

TNO-rapport
IZF 1991 A-17

Instituut voor Zintuig-
fysiologie TNO

Kampweg 5
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg

Telefoon 0346 35 62 11
Fax 0346 35 39 77

titel

Bewegingsperceptie in moving-base simulatoren

auteurs

W. Bles
J.E. Korteling
J.T. Marcus
J.B.J. Riemersma

datum

12 april 1991

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

aantal pagina's

: 53

(incl. bijlagen,
excl. distributielijst)

© 1991 TNO

INHOUD

	Blz.
SAMENVATTING	5
SUMMARY	6
1 INLEIDING	7
2 VESTIBULAIRE DREMPELS EN SENSATIES IN MOVING-BASE SIMULATOREN	8
2.1 Eigenschappen van het vestibulaire systeem voor het waarnemen van beweging	8
2.2 Simulatie van beweging in fixed-base opstellingen	14
2.3 Mogelijkheden van toegevoegde vestibulaire cues	17
2.4 Mogelijkheden en grenzen van moving-base simulatoren	19
2.5 Indicaties voor moving-base toepassing	22
2.6 Leemten in kennis en aanbevelingen	23
3 TRAININGSEFFECTIVITEIT	24
3.1 Inleiding	24
3.2 Maten voor validiteit en trainingseffectiviteit	25
3.3 De waarde van bewegingsinformatie	28
3.4 Bewegingssysteem en leeroverdracht	29
3.5 Discussie en conclusies	33
4 SIMULATORZIEKTE	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Ontstaan van simulatorziekte	37
4.3 Nadere precisering van de oorzaken van simulatorziekte	40
4.4 Na-effecten van simulatorgebruik	42
4.5 Conclusies	43
5 SLOTCONCLUSIES EN SUGGESTIES VOOR VERVOLG- ONDERZOEK	44
5.1 Slotconclusies	44
5.2 Suggesties voor vervolgonderzoek	47
REFERENTIES	48
APPENDIX Begrippenlijst	53

Bewegingsperceptie in moving-base simulatoren

W. Bles, J.E. Korteling, J.T. Marcus, J.B.J. Riemersma

SAMENVATTING

Het onderhavige rapport is een literatuurstudie inzake de effecten van een moving-base systeem op de bewegingssensaties, op de leeroverdracht en op het optreden van simulatorziekte in simulatoren. Allereerst wordt een overzicht gegeven van vestibulaire drempels en sensaties, de invloed hierop van visuele en tactiele cues, en de consequenties voor moving-base simulatoren. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van wat er bekend is aan methoden en onderzoek aangaande de leeroverdracht bij overgang van de simulator naar het echte systeem bij gebruik van een moving-base. Tenslotte wordt ingegaan op het optreden van simulatorziekte, toegespitst op het gebruik van een moving-base simulator. Leemten in kennis aangaande deze drie onderdelen worden geïnventariseerd en aangegeven wordt hoe die leemten kunnen worden opgevuld.

Motion perception in moving-base simulators

W. Bles, J.E. Korteling, J.T. Marcus, J.B.J. Riemersma

SUMMARY

The present report is a literature review about the influence of a moving-base simulator on motion perception, transfer of training and simulator sickness incidence. First vestibular thresholds and sensations are reviewed, followed by a discussion of the effects of additional visual and tactile cues and the consequences for moving-base simulators. Subsequently methods and investigations concerning transfer of training are discussed for the transition from simulator to the real system in case of a moving-base simulator. Finally the mechanisms of simulator sickness are discussed and the consequences of a moving-base on simulator sickness incidence.

1 INLEIDING

In simulatoren van vaar-, voer- en vliegtuigen wordt vaak gebruik gemaakt van een moving-base teneinde de visueel opgewekte bewegingssensaties te ondersteunen met tactiele en vestibulaire cues. Vanzelfsprekend kunnen de echte bewegingen slechts ten dele nagebootst worden vanwege het plaatsgebonden karakter van de simulator.

Een complete moving-base heeft zes vrijheidsgraden van beweging (3 rotaties en 3 translaties). **Rotaties** zijn rond iedere willekeurige as mogelijk, zij het dat de rotatiehoek beperkt is: van deze vorm van simulatie wordt gebruik gemaakt om de onset van (grotere) rotaties te markeren, om kanteling t.o.v. de verticaal weer te geven en om (grote) lineaire versnellingen te suggereren. **Translaties** zijn ook mogelijk, maar de slag is meestal niet in alle richtingen even groot. Door middel van merkbare differentiële verplaatsingsimpulsen kunnen bewegings- en versnelingssensaties worden opgewekt die de werkelijke bewegingsperceptie gedeeltelijk benaderen. De "merkbare" bewegingsimpulsen van de simulator moeten echter gevolgd worden door "onmerkbare" bewegingen terug naar de uitgangspositie om daarvandaan weer een "merkbare" te kunnen genereren. In de praktijk komt het er op neer, dat de echte bewegingssensaties met behulp van een plaatsgebonden moving-base slechts bij benadering kunnen worden nagebootst.

Bij de huidige ontwikkelingen van simulatoren voor training of onderzoek is het van groot belang te weten hoe een moving-base de bewegingssensaties kan beïnvloeden, hoe deze bewegingssensaties al dan niet bijdragen tot leeroverdracht en validiteit, en in hoeverre een moving-base het optreden van simulatorziekte beïnvloedt.

Het onderhavige rapport is een literatuurstudie inzake deze drie onderwerpen. Allereerst wordt in Hoofdstuk 2 een inventarisatie gegeven van vestibulaire drempels en sensaties en de consequenties daarvan voor moving-base simulatoren. Tevens wordt aangegeven hoe deze drempels en bewegingssensaties beïnvloed worden door tactiele en visuele cues. Leemten in kennis worden geïnventariseerd en aangegeven wordt hoe die leemten opgevuld kunnen worden.

In Hoofdstuk 3 wordt vervolgens een overzicht gegeven van wat er in de literatuur bekend is aan methoden en onderzoek over de vraag of verschillen tussen werkelijkheid en nabootsing aanleiding geven tot vermindering van de leeroverdracht bij overgang van de simulator naar het echte systeem en wat de invloed van een moving-base hierop is. Aan de hand hiervan worden eisen geformuleerd die aan een moving-base te stellen zijn.

In Hoofdstuk 4 tenslotte wordt ingegaan op de gevolgen van een moving-base voor het optreden van simulatorziekte.

2 VESTIBULAIRE DREMPELS EN SENSATIES IN MOVING-BASE SIMULATOREN

2.1 Eigenschappen van het vestibulaire systeem voor het waarnemen van beweging

Het vestibulaire systeem wordt kort geïntroduceerd, met speciale aandacht voor de drempelwaarden, de frequentie-afhankelijkheid van deze drempels, en latentie van de waarneming. Deze kenmerken zijn immers van belang bij de toepassing van vestibulaire cues in een simulator, en bij onderdrempelige terugplaatsing van een moving-base naar de neutrale positie.

2.1.1 Drempelwaarden voor de waarneming van lineaire versnelling

De drempelwaarden voor lineaire versnellingen worden bepaald door de specifieke sensoren voor lineaire versnelling: de otolieten. Dit wordt ondersteund door diverse experimentele gegevens: mensen zonder vestibulaire functie hebben drempelwaarden die een factor 10 hoger liggen dan normaal. Patiënten die niet meer beschikken over somatosensorische informatie door een hoge spinale laesie, maar wel een intact vestibulair systeem hebben, vertonen geen drempelverhoging (Walsh, 1961). Een methodologisch probleem bij de aanbieder van versnellingen in de grootte-orde van de drempelwaarde is dat de proefpersoon diverse andere cues kan waarnemen zoals trillingen en motorlawaai. Om effecten van deze andere cues uit te sluiten kan de drempel worden bepaald aan de hand van een richting-keuze die de persoon moet maken. Voordeel is dat toegenomen trillingen en lawaai bij versnelling geen informatie meer bieden; wel moet bedacht worden dat deze drempel dan een drempel is voor richting-discriminatie.

Benson e.a. (1986b) hebben dit principe toegepast in een drempelstudie met een lineaire versnellingsbaan, onder aanbieder van enkelvoudige versnellingsstimuli. In tegenstelling tot continue versnellingsstimuli die in de meeste vroegere drempelstudies zijn toegepast vertonen deze enkelvoudige stimuli de meeste overeenkomst met de situatie in een moving-base simulator. Het versnellingsprofiel was een eenmalige sinus. Het coördinatenstelsel X-Y-Z is gedefinieerd ten opzichte van de proefpersoon, refererend naar respectievelijk voor-achter, links-rechts, en hoofd-voet as. Op de versnellingsbaan kon de proefpersoon langs elke as worden gestimuleerd, door deze te positioneren in verschillende houdingen: vooruit, zijwaarts, en liggend op de rug. In Tabel I zijn diverse literatuurgegevens weergegeven: de onderste rij bevat de gegevens bij stimulatie met een versnelling in de vorm van een enkelvoudige sinus, verkregen in het boven beschreven experiment van Benson.

Tabel I Drempelwaarden [m/s²] voor de detectie van lineaire bewegingsstimuli in het horizontale vlak, effectief in de X, Y, en Z richting van het hoofd.

Stimulus	f (Hz)	X	Y	Z	Aantal pp	Bron
Continue parallel schommel	.4	.018	.019	.021	?	Walsh (1961)
	.4	-	.038	.053	6	"
	.29	.045	.035	.053	12	Greven e.a. (1974)
Continue oscillatie op lin. baan	.3	.025	.032	.070	6	Benson e.a. (1986a)
Stap versn.	-	.059	-	.098	3	Meiry (1966)
Eenmalige sin. versn.	.3	.063	.057	.154	24	Benson e.a. (1986b)

Tabel I geeft aan dat bij continue oscillatie de drempels lager liggen; dit is begrijpelijk omdat de informatie dan ruimer voorhanden is.

Effect van stimulus frequentie. In de gerefereerde studie van Benson e.a. (1986b) is tevens onderzocht wat het effect is van de frequentie van de eenmalige sinusvormige versnelling. De definitie van lineaire bewegingsdrempel L_t in de vorm van dB luidt:

$$L_t(\text{dB}) = 20 \log(A_{L_t}/A_{\text{ref}})$$

waarin A_{L_t} de amplitude is van de versnellingssinus op de drempel, en A_{ref} een referentie die in de Benson studie (1986b) een waarde heeft van .076 m/s². Wanneer deze drempel wordt uitgezet tegen stimulus frequentie op log schaal, dan blijkt de drempel af te nemen met toenemende frequentie, met helling -5.1 dB/decade in het frequentiebereik van 0.14 tot 1.02 Hz. De fysiologische achtergrond is onder meer dat bij lagere frequenties adaptatie optreedt, leidend tot hogere drempels.

Concluderend over drempels voor lineaire versnellingen kan worden gesteld dat continuïteit van de stimulus leidt tot lagere drempels, en dat de drempel frequentie-afhankelijk is. Kennis van deze drempels is van praktisch belang bij tilting en wash-out, technieken die in sectie 2.4 aan de orde zullen komen.

2.1.2 Drempelwaarden voor de waarneming van hoeksnelheid

De specifieke sensoren voor hoekversnelling zijn de drie halfcirkelvormige kanalen, gelegen in het binnenoor in drie onderling loodrechte vlakken. Drempelmetingen worden verricht op draaiplatform of draaistoel, waarbij onder meer van belang zijn: de richting van het hoofd ten opzichte van de draaiingsas, en de

afstand van het hoofd tot de draaiingsas. Als deze afstand groter wordt zal de centrifugaalkracht toenemen, waardoor ook de otolieten gestimuleerd worden. Drempelmetingen kunnen hierdoor worden beïnvloed.

Hoeksnelheid vs. hoekversnelling. Deze studie is gericht op de effecten in simulatoren, waarin de beperkte manoeuvreer-ruimte steeds een randvoorwaarde is. Hoeksnelheden kunnen slechts korte tijd worden aangehouden. Daarom zullen die drempelwaarden voor hoeksnelheid hier worden besproken, die voor kortdurende, discrete hoeksnelheden zijn afgeleid door Benson (1989). De effectieve stimulus voor de halfcirkelvormige kanalen is in het algemeen de hoekversnelling; echter de dynamica van dit zintuig is zodanig dat voor kortdurende hoofdbewegingen, waarbij hoekversnelling snel wordt gevolgd door vertraging, de waarneming veel meer gerelateerd is aan hoeksnelheid (bereik tot ongeveer 80 °/s) dan aan hoekversnelling. Derhalve wordt de perceptieve drempel voor discrete stimuli bepaald door de hoeksnelheid, op voorwaarde dat de duur van de stimulus niet langer is dan de integratietijd van de halfcirkelvormige kanalen (ongeveer 3 s).

Maten voor de drempel. In het algemeen geldt dat de termen roll, pitch en yaw betrekking hebben op voertuigrotaties, en het stelsel X-Y-Z refereert naar het hoofd van de persoon. In deze studie zullen alle rotaties worden aangeduid met roll, pitch en yaw, omdat deze termen in de beschrijving van simulatoren worden toegepast:

roll	= rotatie t.o.v. X-as van pp
pitch	= rotatie t.o.v. Y-as van pp
yaw	= rotatie t.o.v. Z-as van pp.

Deze benadering geldt alleen als de proefpersoon geen hoofdbewegingen maakt in de simulator. Voor discrete versnellingsstimuli worden in de literatuur verschillende drempelmaten naast elkaar gebruikt: °/s² en °/s. De weergave in °/s² betreft de fysische stimulus, en de maat in °/s is meer een perceptieve drempel. Voor de maat van °/s, wordt ook een dB drempel L_t gedefinieerd:

$$L_t(\text{dB}) = 20 \log (\theta_{Lt}/\theta_{Ref})$$

Hierbij staat θ_{Lt} voor de hoeksnelheid van de drempelstimulus in °/s, en θ_{Ref} voor een referentiewaarde van 1.48 °/s. Deze drempelmaat in dB wordt toegepast in de frequentiekaracteristiek, waarin ook de frequentie op een logaritmische schaal wordt weergegeven.

Drempelwaarden voor discrete stimuli. De volgende waarden zijn ontleend aan data van Benson (1989), gebaseerd op tenminste 20 proefpersonen, met een eenmalige sinusvormige hoekversnellingsstimulus met een duur van 3.3 s. De proefpersoon werd geplaatst op een draaiend platform, in de posities: rechtop zittend (Z-as stimuli), liggend op de zij (Y-as stimuli), of liggend op de rug (X-as stimuli). De gemiddelde drempel voor de detectie van Z-as stimulering (dus hoeksnelheid om de Z-as van de proefpersoon) was 1.5 °/s. Drempels voor X- en Y-as stimulering waren respectievelijk 2.04 en 2.07 °/s, en significant hoger dan

de Z-as drempels. Voor 6 proefpersonen is het effect van een visuele stimulus bepaald: de Z-as drempel voor deze personen, die keken naar een visueel patroon gefixeerd op de draaistoel, was 8.6 dB lager dan de drempel in duisternis. Dit wordt door Benson mogelijk toegeschreven aan enige activatie van de vestibulo-oculaire reflex, die door de visuele fixatie weer onderdrukt wordt. In een apart experiment is het effect van de frequentie van de sinus-versnelling op de drempel gemeten. Voor Z-as stimuli neemt deze af met -5.9 dB/decade. Dit kan worden toegepast bij wash-out procedures: door de frequentie maar laag genoeg te maken, wordt de stimulus onderdrempelig.

Drempels bij sinusoidale oscillatie langs X en Y as op een vluchtsimulator (Hosman & Van der Vaart, 1978). Bij continue oscillatie wordt onderscheid gemaakt tussen de drempel bij langzaam toenemende ("upper") en die bij langzaam afnemende amplitude ("lower"). De "upper" drempel blijkt significant hoger te liggen.

Over het frequentiebereik van 0.127 tot 2.23 Hz nemen de drempels toe met de frequentie (waarden hier voor "upper" drempels):

$$\begin{aligned}\text{Pitch drempel (}^{\circ}\text{/s}^2\text{)} &= 10^{(-.319 + .716\log(2\pi f))} \\ \text{Roll drempel (}^{\circ}\text{/s}^2\text{)} &= 10^{(-.482 + .866\log(2\pi f))}\end{aligned}$$

Wanneer deze drempelwaarden worden omgerekend naar $^{\circ}/\text{s}$, dan is de frequentie-afhankelijkheid vergelijkbaar met die gevonden door Benson (1989): -4.9 dB/decade voor pitch en -6.9 dB/decade voor roll.

De "upper" drempelwaarden gevonden voor roll en pitch, omgerekend naar hoeksnelheid bij .32 Hz, zijn echter ongeveer een factor 3 lager dan bepaald door Benson voor discrete stimuli. Als mogelijke oorzaken voor deze verschillen kunnen worden aangegeven in de Hosman en Van der Vaart studie: de positie van de proefpersoon ten opzichte van de zwaartekrachtvector (bij Benson neutraal omdat de pp. op rug of op zijde ligt), de continuïteit van de stimulus, de aanwezigheid van visuele displays, en de afstand tussen rotatie-assen en het hoofd van de proefpersoon. Bovendien waren de proefpersonen van Hosman drie getrainde vliegers.

Drempelwaarden gemeten door De Boer (1988) in een vluchtsimulator zijn in dezelfde orde als die van Hosman en Van der Vaart (1978).

Conclusie over drempelwaarden voor hoekversnelling. Een meebewegend visueel display verlaagt de drempel; het steunen van het hoofd voor-achter en lateraal verhoogt de drempel. De drempel voor eenmalige stimuli ligt hoger dan voor continue stimuli. De meetcondities, en met name de hoofdpositionering, blijken de drempels echter te kunnen beïnvloeden.

Tabel II Drempelwaarden voor de detectie van hoekversnelling ten opzichte van de X, Y en Z-as van de pp., overeenkomend met resp. roll, pitch en yaw. De drempels worden weergegeven in de amplitude van de versnellingssinus, en zijn ontleend aan: (a) = Hosman & Van der Vaart (1978); (b) = De Boer (1988); (c) = Benson e.a. (1989).

Stimulus	f (Hz)	X (roll)	Y (pitch)	Z (yaw)	Ref
Continu					
"Boven"	.32	.74 °/s ²	.86 °/s ²		(a)
"Onder"	.32	.37 °/s ²	.39 °/s ²		(a)
Continu	.32	.80 °/s ²	.46 °/s ²		(b)
Eenmalige sin.versn.	.3	1.92 °/s ²	1.95 °/s ²	1.49 °/s ²	(c)

2.1.3 Model voor vestibulaire waarneming in een simulator

Op basis van pitch- en roll-drempelmetingen in een vluchtsimulator hebben Hosman en Van der Vaart (1978) een praktisch model opgesteld voor de bovendrempelige vestibulaire waarneming in deze vluchtsimulator. Proefpersonen waren drie ervaren verkeersvliegers in zittende positie. Een aantal vooronderstellingen zijn: frequentiebereik tussen .6 en 60 Hz, lineaire responsies van kanalen en otolieten, en het samenvoegen van de kanalen- en otolieten responsies in een enkele functie. Aldus werd de volgende transfer functie verkregen, met input hoekversnelling in pitch of roll, en output de vestibulair waargenomen versnellingsamplitude:

$$H(s) = \frac{1 + .11 s}{(1 + 5.9 s)(1 + .005 s)}$$

De tijdconstante .005 s kan voor praktische doeleinden worden verwaarloosd. In de vorige secties is aangegeven hoe de vestibulaire drempels frequentie-afhankelijk zijn; uit deze overdrachtsfunctie kunnen amplitude- en fasekarakteristiek voor bovendrempelige vestibulaire waarneming worden berekend. De perceptieve waarde van een stimulus kan hiermee worden berekend, en deze berekening kan worden toegepast bij het dimensioneren en ontwerpen van simulatoren.

2.1.4 Invloed van de versnellingsgrootte op de latentie van de waarneming

Een van de factoren die de natuurgetrouwheid van een simulator bepalen is de timing van de versnellingen: in de simulator moeten deze op dezelfde tijden in een stuurproces worden waargenomen als in werkelijkheid. Door technische beperkingen kunnen in een simulator reeds ongewenste latentietijden optreden tussen besturingshandelingen enerzijds, en versnellingen en visuele informatie anderzijds. In § 2.4.4 wordt daar nader op ingegaan.

Naast deze technische oorzaken van vertraging treedt nog een ander effect op dat samenhangt met de vestibulaire waarneming: De maximaal haalbare amplitude van de versnellingen in een simulator is vaak aanzienlijk kleiner dan de waarden in werkelijkheid. Dit levert de vraag op in hoeverre de amplitude van de versnelling een directe invloed heeft op de latentie van de waarneming. Dit geldt zowel voor lineaire versnellingen als voor hoekversnellingen.

Experimenteel is de relatie tussen amplitude en waarneming door Arrott e.a. (1990) onderzocht op een horizontale lineaire versnellingsbaan met lengte 4.7 m. Stapvormige versnellingen werden aangeboden in het amplitudebereik van .005 g tot .08 g ($1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$ = de grootte van de gravitatieversnelling). Proefpersonen moesten de richting van subjectieve versnelling aangeven met een joystick. Het tijdsverschil tussen actuele en waargenomen versnelling werd gemeten; dit is dus de volledige reactietijd op basis van perceptie en respons. Deze reactietijd T bleek omgekeerd evenredig te zijn met de versnellingsamplitude A :

$$T = B / A + T_{\min}$$

T varieerde van 0.6 tot 3 s. $T_{\min}$ staat voor een constante minimale reactietijd van ongeveer 0.5 s. De term B heeft de dimensie van snelheid en bedraagt ongeveer 0.2 m/s. Melvill Jones en Young (1978) hebben de relatie onderzocht tussen latentie en verticale versnelling. Zij vonden eenzelfde afhankelijkheid als Arrott e.a., met waarden $B = 0.022 \text{ g.s}$ (gelijk aan ongeveer 0.2 m/s) en $T_{\min} = 0.37 \text{ s}$. Zie Fig 1.

Analoog aan de waarneming van lineaire versnellingen geldt een vergelijkbare relatie tussen de amplitude van hoekversnellingen en de reactietijd: over een groot bereik van korte acceleratie stimuli geldt dat het produkt van hoekversnelling en reactietijd constant is: ongeveer 1.5-2.0 °/s. Dit wordt aangeduid als het Mulder produkt (Mulder, 1908; Melvill Jones & Young, 1978).

Voor de praktijk van een simulator betekent deze produktwet voor amplitude en perceptieve latentie dat, in geval van amplitudereductie, het verlaagde versnellingsniveau vervroegd zou moeten worden aangeboden. Alleen dan zal het tijdstip van gewaarwording overeenkomen met de nagebootste werkelijkheid. De vereiste nauwkeurige timing van versnellingen wordt wellicht mogelijk door technische verbeteringen. Bose e.a. (1981) beschrijven een hydraulisch aandrijfsysteem voor een F-15 simulator met een stijgtijd van minder dan 15 ms (van 10 naar 90% van eindamplitude).

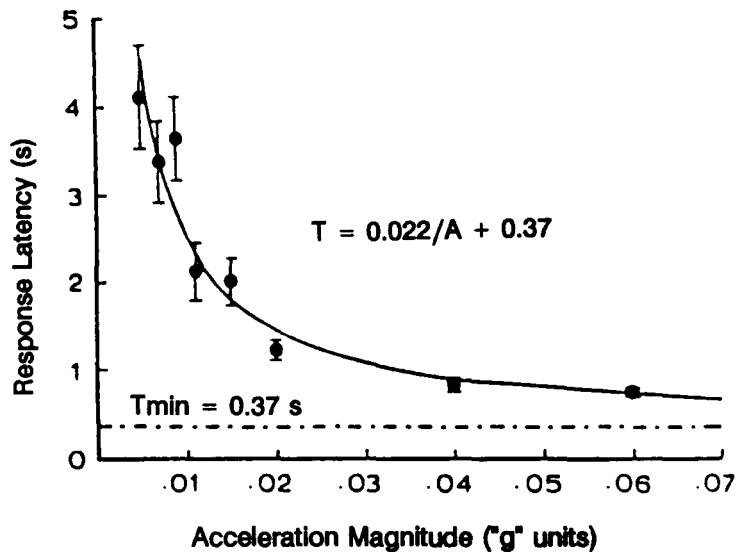


Fig. 1 Relatie tussen respons latentie en amplitude van de versnelling. De continue curve geeft een hyperbolische regressie aan. T staat voor totale latentie, A staat voor versnellingsgrootte uitgedrukt in de g eenheid, en Tmin staat voor de berekende asymptoot met de betekenis van een minimale reactietijd.

2.2 Simulatie van beweging in fixed-base opstellingen

In fixed-base simulatoren wordt beweging gesimuleerd door beeldprojectie, eventueel aangevuld met proprioceptieve cues zoals de G-seat. De kenmerken van deze vectie zullen in deze sectie worden samengevat, zodat kan worden aangegeven welke bewegingssensaties wel en welke niet met een fixed-base simulator kunnen worden aangeboden. In § 2.3 zal dan besproken worden hoe deze vectie door toevoeging van vestibulaire cues beïnvloed wordt.

2.2.1 Visueel geïnduceerde bewegingssensatie

Vectie. Bewegende visuele velden kunnen een sensatie van zelfbeweging induceren die vectie wordt genoemd. De effectiviteit van de visuele stimulus voor het induceren van vectie wordt onder meer bepaald door de hoeksnelheid, spatiële frequentie en contrast. Het kan 10 tot 30 s duren voordat deze vectie tot maximale intensiteit is aangegroeid; eenmaal opgewekt kan deze vectie continu aanhouden bij constant bewegend visueel veld.

Kenmerken van vectie. Young (1979) geeft een overzicht van karakteristieken van vectie:

- 1 Het perifere gezichtsveld moet worden gestimuleerd.
- 2 Achtergrond stimulatie domineert over voorgrond stimulatie.
- 3 De spatiële frequentie van de visuele stimulatie is belangrijker dan inhoud of kleur.

- 4 De grootte van de vectie is ongeveer evenredig met de snelheid van het visuele veld, tot aan een saturatieniveau van ongeveer 60 °/s voor rotatie en 1 m/s voor lineaire snelheid. Door een visueel veld dat roteert in pitch en roll kan bovendien een sensatie van statische tilt in pitch en roll worden opgewekt ter grootte van 15 tot 60°.
- 5 De latentietijd tussen visuele stimulus en vectie is kleiner naarmate de snelheid van het visuele veld geringer is.
- 6 Vectie geeft geen versnellingsensatie.
- 7 De frequentierespons van vectie loopt ongeveer vlak tot .1 Hz, en neemt dan snel af.
- 8 Vectie vertoont asymmetrieën: snelheidsopbouw vanuit stilstand heeft grotere latentie dan stoppen; achterwaartse vectie treedt sneller op dan voorwaartse vectie.

Voor praktische toepassing in simulatoren kan met een beeldsysteem dus geen sensatie van snelheidsveranderingen boven de .1 Hz gegenereerd worden; vectie is niet geschikt voor nauwkeurig timing van onset cues.

2.2.2 Somatosensorische informatie: toepassing van een G-seat voor het genereren van tonische versnellingsinformatie

Werking van een G-seat. In vliegtuig- en helikoptersimulatoren is simulatie van beweging in de "heave" richting (= normaalrichting van het vliegtuig) moeilijk te realiseren: een veranderende specifieke kracht G in de z -richting van de vlieger (= G_z) kan in werkelijkheid langdurig aanhouden, terwijl de simulator slechts een kortdurende onset cue kan geven. Met name helikopters kunnen langdurige verticale manoeuvres uitvoeren, waarbij juist de tonische informatie van de specifieke kracht essentiële informatie levert. Een G-seat levert de heave bewegingssensatie via het somatosensorische systeem (White, 1989). Bij hogere G_z worden door het contact met de stoel, en de positie op de stoel, de volgende stimuli aangeboden:

- 1 Het lichaam zakt dieper in de stoel, contact met de schouderriemen wordt minder;
- 2 De stoel voelt harder aan;
- 3 De hoeken in de grote gewrichten veranderen;
- 4 De oogpositie verandert als het lichaam naar beneden zakt.

Bovendien kunnen trillingen worden toegevoegd die in amplitude en frequentie overeenkomen met de trillingen in vliegtuig of helikopter.

Toepassing in een simulator. De G-seat is door White (1989) geëvalueerd in een helikoptersimulator. Gebleken is dat vliegers een simulatortraining in manoeuvreertaken als zeer realistisch beschreven, en dat prestaties in verticaal manoeuvreren aanzienlijk verbeterden door de activering van de G-seat. Zelfs "hover" (= op constante hoogte blijven hangen) kon zo worden getraind.

Ricard en Parrish (1984) hebben in een simulator de effecten van een G-seat bepaald op de taak van helikopter "hover" nabij een schip. De G-seat bestond uit opblaasbare kussens waarmee pitch, roll en heave sensaties kunnen worden gegenereerd. Twaalf ervaren vliegers werden getest in een binnen-proefpersoon ontwerp van condities: met/zonder moving-base, met/zonder G seat, delays in

het visuele display van 66 of 128 ms, met/zonder beweging van het schip. Prestatie, uitgedrukt in Vector Error Score bij 66 ms delay, was bij fixed-base 4.8, bij G seat 4.5 en bij moving-base 3.6. In vergelijking met fixed-base gaf de G seat een verbetering voor de betreffende stuurtaak, echter niet zo goed als de moving-base (zie ook § 3.4.1).

Bose e.a. (1981) beschrijven een G-seat voor een F-15 simulator die niet alleen met pneumatische kussens is uitgerust, maar tevens met hydraulische sturing van stoel, rugsteun, riemen en helm-belaster (vergroot gewicht van de helm). Het hydraulische systeem verzorgt de snelle onset versnellingscues, en de pneumatische kussens genereren de continue cues. Zowel de pneumatisch als de hydraulisch gestuurde verplaatsingen zijn in de orde van slechts 2.5 cm. Evaluatie werd uitgevoerd door ervaren F-15 vliegers. Belangrijkste extra voordelen van het hydraulische systeem zijn: nauwkeurige timing van onsets, en toevoeging van vestibulaire cues in pitch en roll. De helm-belaster geeft de beste informatie over de +Gz belasting.

G-suit. De "G-suit" dient onderscheiden te worden van de G-seat. De G-suit dient om bloed-pooling te voorkomen in de benen bij hoge Gz belasting. Het opblazen van een G-suit is in de simulator niet nodig om cardiovasculaire ondersteuning te bieden; het levert bij de simulatie van hoge G bochten echter een zeer krachtige sensatie die een ervaren vlieger associeert met de werkelijkheid (Rolfe & Staples, 1986).

Het praktisch belang van G-seat en G-suit in vluchtsimulators is de mogelijkheid om zowel tonische versnellingsinformatie als onset cues aan te bieden.

2.2.3 Een stuursysteem met gevoel

De basisgedachte bij "stuursystemen met gevoel" is dat de haptische waarneming een extra ondersteuning kan bieden aan de vestibulaire waarneming. Zo kan een vlieger aan een mechanisch gekoppelde (dus niet "fly-by-wire") stuurknuppel voelen hoe hoog de luchtweerstand is op de roeren, en daaruit dus indirect informatie afleiden over zijn snelheid ten opzichte van de lucht. Voordeel van deze informatie is onder meer dat het visuele en auditieve systeem voor andere doeleinden kunnen worden gebruikt.

Recent is een modelstudie verricht naar de rol van deze informatie "feel-systems" bij het besturen van vliegtuigen (Hess, 1990). Het model omvat onder meer de feedback van de stuurstick (kracht en/of positie dynamica) en vestibulaire bewegingsfeedback. Dit model blijkt de vliegtuigbesturing goed te benaderen. Wanneer de stuursystemen in werkelijkheid via terugkoppeling informatie geven over het vliegtuig/voertuig, dan zal dit systeem in de simulator hetzelfde "gevoel" moeten geven. De bedieningskrachten moeten dus overeenkomen met de werkelijkheid. Voor ervaren bestuurders zal dit kunnen bijdragen tot de waarneming van snelheid. In simulators zouden juist deze cues kunnen worden ingebouwd zonder hoge extra kosten.

Voor bewegingssimulatie in fixed-base kan worden geconcludeerd:

Door middel van visuele stimulatie kan geen snelle onset van vectie worden gegenereerd. G-seat, G-suit, en "stuursystemen met gevoel" kunnen dit gemis slechts gedeeltelijk aanvullen, en dan nog alleen voor simulatie van die vliegtuigen en voertuigen, waarin deze cues ook in werkelijkheid voorkomen.

2.3 Mogelijkheden van toegevoegde vestibulaire cues

Toevoeging van versnellingen biedt de mogelijkheid om snelle onset cues te genereren. Door combinatie van visuele en vestibulaire stimulatie kan gebruik worden gemaakt van visueel-vestibulaire interacties.

2.3.1 Visueel-vestibulaire interactie

Bij combinatie van een beeldsysteem en een moving-base in een simulator treden visueel-vestibulaire interacties op (Young, 1979). In het algemeen kan worden gesteld dat visuele cues domineren bij lage frequenties (tot .1 Hz), en vestibulaire cues overheersen bij hogere frequenties.

In een simulator kunnen de volgende interacties optreden:

- 1 Otolietinformatie over de zwaartekrachtrichting beperkt de visueel geïnduceerde pitch- en rollhoek. Wanneer aan een proefpersoon op een fixed-base een roterend visueel beeld wordt aangeboden, zal de sensatie van zelf-rotatie worden beperkt, doordat de otolieten de informatie geven dat de oriëntatie ten opzichte van de zwaartekracht niet verandert.
- 2 Vestibulaire en visuele cues kunnen in combinatie worden toegepast om de sensatie van yaw hoeksnelheid te genereren. Een vestibulaire onset cue kan een initiële versnellingssensatie geven. Wanneer het visuele beeld blijft draaien met constante snelheid ten opzichte van de simulator, kan zo een sensatie van continue hoeksnelheid worden opgewekt.
- 3 Circulaire vectie maskeert acceleratie in tegenovergestelde richting. In een draaistoel/draaitrommel combinatie is gemeten dat constante circulaire vectie (visuele stimulus-snelheid $40^\circ/\text{s}$) pas kon worden onderdrukt door een tegengesteld gerichte hoekversnelling van $27^\circ/\text{s}^2$ (Probst e.a., 1985). Kleinere versnellingen werden niet waargenomen of leidden slechts tot een afname van circulaire vectie. Zowel detectietijd als drempelwaarde voor versnelling kunnen zo worden verhoogd. Dit betekent dat, door combinatie met de juiste visuele stimulatie, snellere wash-out bewegingen kunnen worden toegepast zonder valse bewegingscues te leveren.
- 4 Vestibulaire cues die in overeenstemming zijn met de visuele stimulatie, kunnen de latentie van vectie verkorten. Voor dit effect heeft de bewegingscue slechts van beperkte amplitude te zijn.

2.3.2 Het effect van werkbelasting en visuele displays op de detectiedrempel van versnellingen

Werkbelasting. Het is van praktisch belang om na te gaan of de drempels die in het laboratorium gemeten zijn, ook gelden in de praktijk. Zo zal een vlieger zijn aandacht niet primair richten op zijn bewegingsperceptie, maar op de vliegtaak als geheel. Het effect van belasting op vestibulaire drempels is door Hosman en Van der Vaart (1978) bepaald bij 3 ervaren verkeersvliegers in een vlucht-simulator. Mentale belasting werd aangeboden door een vliegtuig-stuurtaak, of door een auditieve binaire-keuze taak. Voor de versnelling blijkt de drempeltoename op te kunnen lopen met ongeveer 25, 50 en 100% voor respectievelijk de X, Y en Z richting. De maximale drempeltoenames voor pitch- en roll-versnelling zijn 40 en 80%. Deze percentages geven aan in welke mate de wash-out sterker kan zijn zonder dat je het merkt.

Visuele informatie. Voor een beschrijving van de essentiële functies die een beeldsysteem vervult in een (vliegtuig)simulator, wordt verwezen naar het betreffende hoofdstuk in Rolfe en Staples (1986). Hier zal het effect van een visueel display op de vestibulaire drempels worden aangegeven.

Benson e.a. (1989) hebben aangetoond dat een meebewegend visueel display (dus stationair ten opzichte van de waarnemer) de drempelwaarden voor hoekversnelling significant verlaagt, in vergelijking met drempelwaarden in duisternis. Dit effect ontstaat mogelijk doordat afferente signalen uit de kanalen invloed uitoefenen op de visuele centra die de stabiliteit van de visuele wereld regelen.

Benson en Brown (1989) hebben daarentegen geen effect gevonden van visuele informatie op de drempels voor discrete lineaire versnellingen; tevens werd door de proefpersoon hierbij geen schijnbare beweging gemeld van het meebewegende visuele display.

2.3.3 Modelvorming van visueel-vestibulaire interacties

In deze sectie worden enkele modellen besproken die de in de vorige secties besproken visueel-vestibulaire interacties beogen kwantitatief weer te geven.

In het **conflict model** (Young, 1979) berekent een "intern model" van de halfcirkelvormige kanalen de draaisensatie die zou worden gegenereerd als de visuele bewegingsinformatie het gevolg was van beweging van de waarnemer. Deze sensatie wordt vergeleken met de vestibulair waargenomen draaisensatie. Bij consistente informatie worden zowel de visuele als vestibulaire inputs benut; bij een conflict wordt een afweging gemaakt.

In het **optimale schattingsmodel** (Borah e.a., 1988) wordt het centrale zenuwstelsel gezien als een processor die een optimale schatting tracht te maken van de positie en beweging. Hiertoe maakt deze processor gebruik van voorkennis over de statistiek van de inputsignalen, en over dynamische responsies van de sensoren waartoe ook de proprioceptoren behoren (1988). Volgens het **Wertheim model** bestaan er twee perceptieve systemen: het ene verzorgt de waarneming van zelfbeweging, en het andere verzorgt de waarneming van beweging van de visuele wereld. Beide systemen gebruiken als input zowel vestibulaire als retinale (optische stroomvelden) informatie, maar de twee

systemen gebruiken die input op verschillende manieren. Bovendien vormt de perceptie van zelfbeweging ook nog een deel van de input voor de objectbewegingsperceptie. Die beïnvloeding vindt in omgekeerde richting echter niet plaats (Wertheim, 1990).

Kwantitatieve modellen van visueel-vestibulair-proprioceptieve interacties lijken te kunnen worden toegepast om realistische bewegingsperceptie te genereren bij beperkte bewegingsmogelijkheden. De modelvorming is theoretisch ver ontwikkeld; kennis ontbreekt echter nog over de concrete toepassingen van deze theoretische modellen in simulatoren. De modellen geven nog geen concreet antwoord op de vraag wat je wint met een moving-base simulator.

2.4 Mogelijkheden en grenzen van moving-base simulatoren

Een moving-base simulator beweegt in een beperkte ruimte, zodat technieken als tilting en wash-out vereist zijn. Een afweging zal moeten worden gemaakt tussen de voordelen van toegevoegde bewegingscues, en de nadelen van "valse" cues die kunnen ontstaan door onvolledige wash-out of onjuiste timing.

2.4.1 Bewegingsamplitude

Het bewegingssysteem van een simulator bestaat uit:

- programmatuur voor de generatie van bewegingscues;
- programmatuur voor het aansturen van de aandrijfsystemen;
- de aandrijfsystemen.

De taak van de bewegingscue-programmatuur is het transformeren van de werkelijke bewegingen naar het bereik van de simulator. De technieken zijn onder meer verzwakking en hoogdoorlaat-filtering (Mooij, 1988).

Een juiste en natuurgetrouwe timing van de onset van een beweging is van belang om directe mechanische bewegingsinformatie of feedback te kunnen geven. Aan overeenkomst met de werkelijkheid van de amplitude behoeven minder stringente eisen gesteld te worden, hetgeen inhoudt dat kan worden volstaan met een snelle verzadiging of een beperkte amplitudereproductie (gain) van de verschillende bewegingen. Bij een amplitudereproductie van 100% volgt het platform een beweging die identiek is aan de beweging in werkelijkheid. Tiesler (1973, geciteerd in Blaauw, 1979) geeft aan dat een amplitudereproductie van 25% voldoende is om de visueel waargenomen beweging te ondersteunen. Haug e.a. (1990) onderzocht de benodigde gain- en verzadigingskarakteristieken bij verschillende wegvoertuigmanoeuvres. Hij komt, afhankelijk van de manoeuvre, zelfs tot amplitudereproducties lager dan 25%.

Een uniforme methode om de bewegingskarakteristieken van een simulator te beschrijven en te meten, wordt gegeven in AGARD rapport 144 (1979). Deze karakteristieken omvatten onder meer de grootte van de bewegingscues, die nog nauwkeurig kunnen worden gegenereerd, en de dynamische drempel. Deze drempel is het tijdsinterval tussen versnellingsopdracht en het bereiken van 63% van de amplitude. De belangrijkste tijdswinst in dynamische drempel kan worden

bereikt door de "update" frequentie van de computer te verhogen. Een verhoging van deze frequentie van 15 naar 30 Hz resulteert in een totale tijdswinst van 50 ms, omdat zowel de bemonsteringstijd als de rekentijd worden verkort (AGARD, 1980).

De transformatie van werkelijkheid naar simulator omvat in het algemeen naast verzwakking een hoog-doorlaatfilter van orde 2 of hoger. Praktische waarden voor de afsnijfrequentie van dit filter liggen in het bereik van .08 tot 1.6 Hz voor verticale versnelling in een vliegtuigsimulator. Inherent aan deze filtering is echter een faseverdraaiing, vooral in de omgeving van de afsnijfrequentie (AGARD, 1980).

2.4.2 Tilting

De techniek van tilting is gebaseerd op de eigenschap van de otolieten: deze zijn gevoelig voor de specifieke kracht G , gedefinieerd als de resultante van zwaartekracht en inertiaal reactiekracht, en uitgedrukt in m/s^2 . G wordt ook uitgedrukt in de eenheid "g", ter grootte van de zwaartekrachtversnelling op aarde ($1 g = 9.8 m/s^2$). Een versnelling voorwaarts of zijwaarts kan daarom worden nagebootst door met onderdrempelige hoeksnelheid te kantelen in pitch of roll-as, waardoor de zwaartekracht een component langs de x- of y-as van de proefpersoon gaat leveren. De resulterende illusie van een continue versnelling is overtuigend indien de tilt hoek en de tilt snelheid om deze te bereiken niet hoger zijn dan respectievelijk 23 en 3 °/s. Deze waarden worden door Haug e.a. (1990) gemeld in een beschrijving van een rijsimulator.

2.4.3 Wash-out

Het principe van wash-out is om na simuleren van een bovendrempelige versnelling, deze via onderdrempelige terugplaatsing naar neutrale positie ongedaan te maken. Zo kunnen binnen de fysische begrenzingen van een simulator grote verplaatsingen worden nagebootst. De benodigde algoritmen worden wel aangeduid met "limit logic". In § 2.1.2 is aangegeven dat de drempel voor discrete hoekversnellingsstimuli afhankelijk is van de frequentie: voor yaw stimuli neemt deze af met 5.9 dB/decade als functie van frequentie over het bereik van .05 tot 1 Hz. Door de hoeksnelheid maar langzaam genoeg te veranderen, kan de hoekversnelling dus onderdrempelig worden toegepast.

Bij de weergave van hoekversnellingen in roll moet worden voorkomen dat valse sensaties van laterale versnelling worden opgewekt. Bovendien mag de afsnijfrequentie van de filtering niet hoger zijn dan .7 rad/s, opdat geen faseverschillen gaan optreden ten opzichte van de visuele cues (AGARD, 1980). Een model voor gecoördineerde wash-out in laterale versnelling ("sway") en roll hoekversnelling wordt gegeven door Rolfe en Staples (1986), voor een vliegtuigsimulator. Wash-out kan niet altijd onderdrempelig geschieden. Wanneer bijvoorbeeld in een simulator met beperkte lineaire laterale bewegingsmogelijkheden een pilon circuit met hoge snelheid bereden wordt, moet het platform snel alternerend worden bewogen. Ook wanneer er echter sprake is van sterk fluctuerende dynamische bewegingen en van combinaties van bewegingen (b.v. bij het rijden op een bochtencircuit) zullen de bewegingsmogelijkheden van een

platform door mechanische beperkingen snel uitgeput zijn. Het systeem krijgt in dat geval niet genoeg tijd om onderdrempelig in de richting van de neutrale positie terug te keren.

2.4.4 Delay

Fase-achterstand treedt op door filtering van de werkelijke bewegingen, de reeds genoemde rekentijd van de computer, en bovendien door de dynamische achterstand van de mechanische bewegingsgeneratoren. De vertragingstijden voor de bewegings-onset cues worden bepaald door de technische uitvoering van de simulator. Baarspul (1989) geeft voor de vliegtuigsimulator van de TU Delft tijden op in de orde van 80 ms.

Het effect van vertragingstijden is door Haug e.a. (1990) onderzocht in modellen van een rijsimulator. Frequentie-analyse werd uitgevoerd met verschillende vertragingstijden in het beeldsysteem. De stabiliteit wordt hierbij uitgedrukt in de fasemarge; dit is het faseverschil met -180° in het fasediagram, bij die frequentie waarbij de versterking 1 bedraagt. Kleinere fasemarge betekent meer instabiliteit in het closed-loop regelsysteem, dus meer neiging tot oscillaties (Di Stefano e.a., 1967). Een toenemende tijdvertraging leidt tot meer instabiliteit, en vertragingen in het bewegingssysteem zijn kritischer dan in het beeldsysteem. De timing van vestibulaire en proprioceptieve cues voor het waarnemen van zelfbeweging moet dus nauwkeuriger zijn dan de timing van de vectie-cues. Als algemene indicatie stellen Haug e.a. dat een delay vanaf 50 ms in de moving-base de prestatie van rijsimulator-bestuurders nadelig beïnvloedt.

Om deze "lag" te compenseren wordt een "lead" (fasevoorsprong) term toegevoegd zowel aan het positie signaal dat de hydraulische systemen stuurt, als aan de visuele feedback loop. Men maakt dan als het ware gebruik van een extrapolatie van de momentane bewegingsvector om de komende positie van het platform te voorspellen. Met behulp van deze "lead compensation" is het mogelijk een stabiele regeling te verkrijgen in een rijsimulator (Haug e.a., 1990).

2.4.5 Aantal vrijheidsgraden

Operationele bewegingsplatformen verschillen onderling niet alleen met betrekking tot maximale versnellingen, snelheden, uitslagen en delays maar ook in aantal graden van vrijheid. Bij een moving-base met drie rotatie-vrijheidsgraden, zonder transversale beweging van het platform, wordt rond één centraal punt bewogen. Op dit punt kruisen de drie rotatie-assen elkaar. Normaliter lopen deze assen door een gebied rond het zwaartepunt van het voertuig. Daarom moet het draaipunt in een simulator zich ten opzichte van de bestuurder bij voorkeur bevinden op de positie waar in werkelijkheid het zwaartepunt zit. Wanneer de rotatie-assen in de simulator en in het werkelijke voertuig niet samenvallen geeft dit een verkeerde indruk van de rotatie-bewegingen die het voertuig maakt. Wanneer de bestuurder in het werkelijke voertuig ver van het zwaartepunt af zit, zoals bij tanks en lange vrachtwagens, is deze eis moeilijk te handhaven. Bij personenwagens zal de bestuurder zich dicht bij het zwaartepunt van het voertuig bevinden en zijn bij gebruik van een moving-base met drie rotatie-vrijheden weinig problemen te verwachten.

Blaauw (1979) geeft een inventarisatie van een 23-tal, voornamelijk research rijsimulatoren. Slechts 8 van deze simulatoren beschikken over een beperkt bewegingsplatform, terwijl 1 simulator gebruik maakt van een rollenbank. De rol-beweging wordt het meest frequent gesimuleerd, gevolgd door de domp- en de gier-beweging. Lineaire versnellingen worden, met uitzondering van twee simulatoren, gerealiseerd door tilting.

Recentere research rijsimulatoren (o.a. Drosdol & Panik, 1985; Haug e.a., 1990) en trainings-rijsimulatoren (o.a. Padmos, 1989) maken gebruik van een op tenminste zes actuatoren bevestigd bewegingsplatform met zes graden van vrijheid, mogelijk nog uitgebreid met een transversaal railsysteem. Met een dergelijk systeem kunnen lineaire versnellingen beter worden nagebootst. Wanneer deze versnellingen langdurig zijn kunnen ze geleidelijk door tilting worden overgenomen. De mogelijkheden om rotatie-assen correct ten opzichte van de bestuurder te positioneren worden bij een systeem met zes graden van vrijheid vergroot.

2.5 Indicaties voor moving-base toepassing

De mogelijkheden van een fixed-base en een moving-base opstelling zijn besproken. In deze sectie wordt nagegaan of de bestudeerde literatuur antwoord geeft op de vraag, welk type simulatoren gediend is met een moving-base.

Om de vraag naar doelmatigheid van een moving-base te onderzoeken, moet binnen eenzelfde simulator een experimenteel ontwerp worden uitgevoerd, gericht op de vergelijking fixed-base vs. moving-base. In de literatuur zijn slechts weinig studies gevonden die hieraan voldoen. In de reeds genoemde studie van Ricard en Parrish (1984) is aangetoond voor een helikoptersimulator dat een moving-base leidt tot geringere fout in de "hover" stuurtaak, in vergelijking met de fixed-base.

Van der Vaart en Hosman (1987) hebben in een vluchtsimulator gemeten wat het effect is van roll-beweging van de cockpit op twee typen stuurtaken (verstoringstaak en volgtaak), in vergelijking met een niet-bewegend platform. Bij een verstoringstaak is alleen het uitgangssignaal zichtbaar op een display. Voorbeeld is het stabiel houden van een vliegtuig bij atmosferische turbulentie. Bij een volgtaak is de fout tussen uitgang en referentiesignaal zichtbaar. Het effect van toegevoegde beweging op de stuurtaak wordt uitgedrukt in de "gain cross-over" frequentie en de fasemarge. De gain cross-over frequentie is de frequentie waarbij de modulus 1 bedraagt; een hoge waarde betekent in het algemeen een snelle regeling. Zoals gemeld in § 2.4.4 betekent een hoge waarde van de fasemarge een hoge stabiliteit in closed-loop regeling. De resultaten in Tabel III geven aan dat het effect van de toegevoegde beweging afhankelijk is van de taak: de regeling bij de verstoringstaak verloopt sneller, en de regeling bij de volgtaak wordt stabiel.

Tabel III Het effect van toegevoegde cockpitbeweging op twee closed-loop regeltaken in een vluchtsimulator (Van der Vaart & Hosman, 1987).

Taak	Effect van toegevoegde beweging	
	Cross-over frequentie ("snelheid")	Fasemarge ("stabiliteit")
Verstoringstaak	toegenomen	niet veranderd
Volgtaak	niet veranderd	toegenomen

Deze effecten konden kwantitatief met het volgende model voor vestibulaire waarneming van hoekversnelling beschreven worden. In dit model zijn de eigenschappen van de halfcirkelvormige kanalen verwerkt (K = constante):

$$H_{\text{vest}}(s) = K \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} e^{-T_d s}$$

Hierin zijn de volgende tijdconstanten van belang:

$$\begin{aligned} T_1 &= \text{differentiatie ("lead") tijdconstante} &= 0.1 \text{ s} ; \\ T_2 &= \text{integratie ("lag") tijdconstante} &= 6 \text{ s} ; \\ T_d &= \text{totale vertragingstijd} &= 0.18 \text{ s} . \end{aligned}$$

Dit model is een uitbreiding van de transferfunctie in § 2.1.3 met een vertragingsterm.

Op grond van deze literatuurgegevens luidt het antwoord op de vraag of toegevoegde beweging doelmatig voor een simulator is, dat toevoeging van een moving base in ieder geval geen negatief effect heeft voor zover het de taakprestatie betreft en dat een positief effect afhankelijk is van de taak. De vestibulaire overdrachtsfunctie biedt een kwantitatief model voor bovendrempelige waarneming van roll-versnelling in een vluchtsimulator. Overigens is het enige criterium of de leeroverdracht in de simulator op zijn minst zo effectief is als die in werkelijkheid (zie Hoofdstuk 3).

2.6 Leemten in kennis en aanbevelingen

2.6.1 Ontbrekende kennis

In deze literatuurstudie is de indruk ontstaan dat gegevens over vestibulaire drempels en waarneming slechts beschikbaar zijn voor specifieke laboratorium-opstellingen. Een algemeen toepasbaar 3-dimensionaal model van het vestibulair systeem ontbreekt.

Met betrekking tot timing van de mechanische onset cues bestaat laboratorium-kennis over de perceptieve latentie van stapvormige versnellingen, in de vorm

van het constante produkt van amplitude en latentie. Praktijkonderzoek moet echter nog uitwijzen of toepassing van deze kennis daadwerkelijk leidt tot verbetering van de bewegings-stimuli in simulatoren.

Over de amplitude-reproductie kan worden geconcludeerd dat een pure lineaire verzwakking ertoe leidt dat essentiële bewegingscomponenten tot onder de vestibulaire drempels verzwakt worden, en dus geheel worden gemist. Zowel theoretisch als experimenteel zullen dus niet-lineaire verzwakkingscurven moeten worden opgesteld, die deze ongewenste nevenwerking voorkomen.

Een praktische vraag blijft op basis van de literatuur nog slechts ten dele beantwoord: Voor welke taak in welk type simulator is een moving-base doelmatig? Weinig experimenteel onderzoek is tot nu toe specifiek gericht op het effect van toegevoegde beweging in een simulator.

2.6.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het opstellen van een 3-dimensionaal model voor het vestibulaire systeem zou een wezenlijke vooruitgang betekenen.

Veelbelovend lijkt voorts de toepassing van somatosensorische cues in een vliegtuigsimulator d.m.v. G-seat, G-suit en "stuursystemen met gevoel". Belangrijk voordeel van dit soort cues is de nauwkeurige timing waarmee ze kunnen worden toegediend. Voor deze stimuli geldt immers niet de inherente massa-traagheid van moving-base bewegingssystemen, of de rekentijd die nodig is om een visueel beeld steeds opnieuw te berekenen.

Het theoretische model van de optimale schatter lijkt de menselijke perceptie het meest te benaderen, met betrekking tot de weging en interacties van vestibulaire, visuele en somatosensorische informatie. Een volgende stap zou kunnen zijn een integratie van dit model van de waarneming (Borah e.a., 1988) met een model van de menselijke besturing (McRuer & Jex, 1967; Hess, 1990).

Om een simulator te verbeteren met deze theoretische modelkennis zou de software die de bewegingscues genereert flexibel en toegankelijk moeten zijn. Deze benadering is reeds aangegeven door Bose e.a. (1981). Het totale mathematische model moet door de regelaar afgestemd kunnen worden. Experts kunnen deze fijnregeling van beweging, visuele en tactiele cues dan uitvoeren; bovendien is afstemming door de individuele regelaar ook nog mogelijk.

3 TRAININGSEFFECTIVITEIT

3.1 Inleiding

De effectiviteit van rij-, vlieg-, en vaaropleidingen waarin simulatoren gebruikt worden, hangt in belangrijke mate af van twee factoren: de (functionele) validiteit van het leerhulpmiddel en de kwaliteit van de gehanteerde trainings-procedures.

Uitgaande van het observeerbare menselijke gedrag kan validiteit gedefinieerd worden als de mate waarin een leermiddel hetzelfde gedrag uitlokt als onder

gelijksoortige condities in werkelijkheid (Korteling & Padmos, 1989). Dit wordt ook wel de gedragsovereenkomst of functionele overeenkomst genoemd (Moraal & Poll, 1979; Moraal, 1981, 1988). De overeenkomst kan absoluut zijn: in maat en getal wordt hetzelfde gevonden, dan wel relatief: overeenkomstige effecten in meer kwalitatieve zin.

Functionele overeenkomst moet onderscheiden worden van fysische overeenkomst. Voor de bepaling van de fysische overeenkomst wordt meer naar het systeem op zich gekeken en tellen zaken als uiterlijke gelijkenis, open-loop systeemgedrag etc. De fysische overeenkomst wordt meestal gevat onder de term fidelity (AGARD, 1980; Flexman & Stark, 1987; Hays & Singer, 1988) of natuurgetrouwheid. Wordt alleen gekeken naar wat gebruikers van een systeem vinden, dan spreekt men van face validity of geloofwaardigheid.

De trainingsprocedures hebben betrekking op de leertechnische aspecten van de opleiding. Hieronder vallen de vorm en inhoud van instructies en oefeningen en de wijze waarop tekorten in de prestatie worden teruggekoppeld.

In dit hoofdstuk zullen we ons beperken tot de mogelijke invloed van moving-base systemen op de validiteit en effectiviteit van trainingssimulatoren.

De functionele validiteit en de trainingseffectiviteit van een simulator kunnen per deeltaak sterk verschillend zijn. Taken die vooral te maken hebben met de (kunstmatige) bedieningsomgeving (cockpit, bestuurderscabine) of meer cognitieve deeltaken waarbij procedures geleerd moeten worden, zijn in principe niet moeilijk na te bootsen (Boer, 1991). Hierbij speelt mechanische beweging doorgaans ook geen rol van betekenis en is een moving-base systeem dan ook meestal niet nodig. Bij perceptief-motorische taakonderdelen (vaak in samenspel met de natuurlijke omgeving) speelt mechanische beweging doorgaans wel een opvallende rol. Verwacht mag dan ook worden dat afwezigheid van mechanische bewegingsinformatie vooral van invloed zal zijn op de training van dit soort deeltaken.

3.2 Maten voor validiteit en trainingseffectiviteit

Om een empirisch antwoord te geven op de vraag in hoeverre het bestaan van verschillen tussen een leermiddel (afwezigheid van de afzonderlijke deelsystemen of cues) en de werkelijkheid ten koste gaat van de validiteit en de trainingseffectiviteit kunnen verschillende onderzoeksparadigma's worden gehanteerd. Meest direct is een vergelijking van de prestaties van een groep leerlingen die gedurende zekere tijd op de simulator is getraind en vervolgens heeft doorgeleerd tot een zeker prestatie-niveau op het werkelijke systeem is bereikt, en de prestaties van een groep leerlingen die uitsluitend op het werkelijke systeem tot hetzelfde prestatie niveau is getraind. Hiervoor zijn twee maten in gebruik: het Percentage Leeroverdracht en de Trainingseffectiviteitsratio (TER).

Het **percentage leeroverdracht** (%L, of transferpercentage; o.a. Roscoe, 1971; Roscoe & Williges, 1980; Taylor, 1985) wordt bepaald door de prestatie van een experimentele en een controle groep te vergelijken volgens:

$$\%L = \frac{T_c - T_e}{T_c} \cdot 100\%$$

- Waarin: %L percentage leeroverdracht;
 T_c de benodigde trainingstijd op het werkelijke systeem, van de controle groep;
 T_e idem, voor de in eerste instantie op het leermiddel getrainde experimentele groep.

Wanneer in het gunstigste geval de experimentele groep geen aanvullende training op het operationele systeem nodig heeft is het %L gelijk aan 100%. In het meest ongunstige geval kan het %L negatief worden, bijvoorbeeld wanneer na de simulatortraining meer uren nodig zijn op het operationele systeem dan zonder voorafgaande simulatortraining. Berekening van het %L is vooral zinvol als de kosten van vervangende training ten opzichte van operationele training laag zijn en er veel trainingstijd beschikbaar is. Bij de berekening wordt namelijk geen rekening gehouden met de hoeveelheid oefening op het vervangende leermiddel.

Bij berekening van de **Trainings Efficiëntie Ratio**¹ (o.a. Roscoe, 1971; Povenmire & Roscoe, 1973; Roscoe & Williges, 1980; Rolfe & Staples, 1986; Taylor, 1985; Hays & Singer, 1988) wordt wel rekening gehouden met de benodigde hoeveelheid oefening op het leermiddel. De formule voor deze maat is als volgt:

$$TER = \frac{T_c - T_e}{T_s}$$

- Waarin: TER trainings efficiëntie ratio;
 T_c de benodigde hoeveelheid training op het werkelijke systeem van de controle groep;
 T_e idem, voor de in eerste instantie op het leermiddel getrainde experimentele groep;
 T_s trainingstijd op de simulator voor de experimentele groep.

Wanneer de hoeveelheid training die bespaard is op het werkelijke systeem ($T_c - T_e$) gelijk is aan de hoeveelheid training op het vervangende leermiddel (T_s) is de TER gelijk aan 1.0. Een TER groter dan 1.0 betekent dat de hoeveelheid bespaarde training op het werkelijke systeem groter is dan de hoeveelheid

¹ De tevens door Roscoe voorgestelde maten CTER, ITER, CTEF, en ITEF zijn respectievelijk de Cumulatieve en Incremental Transfer Efficiency Ratio of Function. Deze zijn vergelijkbaar met de TER, maar worden in de literatuur minder frequent gebruikt. CTER/F, ook wel effectiveness ratio of function genoemd, komt overeen met de TER formulering. Bij het bepalen van de ITER/F wordt de prestatie gerelateerd aan de prestatie van een andere experimentele groep met minder simulator training, in plaats van aan de prestatie van een controle groep zonder simulator training.

training op het leermiddel. In dat geval verloopt de training met het vervangende leermiddel *efficiënter* dan met het werkelijke systeem. Wanneer de benodigde hoeveelheid training op het vervangende leermiddel groter is dan de op het werkelijke systeem uitgespaarde tijd, dan krijgt de TER een waarde onder de 1. Waarden voor de TER kunnen in principe ook worden bepaald op basis van prestatieniveaus voor T_c en T_e . T_s blijft in dat geval staan voor hoeveelheid simulatortraining. Omdat in dit geval maten van tijd en prestatie met elkaar vergeleken worden heeft de hoogte van de TER niet meer de hierboven omschreven absolute betekenis in relatie tot de waarde 1. Aldus berekende TER waarden lenen zich dan slechts voor (relatieve) vergelijkingen.

Zowel de TER en het %L worden, behalve door validiteit en gehanteerde trainingsprocedures, in sterke mate bepaald door de keuze van het aantal lesuren op het vervangende leermiddel. Om het verloop van %L en TER met enige zekerheid te kunnen inschatten is een aantal trainingsoverdracht studies nodig waarbij iedere trainingsoverdracht studie per experimentele groep één meetpunt in een zogenaamde trainingseffectiviteit curve oplevert. Hierin worden %L of TER vastgelegd als functie van de duur van de vervangende training (zie Fig. 2).

De hoogte van de %L en de TER-varianten wordt tevens in belangrijke mate bepaald door de keuze van deeltaken die op het leermiddel worden getraind. Wanneer bijvoorbeeld een simulator wordt ingezet voor het trainen van een veelomvattende taak, zoals autorijden, moet deze keuze altijd expliciet worden gemaakt.

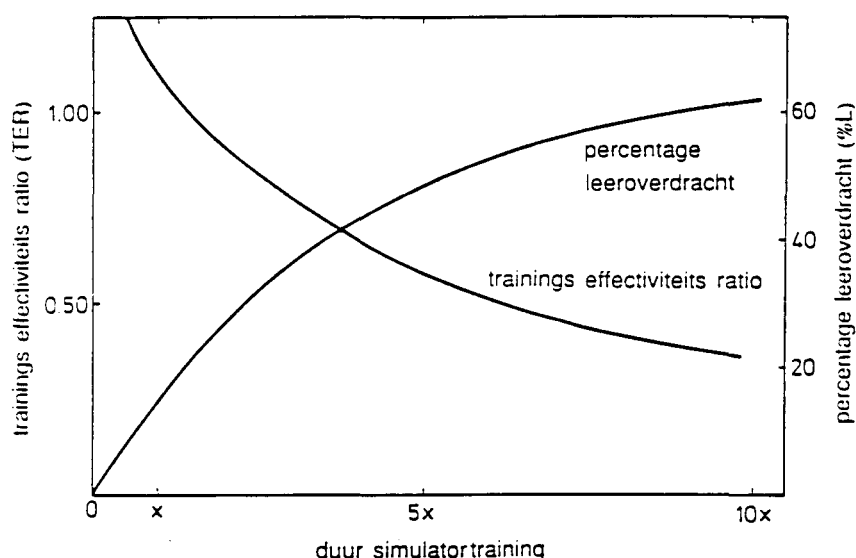


Fig. 2 Percentage leeroverdracht en trainings effectiviteits ratio als functie van de duur van vervangende training, gebaseerd op hypothetische data (naar Roscoe, 1971).

Gelet moet worden op de vele mogelijke foutbronnen die bij dit type transfer of training (TOT) experimenten op de loer liggen. Boldovici (1987) stelt dat een TOT experiment alleen dan goed is uitgevoerd wanneer een voldoende aantal proefpersonen wordt gebruikt en de experimentele en controle groepen random gekozen of goed gematched en verder op identieke wijze behandeld zijn. Verder dient men er voor te waken dat de meting niet in een te vroeg leerstadium verricht wordt en dat de prestatiematen gemeten worden in een werkgebied waarin een voldoende onderscheid optreedt (geen plafond- of bodem-effecten).

Vanwege de praktische voordelen ervan wordt in veel gevallen de voorkeur gegeven aan een andere methode, de quasi-transfer of training (QTOT) methode (of simulator-to-simulator methode, b.v. Lintern, Thomley & Nelson, 1983; Lintern, Wightman & Westra, 1984). Volgens deze methode wordt een aantal groepen leerlingen op dezelfde wijze op een simulator getraind, met dit verschil dat bij iedere groep een ander element in de simulatie afwezig is (b.v. textuur, kleur, mechanische beweging, geluid enz.). Een controlegroep wordt getraind op de volledig operationele simulator (criterium conditie). Vervolgens worden de groepen in dezelfde, volledig operationele simulator, getest. De trainingseffectiviteit kan dan onmiddellijk na de overstap op het complete systeem worden gemeten of worden uitgedrukt in termen van de effort die nog nodig is om tot een bepaald prestatie criterium te komen. Voorbeelden van de laatste zijn: nog benodigde trainingstijd of trainingskilometers. De prestatie verschillen in deze criterium conditie dienen dan als maat voor de relatieve bijdrage van het betreffende onderdeel aan de trainingseffectiviteit van de simulator.

Het meeste onderzoek beperkt zich tot vergelijking van prestaties (op de volledige simulator) van twee of meer groepen die op verschillende simulator-configuraties zijn getraind. Bedacht moet worden dat geen van deze QTOT-methoden absolute informatie oplevert over de validiteit of de trainingseffectiviteit van de volledig operationele simulator.

3.3 De waarde van bewegingsinformatie

De waarneming van de absolute snelheid en de oriëntatie ten opzichte van de omgeving is voornamelijk gebaseerd op visuele informatie. De betekenis van de mechanische bewegingsinformatie ligt voornamelijk in het waarnemen van versnellingen, vertragingen en veranderingen daarin (AGARD, 1980). Snelheids- en versnellingsveranderingen treden veelal op bij overgangsbewegingen, zoals het in- en uitgaan van bochten, bij remmen en accelereren en bij (de aanvang van) stijgen en dalen.

Bij het beantwoorden van de vraag in hoeverre mechanische bewegingsinformatie nuttig is bij verschillende deeltaken van de vliegertaak maken Gundry (1977) en Caro (1979) onderscheid tussen manoeuvreerbeweging en verstoringsbeweging. Korteling en Van Randwijk (1991) passen dit onderscheid in gewijzigde vorm toe op wielvoertuigen.

3.3.1 Manoeuvreeerbewegingen

Manoeuvreeerbeweging is gedefinieerd als de beweging welke resulteert uit handelingen van de bestuurder (piloot) in een closed-loop situatie. Bij dergelijke bewegingen kan de bestuurder anticiperen op de voertuigresponsie. Manoeuvreeerbewegingen kunnen plaatsvinden in stabiele en instabiele omstandigheden.

Wanneer bestuurders een voertuig met een *stabiel* dynamisch gedrag besturen (b.v. met aangepaste snelheid rechtuit- en in bochten rijden, vliegen of varen) maken zij geen gebruik van mechanische informatie over manoeuvreeerbewegingen. In dit geval hebben de bewegingen een laagfrequent karakter. Mechanische bewegingscues zijn dan redundant met betrekking tot de visuele bewegingscues.

Wanneer bestuurders een *instabiel* voertuig of een voertuig in instabiele situaties besturen (helikopter, slippende auto, speedboat) zullen zij wel gebruik maken van de mechanische bewegingsinformatie. In dat geval resulteren de bewegingen in hoogfrequente besturingshandelingen. Er is dan sprake van een zeer complexe perceptief-motorische taak. Bij taakafhankelijk instabiel systeemgedrag zoals het opstijgen met een helikopter of het wegrijden op een éénwielersfiets is mechanische bewegingsinformatie dus essentieel. In deze gevallen treden veranderingen in de bewegingen zo snel op dat louter visuele informatie onvoldoende zal zijn om adequaat te kunnen handelen.

3.3.2 Verstoringsbewegingen

Verstoringsbewegingen komen van buiten de regelkring (worden van buitenaf geleverd) en treden dus vaak onverwacht op. Het gaat hier om bewegingen door gebeurtenissen als bijvoorbeeld responsie van een wielvoertuig op zijwind, plotselinge gladheid, na een klapband enz. en van een vliegtuig op motorstoringen, contact met de landingsbaan bij het landen enz. Het onverwachte karakter van veel verstoringsbewegingen zorgt ervoor dat deze bewegingen appelleren aan de waakzaamheid van de bestuurder. Ze vereisen acuut de aandacht. Karakteristiek voor dergelijke bewegingen is de snelle onset en de voorspelbare voertuigresponsie op dergelijke voorvallen. De bestuurder moet leren op dit soort bewegingen te reageren door de oorzaak ervan te onderkennen en de juiste (corrigerende) handelingen uit te voeren. Daarnaast kunnen verstoringsbewegingen optreden in de vorm van trillingen. Trillingen zijn vrijwel altijd aanwezig en vereisen minder direct de aandacht dan de acute verstoringsbewegingen.

Bij autorijden geven trillingen informatie over de motor, de rijsnelheid en versnellingen, de versnellingsbak en het wegdek (berm, terrein). Bij vliegen kunnen trillingen bovendien de aanwezigheid van turbulentie aangeven. Bij varen geven trillingen hoofdzakelijk informatie over de motor.

3.4 Moving-base en leeroverdracht

De vraag of voor een effectieve opleiding op een simulator deze uitgevoerd dient te zijn met een bewegingsplatform is om diverse redenen moeilijk te beantwoorden. Allereerst zal de trainingseffectiviteit en dus de noodzaak van het beschik-

ken over een bewegingsplatform per taak of taakonderdeel verschillen. Voorts is onderzoek naar de waarde van moving-base systemen door middel van TOT experimenten, zeker voor de rij- en vaartaak, nog maar zelden uitgevoerd. Het meeste onderzoek heeft betrekking op taakprestaties in vliegsimulators en er is geen duidelijk inzicht in de generaliseerbaarheid van deze resultaten naar rij- en vaarsimulators. Een veel onderzochte en gecompliceerde vliegertaak als het aanvliegen en landen op een vliegveld of vliegdekschip bijvoorbeeld, is slechts zeer gedeeltelijk te vergelijken met (onderdelen van) de rijtaak en vrijwel onvergelijkbaar met de vaartaak.

Omdat, zoals zal blijken, betrouwbare onderzoeksresultaten die iets zeggen over de validiteit en/of trainingseffectiviteit van (rij-)simulators niet overvloedig voorhanden zijn, zal in het navolgende literatuuronderzoek ook naar andersoortige experimenten worden gerefereerd, waarin uitsluitend gekeken wordt naar het effect van een moving-base op taakprestaties.

3.4.1 Vliegsimulators

Enkele studies wijzen op betere (trainings)resultaten wanneer de vliegsimulators met een bewegingsplatform zijn uitgerust (o.a. Cohen, 1970; Ricard & Parrish, 1984).

Cohen (1970) citeert vooral studies met ervaren piloten, die (deel-)taken moesten verrichten waarin mechanische beweging een duidelijke rol speelt. Deze rol kon zowel functioneel zijn, zoals in het geval van plotselinge uitval van de remmen tijdens een landing, als verstorend voor de prestatie. Verstoring door beweging kan bijvoorbeeld optreden bij taken die een hoog frequent stuurgedrag vereisen, zoals terreinvliegen, en waarbij de toevoeging van turbulentie de taak aanzienlijk moeilijker maakt. Ricard en Parrish (1984) onderzochten voor de taak van helikopter "hovering" boven een landingsplatform op een zelf eveneens bewegend schip, de waarde van bewegingssimulatie door middel van platform beweging of door middel van een G-seat ten opzichte van een fixed-base opstelling. In een dergelijke taak kan vestibulaire bewegingsinformatie helpen de zelfbeweging te onderscheiden van daarvan losstaande bewegingen in de omgeving, in casu die van het landingsplatform. Zij concludeerden dat bewegingssimulatie de taakprestatie aanzienlijk verbeterde. Deze verbetering was groter als de simulatie als platformbeweging en niet via de G-seat was uitgevoerd. De conclusie van deze studies, dat een moving-base zal bijdragen aan een positieve leeroverdracht wordt door andere studies niet gesteund (o.a. Roscoe, 1980; Taylor, 1985). Lintern (1987) resumeert de kennis aangaande dit onderwerp en wijst erop dat tot nu toe uitgevoerde transfer-of-training studies met vliegsimulators niet aantonen dat bewegingssystemen nodig zijn om de effectiviteit van de training te verhogen. Lintern (1987) beargumenteert dat alléén transfer of training studies van belang zijn voor het inschatten van de invloed van bewegingssimulatie op het trainingsproces. Ook Rolfe & Staples (1986) merken dit op. Zoals hierboven gesteld zijn mechanische bewegingscues in een aantal gevallen redundant met betrekking tot de visuele bewegingscues. Dit verklaart de vele gevallen waarin bij training van een manoeuvreerbeweging van aan- of afwezigheid dan wel correctheid van mechanische beweging, geen effect

op de leeroverdracht werd aangetoond (b.v. Waag, 1981; Martin, 1981; Gray, 1982). Anders ligt dit bij manoeuvreren met instabiele systemen, waar de bewegingsinformatie als primaire cue kan worden beschouwd. Bij het herstellen van de in dergelijke gevallen optredende onbalansverschijnselen maakt een bestuurder enkel gebruik van het initiële gedeelte, de onset (of "schok"), en niet zozeer van het verdere verloop van de beweging. De handeling kan als het ware met de ogen dicht worden uitgevoerd (Korteling & Van Randwijk, 1990). Dit zou betekenen dat bij simulatie van een dergelijke situatie hoge eisen gesteld worden aan de timing en karakter van de onset van de beweging maar dat grote platform verplaatsingen niet een noodzaak zijn (o.a. Caro, 1979; AGARD, 1980).

3.4.2 Rijsimulatoren

De meeste taken die verricht worden bij het autorijden verschillen aanzienlijk van die bij het besturen van een vliegtuig. Aangezien leeroverdracht resultaten bijzonder afhankelijk van het type taak kunnen zijn betekent dit dat gevonden effecten van beweging van vliegsimulatoren op de leerresultaten niet zonder meer generaliseerbaar zijn naar die van rijsimulatoren, of het moet om zeer vergelijkbare deeltaken gaan. Er zijn geen studies gevonden, die echte transfer-of-training experimenten beschrijven. Slechts enkele studies zijn gevonden, waarin rijprestaties op fixed-base en moving-base simulatoren zijn vergeleken.

McLane en Wierwille (1975) toonden aan dat bestuurders in een simulator bij afwezigheid van simulatie van giersnelheid- en laterale versnellingsbeweging meer slingerden bij het koershouden, het sturen in bochten en bij inhalen. Tevens werd het effect van het weglaten van één van de drie beschikbare vrijheidsgraden (gier, rol, laterale verplaatsing) onderzocht. Zij vonden dat aanwezigheid van twee van de drie vrijheidsgraden reeds een maximaal positief effect heeft op de overeenkomst van gaspedaal- en snelheidsvariëaties. Blaauw (1982) vergeleek het rijgedrag van proefpersonen in een geïnstrumenteerde auto op de rechte weg met het rijgedrag in een fixed-base maquette simulator. Deze simulator bleek absoluut en relatief valide met betrekking tot snelheidscontrole en alleen relatief valide met betrekking tot koerscontrole. Verondersteld werd dat dit laatste het gevolg was van afwezigheid van mechanische bewegingsinformatie, maar het kan evenzeer veroorzaakt zijn door de lage resolutie van het gebruikte beeldsysteem. In de simulator bleken onervaren bestuurders een iets grotere variatie in de gaspedaalposities te hanteren vergeleken met de werkelijkheid. In de snelheidsvariëatie werkte dit echter nauwelijks door.

In een literatuurstudie stellen Korteling en Van Randwijk (1991) dat rechtuitrijden, gasgeven, rijden in flauwe bochten en langzaam uitgevoerde verrichtingen zoals keren, parkeren en achteruitrijden stabiele manoeuvres zijn. De trainingseffectiviteit zal hierbij voornamelijk bepaald worden door de karakteristieken van het beeldsysteem. Ondersteuning door middel van een bewegingsplatform lijkt derhalve bij deze taakonderdelen niet strikt noodzakelijk. Snelheidsclues kunnen eveneens voldoende geleverd worden door het beeldsysteem, zodat het aanleren van voertuigsnelheidsbeheersing op een vlakke rechte weg met een fixed-base simulator mogelijk zal zijn.

Met betrekking tot rijnsimulatoren zijn geen studies gevonden naar het effect van mechanische beweging op het trainen van de besturing van instabiele voertuigen (slippen, overstuur) of het reguleren van verstoringbewegingen (zijwindverstoringen).

Het is evident dat door het aanbieden van trillingen de geloofwaardigheid van een simulator wordt verhoogd. Hoe belangrijk zijn trillingen nu voor de validiteit en de leeroverdracht? Een mogelijke vorm van trillingsimulatie wordt geboden door bijvoorbeeld een echt voertuig op een rollenbank te plaatsen en deze op normale wijze aan te drijven met de motor. Met een dergelijk systeem worden dus snelheidsafhankelijke trillingen en auditieve informatie aan de bestuurder aangeboden. Wojcik en Weir (1970, geciteerd in Blaauw, 1979) vonden dat in een camera-maquette simulator (lage resolutie) en een rollenbank voor het genereren van trillingen relatief en wellicht zelfs absoluut valide gedrag in taken als inhalen, rijden over een niet te bochtige weg, koershouden bij zijwind en het volgen van een voorligger kan worden verkregen. Omdat trillingen de waarnemingsdrempels voor mechanische bewegingsinformatie verhogen, kunnen hierdoor ook gebreken in de mechanische bewegingsinformatie voor een belangrijk deel werden gemaskeerd. Dit zou betekenen dat trillingen de face-validiteit van een simulator kunnen verhogen. Over de mate waarin trillingen de functionele validiteit kunnen verhogen en in hoeverre natuurgetrouwheid hierbij een vereiste is biedt de literatuur weinig aanknopingspunten. Op basis van de eerder besproken indeling van mechanische bewegingsinformatie kan hierover wel iets worden gezegd. De meeste trillingen, zoals opgewekt door het wegdek en door de motor, zijn doorgaans niet bepalend voor het handelen van de bestuurder. De eisen die gesteld worden aan het simuleren hiervan behoeven dan ook niet hoog te zijn.

De constatering van Brown (1975, geciteerd in Blaauw, 1979) dat zelfs volledig met het beeldsysteem ongecorreleerde trillingen maken dat de simulatie veel realistischer overkomt dan bij afwezigheid van trillingen, ondersteunt deze stelling en onderstreept het belang van trillingen voor de geloofwaardigheid.

3.4.3 Scheepssimulatoren

Er bestaan simulatoren voor het trainen van brugbemanningen van schepen en bemanningen van centrales in onderzeeërs. In bijna alle gevallen betreft dit fixed-base systemen; in de literatuur wordt over de eventuele wenselijkheid van moving-base systemen zelfs niet gerept. Dit is goed te verklaren uit de relatieve inertie van schepen, waardoor scheepsbewegingen eerst enige tijd na een stuuractie waarneembare gevolgen laten zien. Deze gevolgen kunnen zowel visueel als instrumenteel worden gecontroleerd. In het algemeen kunnen frequente scheepsbewegingen vooral gezien worden als verstoringbewegingen die geen stuuracties behoeven. Bij nabootsen zullen ze wel de realiteitsbeleving maar zeer waarschijnlijk niet de trainingseffectiviteit rechtstreeks bepalen. Meer indirect kan (simulatie van) scheepsbeweging door het oproepen van onlustgevoelens als zeeziekte wel een invloed hebben op het leerproces. Op dit gebied is echter geen literatuur aangetroffen.

3.5 Discussie en conclusies

Over het belang van mechanische bewegingsinformatie voor het (trainen van) stuurgedrag lopen de meningen en bevindingen uiteen. In de literatuur valt het grote gebrek aan voldoende omvangrijke TOT of QTOT studies op, waardoor de meningen over de waarde van bewegingssimulatie vaak gebaseerd zijn op vergelijkende studies met (ervaren) proefpersonen. Met Lintern (1987) kan gesteld worden, dat dergelijke vergelijkende studies in wezen irrelevant zijn voor de bepaling van de opportuniteit van bewegingssimulatie voor trainingssimulatoren. Anderzijds moet bedacht worden dat TOT studies zeer arbeidsintensief zijn en in feite voor elke (deel-)taak of leerdoelstelling apart uitgevoerd zouden moeten worden. Als het leertraject qua trainingseffectiviteit geoptimaliseerd moet worden (beslissing over wannéér overstap naar volgende of echte systeem) dan kan niet volstaan worden met één enkele meting van de transfer of training, maar moet deze meting op een aantal tijdstippen van het leertraject worden herhaald om voor één deeltaak de relatie tussen hoeveelheid simulatortraining en transfer of training in een TOT curve vast te kunnen leggen.

Deze leemte in de kennis zal dus niet snel opgevuld kunnen worden, en het verdient wellicht aanbeveling een meer kwalitatieve en analytische beschouwing van het probleem aan dergelijke studies vooraf te laten gaan teneinde de inspanningen vooral op kritisch te achten taakonderdelen of leerdoelstellingen te kunnen richten.

Uit de bestudeerde literatuur blijkt dat mechanische bewegingsinformatie mogelijk nuttig kan zijn bij de perceptief-motorische taakonderdelen waarbij er sprake is van het manoeuvreren van het voertuig in instabiele omstandigheden en van het reguleren van acute verstoringsbewegingen. Bij de vliegtaak doen dergelijke omstandigheden zich voor in de vorm van motoruitval, grondcontact bij het landen enz. (Caro, 1979). Ten aanzien van de rijtaak kunnen dergelijke omstandigheden zich voordoen bij noodremmen, hellingtrekken, het sturen in scherpe bochten en op kruisingen, terreinrijden en een aantal bijzondere omstandigheden zoals zijwind en aquaplaning. Volgens een literatuuronderzoek van Korteling en Van Randwijk (1990) kan toevoeging van een moving-base de mogelijkheden van een simulator met een beperkt beeldsysteem en bedoeld voor training van beginnende leerlingen met betrekking tot basisvaardigheden van de rijtaak als remmen en hellingtrekken vergroten. Een dergelijke betrekkelijk kleine winst in leeroverdracht zal echter een duur "full scale" bewegingssysteem in veel gevallen niet rechtvaardigen.

Een full scale moving-base lijkt derhalve voor rijsimulatoren meestal niet aan te bevelen. Een eenvoudig moving-base daarentegen dat kortdurende lineaire bewegingen genereert bij het manoeuvreren van het voertuig in instabiele omstandigheden kan zinvol zijn. Voor autorijden zijn vooral de laterale en longitudinale bewegingen van belang. Ook kan gedacht worden aan een systeem dat alleen rotatie bewegingen genereert. Hierbij komen de rol- en dompbeweging als eerste in aanmerking. Zelfs deze partiële bewegingssimulatie kan dan nog wat betreft kosten en leeroverdracht worden vergeleken met andere wijzen van terugkoppelen van de voor het leerproces noodzakelijke informatie. Poll

(1980) toonde in een TOT studie met de Leopard 1 simulator aan dat bij het leren schakelen, beweging van de cabine niet noodzakelijk is om een positieve bijdrage te leveren aan de leeroverdracht, mits de instructeur bij afwezigheid van een moving-base de leerling intensief op dit punt begeleidt.

Mechanische bewegingsinformatie lijkt dus vooral van belang bij perceptief-motorische taken in instabiele situaties en bij acute, taakrelevante verstoringsbewegingen. Met betrekking tot het trainen van deeltaken in deze situaties kunnen aan een bewegingssysteem een drietal eisen gesteld worden (Caro, 1979):

- 1 Vertragingen na de besturingsactie van de onset van de simulator bewegingen dienen de responsie van het werkelijke systeem te benaderen (valide te zijn).
- 2 De timing van de bewegings-onset moet adequaat zijn om de bestuurder te informeren over de op handen zijnde onbalans of de optredende verstoringsbeweging.
- 3 De bewegingscues welke relevante informatie leveren over de onbalans of de verstoringsbeweging dienen in ieder geval aanwezig te zijn.

Als met de simulator ook ervaren proefpersonen worden getraind (voortgezette trainingen of trainingen gericht op het onderhouden van vaardigheden) zouden ook andere bewegingscues toch nog een effectieve bijdrage aan het leerproces kunnen leveren. Verondersteld mag worden dat bij toename van vaardigheden beschikbare informatie steeds beter wordt gecombineerd en subtieler wordt gebruikt. Met andere woorden: het aantal voorwaarden waaraan voldaan moet worden wil een bepaalde specifieke respons optreden wordt steeds groter; de respons-specificiteit en -variatie neemt toe. Dit impliceert dus dat met het toenemen van vaardigheden van leerlingen steeds hogere eisen worden gesteld aan de natuurgetrouwheid van een simulator. Anders gezegd: naarmate het verschil tussen criteriumprestatie (de trainingsdoelstelling) en maximaal bereikbare prestatie bij perceptief-motorische taken kleiner is, is de noodzaak van natuurgetrouwheid, en dus adequate mechanische bewegingsinformatie groter. Hieruit volgt dat voor basisopleidingen waarbij het er vooral om gaat de eerste beginselen van taakuitvoering bij te brengen, er met behulp van een beperkte simulator zonder moving-base systeem waarschijnlijk al snel een bevredigende leeroverdracht kan worden behaald. Voor vervolgopleidingen daarentegen geldt dat voor perceptief-motorische taken een bevredigende leeroverdracht pas met behulp van een compleet moving-base systeem kan worden bereikt (Boer, 1991). De meer chronische verstoringsbewegingen, waarvan trillingen de hoofdmoot vormen, zijn minder bepalend voor het handelen van de bestuurder en zijn daarom van ondergeschikt belang voor de taakuitvoering. Verstoringsbewegingen kunnen indien nodig relatief grof worden gesimuleerd aangezien deze door maskering van fouten in de bewegingssimulatie op de face validity een positief effect kunnen hebben.

Trillingen worden bij voorkeur aangeboden als een superpositie op de bewegingen van een bewegingsplatform, net als in de werkelijkheid. Een dergelijk systeem veroorzaakt dan een trilling van de gehele cabine. Toepassing van een apart trillingssysteem dat bijvoorbeeld geplaatst is onder de bestuurdersstoel heeft tot gevolg dat de bedieningsomgeving niet volledig zal meetrillen. Wat dit

betekent voor de validiteit en de leeroverdracht is vooralsnog niet bekend maar zou nadelig kunnen zijn.

Een geheel ander argument voor installatie van een moving-base is dat het aannemelijk is dat simulatoren met een bewegingsplatform geloofwaardiger over zullen komen dan simulatoren zonder een dergelijk systeem. Geloofwaardigheid werkt positief voor de motivatie van zowel instructeur als leerling en zal naar aangenomen wordt daarmee indirect de effectiviteit van de training positief beïnvloeden. Volgens Lintern (1987) zou dit zelfs de enige goede reden zijn om in het geval van vliegsimulatoren een moving-base toe te passen.

Zowel bij trainingssimulatoren met als zonder moving-base is het aan te bevelen een trillingssysteem te installeren om tekorten of discrepanties ten opzichte van echte bewegingscues te maskeren. Aan de natuurgetrouwheid van dergelijke trillingen lijken in principe geen hoge eisen te hoeven worden gesteld. Natuurgetrouw nagebootste trillingen kunnen wellicht de validiteit van een simulator verhogen doordat feedback wordt gegeven over de toestand van de motor en bij autorijden tevens de schakelbak en de rijsnelheid.

Er zijn echter geen gegevens voorhanden die direct iets zeggen over de effecten van het bovenstaande voor de trainingseffectiviteit.

4 SIMULATORZIEKTE

4.1 Inleiding

4.1.1 Definitie van simulatorziekte

Als manoeuvres die op zich géén bewegingsziekte te weeg brengen, nagebootst worden in een simulator en er treedt dan wél bewegingsziekte op, dan wordt deze vorm van bewegingsziekte simulatorziekte genoemd (Kennedy e.a., 1988). Deze operationele definitie is nodig om niet alle vormen van bewegingsziekten die in simulatoren kunnen optreden onder simulatorziekte te laten vallen: het nabootsen van scheepsbewegingen in het laboratorium leidt net zo goed als op zee tot het optreden van bewegingsziekte, maar is geen simulatorziekte volgens de boven gegeven definitie; daarentegen is de bewegingsziekte die bij het afremmen van de centrifuge tijdens de Gz training kan optreden wel aan te merken als simulatorziekte (bij het trekken van hoge G in het vliegtuig treedt niet direct bewegingsziekte op aangezien de hoekversnellingen hier vrijwel te verwaarlozen zijn in vergelijking met de hoekversnellingen zoals die, noodzakelijkerwijs, bij de centrifugetraining voorkomen).

4.1.2 Symptomen van simulatorziekte

De ziektesymptomen van de simulatorziekte zijn dezelfde als die van andere bewegingsziekten, te weten: misselijkheid, duizeligheid, braken, slaperigheid, bleekheid, zweten, speekselvloed etc. Ook de daarmee samenhangende verschijn-

selen als algemene malaise, apathie, neerslachtigheid, hoofdpijn, desoriëntatie, gebrek aan eetlust, behoefte aan frisse lucht, slap gevoel, moeheid en slecht functioneren komen voor. In tegenstelling tot wat bij de meer gangbare vormen van bewegingsziekte het geval is wordt bij simulatorziekte vaak melding gemaakt van vermoeide ogen maar slechts zelden van braken (Gower e.a., 1988). Volgens Benson (1988) zijn de vermoeide ogen echter eerder een gevolg van de onvolkomenheid van de visuele projectie dan een uiting van bewegingsziekte (zie ook § 4.3.1). In een onderzoek via vragenlijsten bij ca. 1200 piloten die op verschillende simulatoren van de US Navy trainden vond Kennedy (Kennedy e.a., 1988) dat braken inderdaad sporadisch voorkwam (.2%) maar misselijkheid, hoofdpijn, onevenwichtigheid, vermoeide ogen en dergelijke daarentegen in ruime mate (tot ca. 25%). Ongeveer 10% van de totale groep ervoer dusdanige verschijnselen van simulatorziekte dat in de daarop volgende 24 uur een aangepast programma noodzakelijk was. Een van de voornaamste verschijnselen in die periode (na-effecten) waren verstoringen van het houdingsevenwicht.

4.1.3 Gevolgen van simulatorziekte

Kennedy (Kennedy e.a., 1988) verdeelt de negatieve effecten van het optreden van simulatorziekte in drie categorieën te weten

- *gevolgen voor veiligheid en gezondheid.* Hij noemt daarbij visuele na-effecten, het optreden van problemen met het houdingsevenwicht, fysiologisch ongemak en interferentie met perceptief-motorische functies,
- *gevolgen voor de training.* Hij vreest dat het optreden van simulatorziekte op den duur wantrouwen en tegenzin bij de gebruikers van simulatoren zal oproepen wat ook indirect zal leiden tot vermindering van de trainingsefficiëntie. Hij suggereert zelfs de mogelijkheid dat men het gedrag in de simulator aanpast om de ziekte te vermijden met als gevolg een slechte of misschien zelfs negatieve overdracht naar de praktijksituatie. Na-effecten zouden de gebruikers ook kunnen hinderen in hun direct op de simulatie volgende trainingsactiviteiten.
- *gevolgen voor directe inzetbaarheid.* Het kan volgens Kennedy voorkomen dat simulatorziekte leidt tot een tijdelijk vliegverbod van de desbetreffende piloot waardoor de operationele inzetbaarheid in het geding is. Na-effecten kunnen tot ongelukken aanleiding geven, zodat bijvoorbeeld autorijden na een simulatortraining in principe ongewenst is (dit geldt vanzelfsprekend ook voor gebruikers van rijsimulatoren).

4.1.4 Incidentie van simulatorziekte

Het optreden van simulatorziekte blijkt in de studie van Kennedy (Kennedy e.a., 1988) sterk af te hangen van het type simulator: bij sommige simulatoren trad het in het geheel niet op, in andere werden verschijnselen gerapporteerd bij ongeveer 60% van de runs. De simulatoren die de meeste simulatorziekte produceerden bleken helikoptersimulatoren te zijn met zes bewegingsgraden en uitgebreide visuele stimulatie. In een overzicht van simulatorziekte studies komen Casali en Frank (1988) tot vergelijkbare cijfers voor USAF simulatoren, voor rijsimulatoren vonden zij nog hogere ziektepercentages (tot 100%). Opval-

lend is dat high performance aircraft simulatoren met een fixed-base weinig aanleiding geven tot het optreden van simulatorziekte. Schilder (1990) concludeert dat er geen consensus bestaat over de vraag of een simulator nu moet bewegen of niet: hij citeert enerzijds Casali en Wierwille (1980) die vonden dat de simulatorziekte afnam toen zij een moving-base simulator gingen gebruiken, en anderzijds Kennedy e.a. (1988) die vonden dat moving-base simulatoren juist de hoogste incidentie van simulatorziekte vertoonden. Schilder rapporteert dat de fixed-base F-16 simulatoren van de KLu geen noemenswaardige simulatorziekte te weeg brengen (hij zinspeelt hierbij op een mogelijk positief effect van instructie en begeleiding).

4.2 Ontstaan van simulatorziekte

Evenals bij andere vormen van bewegingsziekte zoals wagen-, zee-, lucht- of ruimteziekte, wordt de discrepantie tussen de door de zintuigen waargenomen beweging en de door het centrale zenuwstelsel "verwachte" bewegingen gezien als oorzaak van simulatorziekte. Bij simulatoren zal dit meestal een discrepantie zijn tussen de visuele en de vestibulaire bewegingsinformatie (een *interzintuiglijk* conflict). In moving-base simulatoren kan het ontstaan van simulatorziekte ook het gevolg zijn van een *intrazintuiglijk* conflict, nl. tussen de sensoren voor de lineaire versnellingen (de otolieten) en de sensoren voor hoekversnellingen (de halfcirkelvormige kanalen; zie § 2.1). Het theoretisch kader voor dit mechanisme wordt gevormd door het "neural mismatch" concept van Reason en Brand (1975). Daarnaast geloven sommigen dat laag frequente verticale oscillaties, die om wat voor reden dan ook bewegingsziekte provoceren, veruit de belangrijkste oorzaak zijn van het ontstaan van simulatorziekte in een moving-base simulator.

4.2.1 Het "neural mismatch" concept

Reason en Brand (1975) poneerden een **neural mismatch** of **sensory rearrangement** theorie, een theorie die voor het eerst een coherente verklaring gaf voor de tot dan toe bekende verschijnselen van bewegingsziekte. Het voornaamste idee achter deze theorie is dat bewegingsziekte ontstaat als de zintuiginformatie aangaande de beweging van het lichaam zoals die door de ogen alsmede door het vestibulaire en het proprioceptieve systeem waargenomen wordt, verschilt van de input die het centrale zenuwstelsel op dat moment verwacht. Essentieel voor deze theorie is dus dat er in het centrale zenuwstelsel de aanwezigheid gepostuleerd wordt van een representatie (model) aangaande de lichaamsbeweging gebaseerd op afferente en efferente neurale informatie. Dit model wordt opgebouwd door de bewegingservaring die iedere dag opgedaan wordt, vooral door de actieve controle van het gaan en staan. In het normale voortbewegen zijn verstoringen van het houdingsevenwicht gewoonlijk van korte duur (b.v. als men struikelt) en wordt de mismatch tussen de actuele en gewenste zintuiglijke informatie gebruikt om houdingscorrecties te initiëren. Als er echter een langdurige verandering is in de zintuiglijke informatie - zoals bijvoorbeeld bij verblijf in een gewijzigd zwaartekrachtsveld of bij een aandoening van het

vestibulaire systeem - duidt de aanwezigheid van een mismatch tussen de verwachte en de actuele zintuiginformatie het centrale zenuwstelsel erop dat het interne model niet langer adequaat is. Er wordt dan een adaptatieproces gestart dat het interne model op een dusdanige wijze aanpast dat het weer zoveel mogelijk met de afferente zenuwinformatie overeen gaat stemmen, daarbij de mismatch verkleinend.

De aanwezigheid van een blijvend mismatch signaal heeft echter twee effecten: enerzijds zet dit het adaptatieproces in werking, anderzijds brengt het neurovegetatieve responsies teweeg die kunnen leiden tot bewegingsziekte. Van het eerste effect heeft het organisme zeker baat aangezien een dergelijke aanpassing zeer functioneel is. Van het tweede effect kan dat niet gezegd worden. Oman (1982) suggereert dat het een "ontwerpfoutje" is dat pas heden ten dage door het gebruik van transportmiddelen aan het licht gekomen is.

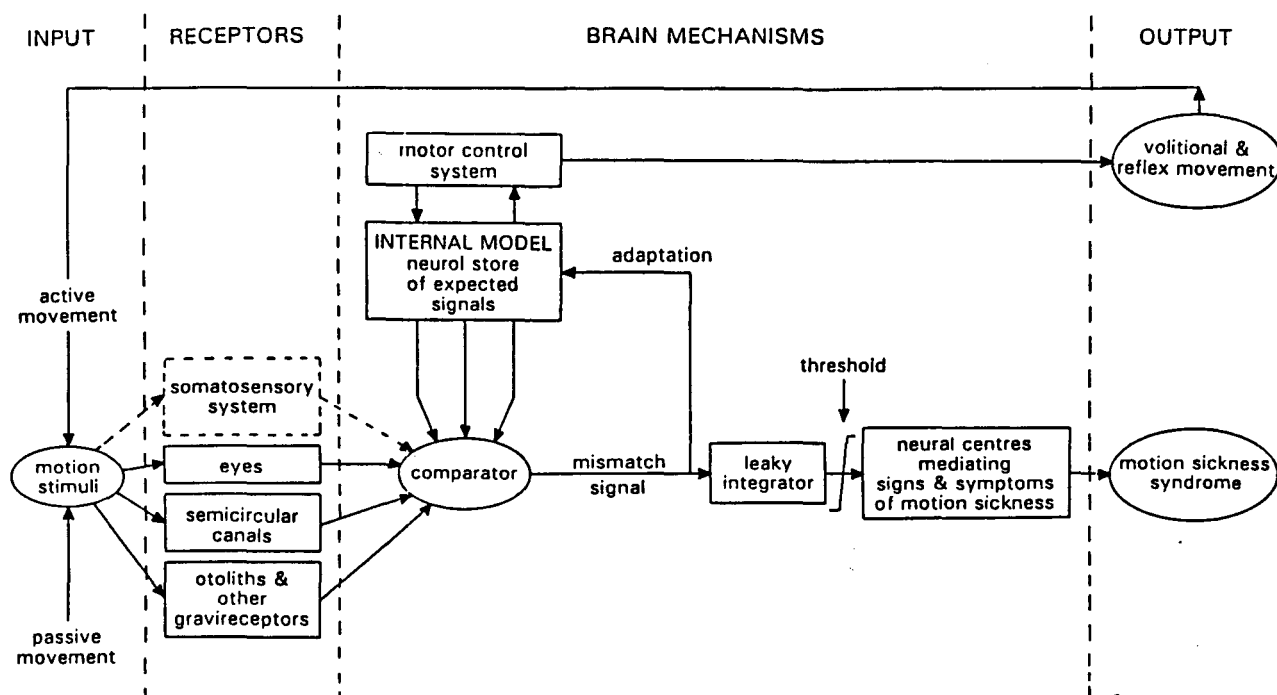


Fig. 3 Variant op het model van Benson (1984) van de sensory rearrangement theorie.

In Fig. 3 is de door Benson (1984) meer gedetailleerde uitwerking van het model van Reason en Brand (1975) weergegeven. Volgens hem wordt beweging van het lichaam voornamelijk door de ogen en het vestibulaire systeem gedetecteerd en speelt het somatosensorische systeem alleen een rol bij het detecteren van veranderingen in de oriëntatie van het lichaam t.o.v. de zwaartekracht en van lineaire versnellingen, zij het altijd synergistisch met het otolieten systeem. Brandt e.a. (1977) en Bles (1981) lieten echter zien dat somatosensorische informatie wel degelijk kan leiden tot bewegingssensatie en bewegingsziekte, vandaar de door stippellijnen gemarkeerde extra receptorblok. In het model zien

we verder het zenuwcentrum dat als comparator fungeert van de signalen die van de receptoren afkomstig zijn met die van het interne model, de "verwachte" signalen. De output van deze comparator is het mismatch signaal dat dus enerzijds het interne model moet aanpassen en anderzijds - helaas- de neuro-vegetatieve processen activeert die de bewegingsziektesymptomen genereren. Benson veronderstelt de aanwezigheid van een leaky integrator omdat de verschijnselen na blootstelling aan provocatieve stimuli zich meestal geleidelijk openbaren. Hij neemt tevens een drempel op in de keten om de interindividuele en intraindividuele verschillen in gevoeligheid voor bewegingsziekte te kunnen verklaren.

In concreto betekent deze theorie voor simulatoren het volgende: in een fixed-base simulator wordt het mismatch signaal te weeg gebracht door het ontbreken van "verwachte" traagheidskrachten wanneer visueel een bepaalde beweging gesimuleerd wordt. In overeenstemming hiermee is de bevinding dat ervaren vliegers in fixed-base simulatoren meer last hebben van simulatorziekte dan aspirant vliegers: deze laatsten hebben immers nog niet zo'n duidelijk verwachtingspatroon (zie Round Table Discussion AGARD 433, 1988).

Om het mismatch signaal te minimaliseren probeert men van een fixed-base simulator over te gaan op een moving-base simulator waarbij de bewegingen van de moving-base zoveel mogelijk die van de visueel geïnduceerde beweging moeten ondersteunen. Benson (1988) citeert twee studies (Sinacori, 1967; Casali & Wierwille, 1980) waarin gevonden was dat het toevoegen van bewegingscues door de aanzet van versnellingen aan te bieden een gunstige invloed had op de acceptatie, dus face validity van de simulator, terwijl ook de simulator ziekte afnam. In een moving-base simulator kunnen echter kwalitatieve en kwantitatieve verschillen tussen de beweging van het platform en de te simuleren beweging, alsmede ook tijdsvertragingen tussen de visuele bewegingsinformatie en de platformbewegingen aanleiding geven tot bewegingsziekteverschijnselen.

4.2.2 Verticale beweging met spectrale energie onder 0.5 Hz

O'Hanlon en McCauley (1974) vonden dat verticale beweging met spectrale energie vooral tussen 0.2 en 0.4 Hz bewegingsziekte te weeg kan brengen. Op zich zullen dit niet de bewegingen zijn die typisch zijn voor vliegtuigen. Echter, wanneer de onset van bewegingen nagebootst wordt in de simulator, moet dit noodzakelijkerwijs gevolgd worden door een terugkerende beweging van de simulator (wash-out filters, zie ook § 2.2.3 en 3.6.2). Bij het simuleren van luchtgevechten zullen dergelijke bewegingen vrij groot zijn en elkaar tamelijk snel opvolgen met het gevolg dat er veel energie in het laagfrequente bewegingspectrum aanwezig is. Kennedy e.a. (1988) laten zien dat de energie van bepaalde simulatoren tijdens simulatietraining inderdaad in het gebied beneden .5 Hz ligt en bovendien dusdanige waarden heeft dat het, gezien de bevindingen van O'Hanlon en McCauley, begrijpelijk is dat bewegingsziekte optreedt. Guedry en Benson (1978) stellen eveneens dat, naast de gevolgen van hoofdbewegingen tijdens rotaties die aanleiding geven tot de z.g. Coriolis effecten, de provocatieve stimuli in simulatoren vooral de lineaire verticale versnellingen onder .5 Hz zijn. Derhalve worden de meeste high-performance aircraft simulatoren tegenwoordig

gebruikt in een fixed-base configuratie, wat de simulatorziekte incidentie deed afnemen (zie Benson, 1988; Schilder, 1990). Dit betekent overigens dat de mismatch die optreedt in de fixed-base simulator kennelijk minder ziekte veroorzaakt dan de laagfrequente bewegingen in de moving-base simulator. Op grond hiervan is Kennedy (zie discussie Gower e.a., 1988) er van overtuigd dat niet alle vormen van bewegingsziekte te verklaren zijn door de sensory rearrangement theorie (zie ook Round Table Discussion AGARD-CP-433, 1988). Casali en Frank ondersteunen deze zienswijze (Casali & Frank, 1988). Reason en Brandt (1975) tenslotte opperen dat de bewegingsziekte ten gevolge van laagfrequente beweging mogelijk toch te verklaren is met de sensory rearrangement theorie doordat er sprake zal zijn van een intravestibulair conflict als bij de verticale bewegingen het hoofd niet gefixeerd is (wat in een vliegsimulator natuurlijk inderdaad nooit het geval is): de otolietinformatie zou dan suggereren dat het hoofd beweegt t.o.v. de zwaartekracht wat door de kanalen niet ondersteund wordt.

4.3 Nadere precisering van de oorzaken van simulatorziekte

4.3.1 Visuele cues

Evenals verandering van de lenzen van een bril aanleiding kan geven tot duizeligheid en bewegingsziektesymptomen, kunnen afwijkingen van de echte oogpositie met de oogpositie zoals die door de projectie aangenomen wordt simulatorziekte tot gevolg hebben (Padmos, 1989). Ook wordt er melding gemaakt dat geometrische en perspectivische vervormingen van het visuele beeld aanleiding kunnen geven tot het optreden van simulatorziekte (Benson, 1988).

De niet altijd even optimale beeldprojectie wordt niet gezien als de oorzaak van simulatorziekte want het perifere deel van het netvlies reageert uitstekend op stimuli met lage spatiële frequenties, laag contrast en lage luminantie. Details kunnen echter wel van groot belang zijn voor de door de piloot uit te voeren foveale zoektaken. Volgens Benson is het ontbreken van die detaillering hoogst waarschijnlijk de aanleiding tot klachten over vermoeidheid van de ogen, hoofdpijn, etc., en zijn deze klachten dus eerder "visuele problemen" dan symptomen van simulatorziekte (zie § 4.1.2).

4.3.2 Oriëntatie ten opzichte van de verticaal

Zoals in § 2.2.3 reeds besproken is, wordt de bewegingssensatie primair visueel gegenereerd, al dan niet ondersteund door de tactiele en vestibulaire cues ten gevolge van mechanische beweging van een moving-base. Nadere analyse van de condities waarin simulatorziekte optreedt leert dat niet iedere mismatch bij conflicterende visuele en vestibulaire stimulatie tot bewegingsziekte leidt: het draaien van een optokinetische trommel rond een stationair zittende persoon maakt deze niet ziek, ondanks het feit dat met een dergelijk apparaat zeer krachtige optokinetische vectie geïnduceerd kan worden (Brandt e.a., 1973; De Graaf, 1990). Bewegingsziekte treedt met name op in die situaties waarin een

discrepanctie optreedt tussen de visueel gesuggereerde oriëntatie t.o.v. de zwaartekracht en de door de otolieten waargenomen richting van de zwaartekracht. Evidentie hiervoor komt uit de literatuur en uit eigen onderzoek. Zo geeft Benson (1988) voorbeelden van het induceren van bewegingsziekte: het kijken naar een visuele roll stimulus en de Pseudo-Coriolis effecten. Bij visuele roll motion stimuli wordt visueel een kanteling gesuggereerd die door het otolieten- en kanalsysteem niet waargenomen wordt, met als gevolg bewegingsziekte. Het tweede voorbeeld betreft de bewegingsziekte die optreedt bij het kantelen van het hoofd tijdens visueel rond de z-as opgewekte draaisensaties, de z.g. "Pseudo-Coriolis" effecten (zie ook Dichgans & Brandt, 1973; Bles, 1981). Analyse van vestibulaire stimuli die bewegingsziekte veroorzaken is hiermee in overeenstemming: stimulatie van de halfcirkelvormige kanalen die een kanteling t.o.v. de zwaartekrachtvector suggereert leidt snel tot bewegingsziekte als dat door het otolietensignaal niet bevestigd wordt terwijl stimulatie rond de z-as (yaw) veel minder snel aanleiding tot het optreden van bewegingsziekte geeft, zelfs bij aanwezigheid van strijdige visuele informatie (Probst e.a., 1985).

De voor bewegingsziekte belangrijke discrepantie is dus het verschil tussen de door de otolieten waargenomen richting van de zwaartekracht en de interne representatie van de zwaartekracht. De vraag is derhalve hoe en wanneer een dergelijke discrepantie ontstaat. Een opvatting is dat deze discrepantie het gevolg is van de bewerking die het otolietensignaal moet ondergaan om de versnelling van de zwaartekracht te scheiden van andere, eveneens op de otolieten inwerkende lineaire versnellingen. Voor deze scheiding is nodig dat het systeem geïnformeerd wordt over de kanteling van het hoofd en die informatie kan geleverd worden door de halfcirkelvormige kanalen (Mayne, 1974; Mittelstaedt e.a., 1989). Deze bewerking resulteert derhalve in een foutieve inschatting van de richting van de zwaartekracht als de kanaalsignalen niet overeenkomen met de kanteling van het hoofd, zoals tijdens de Coriolis-effecten, met de voornoemde discrepantie tot gevolg (zie Guedry & Benson, 1978). Vanwege de sterke visueel-vestibulaire interacties zal ook een visueel geïnduceerde kanteling van het hoofd leiden tot aanpassing van de interne representatie van de zwaartekrachtrichting (b.v. bij het Pseudo-Coriolis effect: Dichgans & Brandt, 1973).

Hoe het systeem er precies in slaagt om de zwaartekrachtvector uit het otolietensignaal te distilleren is niet geheel duidelijk: naast de beschreven **transformatie** m.b.v. de kanaalsignalen wordt ook de aanwezigheid van **laagdoorlaatfilters** gepostuleerd op grond van het feit dat het systeem altijd geneigd blijkt te zijn om tenslotte de richting van de op de otolieten inwerkende kracht als richting van de zwaartekracht te accepteren (met een tijdconstante van ca. 20 seconden; Guedry, 1974).

Daarnaast speelt ook de **adaptatie** aan de grootte van de G-vector een rol zoals blijkt uit de gevolgen van langdurig centrifugeren: kanteling van het hoofd brengt nog uren na afloop van 1.5 uur centrifugeren met 3Gx bewegingsziekte symptomen te weeg. Een verklaring hiervoor is dat de grootte van de interne representatie van de zwaartekrachtvector afwijkt van de normale grootte waardoor de kanteling van het hoofd op grond hiervan verkeerd beoordeeld wordt en dus in

conflict is met de kanaalinformatie aangaande de hoofdkanteling (zie Bles e.a., 1989).

Het is niet onmogelijk dat hier hetzelfde adaptatiemechanisme aangesproken wordt wat ook gewenning aan scheepsbewegingen mogelijk maakt. Ditzelfde mechanisme moet dan ook verantwoordelijk zijn voor de na-effecten van gebruik van de simulator (zie § 4.4).

4.3.3 Tijdvertragingen van visuele en vestibulaire stimuli

Frank e.a. (1988) hebben in een rijsimulator de effecten van tijdvertragingen van vestibulaire en visuele stimuli op o.a. de stuurtaak en het optreden van simulatorziekte onderzocht. Beide soorten tijdvertragingen blijken zowel de stuurtaak als de simulatorziekte in negatieve zin te beïnvloeden. Opvallend is dat zij vinden dat, wanneer er sprake is van asynchroniteiten, een visuele "lead" te verkiezen is boven een vestibulaire lead. Dis is in tegenspraak met de algemene gedachte dat juist een vestibulaire "lead" te verkiezen is (zie § 2.2.4).

4.4 Na-effecten van simulatorgebruik

Geleidelijk aan komen er meer onderzoeken beschikbaar waarin een inventarisatie gemaakt is van de directe lichamelijke gevolgen van het gebruik van de simulator (zie AGARD-CP-433, 1988). Men onderscheidt drie fenomenen: het voortduren van de simulatorziekte, verstoord houdingsevenwicht (ook zonder directe simulatorziekte) en het plotseling optreden van desoriënterende bewegingssensaties. Benson (1988) suggereert als verklaring voor het eerste fenomeen dat de afbraak van neurotransmitters na beëindiging van de beweging geleidelijk verloopt; voor het tweede fenomeen wijt hij het aan de "sensory rearrangement" ten gevolge van adaptatie (kennelijk gevoeliger te registreren in het houdingsevenwicht dan in het optreden van simulatorziekte) en voor het derde fenomeen blijft hij het antwoord schuldig. Op grond van de overwegingen in § 4.4.1 tot 4.4.3 is het echter de vraag of niet toch alle drie de fenomenen beschreven kunnen worden door de "sensory rearrangement" theorie.

4.4.1 Directe reacties op simulatorgebruik

Net als bij andere vormen van bewegingsziekten kunnen de symptomen van simulatorziekte nog enige tijd aanhouden na beëindiging van de simulatorrun. Hierbij vallen grote interindividuele verschillen op: sommigen herstellen zich meteen terwijl anderen nog uren last kunnen hebben. Kennedy e.a. (1988) melden dat 10% van de door hen onderzochte simulatorgebruikers een aangepast programma van 24 uur kregen na hun simulatorrun vanwege negatieve na-effecten in de zin van bewegingsziekte en verstoord houdingsevenwicht. Hoe lang deze symptomen echter precies duurden wordt uit deze studie niet duidelijk. Léger e.a. (1988) meldden dat dit soort na-effecten zich eigenlijk alleen maar in het eerste kwartier na de simulatorrun voordeden: van langdurige na-effecten is in Frankrijk niets bekend. Op grond van bevindingen bij de RAF suggereert ook Chapelow (1988) echter dat het verstandig is om na een simulatorrun eerst een

nachtje te slapen alvorens weer aan de dagelijkse verplichtingen te moeten voldoen.

4.4.2 Verlate reacties op simulatorgebruik

Het is ook mogelijk dat zich pas uren na gebruik van de simulator symptomen van bewegingsziekte of bewegingsillussies openbaren terwijl er gedurende de simulatorrun zelf in het geheel geen problemen waren (o.a. Magee e.a., 1988). Deze fenomenen zijn vergelijkbaar met het optreden van bewegingsillussies die men na een bootreis kan ervaren. Gezien de aanwezigheid van laagfrequente (scheepsbewegingsachtige) bewegingspatronen van sommige moving-base simulatoren is het zeer goed mogelijk dat deze reacties uitingen van hetzelfde adaptatiemechanisme zijn (zie § 4.2.2). Helaas is nooit gedocumenteerd wat voor bewegingen de mensen maken die dit soort illusies luxeren. Maar als kanteling van het hoofd hierbij een rol speelt is het verleidelijk om aan te nemen dat hier hetzelfde adaptatiemechanisme in het geding is als bij de "centrifugeziekte" (zie § 4.2.2). Intra- en interindividuele verschillen in gevoeligheid voor de verschillende vormen van bewegingsziekte hoeven hier niet noodzakelijkerwijs mee in tegenspraak te zijn: daarvoor is te weinig bekend over de adaptatieprocessen van de verschillende subsystemen.

4.4.3 Verstoord houdingsevenwicht

Bij de meeste simulatorstudies wordt gebruik gemaakt van (onderdelen van) de Ataxia Test Battery zoals ontwikkeld door Graybiel en Fregly (1966), voornamelijk omdat deze test geen speciale registratie-apparatuur behoeft. In alle desbetreffende studies (zie AGARD-CP-433, 1988) is een aantasting van het houdingsevenwicht waar te nemen, ook als er geen sprake is van verschijnselen van simulatorziekte. Benson (1988) ziet dit verstoorde houdingsevenwicht terecht als een gevolg van de adaptatie processen die in gang gezet zijn tijdens de simulatie. Waarschijnlijk zijn de gebruikte testen zoals het staan op één been met de ogen dicht, of het staan met de voeten achter elkaar, eveneens met de ogen dicht, testen die nog voor de eerste bewegingsziekteverschijnselen een bestaande "sensory rearrangement" aan het licht brengen. Een zelfde soort observaties werd gedaan na het langdurig centrifugeren: zonder bewegingsziektesymptomen bleek vijf uur na de centrifugerun het staan met de voeten achter elkaar tot grote instabiliteit te leiden.

4.5 Conclusies

Simulatorziekte is primair het gevolg van een mismatch tussen de visuele en vestibulaire bewegingsinformatie, vnl. wanneer de oriëntatie t.o.v. de zwaartekracht in het geding is. Net als bij andere vormen van bewegingsziekte kan ook adaptatie optreden en moet rekening gehouden worden met (ongewenste) na-effecten. Simulatorziekte blijkt in bepaalde simulatoren meer op te treden dan in andere. Dit suggereert dat er technisch nog het een en ander te verbeteren valt

in termen van het terugbrengen van tijdvertragingen e.d. van de bewegingsstimuli.

Wanneer men de literatuur overziet lijkt het optreden van simulatorziekte sterk afhankelijk van het type simulator: vooral helikopter- en rijsimulatoren blijken aanleiding te geven tot het optreden van simulatorziekte. Aangezien deze simulatoren lineaire versnellingen moeten simuleren en de bewegingspatronen elkaar snel moeten kunnen afwisselen, zal er veel gebruik gemaakt worden van tilting en wash-outbewegingen van de moving-bases met alle mogelijkheden van ongewenste bovendrempelige vestibulaire stimulatie wat kan leiden tot de generatie van mismatch signalen. Voor dit soort simulatoren is het dus van belang om te onderzoeken of de winst in training op een moving-base simulator opweegt tegen de nadelige effecten van het optreden van simulatorziekte. In ieder geval zal rekening gehouden moeten worden met de mogelijkheid dat er na-effecten van het simulatorgebruik optreden.

5 SLOTCONCLUSIES EN SUGGESTIES VOOR VERVOLG-ONDERZOEK

5.1 Slotconclusies

De literatuur is niet eenduidig over de vraag of (en zo ja, in welke mate) mechanische bewegingsinformatie voor het (trainen van) stuurgedrag in een simulator gewenst is. Complete transfer-of-training studies zijn nauwelijks voorhanden. Toch kan men wel uit de literatuur afleiden dat bij het trainen van bepaalde stuurtaken mechanische bewegingsinformatie gewenst is. Globaal kan men stellen dat het visuele systeem gevoelig is voor laagfrequente en het vestibulaire systeem voor hoogfrequente bewegingsinformatie. Men onderscheidt daartoe de bij het sturen optredende bewegingen in verstoringsbewegingen en manoeuvreerbewegingen.

Verstoringsbewegingen (van buitenaf optredend, dus de responsie van b.v. een wielvoertuig op zijwind, of van een vliegtuig op baancontact bij het landen) hebben een snelle onset en voorspelbare karakteristieke voertuigresponsies. **Mechanische simulatie van deze bewegingen is derhalve gewenst** omdat de bestuurder juist op dit soort bewegingen moet leren reageren. Aangezien deze bewegingen een hoogfrequent karakter hebben, kunnen ze niet louter visueel gesimuleerd worden.

Manoeuvreerbewegingen zijn het resultaat van de handelingen van de bestuurder. Bij het manoeuvreren met een **instabiel** voertuig (b.v. helikopter) zijn er hoogfrequente besturingshandelingen en zal men dus gebruik moeten maken van mechanische bewegingsinformatie ter aanvulling van de visuele bewegingscues.

Bij het besturen van een voertuig met een **stabiel** dynamisch gedrag is mechanische bewegingsinformatie in het algemeen **niet** nodig: de resulterende bewegingen hebben vaak een laagfrequent karakter en de mechanische bewegingscues

zijn derhalve veelal redundant aan de visuele bewegingscues. Men dient zich hierbij te realiseren dat bij het ondergaan van de echte beweging fysiologische reacties kunnen optreden die bij een puur visuele simulatie ontbreken; daarom is het mogelijk dat ongewenste reacties optreden in de zin van simulatorziekte.

Enige differentiatie tussen rij-, vaar- en vliegsimulatoren is gewenst.

- a *Scheepssimulatoren.* Vanwege de traagheid waarmee schepen op stuuracties reageren is voor het trainen van stuurgedrag visuele en instrumentele terugkoppeling voldoende. Simulatoren waarin hierop getraind wordt betreffen dan ook voornamelijk fixed-base simulatoren. Ook voor trainen van bemanningen in commandocentrales e.d. is een fixed-base simulator afdoende. Een geheel andere vraag is of scheepsbewegingen op de taakuitvoering indirect een negatieve invloed hebben. Het zal duidelijk zijn dat men hiervoor een moving-base simulator nodig heeft die de scheepsbewegingen geheel en al nabootst. Eerst dan is na te gaan of het uitvoeren van bepaalde taken fysiek nog mogelijk is (b.v. bewaren van het houdingsevenwicht) en of het optreden van zeeziekte de taakuitvoering negatief beïnvloedt.
- b *Rijsimulatoren.* Voor het trainen van het uitvoeren van stabiele manoeuvres zoals het rechtrijden, gasgeven, rijden in flauwe bochten en het (langzaam) keren, parkeren en achteruitrijden wordt een moving-base niet als noodzaak gezien om een bevredigende transfer of training te bewerkstelligen: bewegingscues kunnen afdoende geleverd worden door het beeldsysteem. Aange-toond is dat het aanbieden van mechanische trillingen via een rollenbank ertoe leidt dat taken als inhalen, rijden over een niet te bochtige weg, koershouden bij zijwind en het volgen van een voorligger ook valide gesimuleerd kunnen worden. Voor het simuleren van manoeuvres onder instabiele omstandigheden zoals b.v. het maken van noodstops, hellingtrekken, het sturen in scherpe bochten en terreinrijden is echter een complete moving-base vereist. Aangezien bij deze manoeuvres snelle bewegingen in het geding zijn moeten hoge eisen gesteld worden aan het systeem aangaande de delays in de bewegingscues na besturingsacties, alsmede aan de onderlinge afstemming van visuele en mechanische bewegingscues. Desalniettemin kunnen bij het simuleren van deze manoeuvres ook problemen verwacht worden: immers, lineaire versnellingen kunnen slechts kort aangeboden worden (beperkte slag) of dienen gesimuleerd te worden door middel van scheefstand (waardoor ook rotatie optreedt). Bovendien moet elke moving-base beweging door een wash-outbeweging gevolgd worden. In de praktijk blijkt dat voor het eenmalig simuleren van de meeste bovengenoemde manoeuvres dergelijke "getructe" simulatorbewegingen tot het gewenste percept leiden indien er een goede afstemming is met de visuele informatie. Het geeft dan ook geen aanleiding tot problemen als simulatorziekte. Echter, bij elkaar snel opvolgende of gecombineerde bewegingen zoals bij het terreinrijden kunnen deze noodzakelijke "additionele" simulatorbewegingen tot ongewenste vestibulaire gewaarwordingen leiden en in extremo tot het optreden van simulatorziekte. Het is hier dus zaak om de bewegingscues ter ondersteuning van de visuele bewegingscues zo zwak mogelijk te maken zonder de geloofwaardigheid aan te tasten. In hoeverre deze bewegingen hiertoe moeten overeenkomen met de

echte beweging is slechts matig gedocumenteerd, ofschoon reducties tot 25 en 50% genoemd worden. Het ligt voor de hand om hier het onderste uit de kan te halen aangezien elke winst die hier behaald wordt de wash-outbeweging vermindert en derhalve het genereren van ongewenste mismatchsignalen reduceert. Of in de praktijk rijssimulatoren hier optimaal afgesteld zijn laat zich niet uit de literatuur afleiden.

- c *Vliegsimulatoren.* Bij de meeste simulatoren voor verkeersvliegtuigen is de mechanische beweging van de moving-base redundant aan de visueel geïnduceerde beweging bij stabiele manoeuvreerbewegingen: er is dan ook in die situaties niet te verwachten dat een moving-base de transfer of training positief zal beïnvloeden (ook al zal de natuurgetrouwheid van de simulator er wel mee gediend zijn). Positieve trainingsresultaten worden wel gemeld in moving-base simulatoren voor instabiele manoeuvreerbewegingen waarbij een helikopter boven een landingsplatform van een eveneens bewegend schip hangt. In deze situatie kunnen de vestibulaire cues dus kennelijk helpen om te bepalen welk deel van de visueel waargenomen hoogteveranderingen tussen helikopter en landingsplatform het gevolg is van eigenbeweging, dus van de helikopterbeweging.

Een vliegtuig kan bewegingen uitvoeren die vestibulaire stimulatie tot gevolg hebben die in een simulator niet nagebootst kan worden. Hierbij moet men denken aan:

G-belasting. De resulterende G-belasting in een vliegtuig kan sterk variëren. Enerzijds wordt geclaimd dat met geavanceerde simulatoren de (ervaren) vlieger een gevoel van 4 à 5 G gegeven kan worden door combinatie van een "echte" 2 G (door centrifugeren) met G-seats en andere somatosensorische bewegingscues. Strainingmanoeuvres e.d. zijn bij een dergelijke simulatie, in tegenstelling tot de werkelijkheid, niet nodig en eerder contraproductief; ook zullen de vestibulaire reflexen onder de echte G-belasting anders zijn. Wil men daarentegen juist het strainen testen dan is natuurlijk met een centrifuge een met de werkelijkheid overeenkomende hoge G-belasting te genereren, zij het dat die altijd gepaard gaat met hoge hoeksnelheden die in het echt ontbreken en in de centrifuge aanleiding kunnen geven tot sterke draaiduizeligheid, misselijkheid en/of braken.

Aerobatics. Een ander probleem bij vliegsimulatoren is dat in de meeste simulatoren de roll- en pitchhoeken beperkt zijn: aerobatics of bewegingen van high-performance aircraft laten zich dus moeilijk simuleren. Probeert men deze bewegingen toch met een moving-base te genereren dan blijkt dit aanleiding te geven tot het optreden van simulatorziekte. Het simuleren van dit soort bewegingen blijkt in de praktijk beter te functioneren met een fixed-base: kennelijk is het in deze configuratie gegenereerde mismatch signaal beter te verwerken dan het in een moving-base gegenereerde signaal.

Desoriëntatie. Voor het simuleren van het optreden van desoriëntatie is een moving-base simulator vereist. Indien het alleen demonstratie betreft kan de simulator uiterst eenvoudig zijn; indien training beoogd wordt dient men aan een full-scale moving-base simulator te denken om vestibulaire bewegingsillusies te kunnen genereren.

Na-effecten. Er ontstaat een groeiende bezorgdheid over het optreden van na-effecten bij simulatorgebruik. Veelal wordt er geadviseerd om gedurende 24 uur na een simulatorrun een aangepast programma te draaien. Het precieze karakter en mechanisme achter deze na-effecten is echter maar matig bekend.

In zijn algemeenheid kan men stellen dat de vraag of men een rij-, vaar- of vliegsimulator met een fixed-base of een moving-base moet uitrusten afhankelijk is van het leerdoel:

Vaarsimulator	fixed-base	- trainen van alle (stuur)taken.
	moving-base	- bestudering van invloed scheepsbewegingen op zeeziekte-incidentie en op taakprestatie en bewaren van houdingsevenwicht.
Rijsimulator	fixed-base	- trainen zeer stabiele manoeuvreerbewegingen.
	rollenbank	- trainen stabiele manoeuvreerbewegingen.
	moving-base	- trainen instabiele manoeuvreerbewegingen en reacties op verstoringbewegingen.
Vliegsimulator	fixed-base	- trainen stabiele manoeuvreerbewegingen en manoeuvres die in moving-base leiden tot optreden simulatorziekte
	moving-base	- trainen instabiele manoeuvreerbewegingen, trainen reacties op verstoringbewegingen, trainen van weerbaarheid tegen G-belasting (centrifuge), demonstreren van desoriëntatie, en eventueel desoriëntatietraining.

5.2 Suggesties voor vervolgonderzoek

- Het opstellen van een 3-dimensionaal model voor het vestibulaire systeem is zeer gewenst teneinde meer inzicht te krijgen in het samenspel van het vestibulaire systeem met de andere zintuigen: dit is van belang voor een betere afstemming van de bewegingen van de moving-base.
- Experimenten over de meest "zuinige" vestibulaire ondersteuning van het visuele beeld voor een natuurgetrouwe sensatie bij verschillende typen beweging.
- Meer kennis moet verzameld worden over de mechanismen die ten grondslag liggen aan simulatorziekte, waarbij de nadruk moet liggen op de adaptatie-operatoren vanwege het optreden van negatieve na-effecten.
- Wegens het gebrek aan transfer of training studies verdient het aanbeveling een full-scale TOT studie uit te voeren voor een leerdoel waarbij een moving-base simulator van nut kan zijn.

REFERENCES

- AGARD Advisory Report 144 (1979). Dynamic characteristics of flight simulator motion systems. NATO, AGARD-AR-144.
- AGARD Advisory Report 159 (1980). Fidelity of simulation for pilot training. NATO, AGARD-AR-159.
- AGARD Conference Proceedings 433 (1988). Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. NATO, AGARD-CP-433.
- Arrott, A.P., Young, L.R. & Merfield, D.M. (1990). Perception of linear acceleration in weightlessness. *Aviat. Space Environ. Med.* 61, 319-26.
- Baarspul, M. (1989). Lecture notes on flight simulation techniques. Report LR-596, Delft University of Technology.
- Benson, A.J. (1984). Motion sickness. In: *Vertigo* (Eds M.R. Dix & J.D. Hood), Chichester: J. Wiley & Sons.
- Benson, A.J., Kass, J.R. & Vogel, H. (1986a). European vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: Thresholds of perception of whole-body linear oscillation. *Exp Brain Res.* 64: 264-271.
- Benson, A.J., Spencer, M.B. & Stott, J.R.R. (1986b). Thresholds for the detection of the direction of whole-body, linear movement in the horizontal plane. *Aviat. Space Environ. Med.* 57, 1088-1096.
- Benson, A.J. (1988). Aetiological factors in simulator sickness. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 3: 1-8.
- Benson, A.J., Hutt, E.C.B. & Brown, S.F. (1988). Thresholds for the perception of whole-body angular movement about a vertical axis. RAF Institute of Aviation Medicine, Farnborough, UK.
- Benson, A.J., Hutt, E.C.B. & Brown, S.F. (1989). Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis. *Aviat. Space Environ. Med.* 60, 205-213.
- Benson, A.J. & Brown, S.F. (1989). Visual display lowers detection threshold of angular, but not linear, whole-body motion stimuli. *Aviat. Space Environ. Med.* 60, 629-633.
- Blaauw, G.J. (1979). Simulatie en wegonwerp. Rapport 1979-C21, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Blaauw, G.J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study. *Human Factors* 24(4), 473-486.
- Bles, W. (1981). Stepping Around: Circular Vection and Coriolis Effects. In: *Attention and Performance IX* (Eds J. Long & A. Baddeley), Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bles, W., Bos, J.E., Furrer, R., Graaf, B. de, Hosman, R.J.A.W., Kortschot, H.W., Krol, J.R., Kuipers, A., Marcus, J.T., Messerschmid, E., Ockels, W.J., Oosterveld, W.J., Smit, J., Wertheim, A.H. & Wientjes, C.J.E. (1989). Space Adaptation Syndrome induced by a long duration +3Gx centrifuge run. Rapport IZF 1989-25, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Boer, J.P.A. (1991). Een stappenplan voor de aanschaf van simulatoren. Concept-rapport, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Boldovici, J.A. (1987). Measuring transfer in military settings. In: *Transfer of learning. Contemporary research and applications* (Eds S.M. Cormier & J.D. Hagman). Academic Press, Inc.
- Borah, J., Young, L.R. & Curry, R.E. (1988). Optimal estimator model for human spatial orientation. In: *Representation of three-dimensional space in the vestibular, oculomotor, and visual systems*. Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 545.

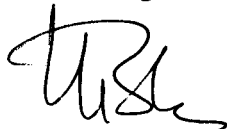
- Bose, E.B., Leavy, W.P. & Ramachandran, S. (1981). Improved G-cueing system. Flight simulation technologies conference, Long Beach. AIAA Conf. Proc. No. 813, 139-146.
- Brandt, Th., Dichgans, J. & Koenig, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Exp. Brain Res.* 16, 476-491.
- Brandt, Th., Büchele, W. & Arnold, F. (1977). Arthrokinetic nystagmus and ego-motion sensation. *Exp. Brain Res.* 30, 331-338.
- Brown, J.L. (1975). Visual elements in flight simulation. Report of Working Group 34, Committee on vision, Assembly of Behavioral and Social Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington.
- Caro, P.W. (1979). The relationship between flight simulator motion and training requirements. *Human Factors* 21(4), 493-501.
- Casali, J.G. & Wierwille, W.W. (1980). The effects of various design alternatives on moving-base driving simulator discomfort. *Human Factors* 22, 741-756.
- Casali, J.G. & Frank, L.H. (1988) Manifestation of visual/vestibular disruption in simulators: severity and empirical measurement of symptomatology. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 11: 1-18.
- Chapelow, J.W. (1988). Simulator sickness in the Royal Air Force: A survey. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 6: 1-11.
- Cohen, E. (1970). Is motion needed in flight simulators used for training? *Human Factors* 12(1), 75-79.
- De Boer, R.J. (1988). Human whole body-motion sensitivity with unrestrained head. Project nr. A3.22.74, Delft University of Technology.
- Dichgans, J. & Brandt, Th. (1973). Optokinetic motion sickness and pseudo-Coriolis effects induced by moving visual stimuli. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 76, 339-348.
- Di Stefano, J.J., Stubberud, A.R. & Williams, I.J. (1967). Feedback and control systems. Schaum's outline series. New York: McGraw-Hill.
- Drosdol, J. & Panik, F. (1985). The Daimler-Benz driving simulator: a tool for vehicle development. SAE paper 850334. International Congress & Exposition, Detroit, Michigan.
- Flexman, R.E. & Stark, E.A. (1987). Training simulators. In: Handbook of human factors (pp. 1012-1038) (Ed. G. Salvendy), New York: Wiley & Sons.
- Frank, L.H., Casali, J.G. & Wierwille, W.W. (1988). Modelling operator control performance and well-being as a function of simulator visual and motion system transport delays. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 12: 1-7.
- Gower, D.W., Lilienthal, M.G., Kennedy, R.S. & Fowlkes, J.E. (1988). Simulator sickness in US Army and Navy fixed- and rotary-wing flight simulators. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 8: 1-20.
- Graaf, B. de (1990). Influence of eye movements on visual perception. Thesis, University of Utrecht.
- Gray, T.H. (1982). Manual reversion flight control system for a-10 aircraft: pilot performance and simulator cue effects. AFHRL-TR-81-53, Air Force Human Resources Laboratory, Williams AFB, AZ.
- Graybiel, A. & Fregly, A.R. (1966). A new quantitative ataxia test battery. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 61, 293-312.
- Greven, A.J., Oosterveld, W.J. & Rademakers, W.J.A.C. (1974). Linear acceleration perception. *Arch. Otolaryngol.* 100, 453-459.

- Guedry, F.E. (1974). Psychophysics of vestibular sensation. In: Handbook of sensory physiology VI/2 (pp. 3-154) (Ed. H.H. Kornhuber). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Guedry, F.E. & Benson, A.J. (1978). Coriolis cross-coupling effects: disorienting and nauseogenic or not? *Aviat. Space Environ. Med.* 49, 29-35.
- Gundry, A.J. (1977). Thresholds to roll motion in a flight simulator. *Journal of Aircraft* 14, 624-630.
- Haug, E.J. e.a. (1990). Feasibility study and conceptual design of a national advanced driving simulator. Center for simulation and design optimization of mechanical systems, College of Engineering, The University of Iowa, Iowa City.
- Hays, R.T. & Singer, M.J. (1988). Simulation fidelity in training system design, bridging the gap between reality and training. Recent research in psychology. New York: Springer-Verlag.
- Hess, R.A. (1990). Analyzing manipulator and feel system effects in aircraft flight control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 4, 923-931.
- Hosman, R.J.A.W. & Van der Vaart, J.C. (1978). Vestibular models and thresholds of motion perception. Results of tests in a flight simulator. Report LR-265, Delft, Netherlands: Delft University of Technology, Department of Aerospace Engineering.
- Kennedy, R.S., Berbaum, K.S., Allgood, G.O., Lane, N.E., Lilienthal, M.G. & Baltzley, D.R. (1988). Etiological significance of equipment features and pilot history in simulator sickness. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 1: 1-22.
- Korteling, J.E. & Padmos, P. (1990). De Leopard II rijsimulator als leerhulpmiddel. Rapport 1990 A-3, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Korteling, J.E. & Randwijk, M.J. van (1991). De inzet van simulatoren en verkeersoefenterreinen in de militaire rijopleiding: literatuurstudie en advies. Rapport in voorbereiding, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Léger, A., Sandor, P. & Delahaye, R.P. (1988). Etude horizontale de l'incidence du mal des simulateurs dans les forces aériennes françaises. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 4: 1-7.
- Lintern, G.D.C., Thomley, K. & Nelson, B. (1983). Visual display manipulations for simulation training air to ground attack. Proceedings of the International Conference on Simulators, September 1983. Brighton: University of Sussex.
- Lintern, G., Wightman, D.C. & Westra, D.P. (1984). An overview of the research program at the visual technology research simulator. In: Proceedings IMAGE III Conference (pp. 206-221) (Ed. E.G. Monroe). Orlando, FL: Naval Training Equipment Center.
- Lintern, G. (1987). Flight simulation motion systems revisited. *Human Factors Society Bulletin* 30(12), December 1987.
- Magee, L.E., Kantor, L. & Sweeney, D.M.C. (1988). Simulator sickness among Hercules aircrew. In: AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 5: 1-8.
- Martin, E.L. (1981). Training effectiveness of platform motion: Review of motion research involving the advanced simulator for pilot training and the simulator for air-to-air combat. AFHRL-TR-79-51, Air Force Human Resources Laboratory, Williams AFB, AZ.
- Mayne, R. (1974). A systems concept of the vestibular organs. In: Handbook of sensory physiology VI/2 (pp. 493-580) (Ed. H.H. Kornhuber). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

- McLane, R.C. & Wierwille, E.S. (1975). The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator. *Human Factors* 17(5), 448-501.
- McRuer, D.T. & Jex, H.R. (1967). A review of quasi-linear pilot models. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE 8, No. 3, 231-249.
- Meiry, J.L. (1965). The vestibular system and human dynamic space orientation. Report T-65-1, Cambridge, MA: MIT.
- Melvill Jones, G. & Young, L.R. (1978). Subjective detection of vertical acceleration: a velocity-dependent response? *Acta Otolaryngol.* 85, 45-53.
- Mittelstaedt, H., Glasauer, S., Gralla, G. & Mittelstaedt, M.-L. (1989). How to explain a constant subjective vertical at constant high speed rotation about an earth-horizontal axis. *Acta Otolaryngol. (Stockh) Suppl.* 468, 295-299.
- Mooij, H.A. (1988). Technology involved in the simulation of motion cues: the current trend. AGARD Conf. Proc. No. 433, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. 2: 1-5.
- Moraal, J. & Poll, K.J. (1979). De Link-Miles rijnsimulator voor pantservoertuigen; verslag van een validatie-onderzoek. Rapport IZF 1979-23, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Moraal, J. (1981). Evaluating simulator validity. In: *Manned systems design, methods, equipment, and applications* (Eds J. Moraal & K.-F. Kraiss). New York, London: Plenum Press.
- Moraal, J. (1988). Validatie van simulatoren. In: *Symposiumboek simulatie: een veelzijdig hulpmiddel bij training, nabootsing en onderzoek*, 17 maart, 's-Gravenhage 1988: 59-70.
- Moraal, J. & Meeteren, A. van (1990). Validatie van trainingssimulatoren. *Militaire Spectator* 159/2, 75-80.
- Mulder, W. (1908). Quantitatieve betrekking tusschen prikkel en effect bij het statisch orgaan. Dissertatie Rijksuniversiteit Utrecht.
- O'Hanlon, J.F. & McCauley, M.E. (1974). Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of a vertical sinusoidal motion. *Aerospace Medicine* 45(4), 366-369.
- Oman, C.M. (1982). A heuristic mathematical model for the dynamics of sensory conflict and motion sickness. *Acta Otolaryngol. (Stockholm) Suppl.* 392, 1-44.
- Padmos, P. (1989). Visual modelling errors in the Leopard II driving simulator. Rapport 1989-6, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Poll, K.J. (1980). Invloeden op de trainingsoverdracht. Memo IZF 1980-M17, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Povenmire, H.K. & Roscoe, S.N. (1973). Incremental transfer effectiveness of a ground-based general aviation trainer. *Human Factors* 15, 534-542.
- Probst, Th., Straube, A. & Bles W. (1985). Differential effects of ambivalent visual-vestibular-somatosensory stimulation on the perception of self-motion. *Behav. Brain Res.*, 16, 71-79.
- Reason, J.T. & Brand, J.J. (1975). *Motion Sickness*. London: Academic Press.
- Ricard, G.L. & Parrish, R.V. (1984). Pilot differences and motion cuing effects on simulated helicopter hover. *Human Factors* 26(3), 249-256.
- Rolfe, J.M. & Staples, K.J. (1986). *Flight simulation*. Cambridge University Press.
- Roscoe, S.N. (1971). Incremental transfer effectiveness. *Human Factors* 13, 561-567.
- Roscoe, S.N. & Williges, B.H. (1980). Measurement of transfer of training. Chapter 16 in: *Aviation psychology* (Ed. S.N. Roscoe), The Iowa State University Press.
- Schilder, A.J. (1990). Met het hoofd in de wolken en de voeten op de grond. Literatuurstudie, Nederlands Instituut voor Praeventieve Gezondheidszorg TNO, Leiden.

- Sinacori, J.G. (1967). V/STOL ground based simulation techniques. USAAV LABS Technical Report No. 67-55. Fort Eustis, Vancouver: Aviation Material Laboratories.
- Taylor, H.L. (1985). Training effectiveness of flight simulators as determined by transfer of training. Bijdrage aan: Symposium on the transfer of training to military operational systems, Brussels, September 1985.
- Van der Vaart, J.C. & Hosman, R.J.A.W. (1987). Compensatory tracking in disturbance tasks and target following tasks. The influence of cockpit motion on performance and control behaviour. Report LR-511, Delft University of Technology.
- Waag, W.L. (1981). Training effectiveness of visual and motion simulation. AFHRL-TR-79-72, Air Force Human Resources Laboratory, Williams AFB, AZ.
- Walsh, E.G. (1961). Role of the vestibular apparatus in the perception of motion on a parallel swing. *J. Physiol.* 155, 506-513.
- Wertheim, A.H. (1990). Visual, vestibular and oculomotor interactions in the perception of object-motion during ego-motion. In: *The perception and control of self-motion* (pp. 145-170) (Eds R. Warren & A.H. Wertheim), Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- White, A.D. (1989). G-seat heave motion cueing for improved handling in helicopter simulators. AIAA Flight Simulation Technologies Conference and Exhibit, August 14-16, Boston 1989: 101-108.
- Wojcik, C.K. & Weir, D.H. (1970). Studies of the driver as a control element - phase 2. Report No. 70-73, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Los Angeles.
- Young, L.R. & Meiry, J.L. (1968). A revised dynamic otolith model. *Aerospace Med.* 39, 606-608.
- Young, L.R. (1979). Visually induced motion in flight simulation. In AGARD Conf. Proc. No. 249, Piloted aircraft environment simulation techniques. 16: 1-8.

Soesterberg, 12 april 1991



Dr. W. Bles

APPENDIX Begrippenlijst

Absolute validiteit: Een systeem is valide in absolute zin wanneer het uitgelokte gedrag kwantitatief vrijwel identiek is aan dat van de praktijk.

Control force loading: Bedieningskrachten - de directe terugkoppeling die haptisch wordt waargenomen bij bediening van knoppen, schakelaars en andere bedieningsmiddelen.

Cues: De meest algemeen voorkomende invarianten die op consistente wijze samenhangen met de statische en dynamische kenmerken van de waarnemer en zijn omgeving.

Face validity: De mate waarin een leerhulpmiddel voor de gebruiker geloofwaardig overkomt.

Fidelity: Natuurgetrouwheid, de mate van fysieke overeenkomst tussen de simulator en het operationele systeem.

Haptische waarneming: Het via sensoren in huid, spieren, pezen en gewrichtskapsels waarnemen van de buitenwereld ("tactiele waarneming") en de positie en toestand van lichaamsdelen ("somato-sensorische" waarneming, "proprioceptie").

Leeroverdracht: De mate waarin er na training op een simulator nog extra training in de praktijk nodig is om een gewenst leerdoel te bereiken. Hoe minder extra training nodig is, hoe hoger de leeroverdracht.

Onset: Kortdurende schok die discontinuïteiten (begin of einde) in een beweging representeert.

Mechanische database: Het model van de mechanische omgeving in de vorm van de weg en terreinkenmerken en obstakels.

Relatieve validiteit: Een systeem is valide in relatieve zin wanneer de (relatieve) effecten op het gedrag van experimentele variabelen overeenkomstig de werkelijkheid zijn.

Simulator: Een kunstmatig systeem dat met behulp van een wiskundig model een bestaand systeem, of een gedeelte daarvan, nabootst.

Taakomgeving: Dat gedeelte van de werkelijkheid, of representatie daarvan, in interactie waarmee de taak wordt uitgevoerd.

Tilting: kanteling van het bewegingsplatform.

Validiteit: De mate waarin een leerhulpmiddel hetzelfde gedrag uitlokt als in werkelijkheid onder gelijksoortige omstandigheden, ook wel "gedragsovereenkomst" genoemd.

Vestibulaire waarneming: Het waarnemen van rotationele en lineaire versnelingen (waarvan de belangrijkste de richting van de zwaartekracht is) via het vestibulaire systeem in het binnenoor.

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD 91-0046	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER IZF 1991 A-17
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 738	5. CONTRACT NUMBER A90/K/330	6. REPORT DATE April 12, 1991
7. NUMBER OF PAGES 53	8. NUMBER OF REFERENCES 89	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Motion perception in moving-base simulators		
11. AUTHOR(S) W. Bles, J.E. Korteling, J.T. Marcus, J.B.J. Riemersma and J. Theeuwes		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Institute for Perception Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Director Defence Research and Development Plein 4 2511 CR DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) The present report is a literature review about the influence of a moving-base simulator on motion perception, transfer of training and simulator sickness incidence. First vestibular thresholds and sensations are reviewed, followed by a discussion of the effects of additional visual and tactile cues and the consequences for moving-base simulators. Subsequently methods and investigations concerning transfer of training are discussed for the transition from simulator to the real system in case of a moving-base simulator. Finally the mechanisms of simulator sickness are discussed and the consequences of a moving-base on simulator sickness incidence.		
16. DESCRIPTORS Simulators Vestibular Perception Training Transfer of Training Motion Sickness Motion Perception		IDENTIFIERS Simulator Sickness Fixed-base versus Moving-base Simulators
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) -	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) -	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) -
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Mailing list only		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) -