodig heeft. Een voorbeeld hiervan is Smartpin [9]. Smartpin is een 3D widget die eruit ziet als een naald met verschillende handvaten. Een voorbeeld wordt getoond op figuur 2.7.



Figuur 2.7: Voorbeeld van de smartpin interactietechniek. De actie wordt geselecteerd door het overeenkomstige handvat vast te nemen.

De gebruiker moet één van de gebieden vastnemen om de actie te activeren. Na activatie wordt de pin onzichtbaar en wordt er visuele hulp getoond afhankelijk van de gekozen actie. Door middel van de drie verschillende handvaten is het voor de gebruiker gemakkelijk om elke actie uit te voeren. Het grootste voordeel van deze techniek is dat het bruikbaar is met slechts één hand.

2.6.3 World in miniature

World in miniature [38] is een interactietechniek waarbij er een miniatuurversie van de virtuele wereld getoond wordt. Deze miniatuurversie geeft een andere kijk op de virtuele wereld. De gebruiker kan de objecten manipuleren met behulp van deze miniatuurversie of door directe manipulatie.

2.7 Haptic feedback

Om realistische interactie te hebben is het belangrijk dat er haptic feedback wordt voorzien.

2.7.1 Active haptics

In veel virtual reality applicaties wordt er nog steeds een controller gebruikt om interactie te hebben met de virtuele wereld. Ook op deze manier kan er haptic feedback voorzien worden. Wanneer de gebruiker een object probeert vast te nemen kan de controller bijvoorbeeld trillen. Dit heeft natuurlijk als beperking dat er geen onderscheid kan gemaakt worden tussen het vastnemen van objecten met verschillende vormen en texturen.

NormalTouch en TextureTouch [5] proberen dit op te lossen. NormalTouch gaat de oppervlakte van de objecten simuleren met behulp van een beweegbaar platform. TextureTouch is gelijkaardig maar gebruikt in plaats van een beweegbaar platform een aantal pinnen om de oppervlakte voor te stellen. Door deze technologieën kunnen de gebruikers veel accurater de vorm van een virtueel object waarnemen. De grootste beperking ligt bij de vorm van de controllers. Deze zijn nog te complex en te groot om goed te kunnen gebruiken.

Een andere gelijkaardige oplossing is de cyberglove [14]. Dit is een handschoen met verschillende sensoren aan elke vinger en aan de handpalm. Deze sensoren kunnen voor haptic feedback zorgen. Het voordeel van deze handschoenen is dat de gebruiker geen controllers meer vast moet nemen en zijn handen kan gebruiken tijdens de interactie.

2.7.2 Passive haptics

Een andere mogelijkheid om haptic feedback te voorzien, is door passive haptics. Dit zijn fysieke props in de echte wereld die overeenkomen met de virtuele objecten. Deze methode kan een voor een realistisch gevoel zorgen. Helaas is het natuurlijk niet haalbaar om voor elk object in de virtuele wereld een passieve prop te voorzien in de echte wereld. Daarom is er een manier voorzien om passieve props te kunnen hergebruiken. Dit wordt ook wel haptic retargeting genoemd [2].

Haptic retargeting gaat ervoor zorgen dat er slechts één fysieke prop voorzien moet worden, voor meerdere virtuele objecten. Dit wordt gedaan door de perceptie van de mens te manipuleren. Er zijn hiervoor drie manieren ontwikkeld. De eerste methode, genaamd body warping, gaat de virtuele representatie van de armen manipuleren. Wanneer de gebruiker het echte object aanraakt, wordt de virtuele arm gemanipuleerd zodat deze ook een virtueel object aanraakt. World warping is de tweede methode en gaat in plaats van de virtuele arm, de virtuele wereld manipuleren zodat het virtuele object en echte object overeenkomen. De laatste methode hybrid warping is een combinatie van body en world warping om een beter resultaat te geven.

De belangrijkste innovatie van haptic retargeting is dat er slechts één fysieke prop nodig is om meerdere virtuele objecten voor te stellen. Het is wel zo dat de er nog een beperking is op de vorm van het fysieke object. Als er een kubus als fysieke prop gebruikt wordt, maar de gebruiker wil in de virtuele wereld een bal vast nemen, kan de immersie doorbroken worden. Er bestaat een oplossing [41] waarbij kleine robots in real time het fysieke object samenstellen door middel van kleine magnetische kubussen. Deze implementatie zorgt ervoor dat elke vorm kan voorgesteld worden in de fysieke wereld. Doordat de fysieke objecten in real time worden samengesteld, is er een delay vooraleer de gebruiker het fysieke object kan gebruiken.

Een andere beperking van haptic retargeting, is dat in de uitwerking de fysieke prop altijd op dezelfde positie staat. Voor interactieve virtuele omgevingen is dit geen ideale oplossing. Een manier om dit op te lossen is door gebruikt te maken van robots om de fysieke props mee te laten bewegen. Een voorbeeld hiervan is VRHapticDrones [19]. Dit is een systeem waarbij dat er drones worden gebruikt om haptic feedback te voorzien. De drones worden zo gepositioneerd dat ze haptic feedback kunnen voorzien wanneer dat de gebruiker iets wil aanraken. Door het gebruik van drones is ook het wel zo dat de vorm niet altijd overeenkomt.

Roomshift [39] is een uitwerking die gebruik maakt van robots op grotere schaal. Roomshift zorgt ervoor dat de virtuele ruimte gesimuleerd wordt in de echte wereld. Roomshift bestaat uit een aantal robots die meubels en muren kunnen verplaatsen. Zo krijgt de gebruiker het gevoel dat hij echt in de virtuele wereld aanwezig is.

Hoofdstuk 3

Discussie interactiemethoden

Zoals blijkt uit de literatuurstudie uit het vorige hoofdstuk zijn er heel wat verschillende mogelijkheden om interactie te hebben met de virtuele omgeving. In de meeste gevallen zijn de interactiemethoden gebaseerd op een bepaalde metafoor zoals bijvoorbeeld de virtuele hand of virtual pointing. Ook is er onderzocht hoe interactie met een menu gebeurt in virtual reality. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste voor- en nadelen van deze technieken besproken. Hieruit kan er dan afgeleid worden op welk gebied de interactie in VR nog verbeterd kan worden. Er wordt vooral gefocust op de mogelijke verbeteringen voor een VR menu systeem.

3.1 Probleem

In deze sectie worden de problemen van virtual reality interactie, waarvoor er in dit onderzoek een oplossing wordt gezocht, besproken.

3.1.1 Algemene interactie

De virtuele hand is binnen virtual reality één van de meest natuurlijke interactiemethoden. Dit is een ideale manier om met virtuele objecten interactie te hebben. De gebruiker kan de objecten manipuleren zoals hij dit in de echte wereld ook zou doen. Hierdoor is de interactie voor de gebruiker zeer natuurlijk, maar de beperkingen van de echte wereld worden ook overgenomen.

Een groot voordeel van VR is dat de interactiemethoden niet gelimiteerd moeten zijn zoals in de echte wereld. Een grote beperking van de virtuele hand is bijvoorbeeld dat de objecten binnen handbereik moeten zijn. Zoals in de literatuurstudie vermeld, zijn er een aantal technieken ontwikkeld die dit probleem oplossen. Dit zijn dan bijvoorbeeld de arm-extension of virtual pointing technieken. Deze technieken zijn vaak niet in elke context even bruikbaar. Ook is men bij bijvoorbeeld de arm-extension techniek afhankelijk van controller input, wat het realistisch gevoel kan verminderen.

3.1.2 Menu interactie

Er wordt ook nog volop onderzoek gedaan naar het gebruik van menu's in virtual reality. Een eerste belangrijke vraag is waar het menu gepositioneerd moet worden. Hier zijn verschillende opties voor die elk hun voor- en nadelen hebben. Zo kan het menu bijvoorbeeld op een plek in de virtuele omgeving of op een vaste plek in het gezichtsveld van de gebruiker geplaatst worden. Het menu plaatsen in het gezichtsveld van de gebruiker kan als storend ervaren worden, daarom wordt er vaak voor gekozen om het menu in de virtuele wereld te plaatsen. Dit heeft als nadeel dat het menu geen vaste positie heeft. Dit is voor de gebruiker minder efficiënt om het menu te gebruiken. In het slechtste geval staat het menu aan de andere kant in de virtuele ruimte, waardoor de gebruiker niet snel aan het menu kan. Een andere mogelijkheid is om het menu vast te koppelen aan de controller. Hierdoor staat het menu altijd op dezelfde relatieve positie van de gebruiker en is het altijd bereikbaar. Door het menu aan de controller te koppelen moet de gebruiker opnieuw zijn twee handen gebruiken om het menu te bedienen. Dit heeft als gevolg dat de gebruiker ook de focus op de hoofdactie verliest.

Verder is de manier waarop men interactie heeft met het menu ook een belangrijke factor. Vaak wordt er gekozen om via virtual pointing interactie te hebben met het menu. Wanneer de gebruiker veel of langdurig interactie heeft met een menu kan dit vermoeiend worden. Ook is virtual pointing niet altijd even accuraat.

Een andere manier is om gaze te gebruiken om interactie te hebben met het menu. Net zoals bij virtual pointing kan het menu op een afstand gepositioneerd zijn. Ook zijn de nadelen gelijkaardig aan die van virtual pointing. Gaze selectie is ook niet altijd even accuraat, zeker wanneer het menu op een afstand gepositioneerd is.

Uit een onderzoek [30] blijkt dat de gebruiker van nature kijkt naar het object waar hij mee bezig is. Hierdoor zijn virtual pointing en gaze interactie niet geschikt als men heel efficiënte en snelle acties wil uitvoeren in VR.

Tot slot zijn er dan ook nog systemen ontwikkeld waarbij het persoonlijke lichaam gebruikt wordt om het menu op te tonen, zoals bijvoorbeeld palm menu. Bij deze toepassingen wordt er vertrouwd op proprioceptie om het juiste menu item te selecteren. Ook bij dit soort implementaties kan de accuraatheid een rol spelen.

3.2 Oplossing

In deze thesis is het de bedoeling om een menu systeem te voorzien dat deze problemen probeert op te lossen.

3.2.1 Doel

Het doel van dit menu systeem is om ervoor te zorgen dat de gebruiker op een gemakkelijke en snelle manier interactie kan hebben met een menu. Het menu moet zo gepositioneerd worden dat de gebruiker zonder te kijken een menu item kan selecteren. Zo kan hij gefocust blijven op zijn andere taken. Ook is het de bedoeling dat de gebruiker snel genoeg een menu item kan selecteren, zodat de de hoofdactie niet lang onderbroken wordt. Ten slotte wordt er ook verwacht dat het niet vermoeiend is om het menu te gebruiken.

Een van de meest voorkomende acties binnen virtual reality zijn object manipulaties. Zoals eerder vermeld zijn de belangrijkste object manipulaties: translatie, rotatie en schalen. Wanneer de gebruiker bijvoorbeeld een object wil verplaatsen, wordt er een combinatie van de verschillende acties gebruikt. Om efficiënt te kunnen werken is het belangrijk dat het wisselen tussen de verschillende acties snel kan gebeuren. Soms is het doel om een object nauwkeurig op een bepaalde positie te plaatsen. Ook hiervoor zijn de verschillende object manipulaties nodig. De nauwkeurigheid kan verbeterd worden door extra opties te voorzien voor de standaard object manipulaties. Zo kan de dimensie voor de manipulatie gelimiteerd worden of de snelheidsfactor verhoogd of verlaagd worden. Dit kan ook door extra menu items te voorzien.

Door een menu te positioneren rondom de gebruiker, kan de gebruiker een menu item selecteren door er naar toe te bewegen met zijn arm. Een ervaren gebruiker leert de posities van de verschillende menu items kennen en kan vervolgens vlot wisselen tussen de gewenste acties.

3.2.2 Positie

In eerste instantie moet er beslist worden waar het menu gepositioneerd wordt. Zoals eerder al vermeld, wordt er vaak gekozen om het menu op een vaste plaats in de virtual reality omgeving te plaatsen. Deze manier zorgt ervoor dat wanneer de gebruiker zich verplaatst of roteert, het menu niet altijd binnen bereik of zichtbaar is. Indien er veel interactie nodig is met een menu, kan dit voor inefficiënte interactie zorgen. Daarom is het belangrijk dat er voor gezorgd wordt dat het menu altijd binnen bereik is van de gebruiker.

Een relatief simpele manier om het menu altijd binnen bereik te hebben, is om het menu altijd op een vaste afstand van de gebruiker te plaatsen. Daarom is er voor gekozen om de ruimte rondom de gebruiker optimaal te benutten.

Doordat het menu rondom de gebruiker geplaatst wordt, kan het menu de interactie belemmeren. Het is belangrijk dat het menu geen andere objecten bedekt. Dit kan op verschillende manieren opgelost

worden. Een eerste oplossing hiervoor is dat het menu pas geactiveerd wordt na een expliciete trigger zoals bijvoorbeeld een druk op een knop. Dit zorgt voor een extra stap vooraleer de gebruiker het menu kan gebruiken, waardoor de interactie minder efficiënt is. Een andere oplossing hiervoor zou zijn dat het menu onzichtbaar gemaakt wordt. Door het menu onzichtbaar te maken, moet de gebruiker de positie en actie van de verschillende menu items leren. Ook hier is het belangrijk dat de gebruiker accuraat een menu item kan lokaliseren zodat er geen verkeerde acties worden uitgevoerd. Er wordt verwacht dat de mensen dit accuraat kunnen doen op basis van de proprioceptie vaardigheden van de mens. Om dit zeker te weten moet er onderzocht worden hoe accuraat een persoon is, in het wijzen naar een onzichtbaar target.

3.2.3 Interactie

Verder moet er ook bepaald worden hoe de gebruiker interactie heeft met het onzichtbare menu. Zoals eerder vermeld wordt er vaak gekozen voor pointer interactie met een menu. Dit kan handig zijn indien het menu op een willekeurige plaats gepositioneerd wordt. Ook dit is niet altijd even gemakkelijk bruikbaar, als het menu ver van de gebruiker is gepositioneerd, kan het moeilijk zijn om accuraat het juiste menu item te selecteren. Het pointeren kan voor de gebruiker na lange tijd vermoeiend worden. Ook is het zo dat wanneer de gebruiker met pointing een menu item wil selecteren, hij zich volledig moet focussen op het pointeren. Zo verliest hij de aandacht met zijn andere acties binnen virtual reality.

De bedoeling van de nieuwe interactiemethode is dat de gebruiker op een snelle manier, zonder de focus te verliezen, een menu item kan selecteren. De menu items worden rondom de gebruiker geplaatst, om een menu item te activeren moet de gebruiker het menu item aanraken met zijn virtuele hand.

In deze interactiemethode is het belangrijk dat de gebruiker met een vlotte en snelle beweging naar een menu item kan bewegen. Indien de gebruiker bijvoorbeeld de actie wil wisselen van rotatie naar transformatie, kan hij door zijn hand te bewegen naar het menu item snel van actie wisselen. Zoals in de literatuurstudie vermeld, is het zo dat de gebruiker kijkt naar het object waar hij mee bezig is. Doordat de menu items op een vaste positie rondom de gebruiker geplaatst zijn, kan de gebruiker een snelle beweging maken naar dit object.

Na verloop van tijd wordt er verwacht dat de gebruiker de positie en actie van elk menu item leert kennen. Indien dit het geval is, moet hij vervolgens enkel zijn arm naar het juiste menu item bewegen. Hierdoor kan de aandacht van de gebruiker op het object gefocust blijven, waardoor hij ook efficiënter gaat kunnen werken.

3.3 Studie

Vooraleer er een menu systeem ontwikkeld kan worden dat aan al deze eisen voldoet, moet er eerst een studie uitgevoerd worden. In deze studie moet er bepaald worden of de gebruikers in staat zijn om accuraat een onzichtbaar menu item te selecteren.

Het menu wordt rondom de gebruiker gepositioneerd, hierdoor kan de gebruiker op elk moment het menu gebruiken. Door het menu op deze manier te positioneren kan de gebruiker met zijn handen het gewenste menu item selecteren. Het is de bedoeling dat de menu items onzichtbaar zijn zodat deze niet storend zijn voor de gebruiker. Dit heeft als gevolg dat het voor de gebruiker veel moeilijker is om het juiste menu item te selecteren. In de studie is het dan de bedoeling om na te gaan hoe accuraat een gebruiker naar een onzichtbaar menu item kan wijzen. Indien de gebruiker niet accuraat naar een menu item kan wijzen, is het niet mogelijk om een menu te voorzien waarbij de ruimte rondom de gebruiker benut is. Bovendien kunnen de resultaten van de test meer inzicht geven over eigenschappen van individuele targets. Bijvoorbeeld, de precisie van individuele zones of de precisie van de dominante hand ten opzicht van de niet-dominante hand.

Verder moet er ook bepaald worden of de interactie niet te vermoeiend is voor de gebruiker. Om een menu item te selecteren, moet de gebruiker zijn arm naar het menu item bewegen. Indien de gebruiker dit vaak moet doen kan dit vermoeiend zijn voor de gebruiker. Daarom moet er bestudeerd worden hoe vermoeiend het is om vaak naar een menu item te wijzen.

Ten slotte is het ook belangrijk dat de gebruiker snel genoeg een menu item kan selecteren. Zodat de gebruiker snel verder kan met zijn andere taken en zijn focus niet verliest. In het volgende hoofdstuk wordt beschreven hoe de studie wordt uitgevoerd.

Hoofdstuk 4

Studie 1: mid-air targets

In dit onderdeel wordt er een studie beschreven waarin er onderzocht wordt hoe snel en accuraat een persoon herhaaldelijk naar mid-air targets kan pointen. Daarnaast wordt er nagegaan hoe vermoeiend dit is voor de gebruiker indien hij deze handeling meermaals moet uitvoeren. De resultaten van de studie dienen niet enkel om te bepalen of een gebruiker in staat is om herhaaldelijk een mid-air target te bereiken. De resultaten worden bijvoorbeeld ook gebruikt om te bepalen op welke manier de targets het best gepositioneerd kunnen worden.

4.1 Wat wordt er onderzocht?

In deze studie willen we onderzoeken of de ruimte rondom de gebruiker op een optimale manier gebruikt kan worden in virtual reality applicaties. Om deze ruimte optimaal te kunnen gebruiken, moet er onderzocht worden met welke precisie en snelheid een gebruiker meermaals een mid-air target kan bereiken. Ook is het belangrijk om te weten hoe vermoeiend bepaalde bewegingen zijn om te bepalen of het praktisch is om dit te gebruiken voor een menu implementatie.

Voor het gebruik van mid-air gestures is het gewenst dat de gebruiker met een vlotte en efficiënte beweging een mid-air target kan selecteren. Daarom is er gekozen voor een combinatie van precisie en snelheid omdat deze twee gebalanceerd moeten zijn. Indien er enkel gekozen wordt voor precisie, kan de gebruiker veel tijd nemen om de targets te selecteren met als gevolg dat hij heel nauwkeurig is. In het andere geval, als er gekozen wordt voor snelheid, kan de gebruiker proberen om met een hoge snelheid de targets te selecteren, maar hierdoor gaat de precisie waarschijnlijk lager zijn. Hieruit volgt een eerste belangrijke vraag: met hoeveel precisie en welke snelheid kan een persoon naar mid-air targets grijpen?

De precisie en snelheid hangen natuurlijk ook af van de hoeveelheid en grootte van de targets. Ook tussen de hoeveelheid en grootte moet een balans gevonden worden. Als een individuele target te groot is, is het voor de gebruiker niet moeilijk om de target te bereiken. De gebruiker moet dan enkel in de juiste richting wijzen om de target te raken. In het andere geval, wanneer de target te klein is het veel moeilijker om de exacte locatie van de target te bereiken. Er is een gelijkaardige redenering voor de hoeveelheid targets. Als er veel targets zijn, is het moeilijker om nauwkeurig de juiste target te selecteren. De hoeveelheid targets hangt natuurlijk nauw samen met de grootte van de targets. Als de targets groter zijn, kunnen er vanzelfsprekend minder targets zijn, maar hierdoor zijn ze wel gemakkelijker te bereiken. Als de targets daarentegen relatief klein zijn, kunnen er meer targets voorzien worden. In dit geval is het dan wel weer moeilijker om met een hoge precisie de juiste target te selecteren.

Verder is het ook zo dat de precisie en snelheid afhankelijk kunnen zijn van de dominante of niet-dominante hand van de gebruiker. Wanneer de gebruiker zijn dominante hand gebruikt, kan hij waarschijnlijk veel preciezer en sneller zijn dan wanneer hij zijn niet-dominante hand gebruikt.

Tot slot zijn de precisie en snelheid natuurlijk ook afhankelijk van de positie en afstand van de targets. Indien de targets op een natuurlijke manier binnen handbereik gepositioneerd staan, kan dit een positieve invloed hebben op de resultaten.

4.2 Methodologie

Deze sectie beschrijft hoe de studie is uitgevoerd.

4.2.1 Deelnemers

Aan de studie hebben 15 personen deelgenomen. De studie vond plaats in het EDM op de universitaire campus in Diepenbeek. De deelnemers hebben allemaal een leeftijd tussen 18 en 50 jaar. Van de 15 deelnemers waren 12 personen rechtshandig en 3 personen linkshandig.

4.2.2 Apparatuur

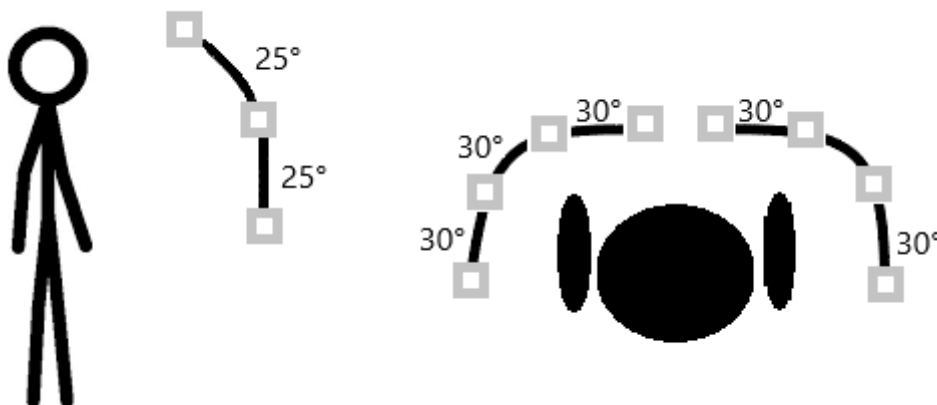
Voor de studie is er gebruik gemaakt van een standaard head mounted display met bijhorende controllers. De gekozen head mounted display is de Pimax 8Kx. In vergelijking met andere head mounted display's heeft de Pimax 8Kx een grotere field of view van 160 graden. Door de grotere field of view zijn er tijdens de training meer targets zichtbaar. Ook zorgt de grotere field of view voor een veel realistischere ervaring. De gebruikte controllers zijn de controllers die standaard worden geleverd bij de HTC Vive. De gebruiker moet tijdens de studie slechts één van de bijhorende controllers gebruiken.

4.2.3 Positionering targets

In deze studie is ervoor gekozen om voor elke hand twaalf targets te voorzien. De targets zijn opgedeeld in drie rijen en vier kolommen. Er is gekozen voor drie rijen omdat dit voor de gebruiker natuurlijk is om te wijzen naar een hoge, neutrale en lage rij. Voor de kolommen is er voor vier gekozen omdat drie kolommen te gemakkelijk leek en vijf kolommen te moeilijk. Indien er voor drie kolommen gekozen was, zouden de targets zo groot kunnen zijn dat hij bijna onmogelijk is om de targets te missen. In het andere geval als er vijf kolommen zouden zijn, zouden de targets meteen veel kleiner moeten zijn en zou het veel moeilijker zijn om accuraat een target te kunnen raken.

Er is gekozen om de targets te positioneren op een bol. De gebruiker bevindt zich op het middelpunt van de bol. Hierdoor worden de targets uniform verdeeld over de bol. Er is beslist om alle 24 targets te positioneren op de 180 graden van de cirkel die zich voor de gebruiker bevindt. Hierdoor moet de gebruiker geen al te moeilijk bewegingen maken en is elke target met een simpele beweging bereikbaar. In figuur 4.1 wordt visueel weergegeven hoe de targets rond de gebruiker gepositioneerd zijn.

Tussen de kolommen onderling is er telkens een ruimte van 30 graden gelaten. Hierdoor worden de targets mooi gelijk verdeeld op hun kwart van de cirkel. Tussen de rijen onderling is er een ruimte van 25 graden voorzien.



Figuur 4.1: Visualisatie van de manier waarop de targets gepositioneerd zijn. Links toont de verdeling van de targets in de hoogte. Rechts toont de verdeling van de targets rondom de gebruiker.

De grootte van de bol wordt berekend op basis van de lengte van de gebruiker zijn arm. Voor elke deelnemer moet de armlengte dus bepaald worden. Dit wordt gedaan met behulp van de head mounted

display en de controller. Op het begin van de studie, wordt aan de deelnemer gevraagd om de headset op te zetten en de controller vast te nemen. Vervolgens moet de deelnemer zijn arm strekken en op een knop op de controller klikken. Hierdoor wordt de afstand tussen de controller en de headset gemeten, wat overeenkomt met de armlengte. Dit gebeurt op het begin van elke studie. Van de armlengte wordt 5cm afgetrokken, zodat alle targets vlot bereikbaar zijn zonder dat de gebruiker zijn arm tot het uiterste moet strekken. Door de targets op deze manier te positioneren wordt er voor gezorgd dat elke target met een natuurlijke beweging vlot bereikbaar is.

4.2.4 Fases Studie

Elke deelnemer doorloopt per hand twee fases tijdens de studie: een training en test fase. De trainingsfase dient om de deelnemer vertrouwd te maken met de posities van de verschillende targets. De testfase wordt gebruikt om per target data te verkrijgen over de snelheid en precisie van elke deelnemer. Elke fase wordt per hand uitgevoerd. Na de eerste ronde in de testfase, krijgen de deelnemers de mogelijkheid om even te pauzeren.

Calibratie

Voor de trainingsfase kan beginnen, moet voor elke deelnemer de positie van de targets gecalibreerd worden. Aan de deelnemer wordt gevraagd om zijn hand voor zich uit te strekken en op de knop van de controller te drukken. Hierdoor wordt de afstand tussen de controller en de headset berekend. Dit komt ongeveer overeen met de afstand tussen de deelnemer zijn hand en zijn schouder. Deze afstand is nodig om de targets correct te positioneren voor iedere deelnemer. In de berekening voor het positioneren van de targets in een cirkelvorm wordt de afstand gebruikt, om er voor te zorgen dat voor elke gebruiker de targets op dezelfde relatieve afstand staan.

Trainingsfase

Het doel van de trainingsfase is om de gebruiker vertrouwd te maken met de posities van de verschillende targets. Om dit te doen, krijgen de deelnemers de instructie om drie keer naar elke target te wijzen. Wanneer de deelnemer denkt dat hij dicht genoeg is bij de target, moet hij op een knop op de controller drukken. Door de gebruiker handmatig te laten drukken, kan hij zelf bepalen wanneer hij denkt de target bereikt te hebben. Wanneer de gebruiker drukt, worden de nodige gegevens gelogd zoals bijvoorbeeld de afstand tussen de target en de hand van de gebruiker.

Het is belangrijk dat de deelnemers balanceren tussen snelheid en accuraatheid. Om dit te doen is er aan elke gebruiker gevraagd om met één vlotte beweging zo accuraat mogelijk te zijn. Ook werd er uitgebeeld wat voor een beweging de deelnemers moeten maken, zodat de deelnemers zeker weten wat de bedoeling was.

Er wordt met kleur gewerkt om het voor de deelnemer duidelijk te maken welke target hij moet aanduiden. Initieel wordt de huidige target blauw. Per keer dat de deelnemer naar de huidige target grijpt, verandert de kleur. De kleuren wisselen af tussen blauw, rood, oranje en groen. Dit om het duidelijk te maken hoeveel keer de deelnemer al naar de huidige target heeft geweest. Na drie keer naar de huidige target te wijzen, wordt deze dus groen en de volgende target blauw. Nadat de gebruiker drie keer naar elke target heeft geweest, doorloopt hij elke target nog één keer in een andere volgorde. Hierdoor zorgen we dat de gebruiker niet gewend is geraakt aan de eerste volgorde.

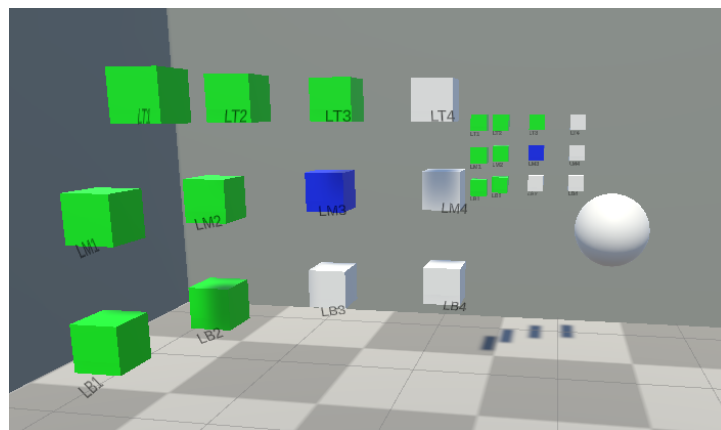
De gebruiker krijgt ook de instructie om na elke target terug naar rustpositie te gaan. De rustpositie is de armen terug op een natuurlijke manier langs het lichaam houden. Indien de gebruiker dit vergeet, wordt er in de virtuele wereld, een instructie getoond waarin vermeld wordt dat hij eerst naar rustpositie moet gaan. Deze instructie wordt voor de gebruiker op de muur getoond. Wanneer hij terug correct bezig is, verdwijnt deze instructie.

Nadat de deelnemer de trainingsfase heeft doorlopen en dus vertrouwd is geraakt met de locaties van de verschillende targets, begint de testfase. Om een beeld te krijgen van de trainingsfase wordt in figuur 4.2 een momentopname van de training getoond.

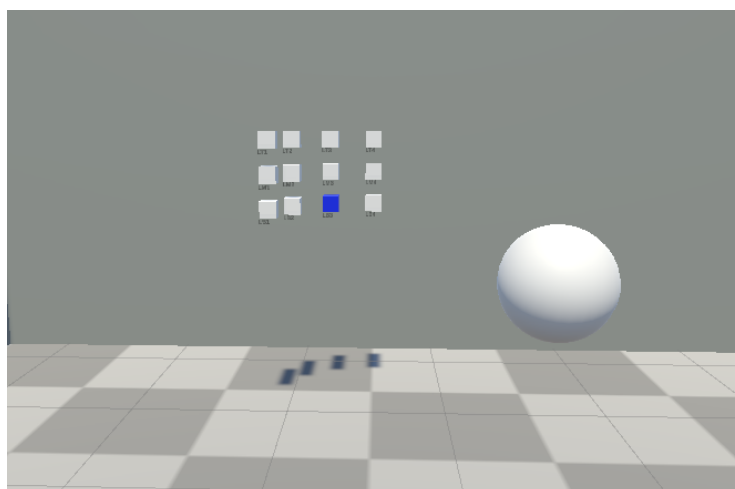
Testfase

De testfase is het belangrijkste gedeelte van de studie. Hierin wordt de data verzameld die nodig is voor de analyse. Net zoals in de trainingsfase wordt er aan de deelnemers gevraagd om naar een target te grijpen. De volgorde van de targets is voor elke deelnemer anders. Om het leereffecten tegen te gaan wordt voor elke deelnemer een random volgorde gegenereerd. De deelnemer dient minstens drie keer naar elke target te wijzen gedurende één testfase. De testfase zelf wordt voor elke hand drie keer uitgevoerd. Elke hand is afwisselend aan de beurt, om vermoeidheid tegen te gaan. Per testfase verandert de volgorde van de targets. De volgorde van de targets wordt compleet random gekozen om zo het leereffect en de vermoeidheid voor een bepaalde target te verminderen.

Tijdens de testfase zijn de targets rondom de deelnemer niet meer zichtbaar. Door de deelnemer eerst de trainingsfase te laten doorlopen, wordt er verwacht dat de deelnemer vertrouwd is geraakt met de positie van de targets. Om nu duidelijk te maken naar welke target de deelnemer moet grijpen, wordt er een soort miniatuurversie van de targets getoond in de virtuele omgeving. Deze miniatuur versie is ook opgedeeld in drie rijen en vier kolommen. De target waar de gebruiker moet naar wijzen wordt op de miniatuur versie met blauw aangeduid. Dit is zichtbaar in figuur 4.3. De derde keer dat een gebruiker een bepaalde target aanraakt, wordt de target met geel aangeduid in plaats van blauw. Het is dan de bedoeling dat de gebruiker een cijfer geeft tussen 1 en 5 over hoe vermoeiend die specifieke beweging was. Ook in de testfase moet de deelnemer na elke klik terug naar de rustpositie.



Figuur 4.2: Momentopname van een gebruiker terwijl deze persoon aan de trainingsfase bezig is. Vooraan worden de targets getoond, achteraan wordt een miniatuurversie van de targets getoond. De bol stelt de hand van de gebruiker voor.



Figuur 4.3: Momentopname van een gebruiker terwijl deze persoon aan de testfase bezig is. Achteraan wordt een miniatuurversie van de targets getoond. De bol stelt de hand van de gebruiker voor. De targets zijn nu onzichtbaar.

4.2.5 Structuur studie

Het verloop van de studie is voor elke deelnemer identiek. Elke deelnemer begon met de training van de linkerkant gevolgd door de eerste test van de linkerkant. Vervolgens werd er hetzelfde gedaan voor de rechterkant. Nadat de deelnemer de training en test een eerste keer heeft uitgevoerd voor de beide handen, is er een korte pauze en een korte vragenlijst. Tijdens de pauze mogen de deelnemers de headset even afnemen. Na de vragenlijst werd de test voor elke hand nog twee keer afwisselend uitgevoerd. De studie verloopt voor elke deelnemer als volgt:

- Links training
- Links test
- Rechts training
- Rechts test
- Vragenlijst en pauze
- Links test
- Rechts test
- Links test
- Rechts test

De testfase wordt door elke deelnemer drie keer per hand uitgevoerd. Door dit meerdere keren uit te voeren, is het ook mogelijk om effecten op lange termijn te zien. De testfase wordt afwisselend uitgevoerd per hand. Dit zorgt ervoor dat de gebruiker de tijd krijgt om zijn arm even te laten rusten, maar ook dat het leereffect vermeden wordt.

Een eerste mogelijk effect dat zichtbaar kan worden is wat er met de accuraatheid van de gebruikers gebeurt. Worden de deelnemers accurater door meermaals naar de targets te wijzen of verliezen ze accuraatheid omdat de targets niet meer zichtbaar zijn?

Een tweede parameter die kan veranderen is de vermoeidheid. Het zou kunnen dat het voor de deelnemers vermoeiend wordt om in een relatief korte periode vaak naar de targets te wijzen. Een andere mogelijkheid is dat de deelnemers de beweging gewoon worden en het minder vermoeiend wordt als ze vaker de targets aanraken.

Tijdens de studie wordt er continu gewisseld tussen de linkerhand en rechterhand. Hierdoor heeft elke hand één ronde de tijd om te rusten. Het is hierdoor ook mogelijk om na te gaan of de deelnemers de targets vlot kunnen blijven bereiken nadat ze even met de andere hand bezig zijn geweest.

4.2.6 Gemeten data

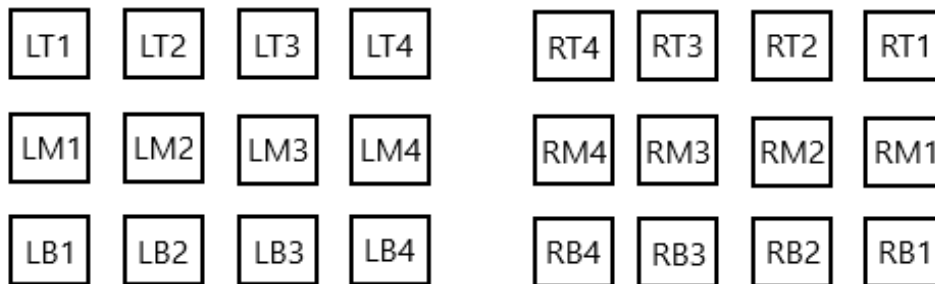
Tijdens de studie wordt er heel wat data gelogd. De belangrijkste gegevens die gelogd worden, hebben te maken met de vermoeidheid, accuraatheid en snelheid. Verder wordt er ook nog informatie gelogd over de target waar er naar gewezen is en in welke fase de deelnemer zich bevindt.

Elke keer als de gebruiker naar een target wijst en klikt wordt de volgende data gelogd.

- UserID: Dit is een random gegenereerd nummer om het mogelijk te maken om de verschillende deelnemers op een anonieme manier van elkaar te kunnen onderscheiden.
- Fase: De fase geeft aan of het om de trainingsfase of testfase gaat.
- Aantal keer in fase: Dit is een getal dat het aantal keer per fase per hand weergeeft.
- Links of rechts: Hiermee wordt duidelijk gemaakt of de data van de linkerhand of rechterhand is.
- Dominante hand: De dominante hand van de gebruiker wordt telkens meegelogd.
- Tijd: Het tijdstip waarop de klik plaats vond.
- Timespan: De tijd tussen het verlaten van de rustzone en het bereiken van de target.
- Targetnummer: Een nummer van één tot twaalf dat aangeeft over welke target het gaat.

- Targetnaam: Elke target heeft ook een naam gekregen aan de hand van volgend gegevens:
 - Links of rechts
 - Rij: Top, middle of bottom
 - Kolom: nummer van één tot vier

Een voorbeeld is LT1. Dit is de target aan de linkerkant, de bovenste rij (top) en de eerste kolom. In figuur 4.4 wordt een 2D afbeelding getoond van de verschillende targets met hun naam.



Figuur 4.4: Dit is een 2D projectie van de verschillende targets met hun namen.

- Aantal in huidige fase: Dit getal geeft weer hoeveel keer de gebruiker naar een bepaalde target heeft gewezen in een bepaalde fase.
- Afstand: De afstand tussen het middelpunt van de target en het middelpunt van de hand. De afstand wordt berekend in wereld coördinaten systeem van Unity.
- Progress: Dit geeft aan wanneer een nieuwe fase start of wanneer een fase bezig is.
- Vermoeidheidsscore: De gebruiker moet soms een score geven van één tot vijf over hoe vermoeiend het was om naar een specifieke target te wijzen.
- Coördinaten target: De wereld coördinaten van de target die de gebruiker moet raken.
- Coördinaten klik: De wereld coördinaten van de gebruiker zijn hand. Dit komt overeen met de plaats waar de gebruiker klikt.
- Coördinaten headset: De wereld coördinaten van de headset.
- X dimensie: Geeft voor de X dimensie of de gebruiker juist geklikt heeft of eventueel in welke richting de gebruiker er naast zat.
- Y dimensie: Geeft voor de Y dimensie of de gebruiker juist geklikt heeft of eventueel in welke richting de gebruiker er naast zat.
- Z dimensie: Geeft voor de Z dimensie of de gebruiker juist geklikt heeft of eventueel in welke richting de gebruiker er naast zat.
- Armlengte: De armlengte van de gebruiker zoals bepaald bij de calibratie.

Tijdens de pauze krijgt de deelnemer ook een aantal vragen. Deze vragen zijn meer gericht op de persoonlijke ervaring van de gebruiker. Er wordt bijvoorbeeld gevraagd hoe moeilijk hij het vond om naar onzichtbare targets te wijzen of hoe accuraat of vermoeiend hij denkt te zijn.

- Hoe moeilijk vond u het om de positie van de targets in te schatten op een schaal van 1 tot 5?
- Hoe vermoeiend was het voor uw dominante hand op een schaal van 1 tot 5?
- Hoe vermoeiend was het voor uw niet dominante hand op een schaal van 1 tot 5?
- Hoe accuraat denkt u dat u was met uw dominante hand op een schaal van 1 tot 5?
- Hoe accuraat denkt u dat u was met uw niet dominante hand op een schaal van 1 tot 5?
- Waren er targets die voor u moeilijk/onnatuurlijk te bereiken waren met uw dominante hand?

- Waren er targets die voor u moeilijk/onnatuurlijk te bereiken waren met uw niet dominante hand?
- Vond u de targets groot genoeg om op een vlotte natuurlijke manier te kunnen bereiken?

Door aan de deelnemer deze persoonlijke ervaringen te vragen is het mogelijk om te kijken of er een verband is tussen de effectieve resultaten en hetgeen de deelnemer zelf ervaart.

4.3 Analyse

Het doel van de analyse is om een beter inzicht te krijgen in de manier waarop gebruikers kunnen interageren met mid-air targets. Zo wordt er vooral gekeken naar de relatie tussen de snelheid, vermoeidheid en afstand.

In deze studie is de positie van de targets de independent variable. Voor elke gebruiker worden de targets op dezelfde relatieve positie geplaatst.

Er worden in deze studie drie dependent variabelen onderzocht.

- Snelheid: de snelheid tussen het verlaten van de rustzone en het bereiken van de target.
- Vermoeidheid: de deelnemers geven tijdens de studie een aantal keer een vermoeidheidsscore over hoe vermoeiend een specifieke beweging is.
- Afstand: de afstand tussen de positie van de target en de positie van de deelnemer zijn hand wanneer er op de controller wordt geklikt.

4.3.1 Hypotheses

De belangrijkste reden voor deze studie is om te achterhalen of de deelnemers in staat zijn om accuraat genoeg een target in mid-air kunnen bereiken.

Ook wordt er onderzocht of er een relatie is tussen de verschillende dependent variabelen.

- **H0:** Er is geen correlatie tussen de snelheid en de afstand wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H1:** Er is een correlatie tussen de snelheid en de afstand wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H0:** Er is geen correlatie tussen de snelheid en de vermoeidheid wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H1:** Er is een correlatie tussen de snelheid en de vermoeidheid wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H0:** Er is geen correlatie tussen de afstand en de vermoeidheid wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H1:** Er is een correlatie tussen de afstand en de vermoeidheid wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H0:** Er is geen correlatie tussen de training en de test op gebied van afstand en snelheid wanneer men naar een target probeert te grijpen.
- **H1:** Er is een correlatie tussen de training en de test op gebied van afstand en snelheid wanneer men naar een target probeert te grijpen.

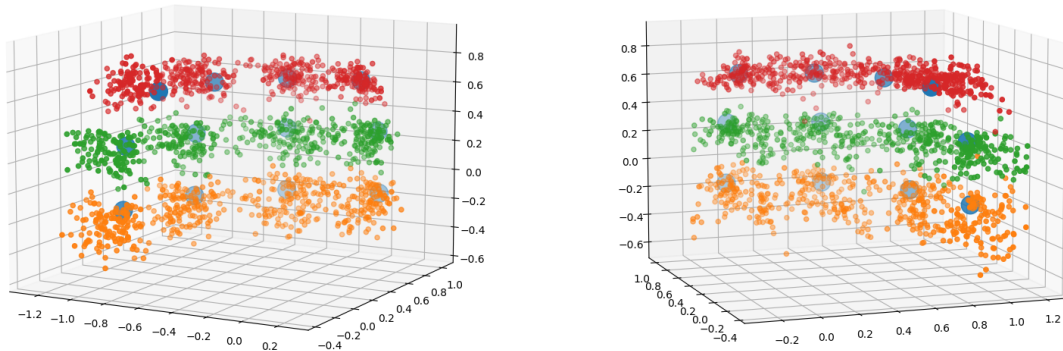
Naast het onderzoeken van deze hypotheses is er ook onderzoek gedaan naar andere trends binnen de data. Eén van de belangrijkste elementen van dit onderzoek is de positie van de targets. Het is natuurlijk de bedoeling dat de gebruikers vlot de targets kunnen bereiken. Daarom is er vooral gefocust op de afstanden tot de targets op zich.

Per target wordt er bepaald wat de gemiddelde afstand tot die target is. Verder wordt er ook gekeken naar waar de deelnemer klikt ten opzichte van de target. Dit in combinatie met de afstand geeft een goed beeld over de meest geschikte positie van de verschillende targets. Zo kan er gemakkelijk bepaald worden of de targets bijvoorbeeld op de juiste hoogte of diepte gepositioneerd staan.

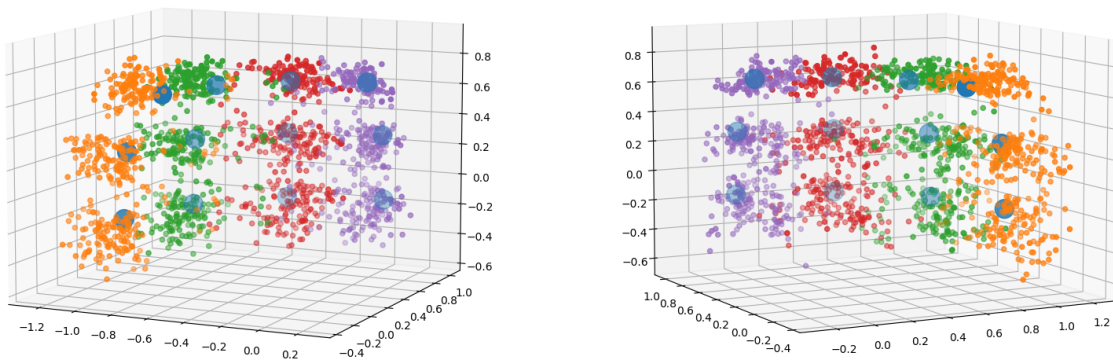
4.4 Resultaten

Om snel een beeld te krijgen van de resultaten van alle deelnemers, is er een 3D visualisatie gemaakt van alle resultaten van elke gebruiker. In een 3D scatterplot worden zowel de targets als elke klik van de gebruiker gevisualiseerd. Hierdoor is het mogelijk om snel een overzicht te krijgen over de accuraatheid van de deelnemers per target.

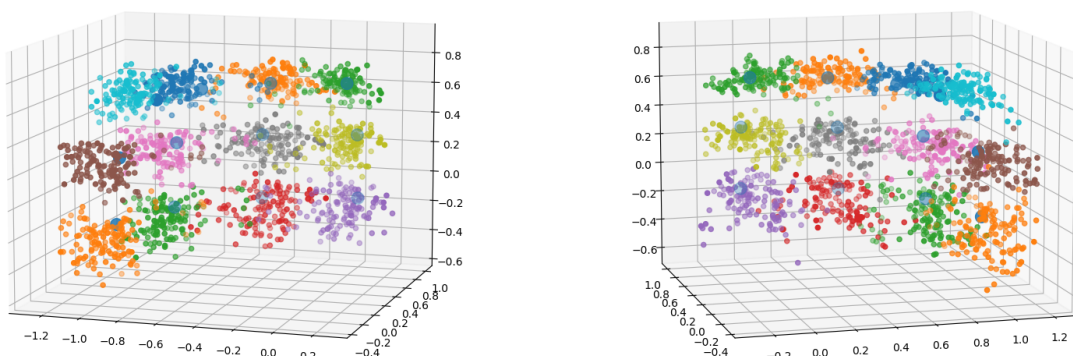
In eerste instantie zijn er een aantal varianten gemaakt van de 3D scatterplot. De eerste variant in figuur 4.5 toont de spreiding van de kliks per rij terwijl een andere variant in figuur 4.6 de spreiding per kolom weergeeft. Vervolgens is er ook een visualisatie 4.7 die de spreiding per target laat zien. Tot slot is er ook nog een visualisatie 4.8 die de gemiddelde klik per target weergeeft. Zo kan er nagegaan worden waar de deelnemers gemiddeld gezien drukken ten opzichte van de target.



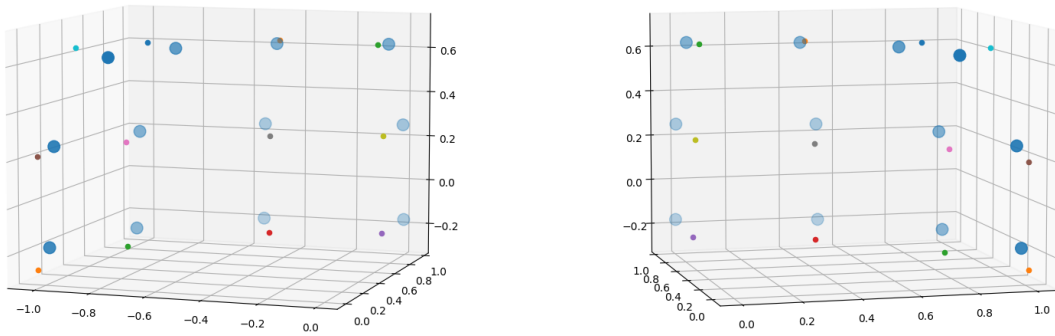
Figuur 4.5: Visualisatie van de klikpunten van alle deelnemers gegroepeerd per rij.



Figuur 4.6: Visualisatie van de klikpunten van alle deelnemers gegroepeerd per kolom.



Figuur 4.7: Visualisatie van de klikpunten van alle deelnemers gegroepeerd per target.



Figuur 4.8: In deze visualisatie worden alle klikpunten van de deelnemers uitgemiddeld per target.

In de eerste twee visualisaties is duidelijk te zien dat de gebruikers in staat zijn om de verschillende kolommen en rijen van elkaar te onderscheiden. Vooral bij de verdeling van de rijen is dit goed zichtbaar. Dit toont aan dat de deelnemers in staat zijn om in de hoogte minstens drie niveaus te onderscheiden. Ook bij de verdeling van de kolommen is dit fenomeen zichtbaar. Hier is er wel iets meer overlap tussen de verschillende kolommen. Vooral bij de twee buitenste kolommen is dit zichtbaar. Het grootste deel van de punten zijn wel goed per kolom verdeeld. Met behulp van deze twee visualisaties is dus wel te zien dat de deelnemers over het algemeen wel altijd in de juiste buurt zitten van de targets.

Om meer accurate resultaten te krijgen, moet de exacte afstand ten opzicht van de targets geanalyseerd worden. De afstand wordt altijd berekend vanaf het middelpunt van de target tot het punt waar de gebruiker geklikt heeft.

4.4.1 Afstand

In eerste instantie is er onderzocht of er een verschil is tussen de trainingsfase en de testfase. In de trainingsfase zijn de targets zichtbaar en tijdens de testfase zijn de targets onzichtbaar. Dit doet vermoeden dat de deelnemers tijdens de trainingsfase accurater moeten zijn dan tijdens de testfase.

In tabel 4.1 wordt per target de gemiddelde afstand getoond van de trainingsfase en de testfase. Door deze waarden met elkaar te vergelijken, valt het direct op dat de gemiddelde afstand per target van de trainingsfase veel lager ligt dan die van de testfase. Dit bevestigt het vermoeden dat de deelnemers accurater zijn wanneer de targets zichtbaar zijn. De gemiddelde afstand van de trainingsfase is 0.0428. Dit komt overeen met 4.28 cm. De gemiddelde afstand van de testfase ligt een stuk hoger op 0.185 wat overeenkomt met gemiddeld 18.5 cm. De targets zelf hebben een straal van 12.5 cm, dit wil dus zeggen dat de deelnemers tijdens de trainingsfase gemiddeld gezien altijd dicht bij het middelpunt van de target zitten. Bij de testfase is de afstand groter dan de grootte van de target wat dus wil zeggen dat de deelnemers er tijdens de test een beetje naast de target grijpen. Gemiddeld gezien grijpen de deelnemers dus 6 cm naast de target.

Vervolgens is het ook belangrijk om te weten of er een verschil is tussen de targets aan de kant van de dominante hand ten opzicht van de targets aan de niet-dominante hand. De gemiddelde afstand voor de dominante hand is 0.189 met een standaard afwijking van 0.059 terwijl dit voor de niet-dominante hand 0.182 met een standaardafwijking van 0.066 is. Dit toont dus aan dat de deelnemers met hun beide handen even goed de targets kunnen bereiken.

Natuurlijk is het ook belangrijk om te weten of er bepaalde targets zijn waar de deelnemers over het algemeen een slechtere score behalen. Tabel 4.1 maakt het mogelijk om de gemiddelde afstand per target te bekijken. Target LT4 heeft de laagste gemiddelde afstand van 0.142 terwijl target RB2 de hoogste gemiddelde afstand heeft van 0.216.

Om te controleren of er significante verschillen zijn tussen de targets is er een Welch Anova test uitgevoerd. Er is voor een Welch Anova test gekozen omdat er niet wordt voldaan aan de assumpties van de standaard Anova test. De Welch Anova test heeft een p-waarde van $6.366e-14$, wat duidelijk kleiner is dan de alfa waarde van 0.05. Hieruit kan besloten worden dat er significante verschillen zijn.

Via een Tukey test kan er dan bepaald worden tussen welke combinatie van targets er een significant verschil is. In figuur 4.9 worden alle paren met een significant verschil getoond. Hier is te zien dat enkel

Target	Afstand training	Afstand test
LB1	0.0489	0.200
LB2	0.0408	0.187
LB3	0.0359	0.194
LB4	0.0382	0.202
LM1	0.0539	0.183
LM2	0.0362	0.177
LM3	0.0354	0.173
LM4	0.0403	0.176
LT1	0.0619	0.199
LT2	0.0337	0.177
LT3	0.0325	0.166
LT4	0.0342	0.142
RB1	0.0462	0.211
RB2	0.0388	0.216
RB3	0.0442	0.208
RB4	0.0577	0.209
RM1	0.0470	0.188
RM2	0.0361	0.202
RM3	0.0414	0.191
RM4	0.0521	0.180
RT1	0.0564	0.180
RT2	0.0336	0.176
RT3	0.0375	0.160
RT4	0.0455	0.154
Gemiddelde	0.0428	0.185
Standaard afwijking	0.009	0.018

Tabel 4.1: Gemiddelde afstand per target tussen de training en de test.

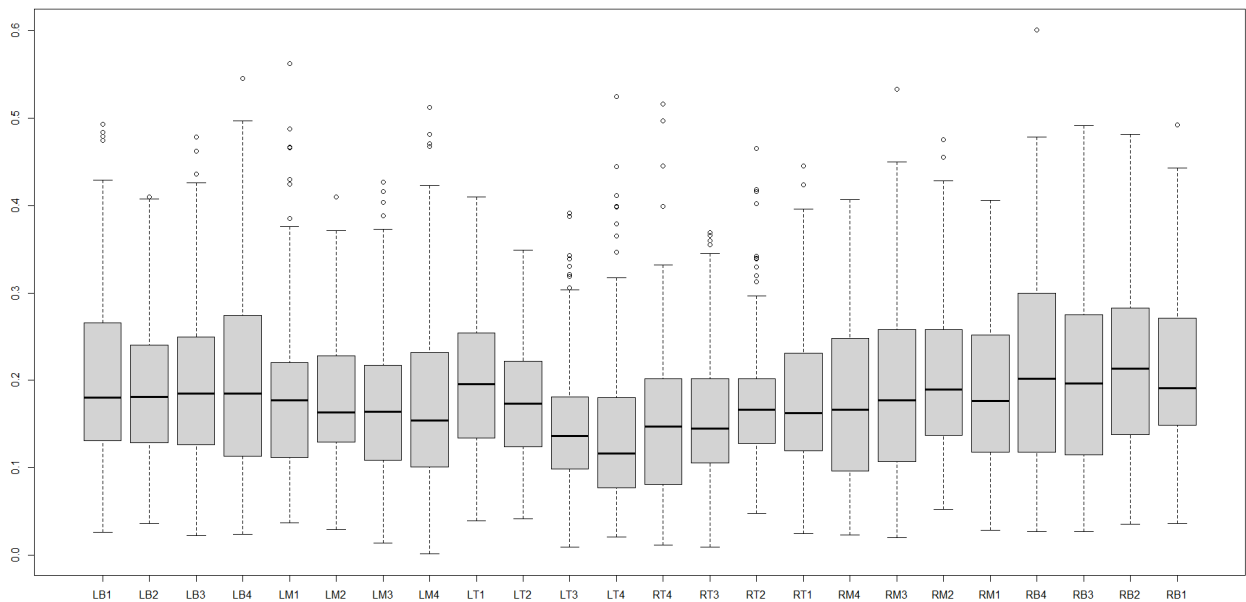
	LT3	LT4		RT3	RT4
LB1	X	X	RB1	X	X
LB2		X	RB2	X	X
LB3	X		RB3		X
LB4		X	RB4		X
LM1		X	RM1		
LM2		X	RM2	X	X
LM3		X	RM3		
LM4			RM4		
LT1	X	X	RT1		
LT2	X		RT2		
LT3			RT3		
LT4			RT4		

Figuur 4.9: Deze tabellen tonen de combinaties van targets met een significant verschil in afstand.

de twee bovenste targets in de derde en vierde kolom een significant verschil hebben met een groot deel van de andere targets. Als er dan naar de gemiddelde afstand wordt gekeken in tabel 4.1 is er ook te zien de gemiddelde afstand van de targets LT3, LT4, RT3 en RT4 lager liggen dan de andere targets.

In figuur 4.10 wordt een boxplot per target weergegeven. In deze boxplot is heel wat belangrijk informatie zichtbaar zoals het gemiddelde, minimum en maximum van elke target. Ook hier valt het op dat de waarden van de bovenste rijen lager zijn dan die van de bovenste.

Hieruit volgt dus dat de gebruiker accurater is voor de bovenste targets dan de onderste targets.



Figuur 4.10: Boxplot van de afstand per target.

Verder kan het ook interessant zijn om te kijken of er een groot verschil is tussen de gemiddelde afstand per deelnemer. Om mid-air targets te gebruiken in concrete systemen, wordt er verwacht dat er geen groot verschil is tussen het gemiddelde van de deelnemers onderling. In tabel 4.2 wordt er informatie getoond over de verdeling van de afstand van alle deelnemers. De minst accurate deelnemer heeft een gemiddelde afstand van 0.116 terwijl de meest accurate deelnemer een gemiddelde heeft van 0.311. Het gemiddelde van alle deelnemers is 0.1854 met een standaardafwijking van 0.059.

Door opnieuw een Welch Anova test ($P = 2.2e-16$) uit te voeren, kan er afgeleid worden dat er een significant verschil is tussen de deelnemers onderling. Er zijn dus zowel uitschieters in positieve als negatieve zin. Twee deelnemers hadden last van hun schouders, wat de negatieve uitschieters zou kunnen verklaren.

	Afstand
Gemiddelde best scorende deelnemer	0.116
Gemiddelde slechtst scorende deelnemer	0.311
Gemiddelde afstand alle deelnemers	0.1854
Standaard afwijking	0.059

Tabel 4.2: Deze tabel geeft een aantal statistieken over de afstand van de deelnemers.

De afstand ten opzichte van de targets geeft een goede indicatie over de accuraatheid van de deelnemers. Dit geeft geen informatie over de positie van de klik ten opzichte van de target. Het is nuttig om te weten in welke richting de deelnemer mist. Dit geeft een beter beeld over de manier waarop de deelnemers de positie van de targets inschatten. In tabellen 4.3 en 4.4 wordt per target getoond hoeveel keer de deelnemers in een bepaalde richting naast een target hebben gedrukt. Figuur 4.11 tot figuur 4.34 tonen voor elke target de afstand voor elke richting waarin de gebruiker naast de target klikt.

	LB1	LB2	LB3	LB4	LM1	LM2	LM3	LM4	LT1	LT2	LT3	LT4
OK	32	32	33	47	43	31	43	48	30	36	50	77
Te ver	71	44	9	0	69	61	19	5	92	79	46	14
Te dicht	32	59	93	88	23	43	73	82	13	20	39	44
Te hoog	17	26	34	27	29	36	26	35	69	67	46	35
Te laag	86	77	68	61	63	67	66	52	36	32	39	23
Rechts	28	27	54	24	37	26	51	27	38	15	57	22
Links	75	76	48	64	55	78	41	60	67	84	28	36

Tabel 4.3: Aantal kliks van deelnemers die in een bepaalde richting naast de target zijn. Rood en groen dienen om opmerkelijke targets in verband met de diepte aan te duiden. Blauw wordt gebruikt om opmerkelijke targets in verband met de hoogte aan te duiden. Geel duidt aan dat de er voor de targets aan de linker- of rechterkant respectievelijk vaker naar links of rechts wordt geklikt.

	RB1	RB2	RB3	RB4	RM1	RM2	RM3	RM4	RT1	RT2	RT3	RT4
OK	26	28	41	39	36	28	45	51	41	31	49	55
Te ver	58	27	1	0	61	52	10	2	79	70	33	15
Te dicht	51	80	93	96	38	55	80	82	15	34	53	65
Te hoog	21	25	20	28	23	15	12	24	60	67	43	37
Te laag	88	82	74	68	76	92	78	60	34	37	43	43
Rechts	80	74	57	64	65	74	50	59	76	78	52	50
Links	29	33	37	32	34	33	40	25	17	26	34	30

Tabel 4.4: Aantal kliks van deelnemers die in een bepaalde richting naast de target zijn. Rood en groen dienen om opmerkelijke targets in verband met de diepte aan te duiden. Blauw wordt gebruikt om opmerkelijke targets in verband met de hoogte aan te duiden. Geel duidt aan dat de er voor de targets aan de linker- of rechterkant respectievelijk vaker naar links of rechts wordt geklikt.

Uit deze tabellen kan heel wat interessante informatie gehaald worden. Om te beginnen valt het meteen op dat geen enkele deelnemer voor zowel target 'LB4' en 'RB4' te ver heeft geklikt. Dit wordt in de tabel met groen aangeduid. Voor deze targets hebben de deelnemers vaak niet ver genoeg geklikt, namelijk respectievelijk 65% en 71% van de kliks was voor de target. Dit fenomeen is zichtbaar voor kolom 3 en 4 aan beide kanten. Dit toont dus aan dat de targets voor de gebruiker, te ver stonden en iets dichterbij de gebruiker geplaatst moet worden. Voor de meeste targets in kolom 1 en 2 is het tegenovergestelde fenomeen zichtbaar. Hier klikken de deelnemers vaak verder dan de werkelijke positie van de target. Deze cijfers zijn in het rood weergegeven.

Indien er gekeken wordt naar de hoogte van de kliks ten opzichte van de targets, valt op dat voor de onderste en middelste rij er vaak lager wordt geklikt dan de target zelf. Dit is in het blauw gemarkeerd in de tabellen. Dit toont aan dat deze targets iets te hoog gepositioneerd stonden en dat het voor de deelnemers natuurlijker is om iets lager te punten naar een target. Bij de targets in de bovenste rij en kolom 3 en 4 is er ongeveer een gelijke verdeling tussen te hoog en te laag klikken. De bovenste targets in kolom 1 en 2 worden vaak te hoog ingeschat.

Nadien wordt er gekeken naar het aantal keer dat een deelnemer links of rechts van de target klikt. Hier is er een interessant fenomeen zichtbaar. Dit fenomeen wordt in het geel aangeduid. Voor de targets aan de linkerkant wordt er meer links van de target geklikt. Terwijl voor de targets aan de rechterkant er eerder rechts van de targets wordt geklikt. Dit toont aan dat alle targets iets te ver van de gebruiker gepositioneerd stonden.

Vervolgens kan het ook interessant zijn om de overeenkomstige targets van de linkerkant en de rechterkant met elkaar te vergelijken.

Om te beginnen wordt er gekeken naar target LB1 en RB1 waarvan de informatie gevisualiseerd wordt in figuur 4.11 en 4.12. Hier valt duidelijk op dat er voor beide targets de afwijking in de hoogte vaak hoger is. Voor target LB1 is de gemiddelde afwijking naar links groter terwijl voor target RB1 de afwijking naar rechts groter is. Ook wordt er voor target LB1 verder geklikt terwijl er voor target RB1 eerder te dicht geklikt wordt.

Voor targets LB2 en RB2 is er een gelijkaardig patroon zichtbaar. Er wordt consistent lager geklikt, voor de target aan de linkerkant wordt er meer naar links geklikt terwijl voor de target aan de rechterkant er meer aan de rechterkant wordt geklikt. In tegenstelling tot targets LB1 en RB1 wordt hier wel voor beide targets eerder te dicht geklikt.

Ook voor targets LB3 en RB3 geldt dat er vaak lager en te dicht wordt geklikt. Voor target LB3 wordt er ongeveer even ver links als rechts van de target geklikt. Ook voor target RB3 geldt dit met een iets groter verschil tussen links en rechts.

Opnieuw wordt er voor targets LB4 en RB4 consistent lager geklikt. Ook wordt er opnieuw voor beide targets niet ver genoeg geklikt. Voor target LB4 en RB4 wordt er respectievelijk meer naar links en rechts geklikt.

Vervolgens kan er gekeken worden naar de targets op de middelste rij, te beginnen bij LM1 en RB1 in figuur 4.19 en 4.20. Opnieuw wordt er voor deze targets consistent te laag geklikt. Net zoals bij targets LB1 en RB1 wordt er voor de linker target meer naar links geklikt en meer naar rechts voor de rechtertarget. Voor beide targets is er ongeveer een gelijke verdeling tussen te ver en te dicht klikken. Beide hebben uitschieters die eerder te ver klikken.

Bij targets LM2 en RM2 wordt er opnieuw te laag geklikt. Voor target LM2 wordt er gemiddeld gezien even dicht als ver geklikt. Terwijl voor target RM2 er eerder te dicht wordt geklikt. Ook voor deze targets wordt er weer meer naar links geklikt voor de target aan de linkerkant terwijl er meer naar rechts wordt geklikt voor de andere target.

Voor target LM3 wordt er net zoals target LB3 ongeveer even ver links als rechts van de target geklikt. Voor target RM3 is de afstand groter wanneer er links van de target geklikt wordt. Voor beide targets wordt er eerder te dicht en te laag geklikt.

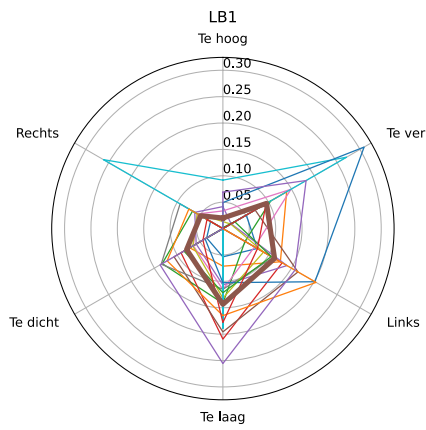
Voor targets LM4 en RM4 geldt hetzelfde als targets LB4 en RB4.

Ten slotte kan er nog gekeken worden naar de targets op de bovenste rij. Als eerste wordt er gekeken naar LT1 en RT1 in figuur 4.27 en 4.28. Voor deze targets wordt er in tegenstelling tot alle targets in de onderste en middelste rij, te hoog geklikt. Opnieuw wordt er voor target LT1 en RT1 respectievelijk meer naar links en rechts geklikt. Voor beide targets wordt er eerder te dicht geklikt.

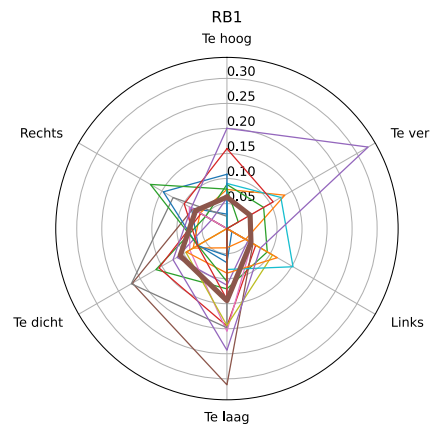
Voor target LT2 en RT2 klikken de deelnemers gemiddeld gezien even hoog als laag ten opzichte van de targets. Voor beide targets klikt de deelnemer ook niet ver genoeg. Ook voor deze targets wordt er respectievelijk meer naar links en rechts geklikt.

Bij target LT3 wijkt de gebruiker meer af naar onder terwijl voor RT3 dit ongeveer gelijk is. Ook de diepte en hoeveel de deelnemers naar links of rechts afwijken is bij RT3 ongeveer gelijk. Voor LT3 is de afwijking naar rechts groter dan naar links, terwijl de afwijking in de diepte wel gelijkaardig is.

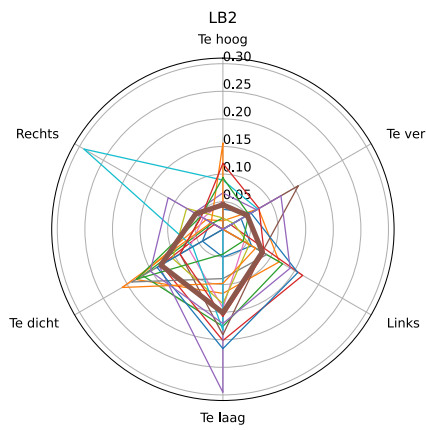
Als laatste zijn er nog targets LT4 en RT4. Voor LT4 valt meteen op dat de gemiddelde afwijking in eender welke richting zeer laag is. Ook voor RT4 is de gemiddelde afwijking per richting redelijk laag, alleen de afwijking naar rechts is iets hoger.



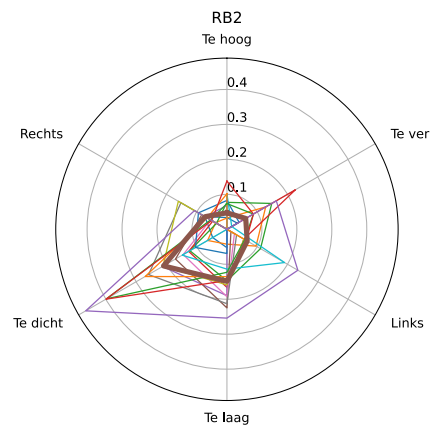
Figuur 4.11: LB1.



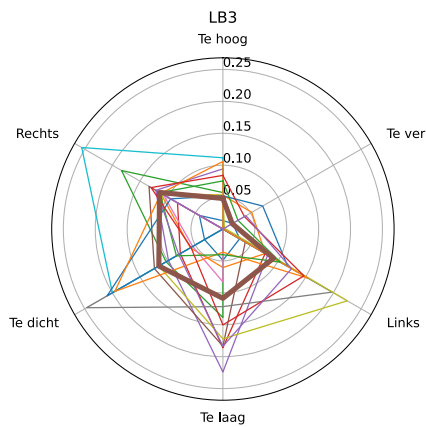
Figuur 4.12: RB1.



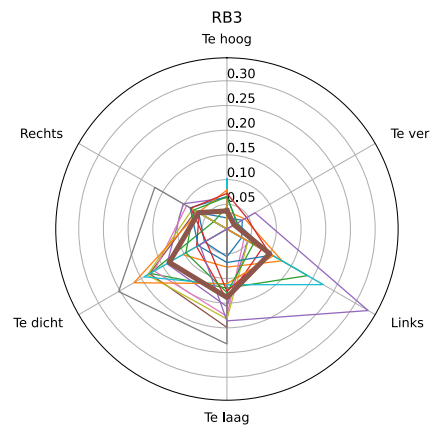
Figuur 4.13: LB2.



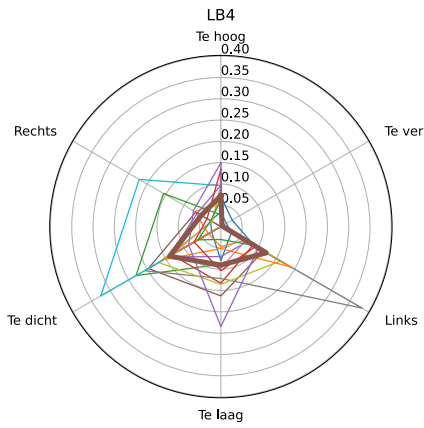
Figuur 4.14: RB2.



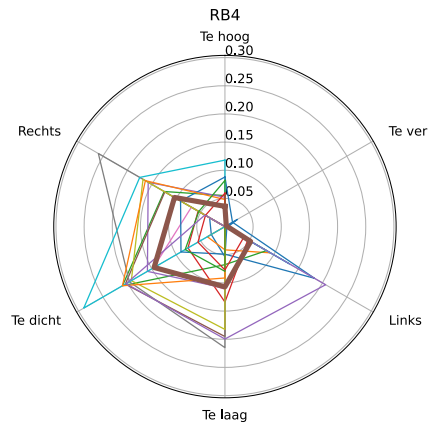
Figuur 4.15: LB3.



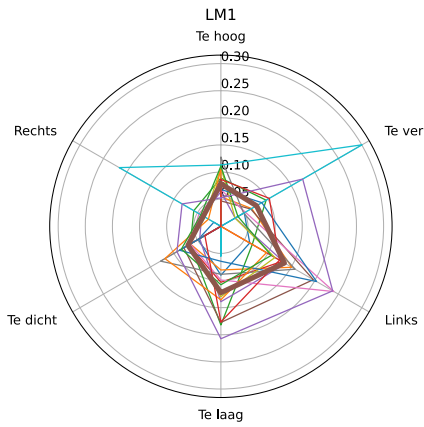
Figuur 4.16: RB3.



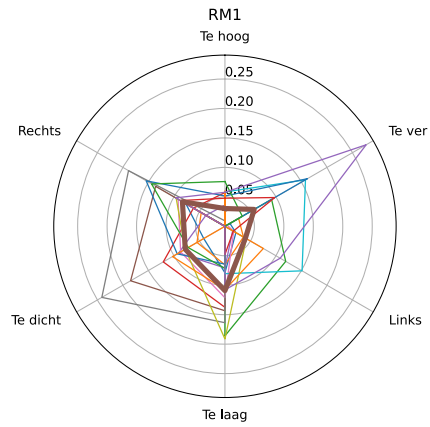
Figuur 4.17: LB4.



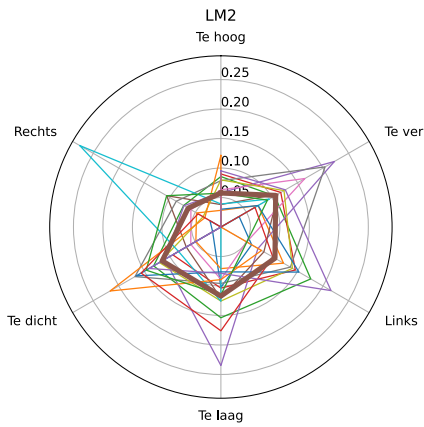
Figuur 4.18: RB4.



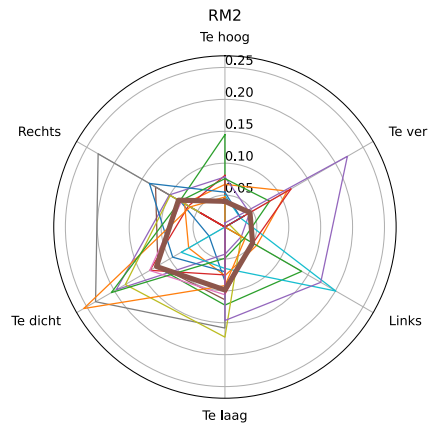
Figuur 4.19: LM1.



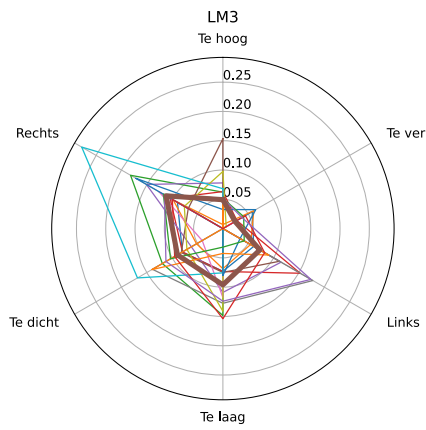
Figuur 4.20: RM1.



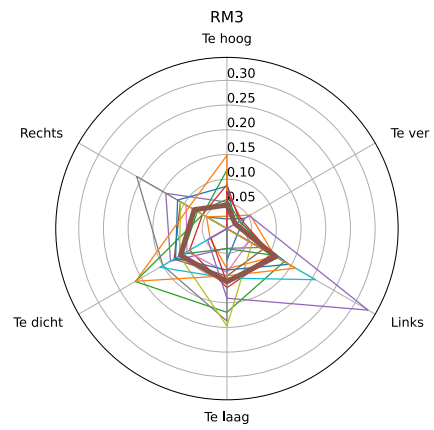
Figuur 4.21: LM2.



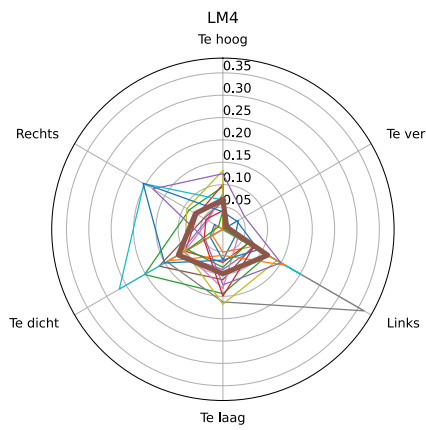
Figuur 4.22: RM2.



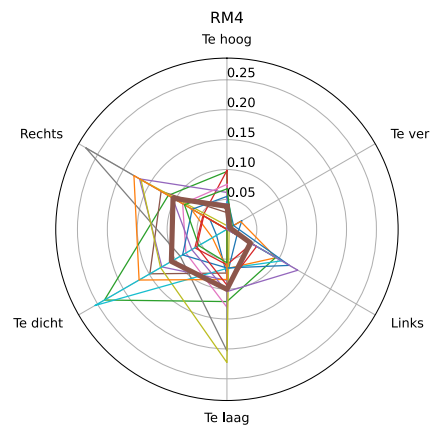
Figuur 4.23: LM3.



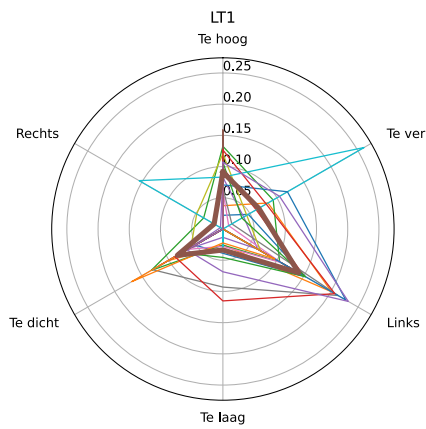
Figuur 4.24: RM3.



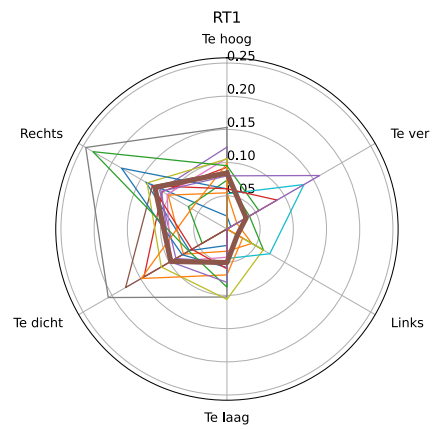
Figuur 4.25: LM4.



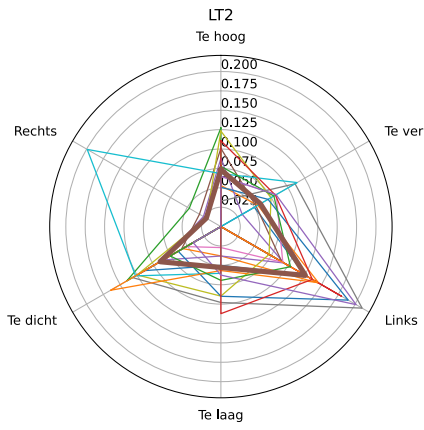
Figuur 4.26: RM4.



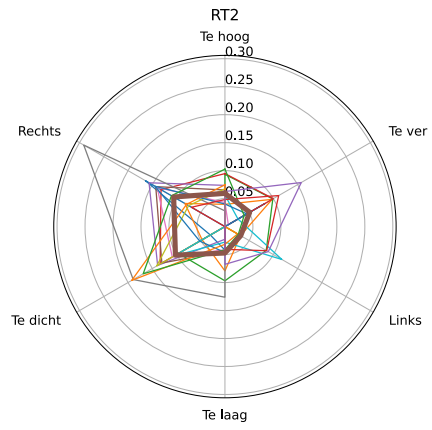
Figuur 4.27: LT1.



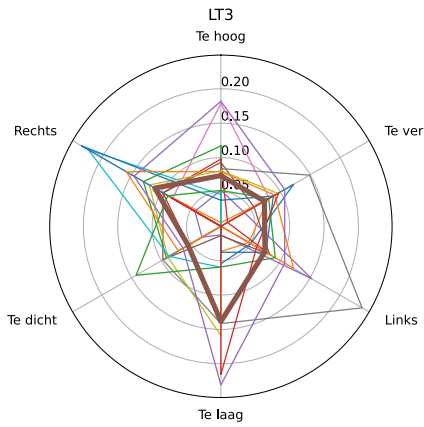
Figuur 4.28: RT1.



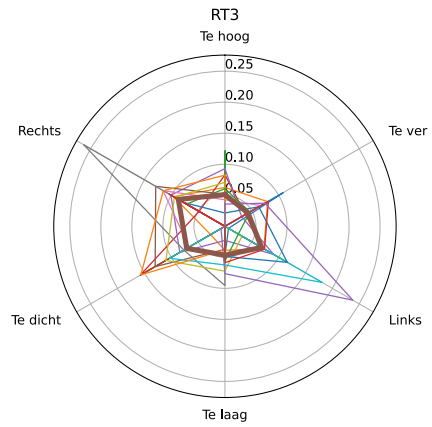
Figuur 4.29: LT2.



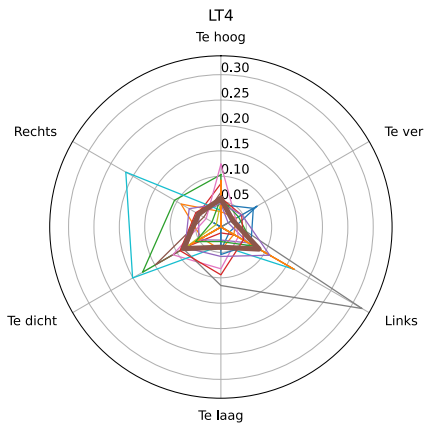
Figuur 4.30: RT2.



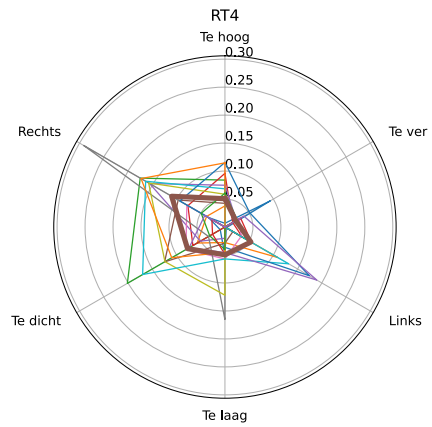
Figuur 4.31: LT3.



Figuur 4.32: RT3.

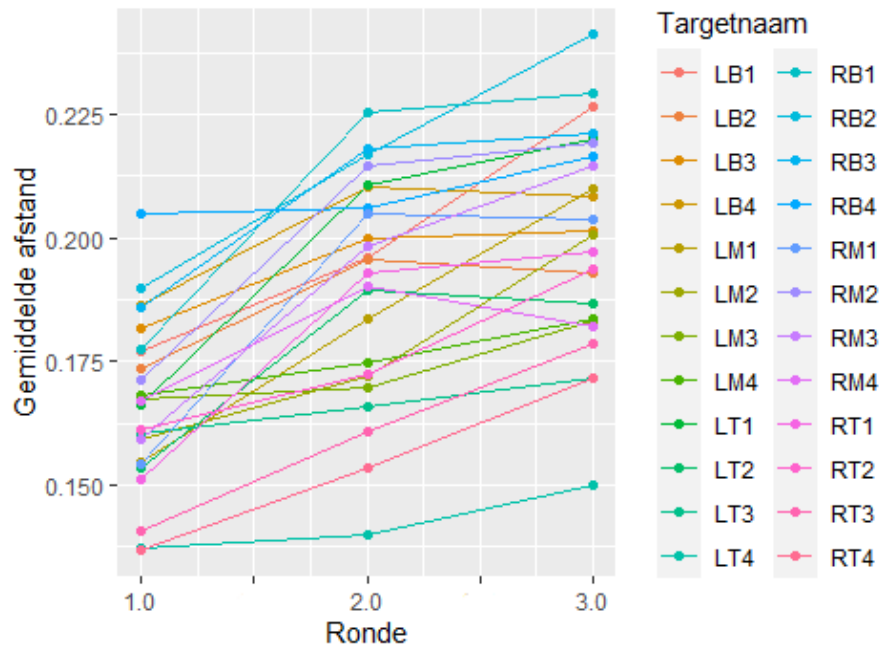


Figuur 4.33: LT4.



Figuur 4.34: RT4.

Tot slot is er nog bestudeerd wat er met de afstand gebeurt over de verschillende testrondes heen. Dit is interessant om te bestuderen omdat er zo gekeken wordt of de deelnemers gemakkelijk vertrouwd geraken met de positie van de targets en ook of vermoeidheid eventueel een invloed heeft op de targets.



Figuur 4.35: Visualisatie van de gemiddelde afstand per target over de verschillende rondes.

In figuur 4.35 wordt de evolutie van de gemiddelde afstand per keer dat een deelnemer de test uitvoert getoond. Hierin is duidelijk te zien dat de gemiddelde afstand per testronde stijgt. Het grootste verschil ligt tussen de eerste en tweede testronde. In de eerste testronde is de gemiddelde afstand duidelijk beter. Waarschijnlijk is dit omdat de deelnemers de eerste testronde direct na de trainingsfase uitvoeren, waardoor ze zich de positie van de target beter herinneren. Na de eerste ronde hebben de deelnemers de VR headset even af mogen nemen. Hierdoor kunnen de deelnemers even op iets anders focussen. Doordat de deelnemers zich hierna terug moeten oriënteren in de VR wereld, is de afstand in ronde 2 en 3 waarschijnlijk iets hoger. De afstand van tussen ronde 2 en 3 blijft wel redelijk stabiel. Dit toont aan dat de deelnemers wel consistent naar dezelfde positie kunnen wijzen.

4.4.2 Vermoeidheid

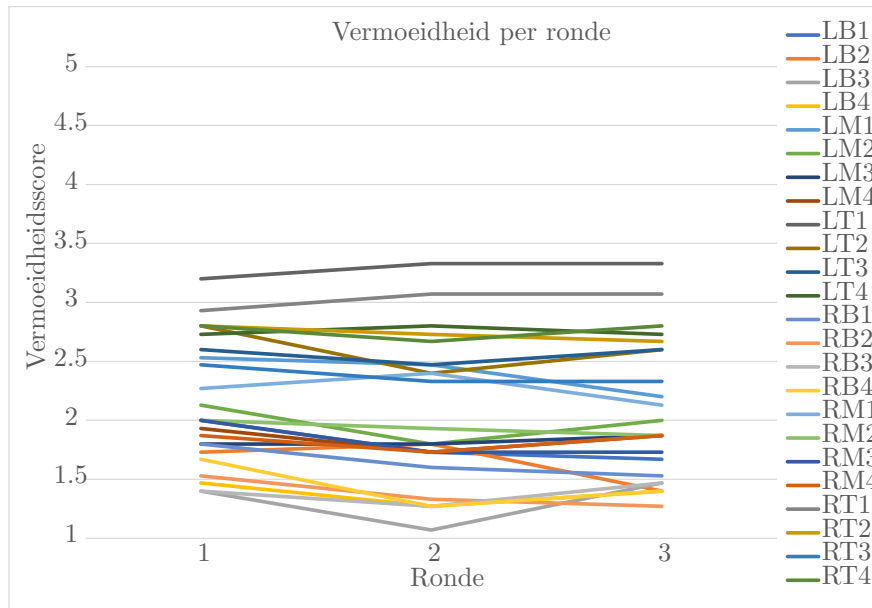
Om een menu in mid-air te gebruiken is het belangrijk dat dit voor de gebruikers niet te vermoeiend is. Ook is het interessant om te weten of er bepaalde targets meer of minder vermoeiend zijn dan de andere targets. Daarom is er onderzoek gedaan naar de vermoeidheid die de gebruiker ervaart om continu naar een bepaalde target te wijzen.

Om de vermoeidheid te meten is er aan de gebruiker per ronde gevraagd hoe vermoeiend ze het vinden om een bepaalde target te bereiken. Hierdoor is het mogelijk om te zien hoe de vermoeidheid van de gebruikers evolueert over de verschillende rondes heen.

In figuur 4.36 wordt de gemiddelde vermoeidheid per ronde voor elke target getoond. Het valt direct op dat de gemiddelde vermoeidheidsscores van de targets redelijk laag liggen. Dit toont aan dat de deelnemers over het algemeen het niet vermoeiend vinden om vaak naar mid-air targets te wijzen. De gemiddelde vermoeidheid voor de drie rondes zijn respectievelijk: 2.16, 2.03 en 2.05. De vermoeidheid blijft dus tussen de verschillende rondes relatief gelijk.

4.4.3 Snelheid

Ten slotte is er ook gekeken naar de snelheid waarmee de deelnemers een bepaalde target kunnen bereiken. Het is de bedoeling dat de deelnemers zowel tijdens de training als tijdens de test met een vlotte beweging naar de targets kunnen wijzen.



Figuur 4.36: Visualisatie van de vermoeidheid per target over de verschillende rondes.

Ronde:	LB1	LB2	LB3	LB4	LM1	LM2	LM3	LM4	LT1	LT2	LT3	LT4
1:	2	1.73	1.4	1.47	2.53	2.13	1.8	1.93	3.2	2.8	2.6	2.73
2:	1.73	1.8	1.07	1.27	2.47	1.8	1.8	1.73	3.33	2.4	2.47	2.8
3:	1.67	1.4	1.47	1.4	2.2	2	1.87	1.87	3.33	2.6	2.6	2.73

Tabel 4.5: Vermoeidheidsscore per target per ronde.

Ronde:	RB1	RB2	RB3	RB4	RM1	RM2	RM3	RM4	RT1	RT2	RT3	RT4
1:	1.8	1.53	1.4	1.67	2.27	2	2	1.87	2.93	2.8	2.47	2.8
2:	1.6	1.33	1.27	1.27	2.4	1.93	1.73	1.73	3.07	2.73	2.33	2.67
3:	1.53	1.27	1.47	1.4	2.13	1.87	1.73	1.87	3.07	2.67	2.33	2.8

Tabel 4.6: Vermoeidheidsscore per target per ronde.

Om te controleren of er een significant effect is tussen de training en de test op basis van de snelheid, is er een Welch two sample t- test uitgevoerd. De t-test toonde aan dat er geen significant effect is voor de tijd tussen de training en de test ($t = 1.0916$, $p < 0.05$, Cohen's $d = 0.013$). Dit toont dus aan dat de gemiddelde snelheid voor de training en testfase gelijkaardig is.

In tabel 4.7 wordt de gemiddelde snelheid per target weergegeven. In de tabel valt het op dat de snelheid voor de targets aan de linkerkant iets trager is dan die aan de rechterkant. Dit kan verklaard worden door het feit dat 12 van de 15 deelnemers rechtshandig was waardoor de resultaten aan de rechterkant automatisch beter zijn.

De gemiddelde snelheid van alle targets is 0.96 met een standaard afwijking van 0.29. Gemiddeld gezien kunnen de deelnemers dus in minder dan 1 seconde van de rustzone naar de target bewegen.

4.4.4 Interview

Tussen de eerste en tweede testronde hebben alle deelnemers enkele vragen moeten beantwoorden. Deze vragen zijn vooral gefocust op de persoonlijke ervaring van de deelnemers. De kwantitatieve data geven de nodige informatie over de prestaties van de gebruiker. Door meer kwalitatieve vragen te stellen, is het mogelijk om te achterhalen of de ervaring van de deelnemers overeenkomt met de daadwerkelijke resultaten.

Als eerste is er aan de deelnemers gevraagd of het moeilijk is om de positie van de targets in te schatten indien ze de targets niet zien. Er werd gevraagd om dit te beoordelen met een cijfer van 1 tot 5, waarbij 1 gemakkelijk is en 5 moeilijk. Vier deelnemers gaven een score van 3 op 5, wat betekent dat het niet heel

Target	Snelheid
LB1	0.717
LB2	1.16
LB3	0.835
LB4	0.965
LM1	1.04
LM2	1.10
LM3	1.54
LM4	1.25
LT1	1.41
LT2	1.43
LT3	1.15
LT4	1.10
RB1	0.589
RB2	0.758
RB3	0.534
RB4	0.564
RM1	0.679
RM2	0.950
RM3	0.667
RM4	0.746
RT1	1.38
RT2	0.849
RT3	0.841
RT4	0.825

Tabel 4.7: Deze tabel toont de gemiddelde snelheid in seconden per target over alle deelnemers.

gemakkelijk is maar ook niet heel moeilijk. De andere deelnemers hun score is ongeveer gelijk verdeeld tussen gemakkelijk en moeilijk. Vijf deelnemers gaven een score van 4, terwijl vijf andere deelnemers een score van 2 gaven. Ook was er één deelnemer die het helemaal niet moeilijk vond en een score van 1 gaf.

Vervolgens is er gevraagd naar de vermoeidheid voor de dominante hand en de niet-dominante hand. Ook hier was het de bedoeling dat de deelnemers de vermoeidheid beoordeelden aan de hand van een score gaande van 1 tot 5 waarbij een hoger cijfer meer vermoeid betekent. Voor zowel de dominante hand als de niet dominante hand is er geen enkele deelnemer die een score van 1 op 5 geeft. Voor de dominante hand hebben negen deelnemers een score van 2 gegeven, vijf deelnemers een score van 3 en één deelnemer een score van 4. Voor de niet-dominante hand liggen de scores iets hoger. Vier deelnemers gaven een score van 2, acht een score van 3 en drie deelnemers een score van 4. De gemiddelde vermoeidheid voor de dominante hand is 2.47, terwijl het gemiddelde voor de niet-dominante hand 2.94 is.

Nadien werd gevraagd hoe accuraat de deelnemers denken dat ze waren met hun dominante en niet-dominante hand. Opnieuw is er hier een schaal van 1 tot 5 gebruikt. Met de dominante hand denken de deelnemers dat ze redelijk accuraat waren. Vijf deelnemers gaven een 3, zeven deelnemers een 4 en er is zelfs één deelnemer die dacht dat hij heel accuraat was en zichzelf een score van 5 gaf. Slechts twee deelnemers dachten niet accuraat te zijn en gaven een score van 2. Voor de niet-dominante hand gaven de deelnemers over het algemeen een iets lagere score. Eén deelnemer dacht helemaal niet accuraat te zijn en gaf zichzelf een 1. Vijf deelnemers gaven een score van 2 en nog vijf andere gaven een score van 3. Vier deelnemers gaven een score van 4. Gemiddeld gezien dachten de deelnemers accurater te zijn met hun dominante hand. Het gemiddelde is hier 3.47, terwijl het gemiddelde voor de niet-dominante hand 2.8 is.

Ook is er nog gevraagd of er targets waren die de deelnemers moeilijk of onnatuurlijk vonden om te bereiken. Over het algemeen hadden alle deelnemers ongeveer dezelfde opmerking. De targets in de bovenste rij en de buitenste kolommen waren voor de meeste deelnemers wat onnatuurlijker. Verder waren er ook twee deelnemers die het moeilijk vonden om het onderscheid te maken tussen bepaalde kolommen. De eerste deelnemer vond het moeilijk om de twee middelste kolommen te onderscheiden terwijl de andere deelnemer de twee buitenste kolommen moeilijker vond.

Tot slot werd er aan de deelnemers gevraagd of de targets groot genoeg waren om deze op een vlotte manier te kunnen bereiken. Hierop werd unaniem ja geantwoord.

4.4.5 Hypotheses

Zoals eerder vermeld in sectie 4.3.1 zijn er een aantal hypotheses gesteld. Deze hypotheses gaan na of er een relatie is tussen de parameters snelheid, vermoeidheid en afstand. Om deze hypotheses na te gaan is er telkens een Pearson correlation test uitgevoerd.

De eerste hypothese onderzoekt of er een relatie is tussen de afstand en de snelheid. De Pearson correlation test geeft een correlatiecoëfficiënt van -0.0445 . Dit wil zeggen dat er een negatieve associatie is tussen de afstand en de snelheid. Wanneer de deelnemer er langer over doet om een target te bereiken zal de afstand tot de target dus kleiner worden. De p-waarde is 0.0105 wat kleiner is dan 0.05 , wat betekent dat de null hypothese verworpen kan worden.

De volgende hypothese gaat over de relatie tussen de snelheid en vermoeidheid. De Pearson correlation test geeft een correlatiecoëfficiënt van 0.086 . Dit betekent dus dat er een positieve correlatie is tussen de snelheid en de vermoeidheid. Wanneer de deelnemers sneller naar de targets wijzen, stijgt de vermoeidheid. De p-waarde is 0.0045 wat kleiner is dan 0.05 , wat betekent dat de null hypothese verworpen kan worden.

Als laatste hypothese voor de parameters, wordt er gekeken naar de relatie tussen de accuraatheid en de vermoeidheid. De Pearson correlation test geeft een correlatiecoëfficiënt van -0.073 . Hier is er dus net zoals tussen de afstand en de snelheid een negatieve associatie. Wanneer de afstand tot de target verkleint, zal de deelnemer meer vermoeid zijn. Ook hier is de p-waarde kleiner dan 0.05 namelijk 0.016 , wat betekent dat de null hypothese verworpen kan worden. Dit wordt ook bevestigd door de analyse in de vorige secties. De deelnemers waren accurater bij de targets in de bovenste rij, maar er werd ook een hogere vermoeidheidsscore gegeven voor deze targets.

Tot slot is er nog een hypothese die nagaat of er een correlatie is tussen de training en test fase op gebied van afstand en snelheid. In sectie 4.4.3 werd al aangehaald dat er geen significant verschil is tussen de snelheid in de trainingsfase en de testfase.

Om te controleren of er een significant verschil voor de afstand tussen de training en test is er opnieuw een Welch two sample t-test uitgevoerd. In dit geval toonde deze t-test dat er een significant verschil is voor de afstand ($t = -67.139$, $p < 0.05$, Cohen's $d = 1.97$).

Dit toont dus aan dat de deelnemers in de training en testfase ongeveer even snel zijn om de targets te bereiken, maar dat er wel een groot verschil is tussen de accuraatheid.

Hoofdstuk 5

Discussie studie 1

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de studie uit het vorige hoofdstuk besproken. Het doel is om na te gaan wat de beste positie is voor de verschillende targets. Deze informatie kan dan gebruikt worden om de mid-air targets in de context van een menu te gebruiken.

5.1 Discussie locatie targets

In deze sectie wordt er besproken of de locatie van de targets goed gekozen is.

5.1.1 Verdeling

Voor deze studie is er gekozen om de targets te positioneren op een bol waarbij de deelnemer het middelpunt van deze bol is. Op deze bol zijn de targets verdeeld in drie rijen en vier kolommen. Er is gekozen voor deze indeling omdat dit een duidelijke en logische verdeling is voor de deelnemers. Ook geeft deze verdeling genoeg targets om te kunnen bepalen of de deelnemers accuraat genoeg kunnen zijn, zonder dat het te gemakkelijk of te moeilijk is.

Wanneer er dan gekeken wordt naar alle punten waar de deelnemers geklikt hebben, wordt het duidelijk dat deze verdeling ook logisch is voor de deelnemers. In zowel figuur 4.5 en 4.6 is te zien dat de deelnemers een goed onderscheid kunnen maken tussen de verschillende rijen en kolommen. Bij de verdeling van de rijen valt het op dat er meer ruimte is tussen de targets onderling. Tussen de verschillende rijen is er bijna geen overlap. Indien er gekeken wordt naar de verdeling tussen de kolommen, valt het op dat er hier iets meer overlap is. Dit is op zich ook redelijk logisch aangezien er meer kolommen zijn dan rijen.

5.1.2 Positionering

In figuur 4.8 wordt per target de gemiddelde klik van de deelnemers weergegeven. Uit deze figuur is het mogelijk om heel wat interessante informatie te halen. In eerste instantie valt het meteen op dat de deelnemers gemiddeld gezien vaak lager klikken voor de targets in de onderste en middelste rij. Voor de bovenste rij zitten de deelnemer qua hoogte gemiddeld gezien wel juist. Dit toont aan dat de targets in de onderste twee rijen best iets lager worden gepositioneerd om een beter resultaat te krijgen.

Ook is het interessant om te zien dat de resultaten voor de linkerkant en de rechterkant bijna elkaars spiegelbeeld zijn. Voor bijvoorbeeld target LT4 wordt er iets te dicht en te veel naar links geklikt. Voor target RT4 geldt hetzelfde, maar in plaats van te veel naar links wordt er te veel naar rechts geklikt. Voor de andere targets is een gelijkaardig fenomeen zichtbaar.

In tabel 4.3 en 4.4 wordt per target weergegeven in welke richting de gebruiker naast de target heeft geklikt. Uit deze tabellen kan per target gekeken worden of ze goed gepositioneerd stonden. In eerste instantie kan er gekeken worden naar de afstand van de verschillende targets ten opzichte van de gebruiker. Voor targets LB3, LB4, RB3 en RB4 wordt er bijna niet te ver geklikt. De deelnemers klikken voor deze targets in minstens 65% van de gevallen niet te ver genoeg. Dit in combinatie met het feit dat er niet te ver geklikt wordt, duidt aan dat deze targets wat dicht bij de gebruiker geplaatst moeten worden om een accurater resultaat te geven. Ook voor targets LM3, LM4, RM3 en RM4 geldt dit.

Voor de targets in kolom 1 en 2 geldt het tegenovergestelde. De deelnemers strekken hun arm hier vaak te veel, waardoor dat ze verder klikken dan de daadwerkelijke positie van de targets.

Wanneer de targets voor de gebruiker staan, klikken de deelnemers dus vaak niet ver genoeg. Terwijl er vaak te ver geklikt wordt als de targets langs de deelnemer staan. Dit toont aan dat de deelnemers hun arm vaak verder strekken voor de targets aan de zijkant en minder moeite doen om hun arm te strekken voor de targets die voor hen gepositioneerd zijn.

Vervolgens kan gekeken worden of de targets op de juiste hoogte gepositioneerd waren. Zoals ook zichtbaar in figuur 4.8 valt het hier op dat de gebruikers voor de twee onderste rijen vaak lager klikken dan de targets zelf zijn. Voor de targets in de bovenste rij is dit verschillend. Bij targets LT1, LT2, RT1 en RT2 wordt er ook ongeveer dubbel zoveel keer hoger dan lager geklikt. Voor de andere targets in de bovenste rij is de verdeling tussen te hoog en te laag klikken ongeveer gelijk. Er waren een aantal deelnemers die vermeld hebben dat ze voor de targets in kolom 1 en 2 hun arm niet ver genoeg moesten strekken en dat dit onnatuurlijk aanvoelde. Dit wordt ook bevestigd in deze resultaten. De deelnemers hebben automatisch hun arm op een natuurlijke manier meer gestrekt waardoor dat ze vaak verder of hoger klikken dan de daadwerkelijke positie van de targets.

Ook kan er nog gekeken worden of de deelnemers meer links of rechts van de targets zitten. Ook hier is een interessant fenomeen zichtbaar. Over het algemeen klikken de deelnemers meer links voor de targets aan de linkerkant en meer rechts voor de targets aan de rechterkant. Dit toont aan dat de targets over het algemeen best iets dichterbij de gebruiker gepositioneerd worden.

5.2 Discussie afstand

De visualisaties in figuur 4.5, 4.6, 4.7 en 4.8 geven een goede eerste indicatie van de prestaties van de deelnemers. De deelnemers zijn in staat om een onderscheid te maken tussen de verschillende targets. Om meer inzichten te krijgen in de resultaten moet er gekeken worden naar meer kwantitatieve data.

5.2.1 Grootte target

Alle targets hebben een straal van 12.5 cm. Om de targets te raken moet de afstand van de klik van de gebruiker tot de target dus kleiner zijn dan 12.5 cm. Uit de resultaten blijkt dat de gemiddelde afstand van de deelnemers toch vaak groter is dan 12.5 cm. De deelnemer met de beste resultaten heeft een gemiddelde van 11.6 cm terwijl de slechtst scorende deelnemer een gemiddelde heeft van 31.1 cm. De gemiddelde afstand over alle deelnemers heen is 18.5 cm. Dit is 6 cm meer dan de voorziene grote van de targets. In de trainingsfase wanneer de targets zichtbaar zijn, ligt de gemiddelde afstand veel lager, namelijk 4.28 cm. Als de targets zichtbaar zijn, is er dus geen probleem en is een straal van 12.5 cm groot genoeg.

In deze studie was de trainingstijd relatief kort. Indien de deelnemers langer de tijd krijgen om de positie van de targets te leren kennen, zouden de resultaten misschien beter kunnen zijn. Verder was het ook zo dat de deelnemers tijdens de testfase niet konden weten hoe correct ze waren. Wanneer een deelnemer op het begin van de test een target verkeerd inschat, blijft hij dit waarschijnlijk door de rondes heen doen. Hierdoor geeft dit een vertekend beeld van de accuraatheid van de deelnemer. Het is interessant om te onderzoeken wat er gebeurt met de accuraatheid indien de gebruiker na elke ronde de kans krijgt om zijn beeld van de targets opnieuw af te stemmen op de werkelijke targets.

Om onzichtbare targets te gebruiken in meer concrete toepassingen is het dus best om de targets te vergroten. Om zeker te zijn dat de deelnemers vlot naar de targets kunnen wijzen is een straal van 20cm aangeraden. Dit heeft als gevolg dat de targets wel met elkaar overlappen. Hierdoor moeten de targets verder uit elkaar staan, waardoor er minder targets in het totaal kunnen zijn.

De deelnemers zijn dus in wel in staat om een onderscheid te maken tussen de verschillende rijen en kolommen, maar ze kunnen nog niet met genoeg accuraatheid de targets bereiken. Dit zou op verschillende manieren verbeterd kunnen worden. In eerste instantie zou er onderzocht kunnen worden of het resultaat verbeterd indien de deelnemers de mogelijkheid krijgen om meer en langer te trainen. Anderzijds werd er tijdens de test helemaal niets getoond, in meer concrete toepassingen zou er wel iets getoond kunnen worden, wat het resultaat meteen gaat verbeteren, zoals ook blijkt uit de trainingsfase. Ten slotte is het ook mogelijk om de targets op zich te vergroten, waardoor de deelnemers automatisch accurater gaan

zijn. Hiervoor moet de indeling van targets misschien wel een beetje aangepast worden om ervoor te zorgen dat de targets niet overlappen.

5.2.2 Optimale targets

Het is ook interessant om te kijken of er targets met betere resultaten zijn. Indien dit het geval is, wordt de positie van deze targets het best gebruikt in concrete toepassingen.

Als eerste is het interessant om te weten of er een verschil is tussen de dominante hand en de niet-dominante hand van de deelnemers. Zoals in sectie 4.4.1 vermeld, blijkt dat er geen verschil is voor de accuraatheid tussen de dominante en niet-dominante hand. De deelnemers kunnen dus met beide handen even accuraat de targets bereiken.

Wanneer er dan gekeken wordt naar de gemiddelde afstand per target, is er geen target met veel betere of slechtere resultaten dan de andere. De gemiddelde afstand van de targets worden getoond in figuur 4.1. De resultaten van de meeste targets liggen rond het gemiddelde van 0.185. Het valt hier wel op dat de targets op de onderste rij een iets hogere score hebben. Zoals in sectie 5.1.2 vermeld komt dit waarschijnlijk omdat de deelnemers vaak te laag klikten bij deze targets. Ook is hier te zien dat vooral de bovenste targets onder het gemiddelde van 0.185 zitten.

Over het algemeen zijn de resultaten van de meeste targets heel gelijkaardig. Er zijn weinig significante verschillen tussen de accuraatheid van de targets onderling. Aan zowel de rechter- en linkerkant zijn er twee targets die het wel significant beter doen dan de andere targets. Dit zijn de bovenste twee targets in kolom 3 en 4. In figuur 4.9 worden de significante verschillen getoond. Deze targets kunnen dus best gebruikt worden voor de acties die de gebruiker niet per ongeluk mag activeren. De targets in kolom 3 en 4 hebben wel als nadeel dat ze in het werk gebied van de gebruiker komen. Hierdoor zijn deze targets iets minder geschikt om te gebruiken in concrete toepassingen. Gelukkig is dit vooral voor de targets in de middelste en onderste rij, waardoor de targets met het beste resultaat toch nog gebruikt kan worden.

5.3 Discussie vermoeidheid

Het is natuurlijk ook belangrijk dat het voor de deelnemers niet te vermoeiend is om naar mid-air targets te wijzen. Om mid-air targets te gebruiken in bijvoorbeeld een virtueel menu, is het belangrijk dat er voor de minst vermoeiende targets gekozen wordt.

Eerst is er gekeken naar de vermoeidheid van de verschillende testrondes. Voor de drie testrondes ligt de vermoeidheidsscore van de deelnemers net boven 2. Dit geeft aan dat de vermoeidheid niet echt een probleem vormt voor het gebruik van mid-air targets. Zelfs bij relatief langdurig gebruik, wordt het niet vermoeiender.

Wanneer er dan naar de vermoeidheid per targets gekeken wordt in tabellen 4.5 en 4.6, valt het op dat de vermoeidheid van de targets in de bovenste rij hoger is dan de andere rijen. De vermoeidheid van deze targets gaat richting een score van 3. Dit is redelijk logisch aangezien het minder natuurlijk is om de armen naar boven te bewegen.

Ook tussen de deelnemers onderling ligt de vermoeidheidsscore relatief gelijk. Er is één deelnemer met een gemiddelde score van 3.04. Dit is de score van de deelnemer die het meest accuraat is geweest. Dit toont aan dat indien de accuraatheid van de gebruiker stijgt, de vermoeidheid mee stijgt. Dit wordt ook bevestigd door de t-test van de hypothesen.

5.4 Discussie snelheid

Ook de snelheid kan belangrijk zijn in het geval dat mid-air targets gebruikt worden voor bepaalde interactietechnieken.

De gemiddelde snelheid om naar een target te wijzen is 0.96 seconde. Deelnemers hebben dus minder dan een seconde nodig om naar een target te bewegen. Voor het grootste deel van de mogelijke toepassingen is dit meer dan genoeg.

5.5 Discussie interview

Tijdens de studie zijn er een aantal vragen gesteld aan de deelnemers om een inzicht te krijgen in hun persoonlijke ervaringen. Door deze resultaten te vergelijken met de kwantitatieve data van de studie kan er vergeleken worden of de persoonlijke ervaring ook echt overeenkomt met de werkelijkheid.

In eerste instantie is er gevraagd naar de vermoeidheid. De vermoeidheid voor de niet-dominante hand ligt gemiddeld gezien net iets hoger dan de vermoeidheid voor de dominante hand. Dit is een redelijk logisch resultaat, want de dominante hand wordt in het dagelijkse leven normaal gezien ook meer gebruikt. Het verschil zou ook te wijten kunnen zijn aan de manier waarop de vraag gesteld is. Door een aparte vraag te voorzien voor dominante en niet-dominante hand zou het kunnen dat de deelnemers automatisch een slechtere score geven aan de niet-dominante hand.

Vervolgens is er ook gevraagd naar de accuraatheid per hand. Ook hier scoort de dominante hand beter dan de niet-dominante hand. Dit op zich kan ook weer logisch zijn of een gevolg van de manier waarop de vraag gesteld is.

Ook werd er gevraagd of er targets waren die moeilijk of onnatuurlijk waren om te bereiken. Alle deelnemers hebben een gelijkaardig antwoord gegeven. Voor de meeste deelnemers waren de targets in de buitenste kolommen en de bovenste rij minder natuurlijk. Om de targets in de buitenste kolommen te raken, moesten de deelnemers hun arm niet volledig strekken. De deelnemers vermeldde dat deze houding voor hun minder natuurlijk aanvoelde en ze de neiging hadden om hun arm volledig te strekken. Dit komt overeen met de resultaten uit sectie 5.1.2.

Verder vonden de deelnemers de targets in de bovenste rij onnatuurlijker om te bereiken. De bovenste targets vereisten ook meer moeite van de gebruikers omdat ze hun armen naar omhoog moeten bewegen. Dit is natuurlijk een beweging die in het dagelijkse leven niet vaak wordt uitgevoerd. Zoals in sectie 5.3 vermeld, vinden de deelnemers deze targets ook vermoeiender dan de andere targets.

Tot slot werd er gevraagd of de targets groot genoeg waren. Hierop hebben alle deelnemers geantwoord dat de targets groot genoeg waren. Indien er rekening wordt gehouden met de gemiddelde afstand van alle deelnemers, is er te zien dat deze resultaten elkaar tegenspreken. Gemiddeld gezien was de afstand van de kliks tot het middelpunt van de targets 18.5cm. De targets zelf hebben een straal van 12.5cm. Dit betekent dus dat de deelnemers vaak buiten de target hebben geklikt. Dit toont dus dat de targets niet groot genoeg zijn om een accuraat resultaat te geven.

5.6 Conclusie studie

In deze studie werd er onderzocht of de deelnemers in staat zijn om mid-air targets vlot en accuraat te bereiken. Ook werd er nagegaan hoe vermoeiend het is om continu naar mid-air targets te wijzen. Het doel van deze studie is om te achterhalen wat de perfecte parameters zijn voor de individuele targets. De parameters naarwaar gezocht is, zijn de positie en grootte van de targets.

In eerste instantie is er gekeken naar de snelheid waarmee de deelnemers een target kunnen bereiken. Voor zowel de trainingsfase als testfase kunnen de deelnemers de targets vlot bereiken wat aantoont dat dit soort interactie kan gebruikt worden om efficiënte interactie te hebben.

Ook is er onderzoek gedaan naar de vermoeidheid van de verschillende mid-air targets. De vermoeidheid blijft over de verschillende testrondes relatief gelijk. De vermoeidheid voor de individuele targets komt overeen met de verwachtingen. Targets die hoger staan zijn vermoeiender omdat de gebruiker zijn armen hoger moet bewegen.

Vervolgens is de accuraatheid onderzocht, wat het belangrijkste onderdeel van deze studie is. Als eerste is er gekeken naar de verdeling van de targets. Uit de studie bleek dat de deelnemers goed het onderscheid kunnen maken tussen de verschillende targets. Verder is er ook gekeken wat de optimale positie is voor de verschillende targets. Hieruit blijkt bijvoorbeeld dat de onderste targets best lager gepositioneerd worden en dat de targets in de bovenste rij voor kolom 1 en 2 best iets verder. Ook is er gekeken hoe ver de deelnemers naast de target klikken. Gemiddeld gezien klikken de deelnemers de grootte van een halve target naast de target.

Als laatste is er ook nog gevraagd naar de ervaring van de gebruiker zelf. De deelnemers gaven zelf aan dat er een klein onderscheid is voor de vermoeidheid en accuraatheid tussen de dominante en niet-dominante

hand. Ook over de moeilijkheid van de targets gaven de deelnemers een eenduidig antwoord. De targets in de eerste kolom en de targets in de bovenste rij waren iets moeilijker en onnatuurlijker.

Uit deze studie blijkt dus dat de deelnemers in staat zijn om verschillende mid-air targets van elkaar te onderscheiden. Wanneer er naar meer concrete resultaten gekeken wordt, is er te zien dat de accuraatheid nog niet optimaal is.

Mid-air targets kunnen dus gebruikt worden als een virtueel menu, maar er kunnen best nog hulpmiddelen voorzien worden om het voor de gebruiker moeilijker te maken om een bepaalde target te missen. Ook kan het interessant zijn om in mogelijke vervolgstudies te gaan kijken, wat er gebeurt met de verschillende metrieken als de deelnemers meer kunnen trainen of het systeem langer gebruiken. Verder kan er ook nog onderzoek gedaan worden naar verschillende indelingen van de targets.

Hoofdstuk 6

Mid-air menu implementatie

In dit hoofdstuk worden de gebruikte technologieën en de architectuur van het menu systeem uitgelegd. Ook worden de design keuzes van het mid-air menu besproken. Het menu wordt geïntegreerd in een bestaande VR applicatie genaamd PROROB. Deze applicatie is onderdeel van het onderzoekscentrum EDM van de UHasselt. Het doel van de applicatie is om robot paden te creëren en te bewerken voor spray painting in virtual reality.

Binnen PROROB is er ook een menu systeem om de positie en oriëntatie van de spuitbus aan te passen. Het doel binnen deze thesis is om dit menu te transformeren naar een mid-air menu. Het mid-air menu moet gemakkelijk bruikbaar zijn en moet verbeteringen op basis van de mid-air studie bevatten.

6.1 Technologieën

Het mid-air menu wordt toegepast in een virtual reality applicatie. Hierdoor wordt er gewerkt met Unity. Unity is één van de meest gebruikte omgevingen om 3D applicaties in te ontwikkelen. Binnen Unity wordt er gewerkt met de taal C#.

Om VR applicaties te ontwikkelen met unity wordt er gewerkt met SteamVR. SteamVR laat het toe om virtual reality applicaties te ervaren voor verschillende HMD's zoals de HTC VIVE of Oculus Rift. Om deze applicaties te ontwikkelen wordt OpenVR gebruikt. OpenVR is de API die het toelaat om VR applicaties te ontwikkelen voor systemen die SteamVR ondersteunen.

Om het menu de oriëntatie en rotatie van het menu juist te plaatsen voor de gebruiker, wordt er een HTC Vive tracker gebruikt.

6.2 Structuur

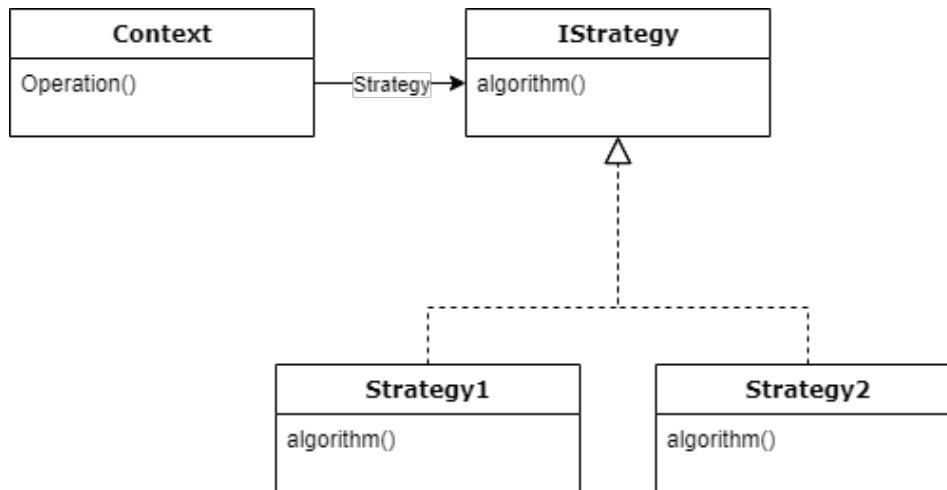
Om de applicatie overzichtelijk te houden, is er gekozen om te werken met het strategy design pattern. Het strategy patroon is een behavioral pattern. Dit wil zeggen dat de gemeenschappelijke communicatiepatronen tussen objecten geïdentificeerd worden. Hierdoor wordt de flexibiliteit en de uitbreidbaarheid van het programma vergroot.

Het strategy design pattern is een patroon dat het toelaat om verschillende algoritmes te definiëren. Tijdens runtime kunnen de verschillende algoritmes elkaar afwisselen. In figuur 6.1 worden de verschillende onderdelen van het strategy patroon getoond.

In eerste instantie is er de Context klasse. Deze klasse bevat een referentie naar een bepaald strategy object en communiceert hiermee via de IStrategy interface.

Vervolgens is er de IStrategy interface, deze bevat de methodes die de verschillende algoritmes moeten implementeren. Ook bevat het een methode die de context klasse nodig heeft om de strategy uit te voeren.

Ten slotte zijn er nog de concrete strategies. Dit bevat de code van de verschillende algoritmes.



Figuur 6.1: De verschillende onderdelen van het strategy design pattern.

Dit patroon is geschikt om de verschillende acties te implementeren. Op deze manier kunnen er gemakkelijk nieuwe acties toegevoegd worden.

Doordat het menu geïntegreerd is met een bestaande PROROB applicatie, is deze structuur aangepast aan de bestaande code. De IStrategy interface komt overeen met de abstracte EditTool klasse. Elke transformatie is een specifieke implementatie van de EditTool. Verder is er een 'ActionRunner' klasse. Deze klasse houdt de huidige geselecteerde EditTool bij. Ook is er een 'Changer' klasse. Deze klasse gaat de parameters van de EditTool in de 'ActionRunner' klasse updaten op basis van de selectie van de gebruiker.

Voor de designkeuzes van het menu zijn er aparte scripts voorzien. Zo zijn er bijvoorbeeld scripts voor het positioneren van het menu, de bewegende bollen en het veranderen van de transparantie van de menu items.

6.3 Menu principe

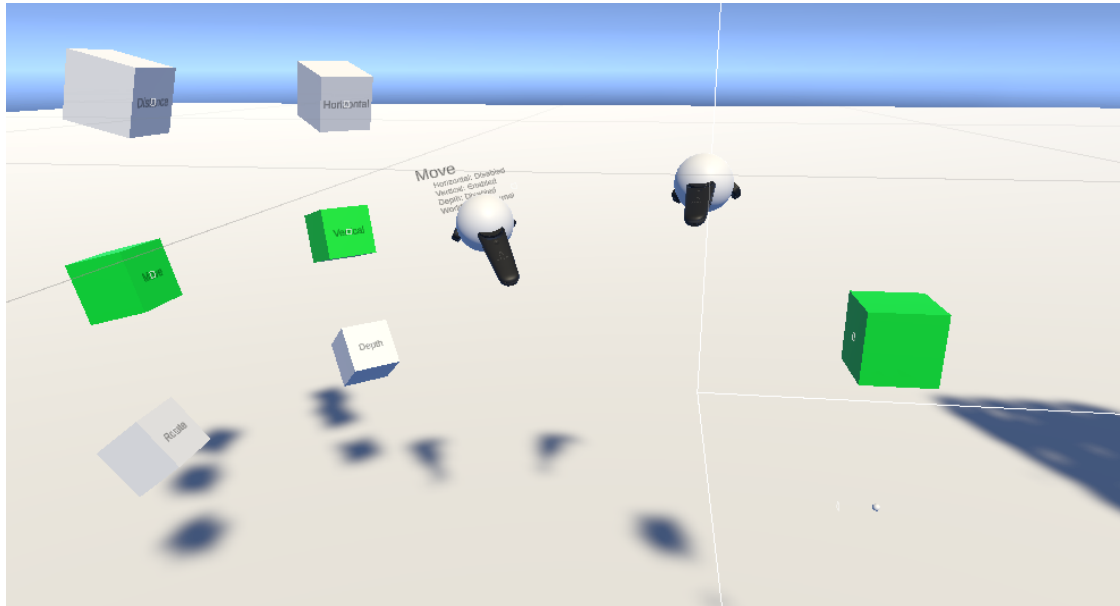
Het menu moet gelijkaardige acties als in de PROROB applicatie ondersteunen. De acties dienen om een virtuele spuitbus te bedienen. Zo is er een translatie, rotatie en schaal actie voorzien. Elk van deze acties hebben hun eigen set van parameters. Zo kan er voor elke actie gekozen worden in welke dimensies deze moet uitgevoerd worden. Hierdoor is het voor de gebruiker gemakkelijk om een bepaalde transformatie accurater uit te voeren. Wanneer de gebruiker bijvoorbeeld een verticale lijn wil tekenen, kan hij de translatie beperken tot enkel de X- en Z-as waardoor de Y-as constant blijft.

Ook heeft elke actie een snelheidsfactor die de gebruiker kan verhogen of verlagen. Wanneer de gebruiker de positie van de spuitbus aanpast, wordt de snelheidsfactor mee in rekening genomen. Met een hoge snelheidsfactor kan de gebruiker met een kleine beweging al grote aanpassingen doen. Indien er voor een lage snelheidsfactor gekozen wordt, kan de gebruiker meer accurate aanpassingen doen.

De gebruiker kan ook een zoom aanzetten waardoor hij de gekozen actie veel nauwkeuriger kan uitvoeren. Tot slot is er ook nog een menu item voorzien die alle targets van kant verwisselt. Hierdoor kan de gebruiker kiezen met welke hand hij de hoofdacties wil uitvoeren.

6.4 Design keuzes

Zoals vermeld in het vorige hoofdstuk, zijn de deelnemers in staat om de verschillende targets te onderscheiden, maar kunnen ze de targets niet met genoeg accuraatheid selecteren. Dit toont aan dat het moeilijk is om in mid-air onzichtbare targets te selecteren. Daarom is het belangrijk dat het menu ervoor zorgt dat de kans om een verkeerd item te selecteren minimaal is. In figuur 6.2 wordt het gecreëerde mid-air menu getoond. Hierop zijn een aantal design keuzes zichtbaar zoals de status van het menu en de positie van de targets.



Figuur 6.2: Voorbeeld van het gecreëerde mid-air menu.

6.4.1 Positie

Het eerste belangrijke aspect van het menu is de positie van de verschillende targets. In de studie werden de targets allemaal op een bol gepositioneerd met als middelpunt de gebruiker zelf. De grootte van de bol is voor elke gebruiker bepaald op basis van zijn armlengte. Om er voor te zorgen dat de deelnemers gemakkelijk aan de targets kunnen, is de grootte van de bol iets kleiner dan de armlengte. Hierdoor moet de deelnemer zijn arm niet volledig strekken om een target aan te raken. Dit heeft ervoor gezorgd dat de deelnemers voor sommige targets hun arm op een onnatuurlijke manier moeten houden. Uit het interview bleek dan ook dat de targets in de eerste kolom onnatuurlijk waren voor de gebruiker.

Uit de studie blijkt ook dat de deelnemers elke target op een bepaalde manier missen. Zo wordt er voor bijvoorbeeld target LB1 lager geklikt. Door deze target dan standaard lager te positioneren, gaat de gebruiker minder vaak de target missen.

Figuur 4.8 geeft een goed overzicht van de positie waar er gemiddeld voor elke target geklikt is. In het design van het mid-air menu is er in eerste instantie voor gekozen om de targets op de gemiddelde punten te plaatsen. Dit gemiddelde komt overeen met de positie waar dat de deelnemer gemiddeld gezien de target verwacht. Door de targets op het gemiddelde te plaatsen is het de bedoeling dat de gebruiker minder vaak de target missen.

6.4.2 Grote van targets

In de studie werden de targets voorgesteld als een kubus met er rond een onzichtbare sphere collider. De colliders van elke target had een vaste grootte. De straal van de sphere collider is 12.5 cm, wat dus betekent dat elke target 25 cm groot is. De studie heeft aangetoond dat de deelnemers gemiddeld gezien 18.5 cm van het middelpunt van de target klikken. Het is dus belangrijk om de targets voldoende groot te maken.

Voor de menu implementatie is ervoor gekozen om de targets groter te maken. Dit geeft wel geen garantie

dat de gebruiker de targets nu minder vaak gaat missen. Ook heeft dit als gevolg dat de targets kunnen overlappen. Om dit op te lossen moet de targets verder uit elkaar geplaatst worden of minder targets in het totaal zijn.

In plaats van simpelweg de sphere collider van de targets te vergroten, zijn er technieken toegepast om de targets oneindig groot te maken. Deze technieken zijn geïnspireerd op ideeën beschreven in de paper 'Beating fitt's law' van Balakrishnan et al. [3].

Een vaak gebruikte techniek is het oneindig groot maken van een bepaalde target. Deze techniek wordt vaak gebruikt in de traditionele 2D desktop interfaces. Een voorbeeld hiervan is de startknop in het windows besturingssysteem. Traditioneel gezien staat deze knop in de linkerbenedenhoek van de interface. De cursor van de gebruiker kan niet verder gaan dan de randen van het scherm. Hierdoor bereikt de gebruiker de knop altijd als de beweging voldoende groot is.

Het idee achter deze techniek wordt toegepast in het mid-air menu. Voor een aantal targets is het mogelijk om ze in een bepaalde dimensie oneindig groot te maken. Hierdoor wordt het voor de gebruiker veel gemakkelijker om de target te raken.

De colliders van de targets in de bovenste rij kunnen oneindig hoog zijn. Er zijn daar geen andere targets meer waar mee de colliders kunnen botsen. Hierdoor kan de gebruiker zelf kiezen hoe hoog hij zijn arm tilt om de target te raken. Een gelijkaardig principe geldt voor de targets in de onderste rij.

Buiten de hoogte kan dit ook in de andere dimensies worden toegepast. De targets kunnen ook oneindig diep zijn. Opnieuw kan de gebruiker hierdoor zelf bepalen hoe ver hij zijn arm strekt om de target aan te raken. Ook in de breedte kan dit toegepast worden. Kolommen in de buitenste kolommen kunnen oneindig breed zijn waardoor de gebruiker opnieuw minder nauwkeurig moet zijn.

Door de targets oneindig groot te maken, is het voor de gebruiker veel gemakkelijker om een bepaalde target te raken. Ook kan de gebruiker voor een deel zijn eigen gedachtenpatroon over de positionering van de targets gebruiken. Dit zorgt ervoor dat het veel natuurlijker is voor de gebruiker om een bepaalde target te selecteren.

Natuurlijk is het ook zo dat de target niet letterlijk oneindig groot moet zijn. De colliders moeten niet veel groter zijn dan de armlengte van de gebruiker, aangezien de gebruiker toch nooit aan dat deel kan komen. Ook mag de collider niet oneindig groot zijn in de richting van de gebruiker. Indien dit het geval zou zijn, gaat de gebruiker continu ongewenste targets aanraken.

6.4.3 Fading targets

Een ander belangrijk onderdeel van de studie was dat de deelnemers onzichtbare targets moesten aanraken. Uit de resultaten blijkt dat de accuraatheid voor de onzichtbare targets niet goed genoeg was. In de trainingsfase daarentegen waren de targets wel zichtbaar en lag de accuraatheid veel hoger. In de praktijk is het niet altijd nodig dat de targets constant zichtbaar zijn.

In het mid-air menu is ervoor gekozen om de targets een fading effect te geven. Als de hoek tussen de target en de kijkrichting van de gebruiker verkleint, wordt de targets steeds meer zichtbaar. Het idee er achter is dat wanneer de gebruiker naar de target kijkt, hij de positie van de target wil leren. Indien de gebruiker niet naar de target kijkt, moet de target niet zichtbaar zijn. Hierdoor kan de target ook niet in de weg staan.

Ook zorgt dit ervoor dat nieuwe gebruikers de positie van de targets gaandeweg kunnen leren. De ervaren gebruikers, die de posities van de targets al goed kennen, kunnen zonder te kijken de target aanraken. Hiervoor moet de target dan ook niet zichtbaar zijn.

6.4.4 Bewegende bol

Het doel van het mid-air menu is dat de gebruikers uiteindelijk zonder te kijken de menu items kunnen selecteren. De resultaten van de studie tonen aan dat de deelnemers nog niet accuraat genoeg zijn om blindelings een item te selecteren. Daarom is het nodig om hulpmiddelen te voorzien om het voor de gebruiker makkelijker te maken om het juiste item te selecteren.

Zoals in 6.4.3 beschreven is er voor gekozen om de menu items niet altijd zichtbaar te tonen. Wanneer het menu niet zichtbaar is, wordt er op het middelpunt van het menu item een kleine bol getoond. Deze bol draait rond het middelpunt. Het idee hierachter is dat wanneer de gebruiker niet naar de menu items

kijkt, hij in de zijkanten van zijn gezichtsveld deze bol ziet bewegen. Volgens verschillende bronnen, zoals bijvoorbeeld *scientific american* [8] maakt de zijkant van het gezichtsveld gebruik van rods in de plaats van cones. Rods zijn gevoeliger voor beweging, waardoor bewegingen beter worden waargenomen. Deze bol moet dus als een referentiepunt dienen om de gebruiker naar toe te laten bewegen. Dit zou het gemakkelijker moeten maken om het juiste item te selecteren zonder dat de gebruiker zijn hoofd moet draaien om precies genoeg te zijn.

6.4.5 Menu status

Bij het gebruik van een menu, is het ook belangrijk voor de gebruiker dat het duidelijk is welk menu item hij heeft geselecteerd. Er worden twee hulpmiddelen voorzien om duidelijk te maken aan de gebruiker welk menu item hij geselecteerd heeft.

Net zoals in traditionele desktop omgevingen wordt er gewerkt met kleur. Wanneer de gebruiker een menu item activeert, verandert deze van kleur. Hierdoor is het voor de gebruiker duidelijk zichtbaar welk menu item geselecteerd is.

Ten tweede wordt de huidige modus en parameters getoond in tekstvorm. Deze tekst bevat onder andere de huidige geselecteerde actie met een overzicht van de al dan niet geactiveerde parameters. De tekst wordt vast gepositioneerd aan de gebruiker zijn hand. Hierdoor heeft de gebruiker een vast referentiepunt om te controleren welke menu items actief zijn.

6.5 Target keuze

Buiten het toepassen van de verschillende design beslissingen, moet er ook beslist worden welk menu item wordt toegekend aan welke target.

Uit de studie blijkt dat de targets LT3, LT4, RT3 en RT4 een significant verschil hebben qua accuraatheid ten opzichte van een groot deel van de andere targets. Om er voor te zorgen dat de gebruikers zo accuraat mogelijk zijn zou er logischerwijs gekozen worden om deze targets te gebruiken. Deze targets geven qua accuraatheid betere resultaten dan de andere targets maar hun positie is niet ideaal om te kunnen gebruiken in diverse toepassingen. Deze targets staan centraal voor de gebruiker. Wat het gemakkelijk maakt om te botsen met de andere targets.

Ook zijn dit slechts vier targets met een significant betere accuraatheid. Voor veel toepassingen is het zo dat er meer dan vier opties nodig zijn. Hierdoor volstaat het niet om alleen deze targets te gebruiken. Binnen een menu is het ook aangewezen om gelijkaardige opties te groeperen en eventueel om een hiërarchische structuur te gebruiken. Indien alleen deze targets gebruikt worden, ligt er een beperking op de aantal mogelijkheden.

Deze target hebben een betere accuraatheid maar ook de net besproken beperkingen. Daarom is er voor gekozen om andere targets te gebruiken voor de hoofdacties binnen het menu. Het zou natuurlijk niet slim zijn om de meest accurate targets niet te gebruiken. Deze targets kunnen gebruikt worden voor meer risicovolle acties. Voorbeelden zijn een reset of confirm actie. Deze acties kunnen een groot effect hebben op het werk van de gebruiker. Daarom is het gewenst dat de gebruiker deze niet per ongeluk kan selecteren. Ook wil de gebruiker zeker weten dat hij de juiste optie selecteert. Daarom worden deze opties best toegekend aan de meest accurate targets.

Voor de hoofdacties binnen het menu zijn er dus andere targets gekozen. De hoofdacties zijn het kiezen van de transformatie en de dimensies waarin de gebruiker de transformatie wil uitvoeren. Er zijn drie verschillende transformaties namelijk: 'move', 'rotate' en 'distance'. Voor elke transformatie zijn er ook drie dimensies namelijk: 'horizontal', 'vertical' en 'depth'.

In deze menu implementatie is ervoor gekozen om het menu van de hoofdtaak weg te positioneren. Dit zorgt ervoor dat een menukeuze geen of weinig invloed heeft op de andere taken van de gebruiker. Ook is het hierdoor veel moeilijker om per ongeluk een menu te activeren.

Er is gekozen om de gebruiker de transformatie en dimensie met zijn niet-dominante hand te laten selecteren. Hierdoor kan de gebruiker met zijn dominante hand de actie preciezer uitvoeren. Ook bleek uit de studie dat er geen significant verschil was tussen de accuraatheid van de dominante en niet-dominante hand.

In eerste instantie is er voor gekozen om de eerste en tweede kolom te gebruiken voor respectievelijk de keuze van de transformatie en dimensie. Hierdoor kunnen de menu items niet in de weg staan tijdens het uitvoeren van de hoofdactie. De targets zijn vergroot en op betere posities geplaatst op basis van de resultaten van de studie. Hierdoor gaat het voor de gebruiker gemakkelijker zijn om de juiste target te selecteren.

Door de eerste en tweede kolom te gebruiken, zijn de menu items gescheiden van de hoofdactie. Dit heeft wel als gevolg dat de targets onnodig dicht tegen bij staan. Ook is het zo dat door de colliders van de targets te vergroten, de colliders nu kunnen overlappen. Daarom is ervoor gekozen om de tweede kolom verder weg van de eerste kolom te positioneren. De nieuwe positie van de tweede kolom ligt in het midden van de originele tweede en derde kolom. Door de targets verder uit elkaar te positioneren, kunnen de targets groter gemaakt worden. Dit zijn hulpmiddelen om het voor de gebruiker moeilijker te maken om een foute target te selecteren.

Vervolgens zijn er nog twee menu items die de snelheid van de transformatie bepalen. Deze acties zijn gepositioneerd in de eerste kolom aan de dominante hand van de gebruiker. De transformaties en hun dimensies nemen elk twee kolommen aan de niet-dominante hand. Om het menu structuur te geven is er dan voor gekozen om deze twee items aan de kant van de dominante hand te plaatsen. Dit zijn menu items die normaal gezien niet vaak geselecteerd moeten worden. Hierdoor kan de dominante hand nog maximaal benut worden voor het uitvoeren van de transformatie.

Hoofdstuk 7

Studie 2: vergelijking mid-air en point menu

In deze studie wordt er onderzoek gedaan naar de performantie en gebruiksvriendelijkheid van het mid-air menu. Het mid-air menu wordt vergeleken met een bestaand point menu in de PROROB applicatie.

Zoals eerder al vermeld, is PROROB een applicatie waarbij de gebruiker met behulp van transformaties de spuitbus juist moet richten. In de studie gaat de gebruiker deze taak meermaals moeten uitvoeren. De typische werkwijze van de gebruiker is om de juiste transformatie met de gewenste parameters te selecteren om daarna de transformatie uit te voeren. Dit kan meermaals herhaald worden om de spuitbus juist te positioneren.

In deze studie is het interessant om te bestuderen of de tijd dat de gebruiker spendeert aan het selecteren van een menu item minder is ten opzichte van een point menu.

In het al bestaande point menu moet de gebruiker het menu open klikken om vervolgens de actie aan te klikken om dan de gewenste dimensie te kiezen. Tot slot moet de gebruiker het menu opnieuw dicht klikken om de actie te kunnen uitvoeren. In het mid-air menu daarentegen moet de gebruiker de actie selecteren door er naar te wijzen en eventueel nog de gewenste dimensies. Het aantal stappen ten opzichte van het point menu is lager. Er wordt dus gekeken of dit ook resulteert in een snellere tijd.

Verder wordt ook nog de ervaring van de gebruiker onderzocht. Zo is het interessant om te onderzoeken hoe gemakkelijk en efficiënt zij het menu vinden.

7.1 Methodologie

Deze sectie beschrijft het verloop van de studie.

7.1.1 Doel

Het doel van de usability test is om te na te gaan hoe bruikbaar een mid-air menu is ten opzichte van een point menu. In de test wordt het mid-air menu vergeleken met een meer traditioneel point menu. Het mid-air menu is gemaakt met als doel om snelle en efficiënte interactie te hebben met een menu in virtual reality. Daarom wordt de tijd dat de gebruiker spendeert aan het selecteren van een menu item in beide menu's met elkaar vergeleken. Verder wordt er ook onderzoek gedaan naar de verschillende aspecten van usability. Het is belangrijk dat het menu gebruiksvriendelijk is.

7.1.2 Deelnemers

Aan de studie hebben 10 personen deelgenomen. De studie vond plaats in het EDM op de universitaire campus in Diepenbeek. Alle deelnemers hebben een leeftijd tussen 18 en 50 jaar. Van de deelnemers hadden 7 personen weinig ervaring met virtual reality, maar 8 van de 10 deelnemers hadden wel voldoende ervaring met 3D applicaties zoals video games.

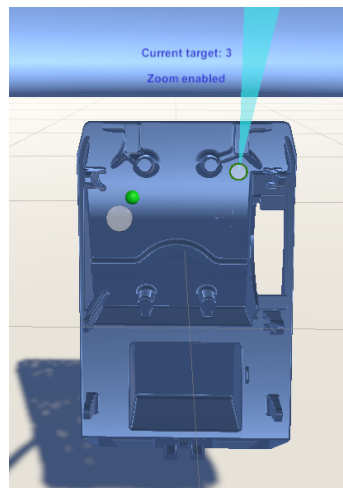
7.1.3 Apparatuur

Voor de studie is er gebruik gemaakt van een standaard head mounted display met bijhorende controllers. De gekozen head mounted display is de HTC Vive pro 2. De gebruikte controllers zijn de controllers die standaard worden geleverd bij de HTC Vive. Origineel was het de bedoeling om, net zoals in de vorige studie, de Pimax 8K te gebruiken. Door een hardware probleem kon deze headset niet gebruikt worden voor deze studie.

7.1.4 Taakomschrijving

Voor elke deelnemer bestaat de studie uit twee delen. De deelnemers moeten de pointer van de spuitbus 20 keer op een voorafgedefinieerde target positioneren met behulp van de drie transformaties: move, rotate en distance. In figuur 7.1 wordt getoond wat de deelnemer te zien krijgt. De deelnemer moet de grote grijze cirkel (links) positioneren op de target (rechts). De straal die uit de target komt geeft een indicatie voor een mogelijke oplossing. Als de spuitbus (groene bol) hierin gepositioneerd wordt, is de kans groot dat de positie en oriëntatie klopt.

Elke deelnemer moet zowel het point menu als het mid-air menu gebruiken. In figuur 6.2 en figuur 7.2 wordt respectievelijk het mid-air menu en point menu getoond. De deelnemers krijgen de tijd om te experimenteren met de werking van beide menu's. Als de deelnemers aangeven dat ze vertrouwd geraakt zijn met het menu start de studie.



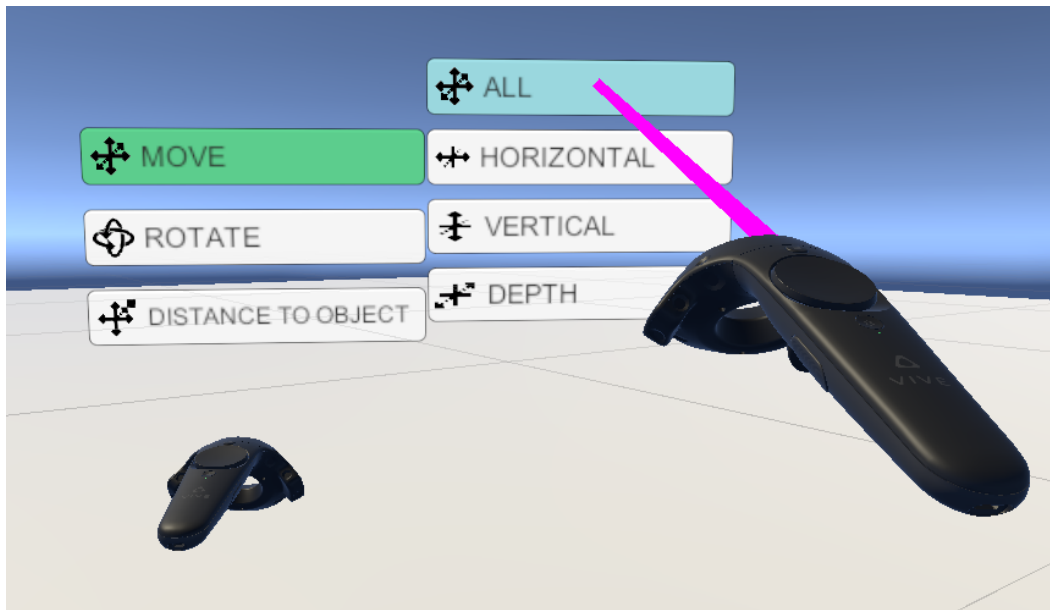
Figuur 7.1: Voorbeeld van de target die de gebruiker juist moet positioneren.

De deelnemers moeten met elk menu tien targets juist positioneren. De focus van de studie ligt op de menu interactie en daarom mag de gebruiker zelf bepalen wanneer de target goed genoeg gepositioneerd is. Na elk tien targets, wat overeenkomt met het gebruik van een bepaald menu, moeten de deelnemers een korte vragenlijst invullen. De gebruikte vragenlijst is de NASA-TLX. Dit is een veel gebruikte vragenlijst om de effectiviteit van een taak of systeem te beoordelen.

Nadat de gebruiker alle 20 targets juist gepositioneerd heeft en dus beide menu's heeft gebruikt, krijgt hij nog een uitgebreidere vragenlijst over hun ervaring met het mid-air menu.

7.2 Analyse

Het doel van de analyse is om na te gaan hoe de tijd dat de gebruiker spendeert in het selecteren van een menu item evolueert ten opzichte van een traditioneel point menu. De tijd die gemeten wordt heeft dus te maken met het menu en niet met de actie die wordt uitgevoerd. Door implementatie verschillen moeten de timers in beide menu's reageren op verschillende events. Om de tijden vergelijkbaar te houden lopen de timers enkel wanneer dat de gebruiker interactie heeft met het menu. Voor het mid-air menu wordt de tijd gemeten vanaf het moment dat de gebruiker het eerste item selecteert totdat de gebruiker begint met de actie uit te voeren. Bij het point menu begint de timer te lopen vanaf het moment dat de gebruiker het menu opent. Ook hier stopt de timer wanneer de gebruiker de actie begint uit te voeren. Het idee



Figuur 7.2: Voorbeeld van het pointmenu.

hier is dat de tijd gemeten wordt vanaf het moment dat de gebruiker een menu item wil selecteren tot het moment dat hij de actie wil uitvoeren.

Verder is er ook bestudeerd hoe de gebruiker de twee verschillende menu's ervaart. Hier wordt er vooral gefocust op de verschillende componenten van usability. De componenten die onderzocht worden zijn: learnability, efficiency, memorability, errors. Ook wordt er gepeild naar het nut van de verschillende design keuzes.

Er worden twee verschillende menu's onderzocht, elke deelnemer gebruikt de twee verschillende menu's tijdens de test. Daarom is er gekozen voor een within-subject design. Elke deelnemer krijgt een ID op basis van het aantal al deelgenomen deelnemers. Als de deelnemer een even ID toegekend krijgt, start hij met het point menu. In het andere geval start de deelnemer met het mid-air menu.

In deze studie wordt er onderzocht of de deelnemers sneller een menu item kunnen selecteren met het mid-air menu dan met het point menu. Daarom is de hypothese:

- **H0:** Er is geen verschil tussen de gemiddelde menu-item selectie snelheid van het mid-air menu en het point menu.
- **H1:** Er is een verschil tussen de gemiddelde menu-item selectie snelheid van het mid-air menu en het point menu.

7.3 Resultaten

In dit onderdeel worden de resultaten van de usability studie besproken. In eerste instantie wordt er gekeken naar de kwantitatieve resultaten om nadien de kwalitatieve resultaten te bespreken.

7.3.1 Kwantitatieve resultaten

Als eerste is onderzocht hoe lang de deelnemers nodig hebben om een menu item te selecteren voor beide menu's. Voor het mid-air menu spenderen de gebruikers gemiddeld 3.32 seconde in het menu vooraleer ze de actie uitvoeren. Bij het point menu is dit gemiddeld slechts 1.14 seconde.

Vervolgens is er onderzocht of er een significant verschil is tussen de gemiddelden voor de twee menu's. Hiervoor is er een Welch Two-sample t-test uitgevoerd. Deze test resulteerde in een p-waarde van 3.245e-14. Dit is kleiner dan de alfa waarde van 0.05. De null hypothese mag dus verworpen worden, wat wil zeggen dat er dus significante verschillen zijn tussen de gemiddelde snelheid van de twee menu's.

Target	Gem. snelheid mid-air menu	Gem. snelheid point menu
1	4.19s	1.84s
2	2.34s	1.09s
3	2.82s	0.94s
4	2.31s	0.93s
5	3.29s	0.81s
6	2.36s	0.75s
7	1.84s	0.81s
8	2.14s	1.00s
9	1.81s	0.99s
10	1.62s	0.76s

Tabel 7.1: Evolutie van de snelheid gegroepeerd per target.

Het mid-air menu is ontwikkeld met het idee om de interactie met het menu sneller te maken. Uit deze studie blijkt dat dit voorlopig niet het geval is. Om de exacte reden te bepalen is er verder onderzoek nodig. Door de deelnemers te observeren kan er wel al logisch nagedacht worden over mogelijke redenen.

Ten eerste gaven 90% van alle deelnemers aan weinig tot geen ervaring te hebben met virtual reality. Dit in combinatie met een nieuw type menu kan er voor gezorgd hebben dat de snelheid lager was. Toch gaf ook 80% van de deelnemers aan een beperkte ervaring te hebben met een point menu. Normaal gezien is het gebruik met een standaard point menu intuïtiever aangezien het principe heel gelijkaardig is aan een traditioneel menu op een desktop interface.

Verder is het ook zo dat de deelnemers slechts een beperkte tijd hadden om te trainen met de verschillende menu's. Vooraleer de deelnemers de tien targets juist moesten positioneren, konden ze zelf bepalen hoe lang ze wilden oefenen met het menu. De training diende vooral om de verschillende acties te leren kennen omdat learnability één van de aspecten is die onderzocht wordt. Alle deelnemers hebben niet veel tijd gespendeerd aan de training. Met het mid-air menu hebben de deelnemers gemiddeld 2 minuten en 32 seconden getraind. Met het point menu was dit slechts 1 minuut en 47 seconde. Dit kan er dus voor gezorgd hebben dat de tijd niet de optimale tijd is. Indien de deelnemers meer tijd hadden genomen om te trainen, hadden ze misschien betere resultaten. In tabel 7.1 is duidelijk te zien dat voor de eerste target de gemiddelde snelheid hoger ligt. Dit komt waarschijnlijk omdat ze toch nog niet heel vertrouwd waren met de werking van het mid-air menu. Voor de rest van de targets is de gemiddelde snelheid beter.

Om dit te controleren is er een gekeken of er een correlatie is tussen de trainingstijd en de gemiddelde snelheid van de deelnemers. De Pearson correlatie test geeft een correlatie coëfficiënt van -0.57. De p-waarde is kleiner dan 0.05 wat betekent dat de correlatie significant is. Deze test geeft dus aan dat als de deelnemers meer tijd hadden genomen om te trainen, hun snelheid ook beter zou zijn.

Een andere reden zou te maken kunnen hebben met de onervarenheid van de deelnemers met het mid-air menu. Tijdens de relatief korte duur van de studie moesten de deelnemers het menu slechts gebruiken voor tien targets juist te positioneren. Door de korte duur waren de deelnemers nog niet in staat om het menu blindelings te gebruiken. Hierdoor moesten de deelnemers elke keer hun hoofd draaien om een menu item te selecteren. In tegenstelling tot het point menu waarbij de deelnemers zelf konden bepalen waar ze het menu opende. Dit is normaal gezien voor de gebruiker zelf waardoor er geen extra beweging nodig is. Indien de gebruiker meer tijd zou krijgen om te oefenen en de posities van de verschillende menu items leert kennen, kan hij blindelings het gewenste menu item selecteren. Hierdoor zou de snelheid ook moeten verbeteren.

Ook was tijdens de studie zichtbaar dat de gebruikers voorzichtiger waren bij het mid-air menu. Ze probeerden hier om accidental touches te vermijden, waardoor ze niet op volledige snelheid gewerkt hebben. De deelnemers controleerden ook extra of ze het juiste menu-item geselecteerd hebben en dat ze niet per ongeluk een verkeerde menu item geactiveerd hadden. Beide zorgen ervoor dat de tijd die ze spenderen in het menu hoger wordt.

7.3.2 Kwalitatieve resultaten

In dit onderdeel worden de kwalitatieve resultaten van de studie besproken. Er wordt hier vooral ingegaan op verschillende aspecten van usability en de design keuzes.

Learnability & Memorability

Een belangrijk onderdeel van het mid-air menu is dat gemakkelijk te gebruiken is (learnability) en dat de gebruiker de positie van de targets leert kennen en kan onthouden (memorability). Om dit te bepalen is er naar de mening van de deelnemers gevraagd.

In eerste instantie is er gevraagd of het menu gemakkelijk was om te gebruiken. Hier hebben de deelnemers allemaal ja op geantwoord. Ook hebben sommige deelnemers hier vermeld dat het menu gemakkelijk was om te leren en dat het gebruiksvriendelijk is. Vervolgens is er onderzocht of het duidelijk is hoe het menu werkt. Ook hierop werd eenduidig ja geantwoord. Hier heeft wel één deelnemer vermeld dat hij niet direct doorhad dat het menu een hiërarchische structuur had.

De belangrijkste reden voor het design van het mid-air menu is dat de gebruiker na verloop van tijd blindelings een menu item moet kunnen selecteren. Door de beperkte duur van de studie kwam dit nog niet echt voor. Daarom is er aan de deelnemers gevraagd of ze dachten dat ze na verloop van tijd blindelings een menu item zouden kunnen selecteren. Ook hier dachten alle deelnemers dat ze dit na een bepaalde tijd wel zouden kunnen. Vervolgens is er aan de deelnemers gevraagd hoe lang ze denken nodig te hebben om blindelings een menu item te kunnen selecteren. De antwoorden hierop waren ook redelijk gelijkaardig. De meeste deelnemers zeiden dat ze ongeveer een uur nodig zouden hebben om dit te kunnen. Dit is een relatief korte tijd wat opnieuw aantoont dat het menu gebruiksvriendelijk is.

Verder hebben twee deelnemers hier nog interessante opmerkingen over gegeven. Eén deelnemer vermeldde dat hij het nu blindelings zou kunnen, maar indien het aantal menu items stijgt dit niet meer mogelijk zou zijn. Dit komt overeen met de resultaten van de eerste studie. In deze studie waren er ook meer targets en hier waren de deelnemers ook niet accuraat genoeg. Een andere deelnemer dacht dat er ook een beperking lag op het blindelings selecteren. Hij vond dat er tactile feedback ontbrak om consistent het juiste menu item blindelings te selecteren. Hij vergeleek het met blind typen op een smartphone. Dit is ook mogelijk, maar ook hier worden er soms fouten gemaakt omdat tactile feedback ontbreekt.

Efficiency

Het volgende onderdeel is efficiency. Het is belangrijk dat de gebruiker efficiënt het gewenste menu item kan selecteren. In het geval van een mid-air menu moeten de menu items vlot bereikbaar zijn. De menu items hebben op basis van de resultaten van de vorige studie een nieuwe betere positie gekregen. De targets zijn ook verder van elkaar gepositioneerd en zijn groter gemaakt. Dit om ervoor te zorgen dat de gebruiker veel gemakkelijker de juiste target kan selecteren.

Aan de deelnemers is gevraagd of ze vlot de verschillende menu items konden bereiken. Alle deelnemers vonden dat de targets vlot bereikbaar waren. Toch zijn tussen de verschillende antwoorden nog twee verschillende meningen zichtbaar. De meeste deelnemers vonden het handig dat de targets buiten het zicht gepositioneerd stonden. Hierdoor konden ze met een snelle bewegingen het gewenste menu item selecteren. Enkele andere deelnemers vonden het storend dat ze de continue moeten wegkijken van de hoofdtaak. Ook dachten deze deelnemers dat ze hierdoor sneller fouten konden maken.

Het doel van het mid-air menu is om blindelings, snelle en simpele bewegingen te maken om een menu item te selecteren. Door de korte trainingstijd en duur van de studie, waren de deelnemers nog niet in staat om dit blindelings te doen. Veel deelnemers hebben wel vermeld dat ze het nut van het mid-air menu begrijpen. Ook zeiden ze dat het gebruik van het menu veel efficiënter wordt als ze blindelings een item zouden kunnen selecteren.

Errors

Verder is er nog het error component van usability. Bij een menu design is het belangrijk dat de gebruikers zo weinig mogelijk foute menu items selecteren. In vergelijking met andere menu designs, is het mid-air menu redelijk gevoelig aan het maken van fouten. Zeker als het de bedoeling is als de gebruiker zonder

te kijken een menu item selecteert. De gebruiker kan niet 100% zeker weten dat hij het gewenste menu item heeft geselecteerd.

Zoals eerder al aangehaald, zijn de menu items beter gepositioneerd om de kans op fouten te minimaliseren. In de studie is het moeilijk om te achterhalen wanneer een gebruiker nu precies een fout maakt. Indien in de logs de gebruiker bijvoorbeeld de transformatie *move* selecteert en meteen erna een andere transformatie zoals bijvoorbeeld *rotate*, kan dit wijzen op een foute selectie. Dit kan ook betekenen dat de gebruiker zich vergist had of toch een andere strategie wil gebruiken om de target juist te positioneren. Uit de logs alleen is het dus niet gemakkelijk om zo maar fouten af te leiden.

Ook daarom is er gevraagd aan deelnemers hoe vaak het voorkwam dat ze een verkeerd menu item selecteerde. Alle deelnemers vermeldden dat het slechts een paar keer voorkwam dat ze een verkeerd item selecteerden. In de meeste gevallen gebeurde dit wanneer de deelnemer zijn arm wilde terugtrekken wanneer hij één van de bovenste menu items selecteerde.

Indien de gebruikers leren dat ze op een bepaalde manier hun arm moeten terugtrekken, gaan de accidental touches die de deelnemers hadden verminderen. In de huidige versie van het mid-air menu wordt een menu item geactiveerd als de gebruiker binnen de collider van het menu item komt. Dit zorgt ervoor dat de gebruiker snel en gemakkelijk een menu item kan selecteren. Helaas heeft dit ook als gevolg dat er gemakkelijk een fout menu item geselecteerd kan worden.

Een mogelijke manier om dit op te lossen is om een expliciete trigger te voorzien voor het activeren van een menu item. Een expliciete trigger kan bijvoorbeeld een klik op de controller zijn of een grab gesture. Door een expliciete trigger te voorzien kunnen de deelnemers zelf bepalen wanneer ze een menu item activeren. Hierdoor vermindert het aantal accidental touches dat de deelnemers maken. Aan de deelnemers is gevraagd of ze een expliciete trigger of automatische activatie verkiezen. Hier waren de antwoorden gelijk verdeeld. De helft van de deelnemers zou liever een expliciete trigger gebruiken, terwijl de andere helft het liever houdt op automatische activatie. De meeste deelnemers hadden wel door dat door een expliciete trigger te gebruiken, de kans op accidental touches kleiner is, maar de efficiëntie afneemt. Toch waren de antwoorden gelijk verdeeld.

Design keuzes

Vervolgens is er ook nog gepeild naar het nut van een aantal design keuzes. Er is al gevraagd of de menu items vlot bereikbaar waren, waarop de deelnemers allemaal ja hadden geantwoord.

Buiten de bereikbaarheid zijn er ook nog andere design keuzes gemaakt. Zo is waren er bijvoorbeeld de bewegende bollen en de fading targets. Over deze twee design keuzes zijn er een aantal vragen gesteld tijdens de studie. Zo werd er bijvoorbeeld gevraagd of de deelnemers het nut van de bewegende bollen begrepen. Helaas had geen enkele deelnemer door dat de targets onzichtbaar werden of dat er bewegende bollen waren.

Dit komt door de beperkte field of view van de gebruikte VR headset. Normaal gezien was het de bedoeling om dezelfde VR headset te gebruiken als in de vorige studie. Door een hardware probleem kon deze headset niet gebruikt worden. Deze headset heeft een grotere field of view waardoor deze design keuzes misschien wel handig zouden kunnen zijn. Door deze studie kan er niet bepaald worden of deze design keuzes een meerwaarde hadden of niet.

Verder zijn er ook design keuze gemaakt om het duidelijk te maken welke menu items de gebruiker geselecteerd heeft. Zo worden de geselecteerde targets groen gekleurd. Ook wordt er in tekstvorm een overzicht gegeven van de huidige menu selectie. Er werd gevraagd of het duidelijk was welke items de deelnemers geselecteerd hadden. Als vervolg werd er gevraagd of ze de kleur of de tekst het meest nuttig vinden. 9 van de 10 deelnemers gaf aan dat de kleur het meeste nut had om te weten welke target ze geselecteerd hebben. Dit heeft waarschijnlijk ook te maken met het feit dat de deelnemers nog niet blindelings een target konden selecteren. Hierdoor zagen ze tijdens de selectie de kleur veranderen waardoor dat de tekst overbodig is.

Eén deelnemer vond de tekst wel handig. Hij vond het vooral nuttig om tijdens het uitvoeren van de actie snel een overzicht te kunnen krijgen van de huidige menu selectie. Een andere deelnemer vermeldde dat het misschien handiger zou zijn als het menu op een vaste positie in de field of view staat. Hierdoor kost het voor de gebruiker geen extra moeite om te kijken. Nog een andere deelnemer gaf als feedback dat tekst niet snel een overzicht kan geven over de huidige status. Het zou misschien beter zijn om in plaats van tekst de status op een meer visuele manier te tonen. Een voorbeeld zou een graaf kunnen zijn

die overeenkomt met het mid-air menu. Hierdoor kan de gebruiker veel sneller een beeld krijgen van de geselecteerde menu items.

7.3.3 NASA-TLX

Na het gebruik van elk menu moesten de deelnemers in VR ook een korte vragenlijst invullen. Deze vragenlijst focust op de performance en workload van de taak. In tabel 7.2 worden alle vragen weergegeven. Deze vragen kunnen een inzicht geven over hoe goed de menu's gebruikt kunnen worden om taken uit te voeren. Het kan ook interessant zijn om een idee te krijgen met welk menu de gebruiker het meest succesvol de taak kan uitvoeren.

	Mid-air	Point
How mentally demanding was the task?	8.1	8.4
How physically demanding was the task?	7.1	5.7
How hurried or rushed was the pace of the task?	5.1	5.9
How successful were you in accomplishing what you were asked to do?	15.6	16
How hard did you have to work to accomplish your level of performance?	7.4	7.2
How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?	7.2	7.1
How accurate could you execute the task?	15.3	15

Tabel 7.2: Antwoorden vragenlijst NASA-LTX voor beide menu's.

In tabel 7.2 worden ook de gemiddelde scores voor elk menu per vraag weergegeven. Hier is te zien dat de gemiddelde waardes van de twee menu's redelijk gelijkaardig zijn. Voor elke vraag scoort het point-menu gemiddeld gezien net iets beter dan het mid-air menu. Voor alle vragen is er dan met behulp van een t-test bepaald of er een significant verschil is tussen de gemiddelde scores van elk menu. De t-test geeft voor zes van de zeven vragen een insignificant verschil. Voor de vraag 'How physically demanding was the task?' is er wel een significant verschil. De t-test geeft voor deze vraag een p-waarde van 0.044. Dit is kleiner dan de alfa waarde van 0.05 waardoor het dus een significant verschil is.

Dit geeft dus aan dat de deelnemers het fysiek vermoeiender vinden om met het mid-air menu te werken ten opzichte van het point menu. Bij het mid-air menu moeten de deelnemers een grotere beweging maken met hun arm om een menu item te selecteren. Ook was het zo dat op dit moment de deelnemers hun bovenlichaam mee bewegen om naar de menu items te kijken. Dit kost allemaal moeite voor de deelnemer. Hierdoor is het logisch dat het mid-air menu een hogere score behaalt voor de fysieke vermoeidheid. In de vorige studie moesten de deelnemers op een korte tijd vaker naar een mid-air target wijzen. Uit deze studie bleek dat het niet heel vermoeiend is om langdurig naar een mid-air target te wijzen. Hierdoor is het geen groot probleem dat ook uit deze resultaten blijkt dat het mid-air menu fysiek vermoeiender is.

Hoofdstuk 8

Discussie

In dit hoofdstuk wordt er een overzicht gegeven over het voltooide werk. Ook wordt er besproken wat deze thesis bijdraagt en wat er eventueel in de toekomst nog gedaan kan worden.

8.1 Overzicht

In eerste instantie is er door middel van een literatuurstudie rond virtual reality gekeken wat de goede eigenschappen en de huidige tekortkomingen zijn. Deze literatuurstudie toonde aan dat er heel wat interactiemethoden zijn met elk hun eigen voor- en nadelen. Op basis van deze inzichten is er dan gekozen om te focussen op menu interactie. Het doel van deze thesis is om de gebruiker efficiënte menu interactie te laten hebben met beide handen zonder het gebruik van controllers.

Het idee voor een nieuw menu is ontstaan doordat de huidige interactiemethoden met een menu niet altijd even efficiënt zijn. Zo moet er nagedacht worden over de positie van het menu en de manier waarop de gebruiker het menu moet bedienen. Vaak wordt er een point menu gebruikt, de gebruiker is hier niet altijd even accuraat en dit kan vermoeiend worden. Ook moet de gebruiker zijn focus verplaatsen naar het menu.

Het nieuwe menu moet er voor zorgen dat de gebruiker snelle interactie kan hebben met een menu. Het idee hiervoor is dat de gebruiker blindelings naar een target kan grijpen om het gewenste item te selecteren. Om dit soort interactie te ondersteunen moeten er twee dingen gecontroleerd worden. In eerste instantie moet er onderzocht worden of de gebruiker accuraat genoeg is om naar een punt te grijpen. Het tweede doel van de studie is om na te gaan wat de ideale positie is voor de verschillende targets. Als er targets zijn met betere resultaten worden deze het beste gebruikt. Hiervoor is er een studie uitgevoerd met 15 deelnemers.

De studie toonde aan dat de deelnemers de verschillende targets van elkaar kunnen onderscheiden maar dat ze nog niet met genoeg accuraatheid een target kunnen selecteren. Ook heeft deze studie een goed inzicht gegeven over de beste positie van de verschillende targets. De resultaten op basis van snelheid en vermoeidheid waren positief.

Op basis van de bevindingen van deze studie is er een mid-air menu ontwikkeld. De deelnemers waren nog niet accuraat genoeg in de studie. Daarom zijn er technieken toegepast om ervoor te zorgen dat de gebruiker accurater kan zijn. Zo is er bijvoorbeeld voor gezorgd dat de targets zichtbaar zijn wanneer dat het nodig is. Ook zijn de target vergroot en op de meest optimale positie geplaatst op basis van de studie. Dit moet er voor zorgen dat de gebruiker accurater kan zijn.

Het menu is geïmplementeerd in een bestaande PROROB applicatie. In deze applicatie wordt het menu gebruikt om transformaties te selecteren. Met deze transformaties moet de gebruiker een spuitbus juist positioneren. Om de bruikbaarheid van het menu te testen is er een usability studie uitgevoerd.

In deze studie is het nieuw gecreëerde menu vergeleken met een point-menu. Met beide menu's moet de gebruiker tien keer de spuitbus juist positioneren met behulp van de transformaties. In de studie werden verschillende aspecten van usability onderzocht. Zo is er onderzoek gedaan naar de learnability, memorability, efficiency en error componenten van usability. Verder is er ook gepeild naar het nut van

de verschillende design keuzes. Buiten de usability is er ook gekeken met welk menu de gebruiker het snelste het gewenste menu item kan selecteren.

De voorkeur van de deelnemers tussen de twee menu's is ongeveer gelijk verdeeld met een lichte voorkeur naar het point menu. Door middel van de verschillende design keuzes en de verbeterde positie van de menu items waren de hoeveelheid errors beperkt. Ook vonden de deelnemers dat het menu duidelijk was en gemakkelijk om te gebruiken. Qua snelheid waren de deelnemers nog sneller met het point menu. Dit komt waarschijnlijk door de beperkte trainingstijd.

Heel wat deelnemers zagen wel het nut van het mid-air menu in. Indien ze meer tijd zouden krijgen om te trainen en gewoon worden aan de werking van het mid-air menu, zouden ze snel en blindelings een menu item kunnen selecteren. Er is nog verder onderzoek nodig maar in dit type van menu zit dus wel potentieel om efficiënte interactie te voorzien.

8.2 Future work

Zoals uit de twee studies blijkt is het mid-air menu nog niet optimaal. Hier is dan ook nog ruimte voor verbetering. Buiten dit kan er ook in de andere fases van de thesis nog onderzoek gebeuren. Er zijn drie grote gebieden waar er nog verder onderzoek gedaan kan worden.

8.2.1 Mid-air studie

In eerste instantie kan er nog verder onderzoek gedaan worden in de mid-air studie. Een eerste mogelijk pad is om een langdurige studie te organiseren. Hierdoor kan de evolutie van de gebruiker op lange termijn bestudeerd worden. Het is mogelijk dat de accuraatheid verbetert, maar dat het vermoeiender wordt omdat de deelnemer het systeem langer kan gebruiken. Ook kan er gekeken worden hoe de accuraatheid verbetert als de deelnemer langer de tijd krijgt om te trainen.

Verder is er gekozen om de targets op een bol te positioneren rondom de gebruiker. Voor andere toepassingen kan het interessanter zijn om de targets op een andere positie te positioneren. Het kan misschien interessant zijn dat de targets gepositioneerd worden voor de gebruiker op een vlak dat evenwijdig is met de grond. Ook hier kunnen nog veel variaties bedacht worden. Er kan nagedacht worden over de oriëntatie, verdeling en positie van de targets. Op basis van verschillende indelingen kan er gekeken worden of de gebruiker accurater is bij een bepaalde indeling.

Ook kunnen er nog een aantal kleine aanpassingen aan de huidige studie setup gebeuren. Zo kan er gevarieerd worden in het aantal trainings- en test rondes of het aantal targets dat er per ronde aangeklikt moet worden. Er kan ook nog feedback worden gegeven na elke ronde, zodat de gebruiker zijn beeld van de positie van de targets kan bijsturen.

8.2.2 Menu design

In het huidige menu design zijn er een aantal technieken toegepast om het gemakkelijker te maken om het juist menu item te selecteren. Hierop kunnen nog verdere verbeteringen toegepast worden. Zo kan er bijvoorbeeld onderzoek gedaan worden naar het nut van haptic feedback. Doordat de gebruikers feedback krijgen wanneer ze een target aanraken kan het misschien natuurlijker aanvoelen om de juiste target te selecteren. In eerste instantie kan de gebruikte controller trillen wanneer men in de buurt komt van een menu item. Uiteindelijk is het natuurlijk de bedoeling dat er geen controllers gebruikt worden. Dan kan er bijvoorbeeld een ander apparaat zoals de SenseGlove gebruikt worden.

Ook heeft een deelnemer van de usability studie vermeld dat het handig kan zijn om de targets een betere uitlijning te geven. Hierdoor zou er een beter contrast zijn tussen de virtuele omgeving en de targets zelf.

Op dit moment is het ook zo dat de menu items geactiveerd worden wanneer de gebruiker er over hovered. In een nieuwe studie kan dit vergeleken worden met een menu waarbij er een expliciete trigger is. Een expliciete trigger zou een klik op de controller of een bepaalde gesture kunnen zijn. Hierdoor gaat de gebruiker minder accidental touches hebben. Het kan ook interessant zijn om te controleren wat er gebeurt met de snelheid.

8.2.3 Usability studie

Als laatste kan er verder onderzoek worden gedaan in de usability studie. Net zoals in de mid-air studie kan er bestudeerd worden wat het effect is van langdurig dit soort menu te gebruiken. Ook kan er meer tijd voorzien worden om de deelnemers te laten trainen. De deelnemers gaan dan misschien het menu blindelings kunnen gebruiken en efficiënter kunnen werken met het mid-air menu. Uit een langere studie kan afgeleid worden of het mid-air menu ook blindelings bruikbaar is, wat uiteindelijk ook het doel is.

Tot slot kan er ook nog gekeken worden naar andere contexten met eventueel meer menu items. Het is mogelijk dat er bepaalde toepassingen zijn die meer of minder compatibel zijn met een mid-air menu. Zo kan er ook gekeken worden wat het hoogste aantal menu items is om het menu gebruiksvriendelijk te houden.

8.3 Bijdrage

De bijdrage van deze thesis bestaat uit vier onderdelen. Als eerste is er een overzicht gegeven van bestaande interactiemethoden van virtual reality. Voor deze methoden wordt er vermeld wat de positieve en negatieve aspecten zijn. Als tweede is er een studie uitgevoerd die een inzicht geeft over de capaciteiten die de mens heeft om een mid-air target te bereiken. Ook geeft dit een inzicht over de beste posities voor de verschillende targets. Vervolgens is er een menu-systeem ontwikkeld die gebruikt maakt van de bevindingen uit de studie. Het menu systeem is gemakkelijk te gebruiken voor zowel beginnende als gevorderde gebruikers. Tot slot is er nog een usability studie uitgevoerd die inzichten geeft over de gebruiksvriendelijkheid van een mid-air menu.

Hoofdstuk 9

Conclusies

In deze thesis werd er geprobeerd om een nieuwe efficiënte interactiemethode te voorzien voor menu's in virtual reality. Op dit moment wordt er vaak een point menu gebruikt. In dit soort menu moet de gebruiker pointeren naar het menu en het gewenste item selecteren. Dit soort menu is typisch gezien niet heel accuraat en kan vermoeiend zijn. Ook moet de gebruiker zijn focus verleggen om het menu te gebruiken. Hiervoor werd een mid-air menu ontwikkeld dat de gebruiker moet toelaten om snel en zonder moeite het gewenste item te selecteren.

Hiervoor werd in eerste instantie een studie uitgevoerd waarin er gekeken werd of mensen in staat zijn om een mid-air target te bereiken. Ook gaf deze studie een inzicht in de beste positie voor de verschillende targets. Vervolgens is er met deze informatie een mid-air menu ontwikkeld. Hierin zijn een aantal technieken toegepast om het gemakkelijker te maken voor de gebruiker om het menu item te selecteren. Tot slot is er een usability studie uitgevoerd die het mid-air menu vergeleek met een point menu. De voorkeur van de deelnemers was ongeveer gelijk verdeeld tussen beide menu's.

Deze thesis startte met het onderzoeken van de bestaande literatuur om mogelijke verbeterpunten te vinden voor VR interactie. Er waren veel interessante onderzoeksgebieden, maar persoonlijk vond ik het moeilijk om een onderwerp te vinden waarin ik ook iets kon bijdragen. Door de lange zoektocht heb ik best wel wat tijd verloren. Uiteindelijk heb ik wel aan een interessant thema kunnen werken.

Over het algemeen vond ik het soms wel moeilijk om het werk voor deze thesis te combineren met de andere vakken gedurende het academiejaar. Hier moest ik soms afwegingen maken op wat ik mij het meeste wilde focussen. Ook heeft dit ervoor gezorgd dat de vooruitgang van mijn thesis niet altijd even vlot verliep.

In deze thesis zijn er twee studies uitgevoerd. Het verbaasde mij wat er allemaal komt kijken bij het opzetten en uitvoeren van een thesis. De eerste mid-air studie was het belangrijkste onderdeel van de studie, daarom moest er hier grondig over nagedacht worden. Ik was verrast dat tijdens het opzetten van de studie er nog regelmatig bijgestuurd wordt, waardoor bijvoorbeeld een deel van de code herschreven moest worden. Ik heb ook geleerd dat er over veel factoren grondig nagedacht moet worden om een studie correct te kunnen uitvoeren. Verder heb ik ook gemerkt dat het onmogelijk is om een studie voor te bereiden op alle mogelijke use cases. Hierdoor is het belangrijk om probleemoplossend te kunnen denken en eventueel creatieve oplossingen te vinden.

Na een jaar werken heb ik mijn thesis afgerond door twee studies uit te voeren en een mid-air menu te ontwikkelen. Door de implementatie en de resultaten van de studie, heb ik toch wat kunnen bijdragen aan een nieuwe interactiemethode voor virtual reality.

Bibliografie

- [1] AZAI, T., OTSUKI, M., SHIBATA, F., AND KIMURA, A. Open Palm Menu: A Virtual Menu Placed in Front of the Palm. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference* (Seoul Republic of Korea, Feb. 2018), ACM, pp. 1–5.
- [2] AZMANDIAN, M., HANCOCK, M., BENKO, H., OFEK, E., AND WILSON, A. D. A Demonstration of Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experience. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, May 2016), CHI EA '16, Association for Computing Machinery, pp. 3647–3650.
- [3] BALAKRISHNAN, R. “Beating” Fitts’ law: virtual enhancements for pointing facilitation. *International Journal of Human-Computer Studies* 61, 6 (Dec. 2004), 857–874.
- [4] BAU, O., AND MACKAY, W. E. OctoPocus: a dynamic guide for learning gesture-based command sets. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology* (New York, NY, USA, Oct. 2008), UIST '08, Association for Computing Machinery, pp. 37–46.
- [5] BENKO, H., HOLZ, C., SINCLAIR, M., AND OFEK, E. NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology* (Tokyo Japan, Oct. 2016), ACM, pp. 717–728.
- [6] BOWMAN, D., AND HODGES, L. An Evaluation of Techniques for Grabbing and Manipulating Remote Objects in Immersive Virtual Environments. *Symposium on Interactive 3D Graphics 182* (Sept. 1999).
- [7] BOWMAN, D., AND WINGRAVE, C. Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments. pp. 149–156.
- [8] BUDDIES, S. Put Your Peripheral Vision to the Test.
- [9] CAPUTO, F. M., EMPORIO, M., AND GIACHETTI, A. The smart pin: a novel object manipulation technique for immersive virtual environments. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (Gothenburg Sweden, Nov. 2017), ACM, pp. 1–2.
- [10] CARD, S. K., ENGLISH, W. K., AND BURR, B. J. Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT. *Ergonomics* 21, 8 (Aug. 1978), 601–613.
- [11] CARPENTER, A. P., AND JUST, M. A. Eye Fixations and Cognitive Processes.
- [12] CLERGEAUD, D., ROO, J. S., HACHET, M., AND GUITTON, P. Towards seamless interaction between physical and virtual locations for asymmetric collaboration. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (New York, NY, USA, Nov. 2017), VRST '17, Association for Computing Machinery, pp. 1–4.
- [13] COLAÇO, A., KIRMANI, A., YANG, H. S., GONG, N.-W., SCHMANDT, C., AND GOYAL, V. K. Mime: compact, low power 3D gesture sensing for interaction with head mounted displays. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology* (St. Andrews Scotland, United Kingdom, Oct. 2013), ACM, pp. 227–236.
- [14] CyberGlove systems | CyberTouch. <http://www.cyberglovesystems.com/cybertouch>. Accessed: 2022-03-27.

- [15] FITTS, P. M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology* 47, 6 (1954), 381–391.
- [16] FREDERICK, M. M., BROOKS, F. P., CARLO, J., AND SEQUIN, H. Moving Objects In Space: Exploiting Proprioception In Virtual-Environment Interaction, 1997.
- [17] GROSSMAN, T., AND BALAKRISHNAN, R. The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '06* (Montreux, Switzerland, 2006), ACM Press, p. 3.
- [18] HAAN, G., KOUTEK, M., AND POST, F. IntenSelect: Using Dynamic Object Rating for Assisting 3D Object Selection. pp. 201–209.
- [19] HOPPE, M., KNIERIM, P., KOSCH, T., FUNK, M., FUTAMI, L., SCHNEEGASS, S., HENZE, N., SCHMIDT, A., AND MACHULLA, T. VRHapticDrones: Providing Haptics in Virtual Reality through Quadcopters. In *Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* (New York, NY, USA, Nov. 2018), MUM 2018, Association for Computing Machinery, pp. 7–18.
- [20] JACOB, R. J. K. What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems Empowering people - CHI '90* (Seattle, Washington, United States, 1990), ACM Press, pp. 11–18.
- [21] JACOBY, R. H., AND ELLIS, S. R. Using virtual menus in a virtual environment. J. R. Alexander, Ed., pp. 39–48.
- [22] JONATHAN, E., ROBERTS, C., PRESENTATION, S., RAZZAQUE, S., KOHN, Z., AND WHITTON, M. Redirected Walking. *Proceedings of Eurographics* (Aug. 2001).
- [23] KAMMERER, Y., SCHEITER, K., AND BEINHAEUER, W. Looking my way through the menu: the impact of menu design and multimodal input on gaze-based menu selection. In *Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications - ETRA '08* (Savannah, Georgia, 2008), ACM Press, p. 213.
- [24] KURTENBACH, G., AND BUXTON, W. The limits of expert performance using hierarchic marking menus. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '93* (Amsterdam, The Netherlands, 1993), ACM Press, pp. 482–487.
- [25] LANGBEHN, E., LUBOS, P., AND STEINICKE, F. Evaluation of Locomotion Techniques for Room-Scale VR: Joystick, Teleportation, and Redirected Walking. In *Proceedings of the Virtual Reality International Conference - Laval Virtual* (New York, NY, USA, Apr. 2018), VRIC '18, Association for Computing Machinery, pp. 1–9.
- [26] LIANG, J., AND GREEN, M. JDCAD: A highly interactive 3D modeling system. *Computers & Graphics* 18, 4 (July 1994), 499–506.
- [27] MINE, M. Virtual Environment Interaction Techniques.
- [28] NUKARINEN, T., KANGAS, J., RANTALA, J., KOSKINEN, O., AND RAISAMO, R. Evaluating ray casting and two gaze-based pointing techniques for object selection in virtual reality. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (Tokyo Japan, Nov. 2018), ACM, pp. 1–2.
- [29] PENG, C., DONG, Y., AND CAO, L. Freehand Interaction in Virtual Reality: Bimanual Gestures for Cross-Workspace Interaction. In *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (Osaka Japan, Dec. 2021), ACM, pp. 1–2.
- [30] PFEUFFER, K., MAYER, B., MARDANBEGI, D., AND GELLERSEN, H. Gaze + pinch interaction in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction* (New York, NY, USA, Oct. 2017), SUI '17, Association for Computing Machinery, pp. 99–108.
- [31] PIETROSZEK, K. Raycasting in Virtual Reality. Mar. 2018.
- [32] PIETROSZEK, K. Virtual Hand Metaphor in Virtual Reality. Mar. 2019.
- [33] PIETROSZEK, K., TAHAI, L., WALLACE, J., AND LANK, E. Watchcasting: Freehand 3D interaction with off-the-shelf smartwatch. pp. 172–175.

- [34] POUPYREV, I., BILLINGHURST, M., WEGHORST, S., AND ICHIKAWA, T. The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology* (New York, NY, USA, Nov. 1996), UIST '96, Association for Computing Machinery, pp. 79–80.
- [35] RICO, J., AND BREWSTER, S. Gestures all around us: user differences in social acceptability perceptions of gesture based interfaces. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (New York, NY, USA, Sept. 2009), MobileHCI '09, Association for Computing Machinery, pp. 1–2.
- [36] SONG, P., GOH, W. B., HUTAMA, W., FU, C.-W., AND LIU, X. A handle bar metaphor for virtual object manipulation with mid-air interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Austin Texas USA, May 2012), ACM, pp. 1297–1306.
- [37] SPEICHER, M., EHRLICH, J., GENTILE, V., DEGRAEN, D., SORCE, S., AND KRÜGER, A. Pseudo-haptic Controls for Mid-air Finger-based Menu Interaction. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow Scotland Uk, May 2019), ACM, pp. 1–6.
- [38] STOAKLEY, R., CONWAY, M. J., AND PAUSCH, R. Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (USA, May 1995), CHI '95, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 265–272.
- [39] SUZUKI, R., HEDAYATI, H., ZHENG, C., BOHN, J. L., SZAFIR, D., DO, E. Y.-L., GROSS, M. D., AND LEITHINGER, D. RoomShift: Room-scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-moving Swarm Robots. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Apr. 2020, pp. 1–11.
- [40] YU, D., LU, X., SHI, R., LIANG, H.-N., DINGLER, T., VELLOSO, E., AND GONCALVES, J. Gaze-Supported 3D Object Manipulation in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, May 2021), CHI '21, Association for Computing Machinery, pp. 1–13.
- [41] ZHAO, Y., KIM, L. H., WANG, Y., LE GOC, M., AND FOLLMER, S. Robotic Assembly of Haptic Proxy Objects for Tangible Interaction and Virtual Reality. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces* (New York, NY, USA, Oct. 2017), ISS '17, Association for Computing Machinery, pp. 82–91.