



**Hogeschool van Amsterdam**

# Stage Onderzoeksrapport

Is hand tracking een gangbare oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR.

Student : Chris Huider  
Studentnummer : 500844542

Opleiding : HBO-ICT Game development  
Docentbegeleider : Jur van Oerle  
Loopbaanadviseur : Tinka van Utteren-Overzier

Bedrijf : Koninklijke Luchtvaart Maatschappij (KLM)  
Bedrijfsbegeleider : Daisy Navarette Schuiten

Datum : 25-11-2022  
Versie : 1.0

## Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
1. Inleiding .....	3
2. Achtergrond .....	4
2.1 Het bedrijf.....	4
2.2 Probleemanalyse .....	4
2.3 Wat is Hand Tracking .....	4
3. Hoe werkt Hand Tracking .....	5
3.1 Sensoren.....	5
3.2 Methodes .....	5
3.3 Conclusie .....	7
4. Hand Tracking hardware .....	8
4.1 Producenten.....	8
4.2 Producten.....	11
4.3 Voor- en nadelen.....	16
4.4 Keuze .....	20
4.5 Conclusie .....	20
5. Implementatie in Unity .....	21
5.1 Oculus VR SDK.....	21
5.2 Controller VS Hand .....	21
5.3 Gemaakte knoppen.....	22
5.4 Cockpit prototype .....	27
5.5 Conclusie .....	29
6. Conclusie.....	30
Aanbeveling.....	31
Verwijzingen .....	32

## Samenvatting

Het XR Center of Excellence (XRCOE) van de Koninklijke Luchtvaart Maatschappij (KLM) is benieuwd of hand tracking een gangbare oplossing is voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in virtual reality (VR). Om dit te onderzoeken zijn drie deelvragen opgesteld: “Hoe werkt hand tracking?”, “Welke hand tracking hardware past het beste bij de use case?” en “Hoe kan hand tracking worden toegepast op verschillende knoppen in Unity?”. De use case die hierbij opgesteld is luidt: “Het gebruiken van hand tracking in een VR cockpit van de Embraer 190 voor langdurige en wijd inzetbare procedure trainingen.

Uit het onderzoek zijn de volgende antwoorden op deze deelvragen naar boven gekomen:

Hand tracking werkt doormiddel van verschillende sensoren die gegevens vastleggen van de hand, bijvoorbeeld de positie, rotatie en snelheid. Deze gegevens kunnen met verschillende methodes vastgelegd worden. Deze gegevens worden hierna omgezet in een virtuele hand.

De hardware welke het meest geschikt is voor de use case is de Meta Quest 2 vanwege zijn lichte gewicht, wat langdurende trainingen mogelijk maakt, en de lage prijs, wat grootschalige inzet mogelijk maakt.

Hand tracking kan worden toegepast op knoppen in Unity doormiddel van standaard OVR SDK componenten. Wel zijn er voor betere kwaliteit van de interactie wat verbeteringen nodig, deze kunnen de vorm nemen van verleggen van pivot punten, het bijhouden van handen en pols gewrichten en het gebruiken van finger tracking voor het aanroepen van het vastpakken.

Aan de hand van deze antwoorden kan een antwoord worden gegeven op de hoofdvraag: “Is hand tracking een gangbare oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR?”.

Om hand tracking te realiseren in het komende project van het XRCOE team zal er wat werk verricht moeten worden. Hoewel het hand tracking systeem van de OVR SDK zich in een stabiel en goed werkend stadium bevindt, is het niet perfect, zo zijn er bijvoorbeeld problemen bij het identificeren van knoppen die dicht op elkaar zitten, wat ervoor kan zorgen dat de verkeerde knop wordt vastgepakt. Desalniettemin is hand tracking een meer dan degelijke oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR.

## 1. Inleiding

Binnen de Koninklijke Luchtvaart Maatschappij (KLM) bestaat een team voor het ontwikkelen en produceren van virtual reality (VR) trainingen voor grond- en cabinepersoneel. Dit team heet het XR Center of Excellence (XRCOE).

Het komende project van dit team is het ontwikkelen van een VR Embraer 190 vliegtuig cockpit procedure training. Om deze training zo realistisch en intuïtief mogelijk te maken ontstond de interesse in hand tracking. Uit deze interesse ontstond de vraag “Is hand tracking een gangbare oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR?”.

Om deze vraag te kunnen beantwoorden is hij opgedeeld in drie deelvragen: “Hoe werkt hand tracking?”, “Welke hand tracking hardware past het beste bij de use case?” en “Hoe kan hand tracking worden toegepast op verschillende knoppen in Unity?”. Hierbij is de use case het gebruiken van hand tracking in een VR cockpit van de Embraer 190 voor langdurige en wijd inzetbare procedure trainingen.

In dit onderzoeksrapport wordt antwoord gegeven op bovenstaande hoofdvraag en deelvragen.

## 2. Achtergrond

### 2.1 Het bedrijf

De Koninklijke Luchtvaart Maatschappij (KLM, gebruikelijke Engelse naam: KLM Royal Dutch Airlines) is de nationale luchtvaartmaatschappij en een van de tien grootste werkgevers van Nederland. De thuishaven van de KLM is de luchthaven Schiphol bij Amsterdam. KLM opereert wereldwijd en vormt de kern van de KLM Groep, waarvan ook KLM Cityhopper, Martinair en Transavia deel uitmaken. KLM is in 2004 gefuseerd met Air France tot de holding Air France-KLM. Onder de holding zijn KLM en Air France beide actief als netwerkmaatschappij. KLM behaalt haar omzet uit drie kernactiviteiten: vervoer van passagiers, vrachtvoer en vliegtuigonderhoud.

De KLM XR Center of Excellency (XRCOE) is een productteam gespecialiseerd in het ontwikkelen van VR trainingen. Deze trainingen worden gebruikt voor onder andere het opleiden van grond en cabinepersoneel.

### 2.2 Probleemanalyse

Het productteam van de KLM XRCOE wilde graag weten of VR hand tracking zich al in een stabiel en precies genoeg stadium bevindt om er een cockpit training mee te kunnen maken. Bij de huidige cockpit training wordt er nog gebruik gemaakt van VR controllers, maar om het realisme en het gebruiksgemak te verhogen ontstond de interesse in hand tracking. Zij willen met zo min mogelijk hardware en uitleg over de hardware een goed training kunnen geven, hierom is één van de wensen dat er zo min mogelijk externe hardware word gebruikt waar de gebruiker mee in contact staat. Hieronder vallen bij voorbeeld VR controllers of motion capture handschoenen.

Om deze redenen behandel ik in dit rapport de hoofdvraag: "Is hand tracking een gangbare oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR".

### 2.3 Wat is Hand Tracking

"Hand tracking" of "hand volgen" is een functie waarmee je je handen kunt gebruiken om te navigeren in VR, in plaats van de Oculus touch-controllers. Als Hand tracking is ingeschakeld, gebruikt de headset de camera's om de positie en oriëntatie van je handen te detecteren. (Oculus, sd)

### 3. Hoe werkt hand tracking

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: “Hoe werkt hand tracking?”. Om deze vraag te beantwoorden wordt onderzoek gedaan naar de werking van hand tracking en de verschillende methodes. Deze onderwerpen zijn onderzocht doormiddel van bronnenonderzoek.

#### 3.1 Sensoren

Sensoren leggen gegevens vast over de positie, oriëntatie en snelheid van de handen van de gebruiker, dit wordt tracking genoemd. Handtrackingsoftware gebruikt deze gegevens vervolgens om er een realtime virtuele belichaming van te maken. (Ultraleap, 2021)

Er zijn veel verschillende manieren om met sensoren deze gegevens vast te leggen, zo kunnen de sensoren ingebouwd zijn in de headset, dit heet ‘inside-out tracking’, in ‘base stations’ ingebouwd zijn, dit heet ‘outside-in tracking’, (VR Expert, 2022) of zijn het externe sensoren zoals die in bijvoorbeeld een motion capture handschoen.

#### 3.2 Methodes

Er zijn verschillende manieren om gegevens vast te leggen, namelijk met via Infrarood, Optical, LiDAR, laser arrays of GPS (Ultraleap, 2021). Deze methodes gelden voor beide inside-out als outside-in tracking, maar niet voor motion capture.

Ik ga verder in op de Infrarood, Optical, LiDAR en Motion Capture methode, omdat dit de meest gebruikte methodes zijn.

##### Infrarood

Deze methode maakt gebruik van één of meerdere infraroodcamera's. De infraroodcamera('s) leggen beeld vast van alles binnen het gezichtsveld van de camera. Aan de hand van deze beelden kan een algoritme de handen detecteren en de gegevens hiervan doorsturen naar de VR headset. (Ultraleap, 2021)

Deze methode heeft als voordeel dat infrarood licht onzichtbaar voor het blote oog is (in de meeste omstandigheden) en consistent en betrouwbaar werkt met verschillende omgevingsbelichting. (Ultraleap, 2021)

Deze methode heeft als nadeel dat het erg gevoelig is voor contrast. Als twee objecten met vergelijkbare temperatuur dicht bij elkaar zijn, kan het algoritme moeilijk deze moeilijk onderscheiden. (Soloviev)

## Optical

Deze methode maakt gebruik van één of meerdere RGB-camera's. De RGB-camera('s) leggen beeld vast van alles binnen het gezichtsveld van de camera. Aan de hand van deze beelden kan een algoritme de handen detecteren door het verschil in pixels te meten waarna de gevonden gegevens hiervan door worden gestuurd naar de VR headset. (VR Expert, 2022)

Deze methode heeft als voordeel dat er niet veel speciale hardware voor nodig is. De enige component dat deze methode nodig heeft is een camera. (VR Expert, 2022)

Deze methode heeft als nadeel dat het proces om uit te rekenen waar de handen zijn langer duurt. Ook is het gebonden door het gezichtsveld (Field of View) van de camera en kan dus alleen de handen volgen als deze zichtbaar zijn voor de camera. Ook is het erg sensitief voor licht en de 'frame rate' van de camera. (VR Expert, 2022)

## LiDAR

Deze methode maakt gebruik van Light Detection and Arranging (LiDAR). Dit systeem schiet lasers in pulsen af om de afstand, positie, beweging en omgeving relatief aan de handen vast te leggen. De lasers worden afgeschoten en komen terug. Het moment dat de laser terug keert berekent het systeem alle gegevens en genereert het een 3D beeld van wat de laser heeft geraakt. (VR Expert, 2022)

Deze methode heeft als voordeel de snelheid waarmee het wordt uitgevoerd en het 3D beeld wordt gegenereerd. (VR Expert, 2022)

Deze methode heeft als nadeel de gevoeligheid voor reflectieve oppervlaktes. Dit kan ervoor zorgen dat de berekening niet klopt en er dus een verkeerd beeld ontstaat. (Soloviev)

## Motion Capture

De methode maakt gebruik van speciale, vaak motion capture, handschoenen. Dit systeem gebruikt sensoren op de hand om gegevens over positie, oriëntatie en buiging van de handen en vingers vast te leggen. (MANUS™, 2021)

Deze methode heeft als voordeel dat de uitkomst erg precies is en er geen zogenaamde deadzones zijn. Deadzones zijn plekken waar de hand niet gevolgd kan worden, bijvoorbeeld bij de optical tracking methode, waar de hand niet gevolgd kan worden, als hij niet zichtbaar voor de camera is. In dat geval is alles wat buiten het gezichtsveld van de camera valt een deadzone. (MANUS™, 2021)

Deze methode heeft als nadeel dat er een speciale handschoen gedragen moet worden. Ook moet hij verbonden zijn aan een computer, doormiddel van een kabel of draadloze verbinding. Ook moet de handschoen bij elk gebruik eerst gekalibreerd worden. (MANUS™, 2021)

### 3.3 Conclusie

Hand tracking werkt doormiddel van verschillende sensoren die gegevens vastleggen van de hand, bijvoorbeeld de positie, rotatie en snelheid. Deze gegevens kunnen met verschillende methodes vastgelegd worden. Deze gegevens worden hierna omgezet in een virtuele hand.

Het antwoord op de deelvraag: “Hoe werkt hand tracking?” is dus de volgende.

Bij de Infrarood methode wordt er een infrarood video gemaakt. De handen worden hierna gedetecteerd doormiddel van deep learning algoritmes. De gedetecteerde hand wordt hierna omgezet in een virtuele hand.

Bij de Optical methode wordt er een video gemaakt. De handen worden hierna gedetecteerd doormiddel van deep learning algoritmes. De gedetecteerde hand wordt hierna omgezet in een virtuele hand.

Bij de LiDAR methode worden er meerder lasers afgeschoten en aan de hand van de terugkerende lasers worden gegevens over diepte vastgelegd. Deze gegevens worden door een algoritme gebruikt om de handen te detecteren. De gedetecteerde hand wordt hierna omgezet in een virtuele hand.

Bij de Motion Capture methode worden gegevens vast gelegd door sensoren op/in de handschoen. Deze gegevens worden hierna gebruikt om een virtuele hand te maken.



## 4. Hand Tracking hardware

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: “Welke hand tracking hardware past het beste bij de use case?”. Om deze vraag te beantwoorden wordt onderzoek gedaan naar de verschillende beschikbare hand tracking hardware, de producenten hiervan, welke methode(s) deze gebruiken, de compatibiliteit, de kosten en de voor- en nadelen. Deze onderwerpen zijn onderzocht doormiddel van bronnenonderzoek.

### 4.1 Producenten

#### HTC Vive

##### *Achtergrond*

VIVE, ookwel bekend als HTC Vive, is een Taiwanees virtual reality development bedrijf van HTC Corporation. VIVE is opgericht in maart 2015 (HTC Vive, sd) en kwam in 2016 uit met hun eerste VR headset, de HTC Vive (eerste generatie). Deze VR headset was ontwikkeld in samenwerking met Valve voor SteamVR. Sindsdien hebben zij verschillende VR headsets ontwikkeld waaronder de HTC Vive Pro, HTC Vive Focus en de HTC Vive Cosmos (Wikipedia, sd).

##### *Product(en) met Hand Tracking*

- HTC Vive Focus 3

#### Meta/Oculus

##### *Achtergrond*

Oculus VR, ookwel bekend als Oculus, is een Amerikaans technologiebedrijf opgericht in juni 2012. Oculus specialiseert in virtual reality en aanverwante technologie (Oculus VR, sd). In 2013 kwam de Oculus Rift voor het eerst uit voor developers, later in 2016 kwam de consumenten versie uit. Sindsdien hebben zij verschillende VR headsets ontwikkeld waaronder de Oculus Rift, Oculus Go en Oculus Quest (Wikipedia, sd). In 2014 is Oculus VR overgekocht door Meta (voormalig facebook) en werkt nu onder de collectieve naam Meta (Oculus VR, sd).

##### *Product(en) met Hand Tracking*

- Meta Quest 2
- Meta Quest Pro
- Meta Quest 3 (Toekomstig)

## Pico

### *Achtergrond*

Pico is een Amerikaans bedrijf gespecialiseerd in virtual reality ontwikkeling en productie, met een focus op de standalone VR headset (VR headset zonder kabels of externe computer) markt (Pico XR, sd). In 2017 kwam de Pico Goblin uit als Pico's eerste VR headset. Sindsdien hebben zij verschillende VR headsets ontwikkeld waaronder de Pico Goblin, Pico G2 en de Pico Neo (Brown, Pico (VR Manufacturer), sd).

### *Product(en) met Hand Tracking*

- Pico Neo 4
- Pico Neo 4 Pro
- Pico Neo 4 Enterprise

## Varjo

### *Achtergrond*

Varjo is een Fins bedrijf gespecialiseerd in virtual-, mixed en augmented reality hardware- en softwareontwikkeling (Varjo, sd). In begin 2019 kwam de Varjo VR 1 uit als Varjo's eerste VR headset, later dit jaar kwam de Varjo XR 1 uit als Varjo's eerste XR-headset. Sindsdien hebben zij verschillende VR en XR-headsets ontwikkeld waaronder de Varjo VR, -XR en -Aero (Brown, Varjo (VR Manufacturer), sd)

### *Product(en) met Hand Tracking*

- Varjo XR 3

## Ultraleap

### *Achtergrond*

Ultraleap is een Brits bedrijf gespecialiseerd in Hand Tracking- en Haptics hardware ontwikkeling (Ultraleap, sd). Ultraleap is de fusie van Leap Motion (opgericht in 2010) en Ultrahaptics (opgericht in 2013). Ultraleap is ontwikkelaar van verschillende Hand Tracking hardware waaronder de Ultraleap Leap Motion Controller, Ultraleap Stereo IR 170 en de Ultraleap 3Di (Ultraleap, sd).

### *Product(en) met Hand Tracking*

- Ultraleap Leap Motion Controller
- Ultraleap Stereo IR 170

## Intel RealSense

### *Achtergrond*

Intel RealSense is een Amerikaans bedrijf gespecialiseerd in diepte- en tracking hardware ontwikkeling voor onder andere zelfstandig opererende drones en robots, augmented- en virtual reality en smart home apparaten. Intel RealSense is in 2015 opgericht als dochterbedrijf van Intel met als focus de diepte- en tracking hardware productlijn ontwikkeling (Wikipedia, sd). Intel RealSense is ontwikkelaar van verschillende Tracking hardware waaronder de Intel RealSense D405, Intel RealSense D435f en Intel RealSense D455 (Intel REALSENSE, sd).

### *Product(en) met Hand Tracking*

- Intel RealSense D405
- Intel RealSense D435f
- Intel RealSense D455

## Manus

### *Achtergrond*

Manus is een Nederlands bedrijf gespecialiseerd in finger- en body tracking voor motion capture en virtual reality (MANUS™, sd). Manus is opgericht in 2014 en in 2016 kwam de Development Kit Gloves (DK1) uit als Manus' eerste commerciële product. Sindsdien hebben zij verschillende motion capture gloves ontwikkeld waaronder de Quantum Metagloves en Prime X Haptic VR gloves (MANUS™, sd).

### *Product(en) met Hand Tracking*

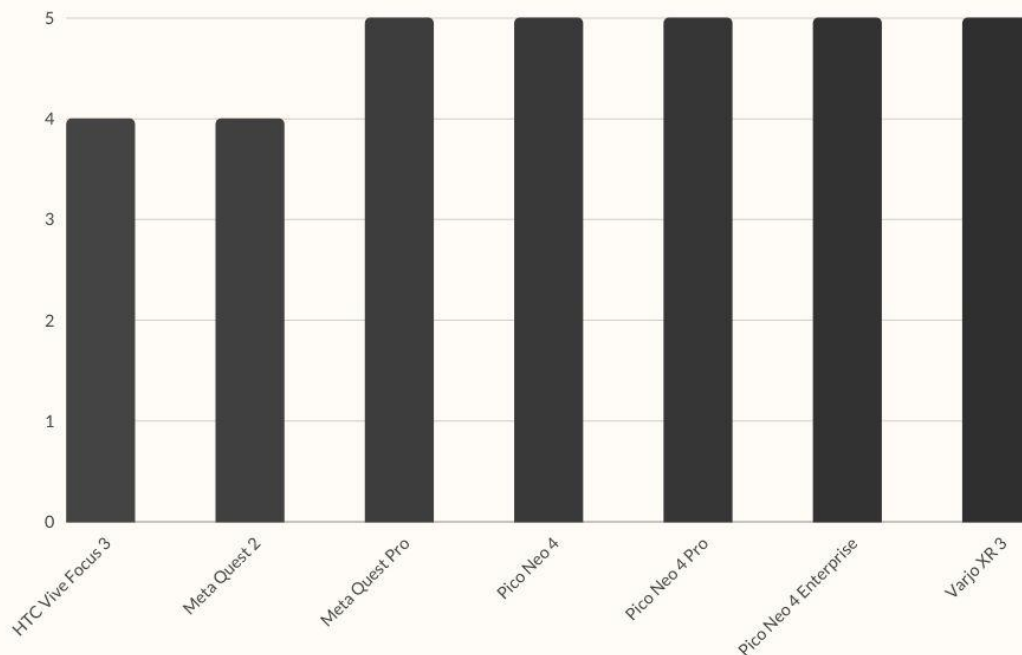
- Manus Quantum Metagloves
- Manus Prime X Haptic VR

## 4.2 Productgegevens

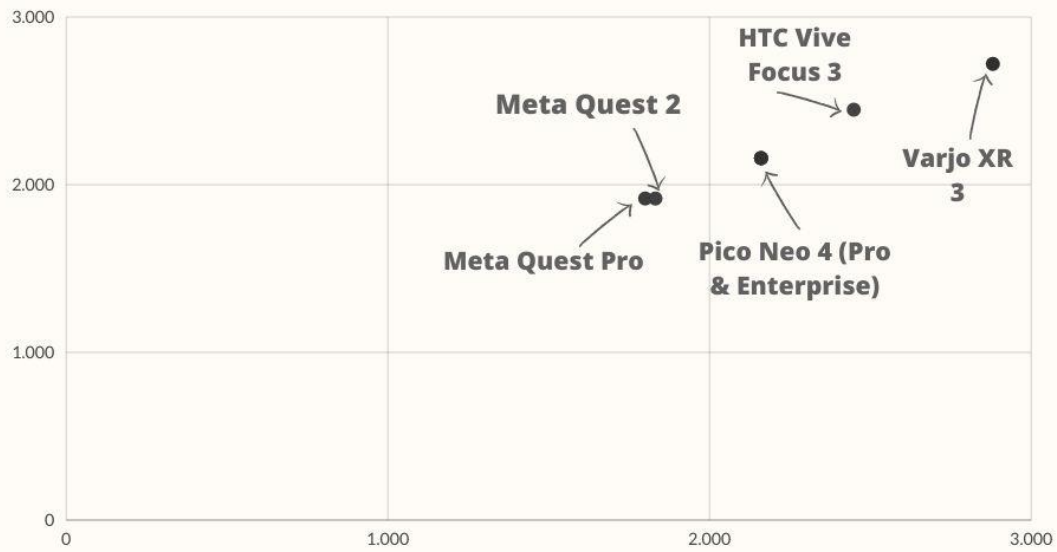
### Gegevens

	Headset Type	Passthrough	Methode
HTC Vive Focus 3	Standalone	Grayscale	6 DoF Inside-out Optical
Meta Quest 2	Standalone	Grayscale	6 DoF Inside-out Optical
Meta Quest Pro	Standalone	Color	6 DoF Inside-out Optical
Pico Neo 4	Standalone	Color	
Pico Neo 4 Pro	Standalone	Color	
Pico Neo 4 Enterprise	Standalone	Color	
Varjo XR 3	Tethered	Color	6 DoF Inside-out Infrarood
Ultraleap Leap Motion Controller	Extern		6 DoF Inside-out Infrarood
Ultraleap Stereo IR 170	Extern		6 DoF Inside-out Infrarood
Intel RealSense D405	Extern		6 DoF Inside-out Optical & Infrarood
Intel RealSense D435f	Extern		6 DoF Inside-out Optical & Infrarood
Intel RealSense D455	Extern		6 DoF Inside-out Optical & Infrarood
Manus Quantum Metagloves	Handschoenen		Motion Capture
Manus Prime X Haptic VR	Handschoenen		Motion Capture

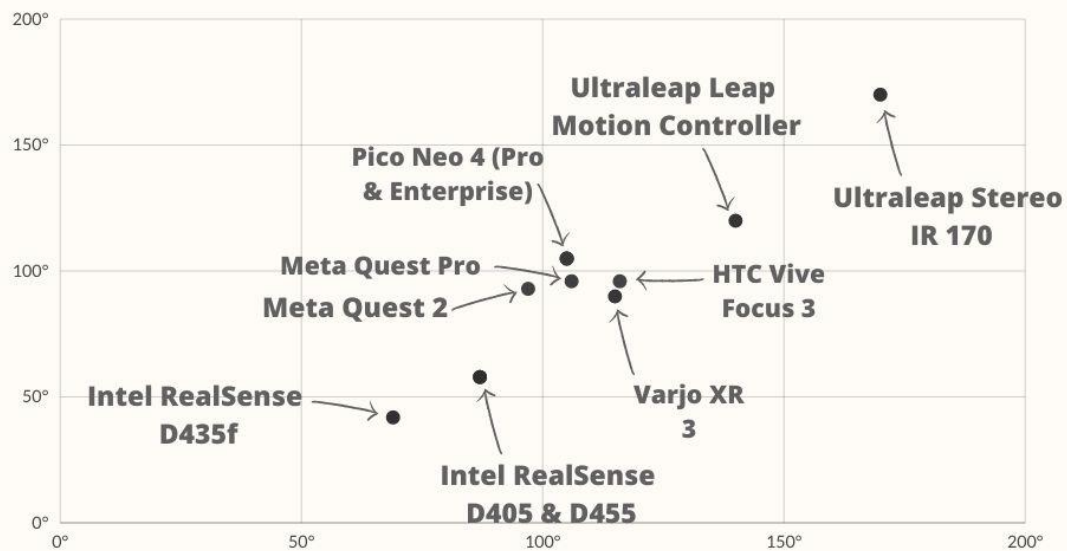
### GEÏNTEGREERDE CAMERA'S



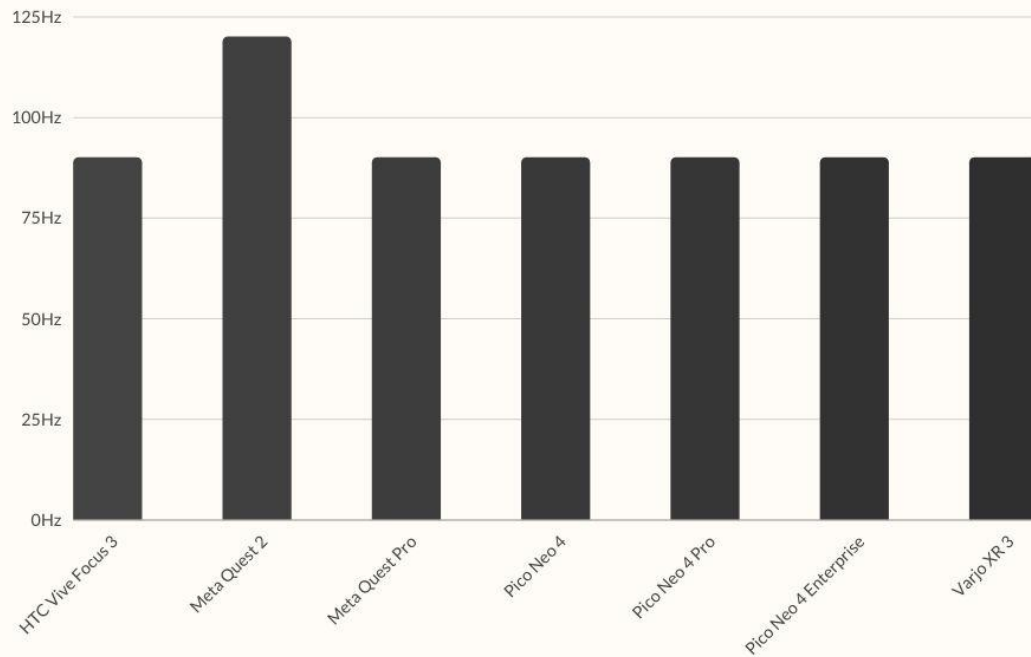
## DISPLAY RESOLUTIE



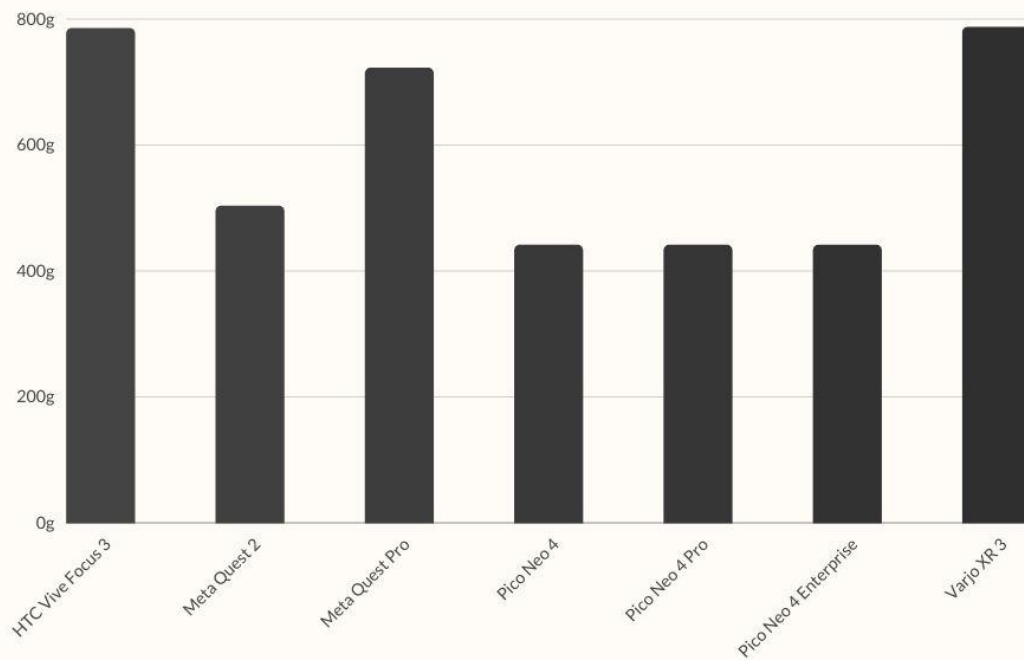
## FOV



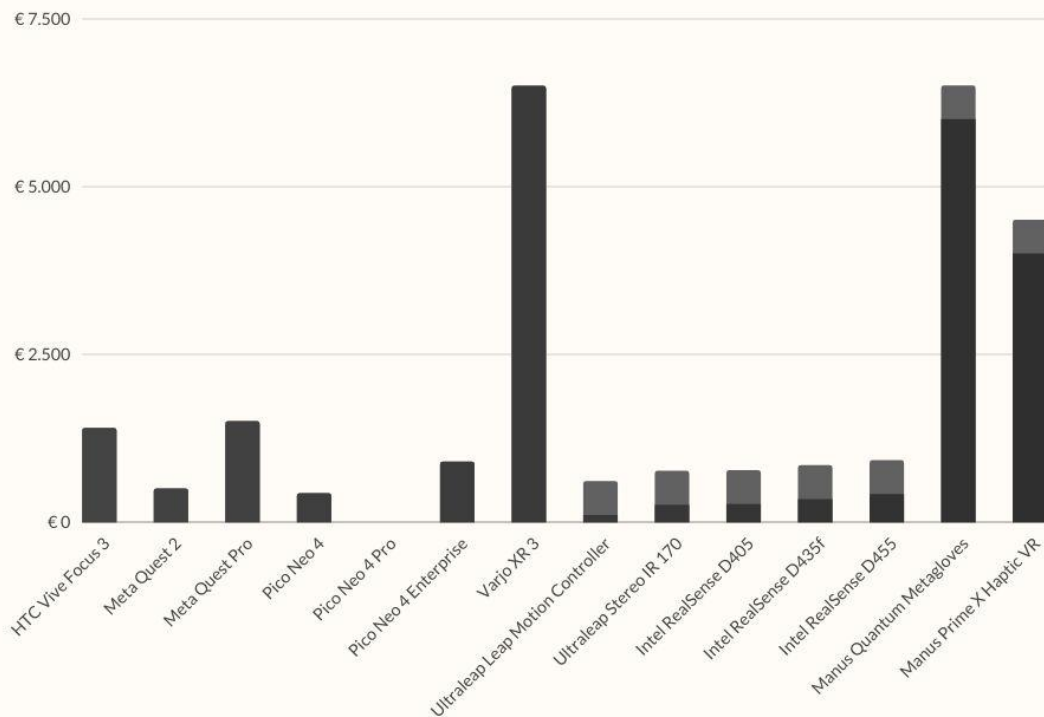
## REFRESH RATE



## GEWICHT



## PRIJS



Compatibel met:	Unity	UnrealEngine	C	C++	C#	Java	Javascript	Python	Node.js	Android	Browser	Progressive web apps
HTC Vive Focus 3	x	x	x	x						x		
Meta Quest 2	x	x									x	x
Meta Quest Pro	x	x									x	x
Pico Neo 4	x	x								x		
Pico Neo 4 Pro	x	x								x		
Pico Neo 4 Enterprise	x	x								x		
Varjo XR 3	x	x	x	x								
Ultraleap Leap Motion Controller	x	x	x	x	x	x	x	x				
Ultraleap Stereo IR 170	x	x	x	x	x	x	x	x				
Intel RealSense D405	x	x	x	x	x			x	x			
Intel RealSense D435f	x	x	x	x	x			x	x			
Intel RealSense D455	x	x	x	x	x			x	x			
Manus Quantum Metagloves	x	x	x	x								
Manus Prime X Haptic VR	x	x	x	x								

## Extra informatie

### *Meta Quest 2*

Deze bril wordt op dit moment gebruikt binnen het XRCOE productteam.

### *Meta Quest Pro*

De Meta Quest Pro is sinds kort te bestellen, echter zijn er nog geen leveringen gedaan.

### *Pico Neo 4 (, ...Pro, ...Enterprise)*

De Pico Neo 4 (, ...Pro, ...Enterprise) is nog niet verkrijgbaar.

De hand tracking methode van de Pico Neo 4 (, ...Pro, ...Enterprise) is nog onbekend.

### *Ultraleap Leap Motion Controller && Ultraleap Stereo IR 170*

Ultraleap gebruikt een speciale vorm van de Inside-out Infrarood methode. Zij hebben infrarood LEDs toegevoegd die de handen oplichten waardoor het algoritme de handen beter kan detecteren, zelf bij slechte omgevingsbelichting.

Ik heb de mogelijkheid gekregen om de VRgineers XTAL 3 Mixed Reality te testen, waarin de Ultraleap Stereo IR 170 module is verwerkt. Na de test is mijn mening dat de hand tracking doormiddel van deze module slechter is dan die van de Meta Quest 2.

### *Intel RealSense D405 & ...D435f & ...D455*

Intel RealSense gebruikt een speciale vorm van de Optical en Infrarood methodes. Zij voegen de beelden die beide methodes vast leggen samen waardoor het algoritme met beter precisie de gegevens van de handen kan vastleggen.



## 4.3 Voor- en nadelen

### HTC Vive Focus 3

#### *Voordelen*

- Hoge display resolutie
- Grote Field of View

#### *Nadelen*

- Zwaar (gewicht)
- Inside-out Optical methode
- Hoge prijs

### Meta Quest 2

#### *Voordelen*

- Snelle refresh rate
- Licht (gewicht)
- Lage prijs

#### *Nadelen*

- Kleine Field of View
- Inside-out Optical methode

### Meta Quest Pro

#### *Voordelen*

- Color passthrough
- Inside-out Optical methode met diepte sensor

#### *Nadelen*

- Zwaar (gewicht)

### Pico Neo 4

#### *Voordelen*

- Color passthrough
- Hoge display resolutie
- Licht (gewicht)
- Lage prijs

#### *Nadelen*

- Onbekende hand tracking methode

### Pico Neo 4 Pro

#### *Voordelen*

- Color passthrough
- Hoge display resolutie
- Licht (gewicht)

#### *Nadelen*

- Onbekende hand tracking methode
- Onbekende prijs
- Alleen verkrijgbaar op Chinese markt

### Pico Neo 4 Enterprise

#### *Voordelen*

- Color passthrough
- Hoge display resolutie
- Licht (gewicht)

#### *Nadelen*

- Onbekende hand tracking methode
- Alleen verkrijgbaar voor geregistreerde bedrijven

### Varjo XR 3

#### *Voordelen*

- Color passthrough
- Hoge display resolutie
- Inside-out Infrarood methode

#### *Nadelen*

- PC-powered (bekabelt)
- Zwaar (gewicht)
- Hoge prijs

### Ultraleap Leap Motion Controller

#### *Voordelen*

- Grote Field of View

- Inside-out Infrarood methode

#### *Nadelen*

- Onbekende kosten
- VR headset benodigd

### Ultraleap Stereo IR 170

#### *Voordelen*

- Grote Field of View
- Inside-out Infrarood methode
- Gemaakt voor VR/AR

#### *Nadelen*

- Onbekende kosten
- VR headset benodigd

### Intel RealSense D405

#### *Voordelen*

- Inside-out Optical en Infrarood methode

#### *Nadelen*

- Heel kleine Field of View
- VR headset benodigd

### Intel RealSense D435f

#### *Voordelen*

- Inside-out Optical en Infrarood methode

#### *Nadelen*

- Heel kleine Field of View
- VR headset benodigd

### Intel RealSense D455

#### *Voordelen*

- Inside-out Optical en Infrarood methode

*Nadelen*

- Heel kleine Field of View
- VR headset benodigd

**Manus Quantum Metagloves***Voordelen*

- Motion Capture methode

*Nadelen*

- Hoge prijs
- Handschoenen moeten gedragen worden
- Handschoenen moeten gekalibreerd worden
- Handschoenen moeten afgesteld worden

**Manus Prime X Haptic VR***Voordelen*

- Motion Capture methode

*Nadelen*

- Hoge prijs
- Handschoenen moeten gedragen worden
- Handschoenen moeten gekalibreerd worden
- Handschoenen moeten afgesteld worden

#### 4.4 Keuze

Op basis van hand tracking hardware op zich winnen de Manus Quantum Metagloves of de Manus Prime X Haptic VR. Dit heeft als rede de precisie van de vast gelegde gegevens welke gebruikt kunnen worden. Helaas zorgen de nadelen van beide ervoor dat ze voor mijn use case niet de oplossing zijn. Om te beginnen ligt de prijs van de handschoenen te hoog om op grote schaal in te kunnen zetten. Ook was één van de wensen van de opdrachtgever dat er zo min mogelijk hardware nodig is om het gebruiksgemak zo hoog mogelijk te houden. Omdat de handschoenen bij elk gebruik gekalibreerd en afgesteld moeten worden, zal dit het gebruiksgemak verminderen en zijn ze dus niet geschikt.

De hand tracking waarvoor ik kies is die van de Meta Quest 2. Deze bril is lichtgewicht, heeft een lage prijs en heeft uitstekende Hand Tracking. Door het lage gewicht is de bril geschikt voor langdurig gebruik benodigd voor sommige trainingen, ook geeft de lage prijs de mogelijkheid de bril grootschalig in te zetten. De inside-out Optical tracking methode heeft wat nadelen in vergelijking met andere methodes, maar omdat de andere methodes nog niet ver genoeg ontwikkeld zijn, komt deze toch als beste naar voren.

#### 4.5 Conclusie

Er zijn veel verschillende hand tracking producenten, en producten welke allemaal voor- en nadelen hebben. Aan de hand van de voor en nadelen is een keuze gemaakt voor het beste Hand Tracking product. Deze keuze is gevallen op de Meta Quest 2 en dus is het antwoord op de deelvraag: “Welke hand tracking hardware past het beste bij mijn use case?” de Meta Quest 2 vanwege zijn lichte gewicht, wat langdurende trainingen mogelijk maakt, en de lage prijs, wat grootschalige inzet mogelijk maakt.

## 5. Implementatie in Unity

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvraag: “Hoe kan hand tracking worden toegepast op verschillende knoppen in Unity?” Om deze vraag te beantwoorden wordt onderzoek gedaan naar de Oculus VR SDK voor Unity, het verschil tussen VR controller en Hand Tracking, prototypes van knoppen gemaakt voor dit onderzoek en een prototype cockpit met alle knoppen geïntegreerd. Deze onderwerpen zijn onderzocht doormiddel van veldonderzoek.

### 5.1 Oculus VR SDK

Om de Meta Quest 2 aan Unity te koppelen is de Oculus VR Software Development Kit (OVR SDK) benodigd. De OVR SDK is beschikbaar als Unity Package in de Unity asset store. Eenmaal toegevoegd aan je account kan deze in de package manager toegevoegd worden aan een project.

De OVR SDK is ontzettend uitgebreid met veel voorbeelden van implementaties, scripts en prefabs. In een van de voorbeeld scenes is ook te vinden hoe hand tracking geïmplementeerd kan worden.

### 5.2 Controller VS Hand

Met de OVR SDK kunnen beide controllers en hand tracking geïmplementeerd worden. Er zijn verschillende scripts en components die dit mogelijk maken.

In eerdere trainingen gemaakt door het XRCOE productteam werden er controllers gebruikt, maar nu is er interesse in hand tracking. Hierom moet ook het verschil tussen beide onderzocht worden.

Om een controller met objecten te laten interacteren zijn er verschillende componenten en scripts nodig, zo zijn er onder andere een RigidBody- en Collider component nodig, gecombineerd met een Grabbable script. Deze zorgen ervoor dat het Interactor script op de controllers met een object kan interacteren. Om daarna zelf methodes toe te voegen is er ook een PointableUnityEventWrapper script nodig, welke op verschillende momenten UnityEvents aanroept. Ook is er een Transformer script nodig welke aangeeft wat het object kan en mag doen. Zo zijn er bijvoorbeeld de OneGrabFreeTransformer en -RotateTransformer. Deze geven door aan het Grabbable script of het object vrij mag bewegen, of alleen mag roteren. Ook kunnen in deze scripts constraints meegegeven worden om het object een nog specifiekere beweging te laten doen.

Om de handen met een object te laten interacteren is niet veel anders nodig, het enige grote verschil is de HandGrabInteractable, -Interactor en HandPose scripts. De HandGrabInteractor vervangt het normale Interactor script en de HandGrabInteractable is een toevoeging op het Grabbable script. Het HandPose script is optioneel en geeft de mogelijkheid de hand op een specifieke manier het object vast te laten pakken.

Er is ook een andere manier om de handen met objecten te laten interacteren, namelijk doormiddel van de TouchGrabInteractable en -Interactor. Deze manier werkt door collision te detecteren met delen van de virtuele hand, in plaats van de gebaren (bijvoorbeeld pinch) te detecteren. Deze manier van interactie zit nog in de experimentele fase en werkt op dit moment niet goed genoeg om te implementeren in mijn use case.

### 5.3 Gemaakte knoppen

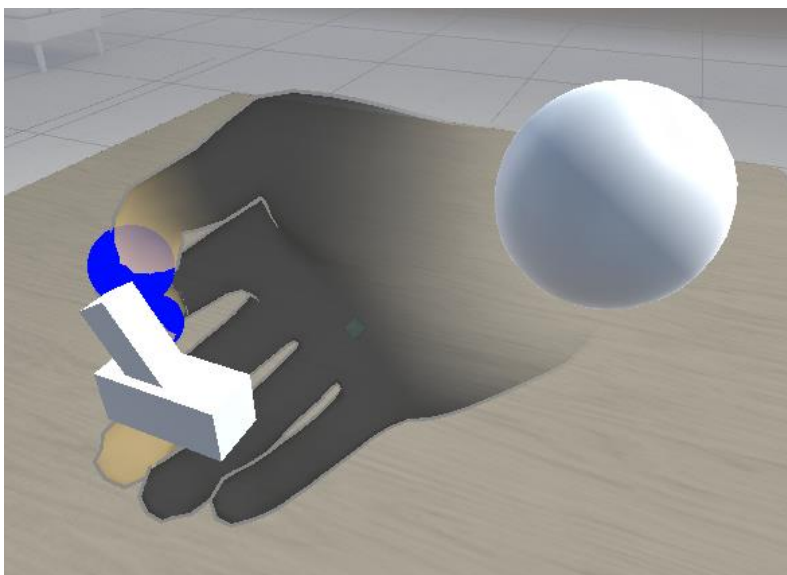
Om zeker te weten of hand tracking kan werken voor een cockpit training moet er onderzocht worden of alle knoppen in de cockpit interacteerbaar gemaakt kunnen worden. Om dit te onderzoeken ben ik zelf prototypes gaan maken van verschillende knoppen die te vinden zijn in de cockpit.

#### 5.3.1 Proces

Ik ben begonnen met het onderzoeken van de beschikbare methodes direct in de OVR SDK. Het vastpakken van objecten was simpel, namelijk doormiddel van het Grabbable, HandGrabInteractable en – Interactor scripts. Nu moest ik de beweging van de interacteerbare objecten zien te beperken. Zo kwam ik op de OneGrab...Transformer scripts. Deze scripts kunnen bepalen welke bewegingen een object kan maken.

##### *Flip Switch Versie 1*

De eerste knop die ik hiermee maakte was een flip switch. Deze knop gebruikt een OneGrabRotateTransformer welke ervoor zorgt dat een interacteerbaar object om een pivot heen kan draaien met bepaalde beperkingen.

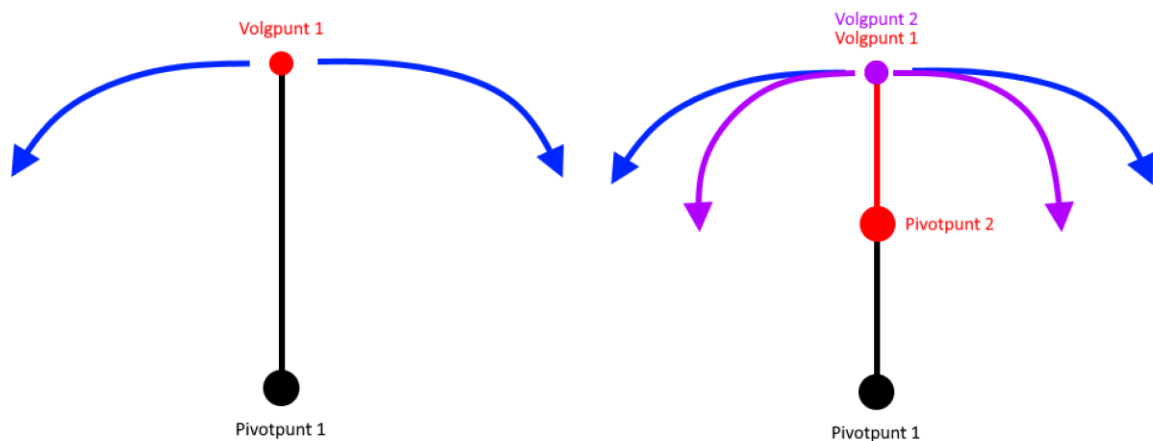


*-Versie één van de flip switch*

### Flip Switch Versie 2

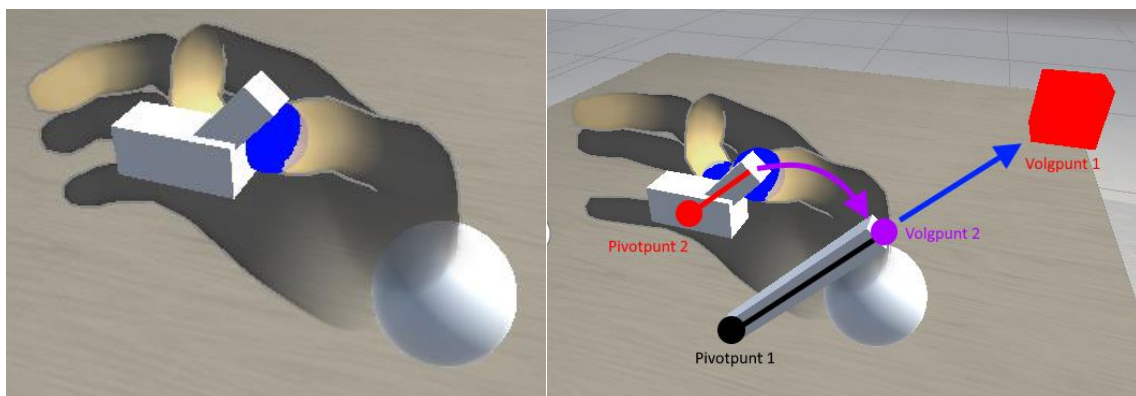
Deze eerste versie van de flip switch werkte, maar werkte slecht. Omdat de knop zo klein is en het pivot punt erg dichtbij ligt was de bediening niet erg precies. De knop bewoog heel snel van de ene naar de andere kant zonder veel controle.

Om dit tegen te gaan begon ik het werk aan de tweede versie, waar het pivot punt veel verder ligt. Om het pivot punt te verplaatsen was een tweede scharnierpunt nodig.



*-Blauwdruk van de tweede versie van de flip switch*

Scharnier één (links) is het onzichtbare interacteerbare element waarbij het pivot punt ver weg ligt. Scharnier twee (rechts) is de visuele knop die volgpunt 1 volgt welke vast zit aan de top van scharnier één. Op deze manier wordt de precisie van scharnier één toegepast op het visuele element van scharnier twee.



*-Versie twee van de flip switch*



#### *Flip Switch versie 3*

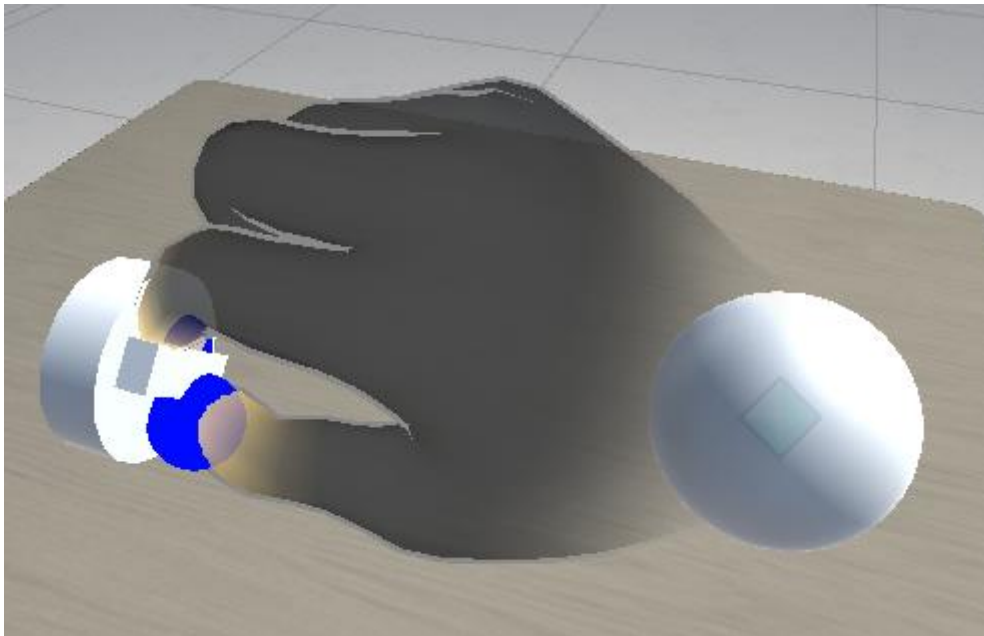
De tweede versie van de flip switch voelde erg fijn aan en werkte goed, maar het aantal GameObjects in de hierarchy was erg hoog. Om dit te verminderen besloot ik een derde versie te maken, welke voornamelijk door een script zou werken. Hij werkt doormiddel van hetzelfde principe als de tweede versie, het verschil is dat ik geen GameObjects meer roteer om een pivot, maar vectoren gebruik om de positieberekeningen te maken.

#### *Draaiknop Versie 1*

Nadat ik tevreden was over de tweede versie van de flip switch begon ik aan de draaiknop. De eerste versie werkte hetzelfde als de eerste versie van de flip switch, met een OneGrabRotateTransformer. Het probleem met deze versie is het feit dat hierbij een het punt van vastpakken om het pivot punt draait. Het werkt dus doormiddel van positie en niet rotatie.

#### *Draaiknop Versie 2*

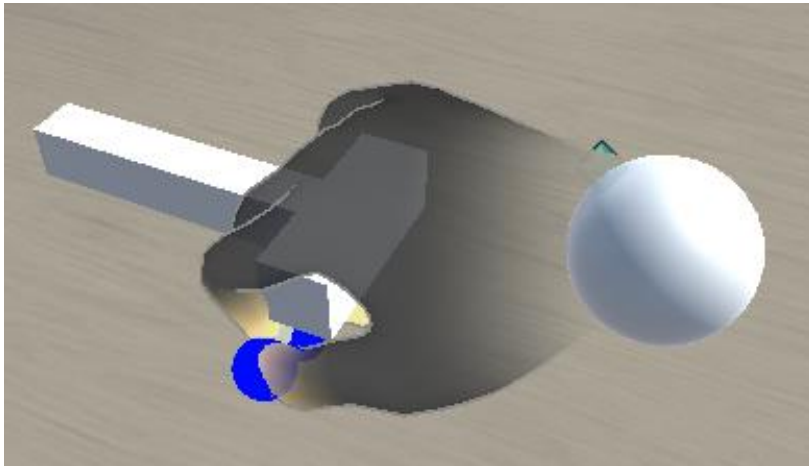
Om ervoor te zorgen dat de draaiknop werkt doormiddel van rotatie moet ik zelf iets maken. Allereerst heb ik een punt toegevoegd aan het polsgewricht van de hand. Met dit punt bereken ik de rotatie om de 'forward' as, in de richting van de arm. Deze rotatie word hierna gebruikt om de knop te draaien.



*-Versie twee van de draai knop*

### *Trek hendel*

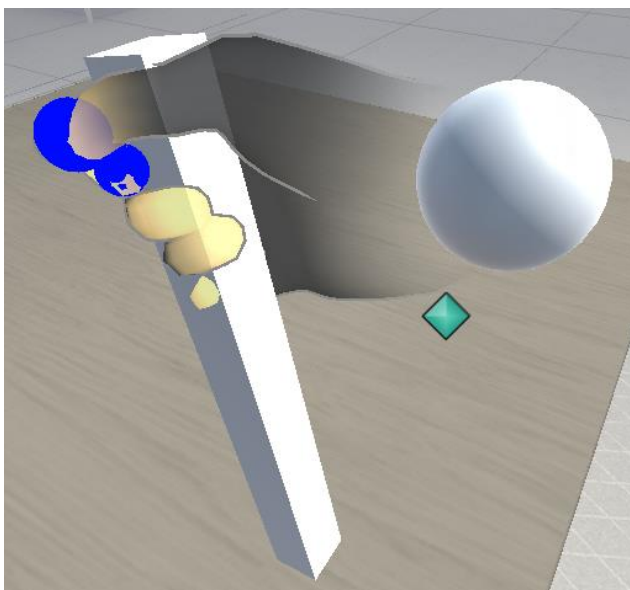
Toen ik tevreden was met de draai knop, ben ik verder gegaan met wat simpelere knoppen. Als eerste was de trek hendel aan de beurt. Deze was simpel om te maken, gezien ik de standaard componenten van de OVR SDK kon gebruiken. Ik gebruik de OneGrabTranslateTransformer en beperk twee van de drie assen, zodat hij alleen voor en achteruit kan bewegen.



*-Versie één van de trek hendel*

### *Hefboom hendel*

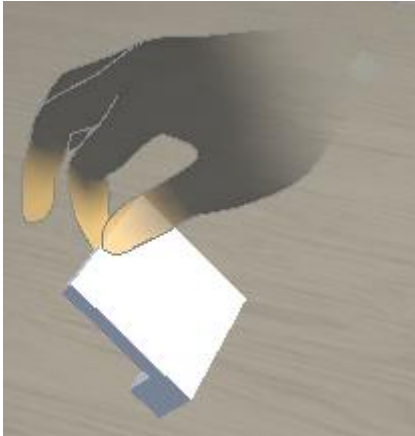
Hierna was de hefboom hendel aan de beurt, en ook deze was simpel. Ook bij deze hendel kon ik een component van de OVR SDK gebruiken, namelijk de OneGrabRotateTransformer. Ik gebruik deze om de hendel om een pivot punt heen te laten draaien.



*-Versie één van de hefboom hendel*

### *Veiligheidsklep*

Om sommige knoppen in de cockpit te beschermen zitten er een veiligheidsklep overheen. Dit zorgt ervoor dat de knop niet per ongeluk ingedrukt of gedraaid kan worden. Hierom heb ik ook een veiligheidsklep gemaakt. Deze is in principe hetzelfde als de hefboom hendel, maar dan kleiner.



*-Versie één van de veiligheidsklep*

### *Finger Tracking*

Tijdens het testen van de knoppen kwam ik er achter dat de hand soms de verkeerde knop vast pakt. Dit komt omdat de knoppen te dicht bij elkaar staan. In een vliegtuig cockpit is het niet mogelijk knoppen verder uit elkaar te zetten dus moest ik een preciezere manier bedenken om de knoppen te detecteren en te pakken.

Om dit te doen heb ik bedacht om de vingers te gebruiken om de knoppen te detecteren en te pakken. Ik gebruik colliders op de vingertoppen om te detecteren wat er aangeraakt wordt en hou deze informatie bij. Wanneer twee of meer vingertoppen een object aanraken, word deze vastgepakt.

### *Handpose bewegen*

Ik gebruikte handposes om ervoor te zorgen dat de handen vast bleven zitten aan de knoppen/hendels. Dit was goed, maar ik kreeg wel de vraag of ik een systeem kon maken waarmee de handpose vast zit aan de knop/hendel maar hij nog wel kan ronddraaien.

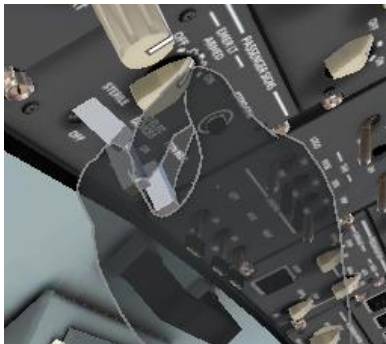
Om dit te doen heb ik ervoor gezorgd dat het GameObject met de handpose om de knop/hendel heen beweegt aan de hand van de GrabType (palm of pinch). Het handpose GameObject geef ik dezelfde rotatie van de echte hand en een positie met offset vanaf het punt waar je het aan vast pakt. Ook moest ik in de code van de OVR SDK wat veranderen waardoor de handpose constant geüpdatet word als het object waar deze bij hoort is vastgepakt.

## 5.4 Cockpit prototype

De voornaamste knoppen van de cockpit zijn werken nu als prototype, maar werken ze ook in een echte cockpit? Om dit te testen moet ik ze verwerken in een cockpit model van een eerder gemaakte cockpit training welke nog geen hand tracking had.

### *Flip switch*

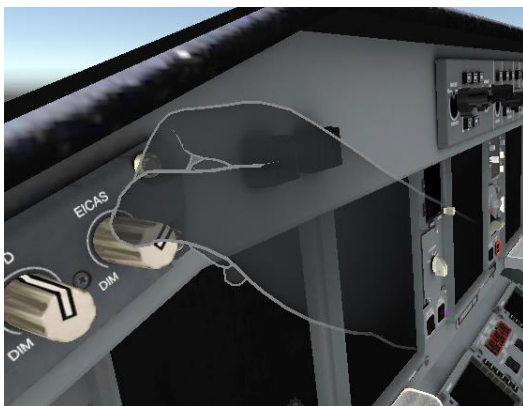
Bij de flip switch ging de implementatie simpel, echter had ik wel wat problemen met het model. Voor elke knop komen de pivot punten (GameObject punten in de scene) niet overeen met waar het model zit, dit zorgde voor veel irritatie bij het omzetten naar werkende flip switch. Hierom heb ik besloten dit achter wegen te laten. Ook merkte ik dat het finger tracking systeem nog wat verbeteringen kan gebruiken. Verder werkte de flip switch zoals bedoeld.



*-In de cockpit geïmplementeerde flip switch (zonder model)*

### *Draaiknop*

Bij de draaiknop kwam ik er snel achter dat de knoppen erg dicht bij elkaar zitten, dit was dan ook de aanzet voor het maken van het finger tracking systeem. Toen dit systeem geïmplementeerd was werkte het zoals bedoeld.



*-In de cockpit geïmplementeerde draai knop*

#### *Trek hendel*

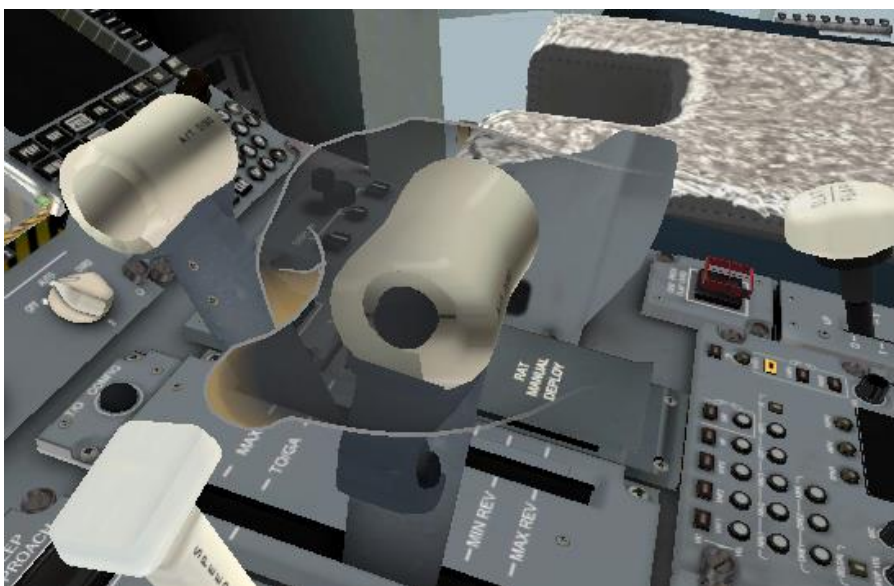
De trek hendel bleek meer gebruikt te worden dan verwacht. Gelukkig ging de implementatie makkelijk en werkte het gelijk zoals bedoeld.



*-In de cockpit geïmplementeerde trek hendel*

#### *Hefboom hendel*

Ook de hefboom hendel wordt op verschillende plekken gebruikt, zoals de gas hendel. Ook bij deze hendel ging de implementatie soepel en werkte het gelijk zoals bedoeld.

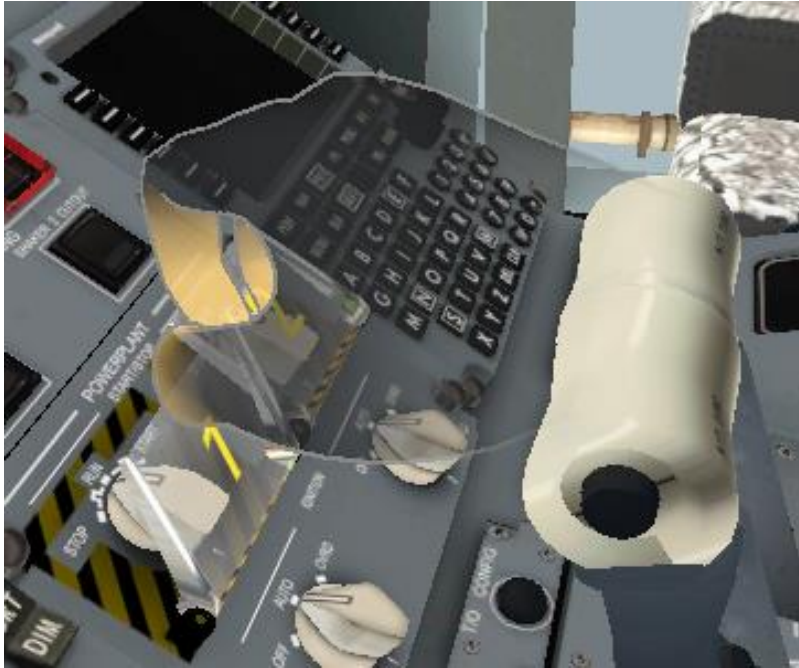


*-In de cockpit geïmplementeerde hefboom hendel*



### *Veiligheidsklep*

De veiligheidsklep was al gemaakt voor zijn doel, maar toch was de implementatie wat stroef. Ik kwam er achter dat het systeem welke ik gebruikte om de graden van rotatie te detecteren om zo UnityEvents aan te roepen, niet goed werkte. Gelukkig werkte de rest wel dus besloot ik dit systeem nog even achter wegen te laten.



*-In de cockpit geïmplementeerde veiligheidsklep*

## 5.5 Conclusie

Om hand tracking toe te passen is er heel wat nodig. De functionaliteit van de verschillende knoppen in de cockpit zoals een flip switch, draai knop, trek hendel, hefboom hendel en veiligheidsklep werken vrij simpel, al is er wel wat meer moeite nodig om het soepel te laten werken. Ook zorgt het feit dat veel knoppen dicht bij elkaar staan voor wat problemen bij de standaard OVR SDK hand tracking. Om dit op te lossen is een ander systeem nodig zoals finger tracking.

Door het analyseren kunnen we antwoord geven op de deelvraag: "Hoe kan hand tracking worden toegepast op verschillende knoppen in Unity?". Het antwoord hierop is: hand tracking kan worden toegepast op knoppen in Unity doormiddel van standaard OVR SDK componenten. Wel zijn er voor betere kwaliteit van de interactie wat verbeteringen nodig, deze kunnen de vorm nemen van verleggen van pivot punten, het bijhouden van handen en pols gewrichten en het gebruiken van finger tracking voor het aanroepen van het vastpakken.

## 6. Conclusie

Aan de hand van de antwoorden op de deelvragen: “Hoe werkt hand tracking?”, “Welke hand tracking hardware past het beste bij de use case?” en “Hoe kan hand tracking worden toegepast op verschillende knoppen in Unity?” kan een goed antwoord gegeven worden op de hoofdvraag: “Is hand tracking een gangbare oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR?”.

Het antwoord op de hoofdvraag is dan ook “Ja, hand tracking is een gangbare oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR”. Om hand tracking te realiseren in het komende project van het XRCOE team zal er wel wat werk verricht moeten worden. Hoewel het hand tracking systeem van de OVR SDK zich in een stabiel en goed werkend stadium bevindt, is het niet perfect, zo zijn er bijvoorbeeld problemen bij het identificeren van knoppen die dicht op elkaar zitten, wat ervoor kan zorgen dat de verkeerde knop wordt vastgepakt. Desalniettemin is hand tracking een meer dan degelijke oplossing voor het bedienen van een vliegtuig cockpit in VR.

## Aanbeveling

De aanbeveling resulterend aan dit onderzoek is dat hand tracking goed geïmplementeerd kan worden in het komende project van het XRCOE.

Als het XRCOE ervoor kiest om hand tracking te implementeren, zal er, zoals eerder benoemd, wel wat werk verricht moeten worden.

Een van de eerste punten is het verbeteren van het identificatiesysteem die de keuze maakt welke knop word vastgepakt. Als hier geen verbetering in wordt gemaakt zal dit het algemene gebruiksgemak verminderen en zou het zelfs kunnen leiden tot ergere gevolgen zoals het niet kunnen vastpakken van bepaalde knoppen.

Voor sommige knoppen is het ook van belang dat deze soepel aanvoelen tijdens gebruik, hiervoor zullen zelf de componenten gemaakt moeten worden. Bij de flip switch is het bijvoorbeeld van belang dat het pivot punt waaruit de draaihoek word berekend verlegt wordt. Bij de draaiknop is het van belang dat de interacterende hand en diens pols wordt geïdentificeerd om zo de draaiing van de pols te kunnen omzetten in de draaiing van de knop.



## Verwijzingen

Alternate. (sd). *HTC Vive Focus 3 vr-bril*. Opgehaald van Alternate: <https://www.alternate.nl/html/product/1749375>

Amazon. (sd). *Meta Quest Pro*. Opgehaald van Amazon: <https://www.amazon.com/Meta-Quest-Pro-Oculus/dp/B09Z7KGTWV>

Brown, R. (sd). *HTC Vive Focus 3*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/htcvivefocus3>

Brown, R. (sd). *Meta Quest Pro*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/metaquestpro>

Brown, R. (sd). *Oculus Quest 2*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/oculusquest2>

Brown, R. (sd). *Pico (VR Manufacturer)*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/manufacturer/pico>

Brown, R. (sd). *Pico 4*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/pico4>

Brown, R. (sd). *Pico 4 Enterprise*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/pico4enterprise>

Brown, R. (sd). *Pico 4 Pro*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/pico4pro>

Brown, R. (sd). *Varjo (VR Manufacturer)*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/manufacturer/varjo>

Brown, R. (sd). *Varjo XR-3*. Opgehaald van VR Compare: <https://vr-compare.com/headset/varjoxr-3>

Coolblue. (sd). *Meta Quest 2 128GB*. Opgehaald van Coolblue: <https://www.coolblue.nl/product/885052/meta-quest-2-128gb.html>

HTC Corporation. (sd). *Vive Hand Tracking SDK Guide*. Opgehaald van Vive Hand Tracking SDK : [https://hub.vive.com/storage/tracking/?\\_gl=1\\*u4yc6h\\*\\_ga\\*NzA5MTg1MzMyLjE2NjU3MzA4ODQ.\\*\\_ga\\_68NRVQF2CG\\*MTY2NTczMDg4My4xLjEuMTY2NTczMDk3Ni4zNS4wLjA](https://hub.vive.com/storage/tracking/?_gl=1*u4yc6h*_ga*NzA5MTg1MzMyLjE2NjU3MzA4ODQ.*_ga_68NRVQF2CG*MTY2NTczMDg4My4xLjEuMTY2NTczMDk3Ni4zNS4wLjA).

HTC Corporation. (sd). *Vive Hand Tracking SDK Overview*. Opgehaald van Vive Hand Tracking SDK : <https://hub.vive.com/storage/tracking/overview/introduction.html>

HTC Vive. (sd). *HTC Vive LinkedIn*. Opgehaald van LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/htcvive/about/>

Intel REALSENSE. (2021). *Intel RealSense SDK 2.0 - Supported platforms and languages*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://dev.intelrealsense.com/docs/supported-platforms-and-languages>

- Intel REALSENSE. (sd). *Intel REALSENSE Home*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://www.intelrealsense.com/>
- Intel REALSENSE. (sd). *Intel® RealSense™ Depth Camera D405*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d405/>
- Intel REALSENSE. (sd). *Intel® RealSense™ Depth Camera D435f*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435f/>
- Intel REALSENSE. (sd). *Store D405*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://store.intelrealsense.com/buy-intel-realsense-depth-camera-d405.html>
- Intel REALSENSE. (sd). *Store D435f*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://store.intelrealsense.com/buy-intel-realsense-depth-camera-d435f.html>
- Intel REALSENSE. (sd). *Store D455*. Opgehaald van Intel REALSENSE: <https://store.intelrealsense.com/buy-intel-realsense-depth-camera-d455.html>
- MANUS™. (2021, Augustus 24). *MANUS Prime X Series - First Time Setup*. Opgehaald van <https://www.youtube.com/watch?v=3TABdEzU0pc>
- MANUS™. (sd). *About MANUS*. Opgehaald van MANUS™: <https://www.manus-meta.com/about>
- MANUS™. (sd). *MANUS Knowledge Center*. Opgehaald van MANUS™: <https://www.manus-meta.com/resources/knowledge-base>
- MANUS™. (sd). *MANUS™ LinkedIn*. Opgehaald van LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/manusmeta/about/>
- MANUS™. (sd). *Shop*. Opgehaald van MANUS™: <https://www.manus-meta.com/buy-now>
- MANUS™. (sd). *Use Cases*. Opgehaald van MANUS™: <https://www.manus-meta.com/use-cases>
- Meta AI. (2019, September 25). *Using deep neural networks for accurate hand-tracking on Oculus Quest*. Opgehaald van Meta AI: <https://ai.facebook.com/blog/hand-tracking-deep-neural-networks/>
- Meta Quest. (2018, September 26). *Introducing Oculus Quest, Our First 6DOF All-in-One VR System*. Opgehaald van Meta Quest: [https://developer.oculus.com/blog/introducing-oculus-quest-our-first-6dof-all-in-one-vr-system/?locale=nl\\_NL](https://developer.oculus.com/blog/introducing-oculus-quest-our-first-6dof-all-in-one-vr-system/?locale=nl_NL)
- Meta Quest. (sd). *Develop with your preferred game engine*. Opgehaald van Meta Quest: <https://developer.oculus.com/get-started-platform/>
- MOUSER ELECTRONICS. (sd). *Leap Motion Controller*. Opgehaald van MOUSER ELECTRONICS: <https://nl.mouser.com/c/?marcom=113531155>
- MOUSER ELECTRONICS. (sd). *Ultraleap UL-SIR170-01-C-EV*. Opgehaald van MOUSER ELECTRONICS: <https://nl.mouser.com/ProductDetail/129-UL-SIR170-01-CEV>

Oculus. (sd). *Hoe kan ik Hand volgen gebruiken in Oculus for Business?* Opgehaald van Oculus for Business:  
<https://business.oculus.com/support/589813891723564/>

Oculus VR. (sd). *Oculus VR LinkedIn*. Opgehaald van LinkedIn:  
<https://www.linkedin.com/company/oculus-vr/>

Pico XR. (sd). *PICO Developer*. Opgehaald van PICO Developer: <https://developer-global.pico-interactive.com/>

Pico XR. (sd). *Pico XR LinkedIn*. Opgehaald van LinkedIn:  
<https://www.linkedin.com/company/picoxr/about/>

Soloviev, V. (sd). *SPECIFICS OF USING LIDAR AND IR-CAMERA FOR DETECTING OBSTACLES ON MARITIME VESSELS*. Novia University of Applied Sciences.

Ultraleap. (2021, Mei 7). *What is Hand Tracking in VR?* Opgehaald van Ultraleap:  
<https://www.ultraleap.com/company/news/blog/hand-tracking-in-vr/>

Ultraleap. (2021, Augustus 13). *Why The Best Hand Tracking Camera Is Infrared*. Opgehaald van Ultraleap: <https://www.ultraleap.com/company/news/blog/best-hand-tracking-camera/>

Ultraleap. (sd). *Integration Tips and Resources*. Opgehaald van Ultraleap For Developers: <https://docs.ultraleap.com/hand-tracking/integration-tips-resources.html>

Ultraleap. (sd). *Ultraleap Home*. Opgehaald van Ultraleap: <https://www.ultraleap.com/>

Ultraleap. (sd). *Ultraleap Leap Motion Controller*. Opgehaald van Ultraleap:  
<https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

Ultraleap. (sd). *Ultraleap LinkedIn*. Opgehaald van LinkedIn:  
<https://www.linkedin.com/company/ultraleap/about/>

Ultraleap. (sd). *Ultraleap Stereo IR 170*. Opgehaald van Ultraleap:  
<https://www.ultraleap.com/product/stereo-ir-170/>

Varjo. (sd). *6 DOF Timewarp*. Opgehaald van Varjo Developer:  
<https://developer.varjo.com/docs/v2.4.1/unity-legacy-plugin/6-dof-timewarp>

Varjo. (sd). *Develop For Varjo*. Opgehaald van Varjo Developer:  
<https://developer.varjo.com/>

Varjo. (sd). *Purchase*. Opgehaald van Varjo: <https://varjo.com/purchase/>

Varjo. (sd). *Varjo LinkedIn*. Opgehaald van LinkedIn:  
<https://www.linkedin.com/company/varjo/about/>

Varjo. (sd). *Varjo XR-3*. Opgehaald van Varjo: <https://varjo.com/products/xr-3/>

VR Expert. (2022, Maart 31). *HTC Vive Focus 3 Review*. Opgehaald van VR Expert:  
<https://vr-expert.nl/htc-vive-focus-3-review/>

VR Expert. (2022, Juni 29). *Meta Quest 2 review*. Opgehaald van VR Expert:  
<https://vr-expert.nl/meta-quest-2-review/>

VR Expert. (2022, Juni 23). *What is virtual reality hand tracking?* Opgehaald van VR Expert: <https://vr-expert.com/what-is-virtual-reality-hand-tracking/>

VR Expert. (sd). *Pico 4 128GB*. Opgehaald van VR Expert: <https://vr-expert.nl/consumer/product/pico-4/>

Wikipedia. (sd). *HTC Vive*. Opgehaald van Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/HTC\\_Vive](https://en.wikipedia.org/wiki/HTC_Vive)

Wikipedia. (sd). *Intel RealSense*. Opgehaald van Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Intel\\_RealSense](https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_RealSense)

Wikipedia. (sd). *Oculus Rift*. Opgehaald van Wikipedia:  
[https://nl.wikipedia.org/wiki/Oculus\\_Rift](https://nl.wikipedia.org/wiki/Oculus_Rift)