



Samenvatting

De invloed van specifieke krachten op de waarneming van zelfbeweging in simulatoromgevingen

Bruno Jorge Correia Grácio

Het gebruik van bewegingsplatformen stelt de mens in staat specifieke manoeuvres in een veilige en gecontroleerde omgeving na te bootsen. Hierbij wordt de illusie van het besturen van een voertuig gewekt door het genereren van specifieke visuele en fysieke stimuli. Hoewel de amplitude van visuele beweging die wordt waargenomen in een voertuig één-op-één kan worden nagebootst in een simulator, vereist het nabootsen van de lineaire- en hoekversnellingen die in een voertuig worden ervaren doorgaans een grotere fysieke verplaatsing dan die waar de simulator toe in staat is. In simulatoren worden fysieke bewegingen daarom met behulp van zgn. Motion Cueing Algoritmes (MCA's) getransformeerd in stimuli die binnen de fysieke grenzen van de simulator liggen.

Aanvankelijk waren MCA's gericht op het minimaliseren van het verschil tussen de stimuli die ontstaan door bewegingen in het daadwerkelijke voertuig en de bewegingen op een bewegingsplatform. Deze methode is in principe geschikt voor het nabootsen van voertuigbewegingen, maar wanneer deze bewegingen toenemen in duur en amplitude worden mensen zich meer bewust van de beperkingen van de simulator. Dit heeft zijn weerslag op de ervaren immersie en op de effectiviteit van trainingen. Een mogelijke oplossing is om, in plaats van de exacte bewegingen die het voertuig maakt, de door de mens waargenomen bewegingen in de simulator na te bootsen. In deze benadering

wordt het verschil tussen de waargenomen bewegingen in het voertuig en die in de simulator geminimaliseerd.

De menselijke waarneming van zelfbeweging komt tot stand in het centrale zenuwstelsel (CNS), door het samenvoegen van informatie uit verschillende sensorische modaliteiten. Een accurate waarneming van zelfbeweging is essentieel voor voortbeweging en ruimtelijke oriëntatie. Wanneer mensen echter worden bewogen in simulatoromgevingen (bijvoorbeeld voor vliegen of autorijden), zijn zij ontvankelijk voor bewegingsillussies. Zo kan specifieke kracht (dat is, de resultante kracht op een ruimtelijk lichaam per eenheid van massa in m/s^2) resulteren in een waarneming van translatie (lineaire beweging), een waarneming van kanteling, of in een combinatie van beide soorten beweging. Voor het ontwikkelen van MCA's die inspelen op de karakteristieken van menselijke waarneming is een grondige kennis van de menselijke waarneming van zelfbeweging in simulatoren daarom onontbeerlijk.

Hierbij is met name specifieke kracht interessant, vanwege de ambiguïteit tussen kanteling en translatie, en vanwege het feit dat een plotselinge verandering van de specifieke kracht ervoor kan zorgen dat een simulator tegen zijn fysieke grenzen aanloopt.

Het hoofddoel van het onderzoek dat in deze dissertatie wordt beschreven is een beter begrip te ontwikkelen van hoe menselijke waarneming van zelfbeweging in simulatoromgevingen wordt beïnvloed door specifieke kracht.

Het onderzoek is verdeeld in twee delen: een deel met een focus op het vestibulair systeem (het evenwichtsorgaan, bestaande uit de otolieten en de halfcirkelvormige kanalen) en een deel met een focus op visueel-vestibulaire interacties.

In het eerste deel, bestaande uit de hoofdstukken twee tot en met vier, wordt beschreven hoe specifieke kracht in afwezigheid van visuele stimuli enerzijds kan leiden tot waarneming van kanteling en anderzijds tot waarneming van translatie. In het tweede deel, bestaande uit de hoofdstukken vijf tot en met zeven, wordt onderzoek naar schaling tussen visuele en fysieke stimuli in een simulatoromgeving beschreven.

In hoofdstuk twee worden mogelijke artefacten in de waarneming van kanteling beschreven. Proefpersonen werden sinusoidaal rond hun naso-occipitale as gekanteld, waarbij ze de door hen ervaren kanteling aangaven met een joystick. De instructie daarbij was ofwel de joystick in de richting tegengesteld aan de eigen kanteling te bewegen, de 'inside-out'-conditie (IO), of de joystick mee te bewegen in de richting van de kanteling, de 'outside-in'-conditie (OI). Voorts werd onderzocht of er verschil bestaat tussen het boven, rond, en onder het draaipunt vasthouden van de joystick. De resultaten toonden een significant verschil in gemeten kanteling tussen de IO en OI condities, maar geen effect van de wijze waarop de joystick werd vastgehouden. Op basis van de

resultaten werd geconcludeerd dat de aangegeven kanteling in de IO conditie correspondeert met de subjectieve verticaal en dat de aangegeven kanteling in de OI conditie overeenkomt met de waargenomen kanteling.

In hoofdstuk drie wordt onderzoek beschreven naar illusoire kanteling, bekend als de 'somatogravische illusie'. Deze illusie ontstaat wanneer mensen in een verder donkere omgeving worden blootgesteld aan een continue lineaire versnelling. Waargenomen kanteling werd gemeten met een joystick, met de in hoofdstuk twee beschreven OI-conditie. De bewegingsprofielen werden gegenereerd met een techniek waarbij proefpersonen werden gecentrifugeerd met een variabele radius. Hierbij ontstaat een laterale centripetale versnelling die als kanteling om de naso-occipitale as wordt ervaren. De resultaten lieten zien dat de tijdsconstante van de somatogravische illusie in de orde van twee seconden was. Daarnaast werd aangetoond dat de illusie kan worden beschreven met een in 1974 door Mayne ontwikkeld model van waarneming van zelfbeweging, bekend als de 'vergelijking van Mayne'.

Naar aanleiding van het in hoofdstukken twee en drie beschreven onderzoek, wordt in hoofdstuk vier onderzoek beschreven naar waargenomen translatie wanneer mensen in het donker blootgesteld worden aan veranderingen in de specifieke kracht. Proefpersonen werden op lateraalsinusoidale wijze bewogen, waarbij de bewegingen verschilden in frequentie en amplitude. Proefpersonen werden gevraagd de waargenomen zijdelingse verplaatsing en pieksnelheid te rapporteren. Uit de resultaten bleek dat de gerapporteerde verplaatsing in dezelfde orde van grootte was als de gerapporteerde pieksnelheid, wanneer deze werd geconverteerd naar verplaatsing. Voor de meeste proefpersonen kon de waargenomen snelheid adequaat worden gemodelleerd met de vergelijking van Mayne. Voor het modelleren van waargenomen verplaatsing was een extra "leaky integrator" (een zogenaamde benaderde integratie) nodig. De resultaten van een klein aantal proefpersonen leken te worden beïnvloed door cognitieve processen die niet in huidige modellen van waarneming van zelfbeweging worden vertegenwoordigd.

Uit de resultaten van hoofdstukken drie en vier blijkt dat de vergelijking van Mayne een accurate beschrijving van de ambiguïteit tussen kanteling en translatie in afwezigheid van visuele informatie geeft. De gemeten tijdsconstante van het model was in dezelfde orde van grootte voor beide onderzoeken. De vergelijking van Mayne kan echter alleen worden toegepast in situaties met verminderde visuele informatie, zoals 's nachts, of door wolken vliegen. Daarom is het vervolg van het onderzoek in deze dissertatie gericht op visueel-vestibulaire interacties.

In hoofdstuk vijf is onderzocht welke schaling tussen visuele en fysieke beweging de voorkeur van proefpersonen geniet. Proefpersonen werden sinusoidaal bewogen, waarbij visuele en fysieke bewegingen met gelijke frequentie en

fase, maar met verschillende amplitude werden aangeboden. De taak van de proefpersonen was de amplitude van de fysieke beweging aan te passen tot een optimale schaling was bereikt. Het bleek dat de gain van de bewegingen, gedefinieerd als de verhouding tussen de fysieke en visuele amplitude, afnam voor grotere visuele amplitudes en bewegingsfrequenties. Over het geheel genomen waren de gains kleiner dan één, wat betekent dat de geprefereerde fysieke amplitude kleiner is dan visuele amplitude. Ook vonden we dat niet één waarde voor de gain de voorkeur heeft, maar dat de geprefereerde gain afhankelijk is van de beginwaarde van de amplitude van de fysieke beweging. Dit onderzoek bevestigt eerdere bevindingen dat fysieke beweging in een simulator wordt overschat.

Het bereik van de fysieke waarden dat in hoofdstuk vijf werd gevonden - hier gedefinieerd als 'optimale zone' (OZ) - leek op de in de literatuur beschreven 'coherentiezone' (CZ). De CZ wordt gedefinieerd als het bereik van de verhoudingen tussen visuele en fysieke beweging die als coherent wordt ervaren, ongeacht verschillen in amplitude of fase. Om deze gelijkenis te duiden werd in hoofdstuk zes een vergelijking gemaakt tussen de OZ en CZ. Proefpersonen werden sinusoidaal-lateraal bewogen. Voor het bepalen van de OZ werd proefpersonen gevraagd de amplitude van de fysieke beweging aan te passen tot een optimale match werd bereikt; voor het bepalen van de CZ werd proefpersonen gevraagd de boven- en ondergrens van fysieke beweging op te zoeken die nog als coherent met de visuele beweging werd ervaren. De resultaten lieten zien dat de OZ en CZ van elkaar verschillen, waarbij de eerstgenoemde binnen de laatstgenoemde viel. De gains van de OZ lieten dezelfde trends met betrekking tot amplitude en frequentie zien als die gevonden in hoofdstuk vijf, namelijk dat de gain afnam met toenemende frequentie en amplitude en dat de geprefereerde gain kleiner dan 1 is - ondanks het feit dat de onderzoeken in verschillende simulatoren werden uitgevoerd.

De waarneming in zowel hoofdstuk vijf als zes, dat de geprefereerde gain kleiner dan 1 is, is mogelijk te verklaren aan de hand van de visuele stimuli die getoond werden in de simulatoren. Daarom is in hoofdstuk zeven onderzocht of de schaling tussen visuele en fysieke stimuli afhankelijk is van de grootte van het blikveld (de "Field-of-View"), en de inhoud van de virtuele wereld, waarbij cues met betrekking tot grootte en diepte werden gevarieerd. In dit onderzoek werd proefpersonen gevraagd de amplitude van visuele stimuli aan te passen tot een optimale overeenstemming met de fysieke beweging was bereikt. De taak werd uitgevoerd voor sinusoidale schrik- (longitudinale), verzet (laterale), en gier- (rotatie om de verticale as) bewegingen (in het Engels *surge*, *sway*, en *yaw*, respectievelijk). De resultaten toonden aan dat de gain van de visuele stimulus, gedefinieerd als de verhouding tussen de visuele en fysieke beweging, dichter bij één lag wanneer de blikveldgrootte toenam en ook wanneer meer

grootte-diepte-cues beschikbaar waren in de virtuele wereld. Op basis hiervan werd geconcludeerd dat perceptie van diepte een groot effect heeft op de gain van de visuele stimulus.

Voor de rotatiebeweging, waar de snelheid van optische stroming (optic flow) onafhankelijk is van de afstand van objecten tot de waarnemer, was de gain van de visuele beweging gelijk aan één en onafhankelijk van de inhoud van de virtuele wereld. Voor de longitudinale en laterale translatiebewegingen, waar de snelheid van optische stroming wél afhankelijk is van de afstand van objecten tot de waarnemer, waren de gains veel hoger dan één, en afhankelijk van de inhoud van de virtuele wereld. De visuele gains lijken hiermee een goede maat om te evalueren hoe grootte en diepte worden geïnterpreteerd in simulatoromgevingen.

In hoofdstuk acht worden de implicaties van de resultaten van de voorgaande hoofdstukken voor het ontwerp van MCA's geëvalueerd. Enerzijds wordt een model van de waarneming van zelfbeweging uit de literatuur uitgebreid om de bevindingen van het onderzoek uit de eerdere hoofdstukken van deze dissertatie te accommoderen, anderzijds wordt in dit hoofdstuk een theoretisch kader voorgesteld voor het ontwikkelen van 'perceptuele' MCA's. Hoewel het in dit hoofdstuk beschreven perceptuele model nog geen substituuft vormt voor klassieke MCA's, biedt de voorgestelde aanpak voordelen voor simulatie van specifieke manoeuvres en kunnen nieuwe bevindingen op het gebied van de waarneming van zelfbeweging vrij eenvoudig in deze aanpak worden geïntegreerd.

Samenvattend laat het werk in deze dissertatie zien dat waarneming van zelfbeweging die wordt geïnduceerd door veranderingen in de specifieke kracht in afwezigheid van visuele stimulatie, adequaat kan worden beschreven met de vergelijking van Mayne. De verwachting is dat toekomstig onderzoek zal bevestigen dat interacties tussen de otolieten en halfcirkelvormige kanalen met deze vergelijking kunnen worden beschreven. Ook hebben we laten zien dat waarneming van zelfbeweging in simulatoromgevingen voornamelijk van waarneming in natuurlijke omgevingen verschilt door een gebrek aan effectieve visuele grootte- en dieptecues en ook door de cognitieve effecten van eerdere ervaringen en verwachtingen van de proefpersoon. De rol van cognitie in de waarneming van zelfbeweging is dan ook een uitgangspunt voor vervolgonderzoek.

Dat vervolgonderzoek zou gericht kunnen worden op het verwerken van cognitieve effecten in modellen van waarneming van zelfbeweging. Evenzeer dient onderzocht te worden hoe visuele en fysieke informatie in het centraal zenuwstelsel wordt gecombineerd om de verschillende methoden die in recent onderzoek worden gebruikt voor het modelleren van waarneming van zelfbeweging met elkaar te kunnen verenigen. Tot slot dient te worden genoemd dat de hier gepresenteerde experimenten van passieve aard waren, in de zin

dat proefpersonen zich concentreerden op hun waarnemingen, terwijl MCA's voornamelijk ontwikkeld worden voor simulaties waarin proefpersonen actieve stuurtaken uitvoeren. In de toekomst dient daarom de toepasbaarheid van de huidige bevindingen op menselijk gedrag in actieve taken te worden onderzocht, om zo te komen tot meer immersieve en efficiënte voertuigsimulatie.