

Nederlandse organisatie
voor toegepast
natuurwetenschappelijk
onderzoek

IZF

Instituut voor
Zintuigfysiologie TNO

TNO-rapport

AD-A257 726



Postbus 23
3769 ZG Soesterberg
Kampweg 5
3769 DE Soesterberg
Telefax 03463 - 5 39 77
Telefoon 03463 - 5 62 11

①

TD
91-2164

IZF 1991 B-6
M.V. Milders
P. Padmos

EISEN VOOR BUTTENBEELDEN VAN
VOERTUIGSIMULATOREN;
EEN LITERATUURSTUDIE

02

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.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

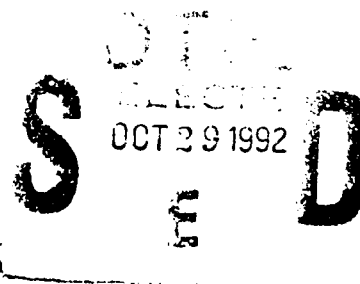
Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten TNO', dan wel de betreffende
terzake tussen partijen gesloten
overeenkomst.

© TNO

TDCK RAPPORTENCENTRALE
Frederikkazerne, Geb. 140
van den Burchlaan 31
Telefoon: 070-3166394/6395
Telefax : (31) 070-3166202
Postbus 90701
2509 LS Den Haag

TDCK

Use of exterior pictures in vehicle simulators. A literature survey



Aantal bladzijden: 102

DISTRIBUTION STATEMENT

Approved for public release;
Distribution Unlimited

179820

92-28397



10408

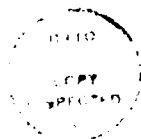
TNO

00 10 28 007

INHOUD

	Blz.
SAMENVATTING	5
SUMMARY	6
1 INLEIDING	7
1.1 Vraagstelling	7
1.2 Inhoud en indeling van dit rapport	8
1.3 Opleiding en onderzoek met voertuigsimulatoren	9
1.4 Opbouw van simulatoren	11
1.5 Totstandkoming van beelden in CGI-systemen	13
1.6 Bepalen van kwaliteitseisen	15
1.7 Literatuur	17
2 HET VISUEEL WAARNEMEN VAN DE OMGEVING	19
2.1 Basisgegevens over het menselijk visueel systeem	19
2.2 Waarnemen van diepte en beweging	20
2.3 Visuele informatie voor een bestuurder	24
2.4 Visuele informatie in simulatoren	26
3 FYSISCH BEELDEIGENSCHAPPEN	28
3.1 Veldgrootte	28
3.2 Beeldpresentatie	32
3.3 Luminantie	36
3.4 Contrast-ratio	38
3.5 Beeldresolutie	40
3.6 Kleur- en helderheidsstappen	44
3.7 Bijwerkfrequentie (update frequency)	46
3.8 Opfrisfrequentie (refresh rate)	48
3.9 Beeldvertraging	50
3.10 Anti-aliasing	52
4 BEELDCAPACITEIT	57
4.1 Polygonen/kanaal	57
4.2 Maximale zichtbaarheidsafstand van objecten (depth of field)	60
4.3 Continu beschikbaar terrein (gaming area)	61
5 POLYGOON BEWERKINGEN	63
5.1 Niveaus van detail (level of detail)	63
5.2 Textuur	65
5.3 Bewegende textuur	68
5.4 Transparante polygonen	69
5.5 Schaduw-effecten	69

6	LICHT- EN ZICHTEFFECTEN	72
6.1	Meteorologische effecten	72
6.2	Tijd-van-de-dag effecten	73
6.3	Lichten	74
7	BEWEGENDE OBJECTEN	76
7.1	Bewegende voertuigen	76
7.2	Bewegende onderdelen van stationaire of bewegende objecten	76
7.3	Animatie-effecten	78
8	SIMULATIE VAN (ELECTRO-)OPTISCHE HULPMIDDELEN	79
8.1	Achteruitkijkspiegels en verrekijkers	79
8.2	Helderheidsversterkers en warmtebeelden	80
8.3	Middelen om afstand te bepalen	80
9	INTERACTIES VAN HET VOERTUIG MET DE OMGEVING	81
9.1	Terrein interacties	81
9.2	Botsingen met objecten	81
10	MODELLEER HULPMIDDELEN	83
10.1	Afdekken van objecten (occluding)	83
10.2	Overload management	85
10.3	Line of sight ranging	86
10.4	Modelleerstation	86
11	INSTRUCTIE HULPMIDDELEN	87
11.1	Vijand detectie (threat occluding)	87
11.2	Beïnvloeden gesimuleerde omgeving	87
12	OVERZICHT VAN GEVONDEN KWALITEITSEISEN	88
13	SLOTBESCHOUWING	92
	REFERENTIES	95



Accession For	
NTIS CRA&I	☒
DTIC TAB	☐
Unannounced	☐
Justification	
By	
Distribution /	
Availability Codes	
Dist	Avail and/or Special
A-1	

Rapport nr.: IZF 1991 B-6

Titel: Eisen voor buitenbeelden van voertuigsimulatoren;
een literatuurstudie

Auteurs: M.V. Milders en dr. P. Padmos

Instituut: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO
Afd: Visuologie

Datum: juni 1991

DO Opdrachtnummer: B91-13

Numer in MLTP: 731.2

SAMENVATTING

Onder voertuigsimulatoren wordt in het volgende verstaan: alle simulatoren die een bepaald vervoermiddel simuleren voor gebruik in opleiding of onderzoek. Hiertoe behoren ondermeer vliegtuig-, helicopter-, auto-, tank- en scheepssimulatoren.

Om kennis die wordt opgedaan in een voertuigsimulator over te kunnen dragen naar de besturing van het echte voertuig, dient de kwaliteit van de simulatie van de visueel waargenomen omgeving aan bepaalde maatstaven te voldoen. Het perfect imiteren van die visuele omgeving is daarbij vaak niet nodig. In dit rapport zijn de eisen, te stellen aan de kwaliteit van de getoonde omgevingsbeelden in voertuigsimulatoren, zo goed mogelijk gefundeerd. Daarbij werd zoveel mogelijk rekening gehouden met het type voertuig dat gesimuleerd wordt en de taken die daarin worden uitgevoerd.

De geraadpleegde literatuur handelt over de eigenschappen van het menselijk visueel systeem en over de visuele informatie die door waarnemers wordt gebruikt voor het adequaat uitvoeren van een taak in een voertuig. Daarnaast is ook gebruik gemaakt van "(quasi)transfer of training" - en prestatie-studies in simulatoren, waarbij men de kwaliteit van de beelden varieerde.

Een groot aantal beeldeigenschappen worden hoofdstuksgewijs behandeld. Naast fysische eigenschappen, die vooral met de beeldpresentatie te maken hebben, is vooral ook aandacht besteed aan de beeldinhoud. Geprobeerd is om bij elk kenmerk, en per type taak, tot een conclusie te komen omtrent het vereiste niveau van weergave, met het oog op de gewenste validiteit van de simulatie. Veel van de eigenschappen zijn alleen van toepassing op computer-gegenereerde beelden (CGI); slechts enkele ook op video-maquette beelden. Over sommige van de besproken beeldeigenschappen was bijzonder weinig informatie te vinden. Daarom moest de behandeling hiervan onvolledig blijven.

Het rapport mondt uit in een overzicht van de te stellen kwaliteitseisen voor beeldeigenschappen, uitgesplitst naar kritische- en niet-kritische taken.

In een slotbeschouwing wordt gewezen op de moeilijkheid om in algemene zin te spreken over benodigde beeldeigenschappen voor training en onderzoek. Ook worden suggesties gegeven voor verder onderzoek hiernaar. Benadrukt wordt dat het werken met simulatoren een grote investering aan expertise, techniek en organisatie vergt.

Requirements for outside-world images of vehicle simulators; a literature survey

M.V. Milders and P. Padmos

SUMMARY

In the following, the term vehicle simulator includes flight, driving, and ship simulators, in use for training or research.

In order to transfer knowledge, acquired on a vehicle simulator, to the control of a real vehicle, the quality of simulation of images from the outside world has to meet certain criteria. Perfectly imitating the real world is not required in general. In this report, the requirements to be made to the images shown in vehicle simulators are founded as well as possible, taking into account the type of simulated vehicle and the tasks to be performed in the simulator.

The literature consulted deals with the properties of the human visual system and with the visual information used by vehicle operators. Incorporated are studies of performance or (quasi-)transfer of training, in relation to image properties.

A large number of image features is treated per chapter. In addition to physical properties, related primarily to image presentation, attention has been paid to image content. Attempts were made to formulate explicit conclusions, per feature and task type, on the required level of reproduction, taking into account the desired validity of simulation.

Many of the features treated apply exclusively to Computer Generated Images (CGI); some apply also to video-modelboard image systems. For some features there was a paucity of information, therefore these features had to be treated incompletely.

The report culminates into a tabulated summary of quality requirements, separating out critical and non-critical tasks.

In a closing regard, the difficulty to speak in general terms on image properties required for training and research is indicated. Suggestions for further research are given. It is stressed that working with simulators demands a large investment in expertise, technique, and organization.

Song of the simulator - CHORUS

It's only a paper moon
 Hanging over a cardboard sea,
 But it wouldn't be make believe
 If you'd believe in me.

Op. cit. Roscoe (1980)

1 INLEIDING

In dit rapport wordt het woord voertuigsimulator gebruikt om alle simulatoren aan te duiden die een bepaald vervoermiddel simuleren, inclusief de omgeving van dat vervoermiddel, voor gebruik in onderzoek of opleiding. Hiertoe behoren ondermeer vliegtuig-, helicopter-, auto-, tank-, en scheepssimulatoren.

1.1 Vraagstelling

Op het Instituut voor Zintuigfysiologie (IZF) worden in toenemende mate voertuigsimulatoren gebruikt voor onderzoek naar het gedrag van het mens-voertuig systeem. Bovendien wordt van militaire zijde steeds meer advies gevraagd over te stellen eisen aan trainingssimulatoren die in gebruik zijn, of zullen worden genomen. Deze twee feiten maken noodzakelijk om op het IZF een goede systeemkennis van simulatoren te hebben, en om op de hoogte te blijven van de meest recente ontwikkelingen.

Vooraf met betrekking tot beeldsystemen van simulatoren hebben zich de laatste jaren stormachtige ontwikkelingen voorgedaan. Met name is er een groot aanbod gekomen van min of meer betaalbare Computer Generated Image (CGI)-systemen, met een toenemende graad van realiteitswaarde van de beelden. Met deze CGI-systemen zijn de principe-mogelijkheden voor simulatie duidelijk groter dan met de tot dusver toegepaste video-maquette techniek. Echter, de selectie van het juiste CGI-systeem, gegeven de met de simulator te verrichten taken, en de doelmatige toepassing van zo'n systeem, vereisen veel specialistische kennis.

Mede in verband met de voorgenomen aanschaf van één of meerdere CGI-systemen, bleek het noodzakelijk om de kennis over deze systemen te vergroten. Een verkenning van de aan buitenbeelden van simulatoren te stellen eisen, uitgaande van een inventarisatie van de onderzoeksvragen van de verschillende afdelingen op het IZF, werd gedaan door van Norren e.a. (1986). Hierbij kon echter nog weinig rekening worden gehouden met de huidige mogelijkheden en beperkingen van CGI-systemen. Een belangrijke conclusie was evenwel dat een nieuwe simulator flexibel moest zijn, teneinde verschillende soorten toepassingen te kunnen dienen. De tot die tijd gebruikte video-maquette simulator bezat die flexibiliteit in onvoldoende mate.

Dit was aanleiding voor een opdracht van de directie aan de tweede auteur van dit rapport (PP), om kennis te verzamelen over de techniek en de toepassing van CGI-systemen voor (voertuig)simulatoren. Daarop is besloten een literatuurstudie uit te voeren. Het grootste aandeel hierin is van de eerste auteur (MM), die een jaar doorbracht op het Instituut, als stagiaire voor zijn studie Psychologie.

De vraag voor deze literatuurstudie was: wat voor eisen moeten gesteld worden aan de gepresenteerde beelden in voertuigsimulatoren, teneinde zo'n simulator zinvol te kunnen gebruiken voor opleiding of onderzoek? Met "zinvol" wordt dan bedoeld, dat vaardigheid of kennis die is opgedaan met behulp van een simulator, een relevante bijdrage kan leveren aan de vaardigheid of kennis m.b.t het echte, gesimuleerde, voertuig.

Bij gebruik van simulatoren voor opleiding spreekt men in dit verband over leeroverdracht (Roscoe, 1971). Het percentage leeroverdracht is het percentage tijdsbesparing van training op het echte voertuig (tot een bepaald vaardigheidsniveau) die training in een simulator oplevert. Is dit percentage zeer klein of zelfs negatief (negatieve leeroverdracht), dan is in dat geval gebruik van de simulator niet zinvol. Voor meer informatie over training in simulatoren, zie ondermeer Boer (1990), Korteling en van Randwijk (1991), of Salvendy (1987).

Voor onderzoek met simulatoren is de validiteit van de onderzoeksresultaten voor de praktijksituatie van belang. Conclusies met betrekking tot het vlieg- rij- of vaargedrag van de mens-voertuig combinatie, die worden getrokken uit experimenten met simulatoren, moeten overdraagbaar zijn op de besturing van het echte voertuig.

Uitgangspunt is uiteraard dat, naarmate de kwaliteit van de simulatorbeelden verbetert, en daarmee het realisme van de simulatie, dat dan tot op zekere hoogte ook de mogelijkheid tot generaliseren van simulator naar voertuig groter wordt. Dat geldt niet voor alle soorten kennis; kennis van procedures, over bijvoorbeeld het opstijgen met een vliegtuig, zal weinig baat hebben bij een bijzonder realistisch beeld in de simulator. Het soort kennis dat hier wel van toepassing is, valt onder de perceptueel-motorische kennis. Hierbij gaat het om het leggen van verbanden tussen bepaalde perceptuele informatie en motorische handelingen, zoals het zien van een bocht in de weg en op het juiste moment en met de juiste uitslag draaien van het stuurwiel in een auto. Omdat dit rapport is gericht op het beeldsysteem van simulatoren, worden de beschouwingen beperkt tot die taken waarin de visuele component van primair belang is.

1.2 Inhoud en indeling van dit rapport

De indeling van dit rapport is als volgt:

In het vervolg van hoofdstuk 1 wordt een korte behandeling gegeven van het gebruik en de opbouw van voertuigsimulatoren en beeldsystemen, hoe kwaliteitseisen kunnen worden bepaald, en hoe de geraadpleegde literatuur voor dit rapport is vergaard.

In hoofdstuk 2 wordt kort ingegaan op de eigenschappen van het menselijk visueel systeem die relevant geacht worden voor simulatorbeelden. Tevens zullen in dat hoofdstuk enkele belangrijke visuele cues worden genoemd, die waarnemers kunnen gebruiken voor het waarnemen van afstanden en voortbeweging. De meeste daarvan zijn ook relevant voor een waarnemer in een voertuig.

De hoofdstukken 3 tot en met 11 behandelen de verschillende eigenschappen van simulatorbeelden welke van invloed zijn op de kwaliteit. Min of meer verwante eigenschappen zijn gegroepeerd in één hoofdstuk, hoewel sommige eigenschappen in meerdere hoofdstukken onder te brengen zijn. De kwaliteit van verschillende beeldeigenschappen is afhankelijk van het niveau van andere eigenschappen. Met verwijzingen naar andere beeldeigenschappen hebben we geprobeerd deze "trade-offs" duidelijk te maken.

De meeste paragrafen in de hoofdstukken 3 tot en met 11 worden afgesloten met conclusies. Hierin worden zeer beknopt de te stellen kwaliteitseisen samengevat, indien mogelijk nog uitgesplitst naar verschillende taken.

Aangezien de meeste gevonden literatuur gaat over simulatie van vliegen, zijn ook veel van de eisen hieraan ontleend. Voorzover bekend is, of aannemelijk kan worden gemaakt, dat andere eisen gelden voor rijden of varen, zijn die eisen apart vermeld.

Hoofdstuk 12 bestaat uit een uitvoerige tabel waarin de kwaliteitseisen ook nog eens overzichtelijk gepresenteerd worden.

In Hoofdstuk 13 wordt een slotbeschouwing gegeven, waarin onder meer suggesties worden gedaan voor verder onderzoek over de benodigde beeldeigenschappen van voertuigsimulatoren.

Gepoogd is de lijst van eigenschappen die te onderscheiden zijn aan simulatorbeelden, zo volledig mogelijk te maken. Voor de meest algemene en belangrijke beeldeigenschappen zijn uitspraken gedaan over de gewenste kwaliteit. Hierbij worden, waar mogelijk, zowel minimum eisen geformuleerd, waarbij een aanvaardbaar omgevingsbeeld zal worden verkregen voor niet-kritische deeltaken, als ook maximum te stellen eisen, waarbij veel kritische taken kunnen worden uitgevoerd.

Voor veel toepassingen blijft het echter belangrijk, dat de gebruiker voor het opstellen van eisen zelf keuzen maakt voor te stellen eisen. Voor dat doel kunnen vooral de in de tekst gegeven overwegingen een belangrijk hulpmiddel zijn.

1.3 Opleiding en onderzoek met voertuigsimulatoren

1.3.1 Voordelen van simulatie

Ongeveer 75 jaar geleden, op een moment dat vliegtuigen zelf ook pas korte tijd bestonden, werden de eerste, nog zeer primitieve, vliegtuigsimulatoren gebouwd (Baarspul, 1990). Vanaf de Tweede Wereldoorlog heeft het gebruik van vliegtuigsimulatoren een grote vlucht genomen. Simulatoren worden gebruikt voor de

opleiding van piloten of ander vliegend personeel, en voor het doen van onderzoek naar het gedrag van de piloot in combinatie met het vliegtuig, of naar dat van de inzittenden. Lag bij de ontwikkeling van de voertuigsimulatoren aanvankelijk de nadruk vrijwel exclusief op het simuleren van vliegtuigen, later werden er ook voor andere vervoermiddelen, zoals auto's, tanks, en schepen, simulatoren gebouwd met hetzelfde doel: opleiding of onderzoek.

Het gebruiken van voertuigsimulatoren, in het vervolg ook aangeduid met simulatoren, voor training of onderzoek is om een aantal redenen te verkiezen boven gebruik van het echte voertuig voor hetzelfde doel (Rolfe & Staples, 1986). Simulatie is vaak aanzienlijk goedkoper, veiliger en efficiënter, en het biedt mogelijkheden die in het echte voertuig niet bestaan, bijvoorbeeld het systematisch variëren van externe omstandigheden of cues, of het nabootsen van calamiteiten. Een voordeel dat de laatste jaren belangrijker wordt, is dat simulatie vriendelijker is voor het milieu. Bij onderzoek heeft simulatie het voordeel dat ontwerpers de consequenties van verschillende ontwerp-opties kunnen testen, zonder dat er allerlei prototypen gebouwd en getest hoeven te worden.

1.3.2 *Natuurgetrouwheid van simulatie*

Voor het zinvol gebruiken van simulatoren voor opleiding en onderzoek is het van belang dat deze de relevante aspecten van het betreffende voertuig redelijk natuurgetrouw nabootsen. Welke aspecten relevant zijn is afhankelijk van het type voertuig en het doel wat men met de simulatie voor ogen heeft. Hierover later meer.

In het algemeen zijn er twee soorten kenmerken (cues) te onderscheiden bij simulatoren die hun natuurgetrouwheid (fidelity) bepalen (AGARD, 1980). Ten eerste de zogenaamde voertuigkenmerken (equipment cues). Hierbij gaat het erom dat het interieur en het exterieur van het gesimuleerde voertuig, voorzover de bestuurder (of de te testen inzittenden) dat kan zien, overeenkomen met die van het origineel. Hierbij hoort ook de wijze waarop het voertuig reageert op invloeden van buitenaf of ingrepen van de bestuurder. Ten tweede zijn er de omgevingskenmerken (environment cues). Deze hebben betrekking op de simulatie van de omgeving rondom het voertuig en de beweging door die omgeving. De veranderingen in de gesimuleerde buitenwereld, als gevolg van de voortbeweging door die wereld moeten overeenkomen met wat iemand ervaart in het echte voertuig.

Bij vliegsimulatoren bestaan er zogenaamde "inflight" simulatoren, hierbij wordt de cabine van het te simuleren vliegtuig in een bestaand vliegtuig nagebouwd en wordt ook de dynamiek van het te simuleren vliegtuig geïmiteerd met dat bestaande vliegtuig. Het voordeel van dit soort simulatoren is dat de omgevingskenmerken automatisch aanwezig en correct zijn. De meeste genoemde voordelen van simulatie gelden daarentegen niet voor inflight simulatoren.

Als er in het volgende gesproken wordt over simulatoren, gaat het dan ook om simulatoren die vast op de grond staan ("ground based"), waarbij de gehele omgeving van het voertuig gesimuleerd moet worden.

1.4 Opbouw van een simulator

1.4.1 *Deelsystemen van simulatoren*

Bestuurders van een willekeurig voertuig krijgen talloze zintuiglijke indrukken. Zo zien zij de omgeving rondom het voertuig, horen zij de motor van het eigen of van andere voertuigen en registreren de tastzin, de proprioceptie en het evenwichtsorgaan versnellingen of veranderingen in de oriëntatie van het voertuig. Een simulator heeft verschillende onderdelen die de verschillende zintuigen van de personen in de simulator moeten bedotten. Zo toont een beeldsysteem de visuele buitenwereld en de veranderingen daarin als gevolg van de voortbeweging van het voertuig. Een bewegingsysteem laat de cabine van de simulator zodanig bewegen dat men een indruk van versnelling en van verandering van oriëntatie krijgt. Verder kan een geluidssysteem zorgen voor de geluiden die behoren bij bepaalde omstandigheden in de buitenwereld of van het voertuig zelf.

Om de simulatie overtuigend te maken moet de stimulatie van de verschillende zintuigen in de simulator voldoende synchroon lopen om één illusie van voortbeweging door de, gesimuleerde, buitenwereld te produceren. Daarvoor moeten de deelsystemen van de simulator op elkaar afgestemd zijn. Dit gebeurt in het zogenaamde voertuig (dynamisch) model. Dit model bestaat uit een computerprogramma waarin de afmetingen en de (bewegings)eigenschappen van het gesimuleerde voertuig zijn opgeslagen. Bij elke verandering in de gesimuleerde omgeving of ingreep van de bestuurder van het voertuig wordt allereerst in het voertuigmodel berekend wat de consequenties hiervan voor het beeld-, beweging- en geluidssysteem zijn, waarna deze deelsystemen zorgen voor de specifieke informatie. In Fig. 1 wordt de combinatie van de verschillende onderdelen van een "full scale" rijnsimulator, die gebruikt wordt voor opleiding, schematisch getoond. Andersoortige voertuigsimulatoren hebben een soortgelijke opbouw, waarbij één of meerdere onderdelen achterwege gelaten kunnen zijn. Een beeldsysteem zal echter aan geen enkele voertuigsimulator ontbreken. Voor meer informatie over de verschillende deelsystemen zij verwezen naar o.a. Baarspul (1990), Korteling (1990), Korteling en van Randwijk (1991), en Rolfe en Staples (1986).

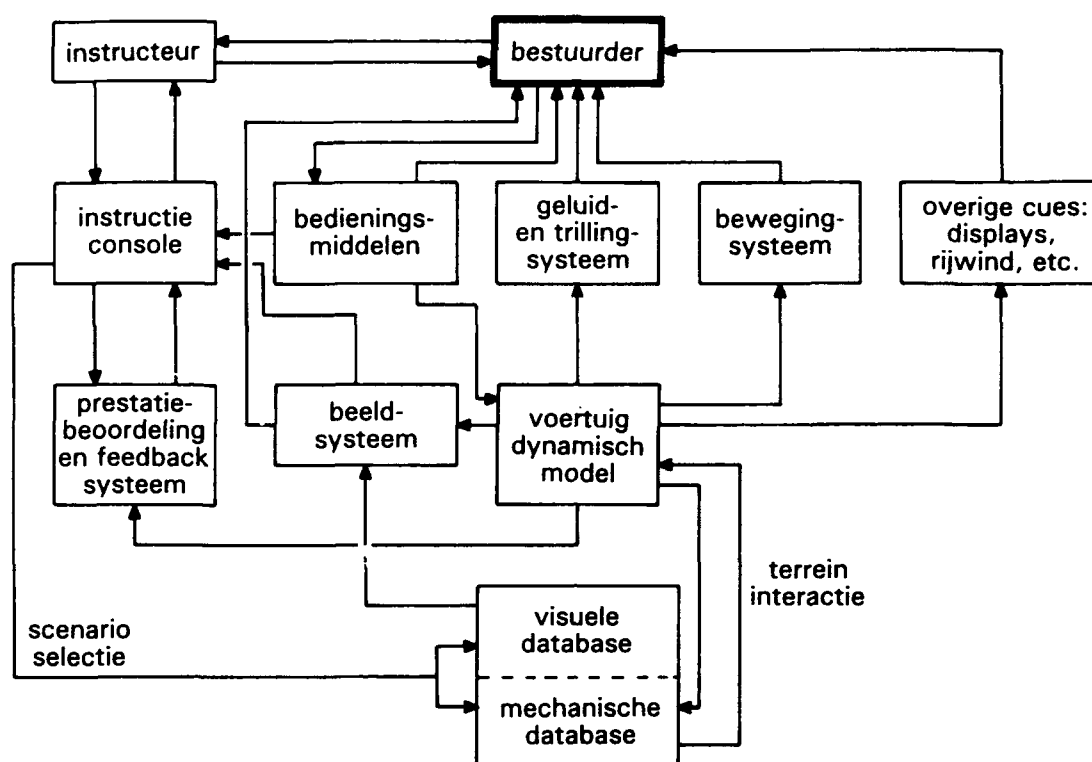


Fig. 1 Schema van de verschillende onderdelen van een rij-simulator die voor opleiding wordt gebruikt.

1.4.2 Het beeldsysteem van simulatoren

In deze literatuurstudie beperken we ons tot het beeldsysteem van simulatoren, of liever gezegd de beelden. Het doel is niet om de techniek van beeldsystemen te behandelen. De belangstelling gaat uit het zichtbare resultaat van de techniek, in relatie tot de eigenschappen van de mens als operator. Hoe het uiteindelijke beeld tot stand is gekomen is voor de huidige vraagstelling van ondergeschikt belang, en zal in deze paragraaf slechts zeer summier aan de orde komen. In par. 1.5 wordt iets meer verteld over de techniek van computer-gegenereerde beelden.

De beelden in de huidige simulatoren zijn in vrijwel alle gevallen afkomstig, hetzij van een maquette waar een camera overheen geleid wordt (closed circuit television/CCTV systeem), hetzij van een beeldgeneratie computer (computer generated imagery (CGI) systeem). In toenemende mate wordt gebruik gemaakt van computer-gegenereerde beelden. CGI-systemen hebben immers een aantal belangrijke voordelen boven CCTV-systemen. Zo zijn CGI-systemen makkelijker te installeren en onderhouden en is het eenvoudiger om veranderingen aan te brengen in het gesimuleerde landschap. Bij maquettes ligt de grootte van het gesimuleerde terrein vast en deze is noodgedwongen beperkt van omvang. Bij CGI-systemen is de grootte van het gesimuleerde terrein in principe eindeloos

uit te breiden. Voorts is een aantal visuele effecten, bijvoorbeeld verminderd zicht door mist of voertuigen die zich vrijelijk door het afgebeelde terrein bewegen, eenvoudiger te verwezenlijken in computer-gegenereerde beelden.

Een belangrijk voordeel van maquette-systemen is daarentegen dat de beelden in het algemeen meer details bevatten dan die van de bestaande CGI-systemen (uitgezonderd de hele dure). Voor toepassingen als rijden of vliegen op geringe hoogte boven de grond dragen gedetailleerde beelden in de simulator sterk bij aan het realisme. Toch wegen voor de veel simulator-toepassingen de voordelen van CGI-beelden (mede door de aanzienlijke recente voortgang in techniek en verlaging van kosten) vermoedelijk op tegen de nadelen, gezien de grote nadruk die tegenwoordig ligt op CGI-systemen.

Onder het beeldsysteem van een simulator wordt verstaan: het geheel van camera's, beeldgeneratie computers, monitoren en projectoren die de beelden uiteindelijk presenteren en eventueel collimerende spiegels of lenzen (zie ook par. 3.1 - Beeldpresentatie).

1.5 Totstandkoming van beelden in CGI-systemen

Alhoewel het niet de bedoeling is om in deze literatuurstudie diep in te gaan op de techniek van beeldsystemen, is enig idee van de wijze waarop de beelden tot stand komen wel nuttig. We beperken ons dan ook tot de meest wijdverbreide beeldsystemen: de CGI systemen.

De huidige CGI-systemen bestaan over het algemeen uit een beeldgeneratie pijplijn (pipeline), die opgebouwd is uit vier belangrijke achtereenvolgende deelsystemen: de Scene Manager, de Geometric Processor, de Display Processor, en het Display (Yan, 1985; Baarspul, 1990). Hierna worden de werkingsprincipes van deze systemen kort uiteengezet.

1.5.1 *De Scene Manager*

Het eerste onderdeel van de pijplijn is de zogenaamde "scene manager" (SM) of "object manager". De voornaamste taak van dit onderdeel is het bepalen welke objecten mogelijk zichtbaar zijn vanuit de huidige positie van de bestuurder van het voertuig. Deze objecten worden opgehaald uit de database van het beeldsysteem. Deze database bestaat uit polygonen, die 3D objecten representeren, uit textuurpatronen (maps) die 2D oppervlaktepatronen definiëren en "color maps", deze bevatten het palet van af te beelden zichtbare kleuren (kleurtonen) en helderheden, dat beschikbaar is voor polygonen en lichtpunten in de af te beelden scènes.

De polygonen die door de SM geselecteerd zijn, worden gerangschikt op hun afstand tot de waarnemer in de gesimuleerde omgeving. Tevens wordt bepaald hoe gedetailleerd elk object afgebeeld zal worden. Behalve door de afstand, wordt dit ook beïnvloed door de mate waarin de andere onderdelen van de pijplijn belast zijn. De SM houdt bij hoeveel reken capaciteit bij de andere componenten van de pijplijn in gebruik is en probeert overbelasting van die

capaciteit (overload) te voorkomen, bijvoorbeeld door het aantal af te beelden details te verminderen (par. 10.2 - Overload management).

1.5.2 *De Geometric Processor*

De geselecteerde polygonen, geordend op afstand, worden overgebracht naar het volgende subsysteem, de "geometric processor" (GP). Hier worden de polygonen of delen van polygonen verwijderd die buiten het visuele veld vallen of afgedekt worden door polygonen die dichterbij het oogpunt staan. Er hoeven verder geen bewerkingen te worden uitgevoerd op deze verwijderde polygonen. Daarnaast zorgt de GP voor de transformaties op polygonen om in de scènes het perspectief juist te laten verlopen. Het aantal polygonen dat de GP in de tijd van 1 frame kan verwerken is een belangrijke maat voor de prestatie van het CGI systeem (Yan, 1985; zie ook par. 4.1 - Polygonen per kanaal).

1.5.3 *De Display Processor*

Het volgende onderdeel in de pijplijn is de "display processor" (DP), ook wel "video processor" genoemd, waarin een beeld gevormd wordt dat opgebouwd is uit pixels. De DP berekent de kleur van elk pixel, eventueel rekening houdend met de vermindering van de helderheid van kleuren bij toenemende afstand (par. 6.1) of verlichtingseffecten, bijvoorbeeld de hoogte waarop de zon staat (par. 5.5 en 6.2) of lichten in de omgeving of van het voertuig zelf. Ook de gevolgen van voorzieningen als anti-aliasing (par. 3.10), transparantie (par. 5.4) of textuur (par. 5.2) voor de kleur van een pixel worden berekend in de DP (Yan, 1985).

Het vereiste rekenvermogen van de DP is afhankelijk van het aantal pixels dat afgebeeld moet worden; voor 1 miljoen pixels ligt het benodigde vermogen in de orde van 10.000 MIPS (Million Instructions Per Second; of, als waarschuwing: Meaningless Information Presented by Salesman). Daarnaast is de vereiste capaciteit van de DP ook afhankelijk van de "speciale effecten" die betrokken worden bij het bepalen van de kleur van een pixel, zoals de eerder genoemde verlichtingseffecten of transparantie. Voor dergelijke effecten zijn veelal complexe algoritmen noodzakelijk, welke de benodigde rekencapaciteit van de DP sterk doen toenemen.

De DP van de eerste CGI-systemen waren hoofdzakelijk "scan-line based". Per scanlijn worden de doorkruisingen (intersections) van alle randen van polygonen door die scanlijn vastgesteld en van de zichtbare segmenten de kleur van de pixels berekend. Dit soort DP kan slechts een beperkt aantal doorkruisingen verwerken, gewoonlijk tussen de 256 en 1000 doorkruisingen per lijn. Het aantal doorkruisingen hangt af van de dichtheid van polygonen in de beelden. De polygonen voor het representeren van scènes in de buitenwereld zullen in de meeste gevallen ongelijk verdeeld over de scanlijnen. Toch is de beschikbare rekentijd voor elke scanlijn gelijk, daarom gebruiken de scan line based DP hun verwerkingscapaciteit niet efficiënt.

De meeste moderne CGI-systemen gebruiken een zogenaamde "frame buffer based" DP. Een frame buffer is een soort geheugen dat de rode, groene en blauwe componenten van de kleur van elk pixel opslaat. De zichtbare polygonen kunnen onafhankelijk van elkaar verwerkt worden, waardoor de verwerkingscapaciteit van de DP gelijkelijk over het hele beeld verdeeld kan worden.

1.5.4 *Het display*

Het vierde subsysteem van een CGI-systeem is het display waarmee de beelden uiteindelijk gepresenteerd worden. Het display kan bestaan uit monitoren of projectoren (par. 3.2 - Beeldpresentatie). Een belangrijk onderscheid is tussen rasterscan- en calligrafische displays. Bij rasterscan displays worden de beelden uitgebouwd uit vlakken (polygonen), welke rasterlijn voor rasterlijn op de display worden "geschreven". Een calligrafisch display kan alleen lichtpunten en lijnen afbeelden. Een calligrafisch display wordt ook wel een vectorscan display genoemd, omdat elk lichtpunt als een vector gedefinieerd is. Voor het vertonen van dagscènes wordt bij simulatoren meestal gebruik gemaakt van raster displays, aangezien deze realistischer beelden geven. Voor nachtscènes worden vaker calligrafische displays toegepast. Tegenwoordig zijn ook displays verkrijgbaar met combinaties van raster- en vectorscan.

In elk subsysteem worden verschillende bewerkingen uitgevoerd op de polygonen en textuurpatronen uit de database. Zodoende is elk subsysteem verantwoordelijk voor een aantal eigenschappen van de beelden die in de simulator vertoond worden en uiteindelijk de kwaliteit van de beelden bepalen. Over deze beeld eigenschappen en hun betrekking tot de beeldkwaliteit handelen hoofdstukken 3 tot en met 11.

1.6 **Bepalen van kwaliteitseisen**

1.6.1 *Factoren die de benodigde kwaliteit bepalen*

De kwaliteit van simulatorbeelden wordt uiteindelijk door twee factoren bepaald. Ten eerste door de eigenschappen van het menselijk visueel systeem. Dit systeem kan worden opgevat als een filter, dat slechts een beperkte hoeveelheid doorlaat van de informatie over de scene die is besloten in het licht dat in het oog valt. Wanneer het simulatorbeeld alle informatie bevat die ook van de werkelijke scene wordt doorgelaten door het menselijk visueel systeem, zal voor een waarnemer het buitenbeeld in de simulator niet van echt te onderscheiden zijn. Er is dan niet zozeer sprake van simulatie als wel van duplicatie van de werkelijkheid. Het bovenstaande houdt natuurlijk ook in dat simulatorbeelden niet méér informatie behoeven te hebben dan de mens kan waarnemen (het beeld hoeft bijvoorbeeld niet scherper te zijn dan overeenkomt met het oplossend vermogen van het oog).

Het is echter technisch en financieel onmogelijk om met de bestaande beeldsystemen onder alle omstandigheden beelden te produceren van een dergelijk hoge kwaliteit. De visuele wereld is daarvoor veel te rijk aan detail. Slechts in uitzonderlijke gevallen, waarin de omgeving direct rondom het voertuig arm is aan detail, bijvoorbeeld bij een vliegtuig op grote hoogte, is het mogelijk de werkelijkheid daadwerkelijk realistisch na te bootsen.

Hiermee komen we bij de tweede factor die van belang is voor het opstellen van de kwaliteitseisen voor simulatorbeelden, namelijk de aard van de (deel)taken die uitgevoerd moeten worden in de simulator. Deze taken zijn niet alleen afhankelijk van het soort (vlieg- rij- of vaar-) simulator. Bij een simulator die voor onderzoek wordt gebruikt hangen de deeltaken ten nauwste samen met de te onderzoeken vragen; bij trainingssimulators zijn deze deeltaken afhankelijk van de gestelde leerdoelen. Sommige taken stellen aanmerkelijk hogere eisen aan de kwaliteit van de beelden dan andere. Bijvoorbeeld maakt Korteling (1991) aannemelijk, dat voor het begin van het leerproces voor autorijden een relatief eenvoudig simulatorbeeld kan volstaan. Bij een taak als het rijden met een auto door een drukke straat in de stad, zijn echter de eisen die aan het beeldsysteem gesteld worden bijzonder hoog. Voor het succesvol uitvoeren van de meeste soorten taken, zijn simulatorbeelden die niet van echt te onderscheiden zijn niet nodig. Hierover later meer.

1.6.2 Bronnen om kwaliteitseisen op te stellen

Bij het opstellen van de voorwaarden waaraan simulatorbeelden moeten voldoen, kan in ieder geval gebruik worden gemaakt van kennis betreffende de eigenschappen van het menselijk visueel systeem en van de specifieke visuele informatie die noodzakelijk is voor een bestuurder in een voertuig om de gestelde taken in het voertuig correct uit te voeren. Helaas is op beide gebieden de kennis incompleet en is het onmogelijk om uitsluitend op grond van genoemde punten tot empirisch ondersteunde kwaliteitseisen te komen (Warren en Riccio, 1985).

Bij trainingssimulators zijn hulpmiddelen om deze moeilijkheid te omzeilen de "transfer of training" of "quasi-transfer of training" studies, waarin men de effecten van variaties in de kwaliteit van de simulatorbeelden op de leeroverdracht vergelijkt. Bij transfer of training gaat het om de overdracht van de simulator naar het echte voertuig; bij quasi-transfer om de overdracht naar een super-simulator, of naar een andere configuratie van dezelfde simulator, die zoveel mogelijk op het echte voertuig lijkt (Boer, 1990; Korteling en v. Randwijk, 1991; Lintern, Wrightman & Westra, 1984).

Een eenvoudiger mogelijkheid is, om de prestaties te vergelijken van ervaren bestuurders van het echte voertuig, die dezelfde taken moeten uitvoeren in een simulator bij verschillende beelden. Door de vertoonde prestaties onderling en met de prestatie op het echte voertuig te vergelijken, is het mogelijk een indruk te krijgen van de eigenschappen van de simulatorbeelden die noodzakelijk zijn voor het adequaat uitvoeren van de betreffende taak.

Bij onderzoeksimulatoren is prestatie-vergelijking met het echte voertuig de enige methode om de kwaliteit van de (beeld)simulatie rechtstreeks te valideren.

Objectieve maten als prestatieniveau of percentage leeroverdracht hebben echter niet altijd het laatste woord, als het gaat om het beoordelen van de kwaliteit van het beeldsysteem. Wanneer het voor het prestatieniveau op een taak onbelangrijk is of de simulatorbeelden een bepaalde eigenschap, bijvoorbeeld kleur, aanwezig is of niet, dan kan subjectief toch de kwaliteit van de beelden met kleur als beter beoordeeld worden. Het subjectieve oordeel van kwaliteit (face validity) bij waarnemers, is ook in verband te brengen met de eigenschappen van het menselijk visueel systeem. Hoe meer de beelden tegemoet komen aan die eigenschappen, hoe beter de subjectief beoordeelde kwaliteit zal zijn. Dit zal ook de geloofwaardigheid van de simulatie vergroten, en daardoor de motivatie van de leerling of proefpersoon om de simulator te besturen alsof het een echt voertuig is.

Het streven van gebruikers van simulatoren is, om tegen zo gering mogelijke kosten een zo groot mogelijk profijt te hebben van het gebruik van een simulator. Een verbetering in de subjectieve kwaliteit van de beelden, die niet gepaard gaat met een hoger rendement bij training of onderzoek op een simulator, maar wel met een sterke toename in de prijs van het beeldsysteem, zal niet altijd welkom zijn. Bij het beoordelen van de kwaliteitseisen voor simulatorbeelden is het zodoende van belang om, naast het effect van een betere kwaliteit op de "zinvolheid" van het gebruik van de simulator, ook het effect op de kosten te beschouwen. Dat is in dit rapport niet uitvoerig gedaan.

1.7 Literatuur

Voor dit literatuuroverzicht is gebruik gemaakt van studies van (quasi-) transfer of training of prestatie waarin, binnen één taak, beelden van verschillende kwaliteit met elkaar vergeleken werden. Naast deze informatiebronnen is tevens gebruik gemaakt van literatuur over de eigenschappen van het menselijk visueel systeem en de visuele informatie die personen in een voertuig gebruiken voor een bepaalde taak, om de op te stellen kwaliteitseisen voor simulatorbeelden zo goed mogelijk te onderbouwen.

Een probleem met veel van de literatuur over beeldsystemen in simulatoren is dat de gepresenteerde gegevens vaak onvolledig zijn, en dat de voorgestelde eisen aan de kwaliteit van de beelden in veel gevallen zonder enige omkleiding van redenen worden geponeerd. Mede als gevolg van deze onduidelijkheid, maar zeker ook omdat niet in detail kan worden ingegaan op de precieze aard van alle uit te voeren deeltaken op simulatoren (zie par. 1.6.1 - Factoren die kwaliteit bepalen) zal er ook in dit rapport vaak geen eenduidige formulering van kwaliteitseisen mogelijk blijken.

Een groot deel van de gebruikte literatuur is verkregen met behulp van een Telesearch bij CID/TNO te Delft. Daarbij ging de belangstelling in eerste

instantie uit naar artikelen of rapporten uit de afgelopen 5 jaar. Gezien de snelle technische vooruitgang op het gebied van de simulatortechniek is de kans immers groot dat minder recente literatuur verouderd is. Er is vooral gezocht in het NASA-bestand. De gebruikte trefwoorden (gecombineerd met "en" of "of") waren in hoofdzaak:

(simulator(s) of (simulation en (driving of (ground)vehicle of flight)))
en (visual display (systems) of visual system of computer generated image(s)/imagery of CGI of computer(ized) image generator of CIG of image/display quality (requirements))

De string (visual display, etc) werd ook nog **en**-gecombineerd met de engelse vertalingen van veel van de in dit rapport als paragraaftitel voorkomende kwaliteitsparameters.

Op ons verzoek heeft het Technisch Documentatie Centrum van de Krijgsmacht (TDCK) zelf ook een search verricht naar literatuur met betrekking op beeldsystemen van simulatoren en hun vereiste kwaliteit. Voor zover de op deze wijze geselecteerde aanvullende literatuur niet in de bibliotheek van het IZF aanwezig was, is deze aangevraagd bij het TDCK.

Daarnaast bleken de Proceedings van de IMAGE conferenties, de International Training Equipment Conference (ITEC) en de Interservice/Industry Training Systems Conference (I/ITSC) rijke bronnen van informatie.

2 HET VISUEEL WAARNEMEN VAN DE OMGEVING

2.1 Basisgegevens over het menselijk visueel systeem

2.1.1 *Algemeen*

Het visueel systeem van de mens kan opereren over een groot gebied van lichtniveaus. Het gebied waar verschillen in luminantie waarneembaar zijn ligt ongeveer tussen de 10^{-6} cd/m² en 10^8 cd/m². Perceptueel correspondeert luminantie met waargenomen helderheid. Het luminantieniveau heeft belangrijke effecten op andere functies van het visueel systeem.

Eén van de opvallendste effecten is vermogen tot kleurenzien, dat tot stand komt door interactie van drie soorten receptoren (kegeltjes) met verschillende spectrale gevoeligheden. Bij heel lage lichtniveaus zijn slechts de (kleurenblinde) staafjes actief. Vanaf ongeveer $6 \cdot 10^{-2}$ cd/m² kan men kleurentonen gaan onderscheiden, te beginnen bij de lange golflengten (rood). Tussen de 10^2 en 10^4 cd/m² is het kleuronderscheidings-vermogen optimaal (Boff e.a., 1986). Andere vermogens die beïnvloed worden door het luminantieniveau zijn de contrastgevoeligheid en de gezichtsscherpte (visus).

De contrastgevoeligheid is de gevoeligheid voor luminantieverschillen tussen aangrenzende gebieden. Deze bepaalt of men contouren van objecten ziet. Deze gevoeligheid neemt toe wanneer de gemiddelde luminantie toeneemt. Vanaf 300 cd/m² bereikt de contrastgevoeligheid een plafond. Nog hogere luminantieniveaus verbeteren de contrastgevoeligheid niet of nauwelijks (van Nes & Bouman, 1967).

De gezichtsscherpte is het vermogen om kleine objecten, of beter kleine details in objecten (uitgedrukt in een hoekmaat), waar te nemen. De gezichtsscherpte is gedefinieerd als de inverse van de visuele hoek, in boogminuten, van het kleinste waarneembare detail. De gezichtsscherpte bereikt een optimaal niveau bij ongeveer 10^3 cd/m² en bedraagt dan gemiddeld 1,5 (Pirenne, 1947). Een gezichtsscherpte van 1,5 wil dus zeggen dat details met een grootte van $(1/1,5 =) 0,67$ boogminuut nog waargenomen worden. Bij een optimaal contrast (zwart object op witte achtergrond) wordt de minimale waargenomen visuele hoek beperkt door de gezichtsscherpte. Lagere contrastniveaus beperken daarentegen de gezichtsscherpte: hoge spatiële frequenties worden daarbij slechter waargenomen.

2.1.2 *Locatie in het visuele veld*

Bij het spreken over gevoeligheid van het visueel systeem dient men zich goed te realiseren welk deel van het netvlies gestimuleerd wordt. De gevoeligheden voor kleur, contrast en spatiële frequentie zijn maximaal in het centrale visuele veld ($\pm 2^\circ$), de fovea, en nemen af naarmate de stimulus op grotere afstand van de fovea op het netvlies valt. Aan de andere kant worden de genoemde functies in de periferie minder beïnvloed door lagere luminantieniveaus dan centraal het geval is (Jennings & Charman, 1981).

Een belangrijk verschil tussen de fovea en het perifere netvlies, in verband met de simulatorbeelden, is het verschil in gezichtsscherpte. De gezichtsscherpte neemt monotoon af met het toenemen van de excentriciteit (afstand tot de fovea). Dit heeft o.a. te maken met de afname in de dichtheid van de receptoren. Bij een luminantie van 10 cd/m² of meer, wanneer alleen de kegeltjes werkzaam zijn, en minder dan 20° excentriciteit is de gezichtsscherpte een lineaire functie van excentriciteit. De inverse van de gezichtsscherpte, ofwel de minimaal waarneembare hoekgrootte, wordt beschreven door de volgende vergelijking:

$$MH(E) = MH(0) \cdot (1 + aE),$$

waarin E de excentriciteit is, MH(E) de minimale visuele hoek bij die excentriciteit, MH(0) de minimale hoek bij de fovea, en a een parameter die afhankelijk is van het luminantieniveau en de waarnemer. Bij excentriciteiten groter dan 20° neemt de minimale waargenomen hoekgrootte exponentieel toe (Boff e.a., 1986). Voor zover deze genoemde eigenschappen van het visueel systeem belangrijk zijn voor de kwaliteit van simulatorbeelden, zal dat in de relevante paragrafen nader genoemd worden.

Voor meer informatie kan men handboeken als die van Boff e.a. (1986) of Graham (1965) raadplegen.

2.2 Waarnemen van diepte en beweging

Bij de gezichtsscherpte en de contrastgevoeligheid ging het achtereenvolgens om het detecteren van details en van luminantieverschillen. In verband met het besturen van een voertuig is eveneens van belang hoe een waarnemer afstanden (diepte) en beweging, zowel van zichzelf als van andere voertuigen, kan waarnemen.

Voor het waarnemen van de 3-dimensionale ruimte maakt het visueel systeem gebruik van de informatie in de (2-dimensionale) beelden van de buitenwereld die op de netvliesen van beide ogen vallen. Om diepte te kunnen zien, gebruikt het visueel systeem van deze netvliesbeelden verschillende kenmerken, die vaak worden aangeduid als "cues". Aan de hand van één of meerdere cues worden afstanden van objecten in de buitenwereld tot de waarnemer, en hun onderlinge verschillen in afstand, afgeleid. Cues worden onderscheiden in binoculaire en monoculaire cues. De binoculaire cues vereisen een gecoördineerde waarneming van beide ogen; voor de monoculaire cues volstaat het beeld van één oog. Voor meer informatie over dit onderwerp wordt verwezen naar o.a. Graham (1965), Hochberg (1971), of Wickens, Todd en Seidler (1989).

2.2.1 Binoculaire cues voor afstandswaarneming

Men onderscheidt twee binoculaire cues voor het schatten van afstand tot de waarnemer:

- 1 Binoculaire convergentie. Wordt er gefixeerd op een object op grote afstand, dan is de blikrichting (line of fixation) van beide ogen parallel. Staat het object dichterbij dan moeten de ogen zodanig draaien om te kunnen fixeren, dat de blikrichtingen van de twee ogen convergeren. Convergentie is alleen werkzaam over afstanden van minder dan 1 à 2 meter.
- 2 Binoculaire dispariteit. Wanneer de ogen een object fixeren dan valt er op de fovea van elk oog een beeld van dat object. Een ander object, op een andere afstand, geeft netvliesbeelden die in de beide ogen op verschillende afstanden tot de fovea's liggen, als gevolg van het verschil in positie van de ogen in het hoofd. Het afstandsverschil tot de fovea's wordt de binoculaire (retinale) dispariteit genoemd en wordt door het visueel systeem geïnterpreteerd als een verschil in afstand. Dit vermogen tot dieptezien wordt stereopsis genoemd. Op afstanden van minder dan een meter kunnen met stereopsis diepteverschillen van minder dan 1 mm worden onderscheiden, maar het juist onderscheidbare diepteverschil neemt snel (meer dan kwadratisch) toe met de afstand. Op 50 m afstand is het juist waarneembare diepteverschil ca. 3 m (Ogle, 1962; Walraven, 1980). In de praktijk zullen daarom op afstanden groter dan 10 á 20 m de hierna te behandelen monoculaire cues meestal een meer accurate diepte-informatie geven.

2.2.2 Statistische monoculaire cues voor afstandswaarneming

In netvliesbeelden waarbij noch de objecten noch de waarnemer bewegen dragen de volgende monoculaire cues bij tot het waarnemen van de afstand tot de waarnemer:

- 1 Relatieve grootte. De schijnbare grootte (hoekmaat) van een object, waarvan de werkelijke grootte bekend is, is een aanwijzing voor de afstand van het object tot de waarnemer. Evenzo zal van 2 objecten waarvan bekend is dat ze gelijk van grootte zijn, de kleinste als verder weg worden gezien.
- 2 Dichtheids- of textuurgradiënt. Ook de waargenomen dichtheid van objecten neemt evenredig toe met het groter worden van de afstand tot de waarnemer. Ditzelfde geldt voor de fijne details (textuur, zie par. 5.2) binnen een oppervlak.
- 3 Interpositie. Een object dat een ander object gedeeltelijk overlapt wordt als zijnde dichterbij waargenomen.
- 4 Lineair perspectief. Structuren die parallel lopen (bijvoorbeeld wegbermen) lijken in perspectief op grote afstand in één punt samen te komen (convergeren).
- 5 Hoogte in het visuele veld. Objecten die dicht bij de horizon zijn afgebeeld, worden als verder weg waargenomen dan objecten die verder van de horizon verwijderd zijn.
- 6 Licht en schaduwen. Aan de hand van de wijze waarop objecten verlicht worden of de schaduwen die ze werpen is het ook mogelijk hun relatieve afstanden te bepalen.
- 7 Atmosferisch perspectief of vertewaaas. Van objecten op grote afstand is het contrast geringer (nevelig) en de kleur wordt blauwig (blueing out).

- 8 Accommodatie. Wanneer het oog gefixeerd is op een punt in de ruimte dan is dat punt scherp afgebeeld op het netvlies. Alle punten dichterbij of verder weg geven onscherpe (blurred) beelden. Het onderscheiden van relatief scherpe en onscherpe beelden zou kunnen dienen als cue voor de afstand van de betreffende punten. Het blijkt echter dat het onderscheiden van verschillen in diepte, op grond van accommodatie, bij afstanden boven de 2 m niet meer correct gebeurt (Graham, 1965).
- 9 Hoeveelheid detail. Naarmate de afstand tot een object groter is, zijn details op dat object minder zichtbaar.
- 10 Relatieve helderheid. Objecten die helderder zijn dan andere objecten lijken dichterbij te zijn.

Wickens, Todd & Seidler (1989) geven een overzicht van studies waarin de onderlinge dominantie van de verschillende cues onderzocht werd. Binoculaire dispariteit, bewegingsparallax (par. 2.2.3) en interpositie blijken krachtige cues voor diepte en oriëntatie. Zwakkere cues, maar zeker niet onbelangrijk, waren textuur gradiënt, lineair perspectief en relatieve grootte. Wel blijkt de dominantie van cues gedeeltelijk taak- en afstandsafhankelijk te zijn.

2.2.3 Dynamische beelden

Voor voertuigsimulatoren spelen dynamische beelden, dat wil zeggen beelden die bewegen als gevolg van de beweging van de waarnemer (in het bewegende voertuig), een belangrijke rol. Ten eerste voor het waarnemen van de eigen beweging, maar ook voor het waarnemen van eventuele beweging van objecten in de scene, en van hun (relatieve) afstanden tot de waarnemer.

Cues voor het waarnemen van beweging van objecten

Voor bewegende objecten die een bewegingscomponent hebben die niet samenvalt met de kijkrichting, is er sprake van er een beweging van het netvliesbeeld. Voor het waarnemen van (de richting van) deze beweging liggen de absolute drempels ongeveer tussen 0,03 bgmin/s en 200°/s (Graham, 1965). Het kleinst waarneembare verschil in snelheid tussen 2 objecten (of tussen het object en de gestructureerde omgeving) ligt in de orde van 1-2 bgmin/s. Voor de grenzen maakt het uit op welke positie in het visuele veld de beweging voorkomt. De fovea is gevoeliger voor lage snelheden, en hoe meer perifeer, hoe hoger de snelheden zijn die nog waargenomen kunnen worden (v.d. Grind e.a., (1983).

Bij beweging van een object in de diepte, dus naar de waarnemer toe of er vanaf, verandert de grootte van het netvliesbeeld van dat object en van de bijbehorende grootte en/of dichtheid van details (textuur). Het visueel systeem blijkt specifiek gevoelig te zijn voor het opzwellen (looming) van objecten die dichterbij komen (Regan & Beverley, 1978). De verandering van de textuurdichtheid heeft eveneens een sterk effect op de waarneming van beweging in de diepte, mits deze verandering in overeenstemming is met de snelheid van opzwellen van het object zelf (Regan & Beverley, 1983). Kwamen de verande-

ring van textuur en die van het gehele object niet overeen, dan werd de waarneming van beweging in de diepte ernstig gestoord.

Harrington e.a. (1985) vonden dat, van de cues voor waarnemen van nadering (of, omgekeerd, verwijdering) van een patroon (toename in grootte van elementen; divergentie van onderlinge afstanden van elementen; toename van zijwaartse snelheden van elementen buiten de botsingskoers), de snelheidsverandering de krachtigste afzonderlijke cue is. Bij het combineren van divergentie met snelheidstoename was de impressie van voortbeweging het sterkst; de grootteverandering speelde een ondergeschikte rol.

Cues voor de waarneming van zelfbeweging

De hiervóór genoemde cues voor het waarnemen van beweging van objecten in de diepte (opzwellen; verandering van textuur-dichtheid; toename zijwaartse snelheid van textuur-elementen), gelden natuurlijk ook voor het waarnemen van de eigen beweging; immers, bij zelfbeweging wordt de afstand van objecten die zich in voorwaartse richting bevinden verkleind.

Een heel belangrijke cue voor beweging van de waarnemer zelf, is de bewegingsparallax. Dat is het bewegen van objecten over het netvlies als gevolg van zelfbeweging. Dit treedt op voor objecten die zich niet in de bewegingsrichting bevinden (voor objecten die ook zelf bewegen moet gelden dat zij niet op een botsingskoers bewegen). Voor deze objecten treedt een verandering op van de richting t.o.v. de waarnemer (parallax), en daarmee een verplaatsing over het netvlies van de waarnemer.

Voor het bepalen van hun snelheid van voortbewegen, maken waarnemers voornamelijk gebruik van de snelheid waarmee objecten een bepaald referentiepunt in hun gezichtsveld passeren, de zogenaamde "edge rate" (Larish & Flach, 1990).

Voor het bepalen van de richting waarin men beweegt, zouden waarnemers gebruik maken van het expanderende patroon van optische stroom over het netvlies ("optic flow", Gibson, 1950), die ontstaat door het naderbij komen van de "optic array" (de visuele informatie die potentieel in de scene beschikbaar is voor de waarnemer). Het centrum (focus) van die expansie, valt volgens Gibson samen met het punt waar de waarnemer naartoe beweegt. Later onderzoek (Regan e.a., 1986) wees echter uit dat de richting van voortbeweging op deze wijze slechts met beperkte nauwkeurigheid bepaald kan worden, omdat het centrum van expansie in feite samenvalt met het punt (in de verte) waarop men de ogen fixeert. Andere informatie, zoals (verandering) in het perspectief, wordt, indien aanwezig, eerder gebruikt voor het bepalen van de koersrichting.

Voor meer informatie over waarneming van voortbeweging wordt verwezen naar ondermeer de boeken van Boff e.a (1986) of van Warren & Wertheim (1990).

Afstandscues in dynamische beelden

De eerder genoemde bewegingsparallax geeft, bij gegeven snelheid van de waarnemer, voor nabije objecten buiten de bewegingsrichting een verplaatsing over het netvlies met grotere snelheid dan voor verre objecten. Bij bewegingsparallax verandert dus de interpositie van objecten. Zo ontstaat er een gradiënt

van relatieve beweging op het netvlies (Rogers & Graham, 1979). Uit deze verschillen in snelheden van verplaatsing is de relatieve afstand van de objecten af te leiden. Op analoge wijze kan de snelheid van bewegen over het netvlies, voor een object waarvan de werkelijke bewegingssnelheid min of meer bekend is, een cue zijn voor het waarnemen van de afstand van zo'n object.

Voor objecten die zich in of nabij de bewegingsrichting bevinden, kan de snelheid van verandering van de eerder genoemde diepte-cues, zoals grootte of textuur-dichtheid, een extra cue voor de afstand tot de waarnemer opleveren, mits er enige kennis bestaat van de relatieve naderings- of verwijderingssnelheid.

2.3 Visuele informatie voor een bestuurder

Welke visuele cues uit het omgevingsbeeld door de bestuurder¹ worden gebruikt in de verschillende soorten voertuigen en bij welke taken, hangt af van de snelheid waarmee, en de hoogte waarop, het voertuig beweegt, alsmede van de aard van de omgeving rondom het voertuig. Hieronder volgt een beknopte beschrijving van enkele van de meest karakteristieke visuele informatiebronnen voor bestuurders, met betrekking tot het waarnemen van diepte en zelfbeweging. In de volgende hoofdstukken zal, bij de bespreking van de verschillende te onderscheiden beeldkenmerken en de kwaliteitseisen die daarvoor gesteld dienen te worden, nader worden ingegaan op de benodigde informatie voor de verschillende soorten voertuigen en deeltaken.

2.3.1 *Vliegen*

Bij het vliegen op geringe hoogte, bijvoorbeeld voor het landen, of om vijandelijke radar te ontduiken, blijkt de snelheidsgradiënt waarmee contouren bewegen als functie van afstand, door piloten gebruikt te worden voor de schatting van hun hoogte (Kruk e.a., 1983). Andere cues die de piloten bij het vliegen op geringe hoogte (nap-of-the-earth) gebruiken om de juiste hoogte te handhaven zijn bewegingsparallax, de toename in contrast en detail bij afnemende afstand en de waargenomen grootte van (bekende) objecten (Kellogg & Miller, 1984). Wolpert, Owen & Warren (1983) vonden dat verandering in de hoek waarmee de optische stroom lateraal expandeert (splay angle), van groot nut kan zijn bij het detecteren van verlies van hoogte. Voor het detecteren van vermindering in hoogte, blijkt in het algemeen de bewegende stroom parallel aan de bewegingsrichting belangrijker te zijn dan de radiaal expanderende stroom, die rechtvooruit te zien valt. Datzelfde lijkt te gelden voor het visueel detecteren van versnelling (Wolpert, 1990).

Ook de positie van de horizon ten opzichte van objecten van bekende hoogte kan als richtlijn dienen voor het bepalen van de hoogte boven de grond. Neemt

¹ In dit rapport zal vaak de term "bestuurder" gebruikt worden als algemene aanduiding voor vlieger, chauffeur, schipper, etc.

de hoogte boven de grond waarop de waarnemer zich bevindt af, dan komt de horizon lager ten opzichte van deze objecten te liggen. Daarnaast kunnen objecten die aanvankelijk zichtbaar waren aan de horizon, bij een afname in hoogte boven de grond, achter de horizon verdwijnen. De positie van de horizon in het visuele veld, dat wordt omlijst door het venster waardoor men kijkt, is bovendien een indicatie voor de domphoek (pitch) van het vliegtuig.

Van Norren e.a. (1986) presenteren een tabel met een twintigtal soorten informatie uit de omgeving die voor het vliegen met helicopters belangrijk is. Het voert echter buiten het bestek van dit rapport om een dergelijk verfijnde uitsplitsing van taken systematisch te behandelen.

2.3.2 *Rijden*

Vanuit rijdende voertuigen, zoals auto's of tanks, kunnen de bewegingsparallax en het divergeren van objecten in perspectief, belangrijke cues zijn voor het schatten van de snelheid van voortbeweging. Deze cues zijn het meest effectief wanneer er zich regelmatig discrete objecten bevinden op korte afstand van het traject van het voertuig (Waldram, 1985), zoals onderbroken wegbelijning of bomen langs de weg.

Voor het waarnemen van koers en laterale positie gebruiken automobilisten het perspectivisch beeld van de weg en, meer in het bijzonder, de translaties en rotaties daarvan (Riemersma, 1987).

Het opzwellen (looming) van naderende objecten wordt gebruikt door automobilisten bij het reguleren van de kracht waarmee ze remmen, als het gaat om een botsing met een voertuig of ander object te vermijden (Lee, 1976).

Korteling (1991) gaat uitvoerig in op dit soort, en overige, visuele cues voor automobilisten.

2.3.3 *Varen*

Vanuit een schip op volle zee zijn er veelal geen discrete objecten in voldoende aantallen om een indruk van divergentie op te wekken. Daarom kan het belangrijk zijn dat het textuurpatroon van het water voor een optische stroom zorgt, die waarnemers een indruk van de snelheid van voortbeweging bezorgt. Instrumenten zullen echter meestal een betrouwbaarder indicatie voor de snelheid, zowel als de positie, geven. Voor het koershouden is het, in verband met de trage reactie van een schip, vooral belang om de snelheid van koersverandering nauwkeurig te kunnen waarnemen (Wylie, 1976; Schuffel, 1984). Hiertoe zal het zien van de verandering van peiling van objecten zoals boeien en andere schepen belangrijk zijn. Vanwege de geringe dichtheid van dit soort objecten, zullen ze vaak ver weg zijn, en dus een kleine visuele hoek hebben.

Bij kust- en havennavigatie is het waarnemen van snelheid van koersverandering nog belangrijker, in verband met het voorspellen van de precieze baan van het schip. Daarnaast kan een accurate bepaling van de positie, en de verandering daarvan, van belang zijn, vooral bij nauw vaarwater (Schuffel, 1986). Ook de detectie van botsingskoers met andere schepen is bij drukker vaarwater van

groot belang. Gegeven de voorkomende snelheden, zullen vooral (monoculaire) statische cues, en de verandering daarvan, een belangrijke rol spelen, naast bewegingsparallax. Maar gedetailleerde gegevens daarover zijn niet bekend.

2.4 Visuele informatie in simulatoren

2.4.1 *Binoculaire cues*

In simulatoren zijn de binoculaire cues van geringe betekenis aangezien de visuele wereld op een plat scherm wordt afgebeeld. Alle zichtbare objecten staan op gelijke afstand van de waarnemer. Slechts enkele simulatoren hebben stereoscopische beelden. Voor de meeste visuele taken, uit te voeren in werkelijke voertuigen, blijkt stereopsis echter ook niet zo belangrijk, omdat deze taken zich meestal afspelen op afstanden groter dan 10 m, waarbij monoculaire cues domineren (par. 2.2.1). Een taak waarvoor wel stereoscopische beelden gebruikt worden in simulatoren, is het bijtanken van vliegtuigen in de lucht (Rolfe & Staples, 1986).

In par. 3.2.2 wordt ingegaan op de gevolgen van de binoculaire parallax tussen gecollimeerde beelden (veel in vliegsimulatoren toegepast) en de cabine voor de schatting van afstand en ooghoogte.

2.4.2 *Monoculaire cues*

Van de monoculaire cues zal accommodatie in werkelijke voertuigen een te verwaarlozen rol spelen bij het waarnemer van diepte. Objecten die voor de bestuurder van het voertuig belangrijk zijn bevinden zich immers zelden op minder dan 2 m. Volgens AGARD (1980) zal er in simulatoren in principe wel een conflict kunnen ontstaan tussen accommodatie en de andere monoculaire afstand-cues (AGARD, 1980), vooral als het beeld zich op minder dan 2 m van het oog bevindt. Omdat de beelden 2-dimensionaal zijn, zullen de objecten in de afgebeelde scène ook allemaal even scherp of onscherp zijn, alsof ze op gelijke afstand staan. De andere monoculaire cues kunnen echter wel suggereren dat er verschillen in diepte zijn. Een oplossing hiervoor is het collimeren van de simulatorbeelden (zie par. 3.2 - Beeldpresentatie). Het is echter nog maar de vraag hoe ernstig dit conflict is, gezien de geringe nauwkeurigheid van de accommodatie als cue voor diepte (Graham, 1965). In par. 3.2.2 wordt ingegaan op andersoortige problemen met afstandschatting bij gecollimeerde beelden die te maken zouden hebben met accommodatie.

Bewegingsparallax van objecten naast de route treedt op wanneer de waarnemer zich met het voertuig voortbeweegt. Rogers en Graham (1979) vonden dat het beeld van de scene relatief complex moest zijn, wil de bewegingsparallax een juiste beoordeling van de relatieve afstanden van objecten opleveren. Daarbij bleek de impressie van diepte, gegeven door de bewegingsparallax "gedomineerd" te worden door de cues van relatieve grootte en hoogte in het visuele veld (Eriksson, 1973; Gogel & Tietz, 1974). Voor objecten die zich dicht bij de

waarnemer bevinden is het een potentieel probleem dat daarvoor geen bewegingsparallax optreedt wanneer de waarnemer in de simulator zijn hoofd beweegt.

Ook voor het optreden van een noemenswaardige optische stroom moet het waargenomen terrein voldoende objecten bevatten, die liefst regelmatig over het terrein verspreid zijn. Hoeveel objecten nodig zijn is moeilijk in het algemeen te zeggen, maar duidelijk is dat de prestatie van proefpersonen in (vlieg)simulators bij taken waarbij afstands-, hoogte- of snelheidsschattingen vereist zijn, beter is naarmate de beelden meer contouren bevatten (Dörfel, 1976; Lintern e.a., 1987; Kleiss e.a., 1988). Bij Kleiss e.a. (1988) nam de nauwkeurigheid van de hoogte schattingen toe tot en met het hoogste niveau van objectdichtheid, 70 objecten/km².

Als er sprake is van een vaste route (zoals bijv. bij het rijden over een weg), dan is het zaak om relatief veel objecten dicht bij de route te plaatsen, ter bevordering van de optische stroom.

Om gebruik te kunnen maken van de (relatieve) grootte bij het schatten van afstanden of hoogte, moet de werkelijke grootte van de objecten bekend zijn. Dat betekent voor simulatorbeelden dat de afgebeelde objecten herkenbaar moeten zijn als bekende objecten, en dat hun grootte overeenkomt met de werkelijke grootte (Chappelow & Smart, 1982; Rolfe & Staples, 1986).

Bijzonder belangrijk voor de simulatorbeelden is ook dat de bewegingen in de scène correct zijn, gezien het belang van beweging voor het navigeren van het voertuig. Volgens Kruk e.a. (1983) wordt er bij simulatorbeelden momenteel te weinig nadruk gelegd op de dynamische cues en teveel op zaken als resolutie en contrast. Het onderzoek van Regan en Beverley (1983) toonde ondermeer het belang van de overeenstemming tussen de veranderingen van de grootte van objecten en die van hun details, voor een adequate waarneming van beweging in de diepte.

Veel beeldeigenschappen die in de volgende negen hoofdstukken genoemd worden, hebben te maken met het zo correct mogelijk presenteren van de bovengenoemde cues. Bij beeldsystemen met een maquette zal dat meestal vrij automatisch gebeuren. In CGI-systemen moet de gehele waargenomen scène echter voortdurend opnieuw opgebouwd worden, en dan kan het verzorgen van de gewenste cues veel moeite kosten. Veel van de te behandelen beeldeigenschappen zijn dan ook uitsluitend van toepassing op CGI-systemen.

3 FYSISCHE BEELDEIGENSCHAPPEN

Hieronder worden verstaan de beeldeigenschappen die fysisch te meten zijn en in fysische maten uitgedrukt kunnen worden.

3.1 Veldgrootte

3.1.1 Definitie en beeldvergroting

Onder veldgrootte wordt verstaan de afmetingen (hoekgrootte) van het visuele veld van het virtuele oog dat naar de gesimuleerde buitenwereld kijkt. Bij beeldsystemen met een maquette en camera wordt dit visuele veld bepaald door de brandpuntsafstand van de cameralens en de grootte van de trefplaat van de camera. In CGI-systemen wordt de grootte van het veld van de buitenbeelden rekenkundig bepaald, als de gezichtshoek van het virtuele oog.

De hoekgrootte van dit visuele veld op de buitenwereld schrijft ook de visuele hoek voor van de beelden in de simulator. Zijn "buiten-veldgrootte" en "binnen-veldgrootte" gelijk dan is sprake van een beeldvergroting van 1. Voor voertuigssimulatoren verdient een vergroting van 1 de voorkeur, met oog op het correct navigeren van het voertuig door de omgeving. Sommigen beweren echter dat een vergroting van ca. 1,25 beter is voor het juist schatten van hoogte en afstand in simulatorbeelden (Meehan & Triggs, 1988).

Gegeven een vergroting 1 van simulatorbeelden, dan zal de grootte van het beschikbare display, in combinatie met de gewenste kijkafstand, meestal de beperkende factor zijn voor de maximaal mogelijke veldgrootte (zie ook par. 3.2 - Beeldpresentatie).

3.1.2 Belang van grote velden

Er wordt algemeen gepleit voor zo groot mogelijke afmetingen van de beelden in voertuigssimulatoren. Een groot veld zou het realisme van de simulator verbeteren, men heeft sterker de illusie in de scene te bewegen, dan er enkel naar te kijken (Proffitt & Kaiser, 1986; Foley, 1987).

Bij visueel geïnduceerde bewegingssensatie (VIB) of vectie, heeft de waarnemer een sensatie van voortbeweging dankzij de detectie van (uniforme) beweging, met name in het perifere visuele veld (Leibowitz & Post, 1982). Bij voertuigssimulatie is een correcte illusie van voortbewegen uiteraard zeer belangrijk. Gezien het belang van het perifere visuele veld bij vectie, is er een groot beeld nodig om dit op te wekken. Horizontaal is hiervoor meer dan 60° nodig, en het meest effectief zou een beeldgrootte van 180° of meer zijn (AGARD, 1980).

3.1.3 Problemen bij grote velden

De meest gebruikte beeldsystemen in simulatoren hebben een (buiten)veldgrootte die hoogstens 50° horizontaal (h.) en 35° verticaal (v.) per kanaal beslaat

(Baarspul, 1990). Voor het verkrijgen van grotere velden kunnen meerdere kanalen gecombineerd worden. Dit heeft echter allerlei nadelen. Zo stijgen met het toenemen van het aantal kanalen de kosten van het beeldsysteem evenredig (Fischetti & Truxal, 1985; Proffitt & Kaiser, 1986). Daarbij is het naadloos op elkaar aan laten sluiten van meerdere kanalen niet eenvoudig. In het geval waarbij de waarnemer direct kijkt naar meerdere monitoren is dat zelfs geheel onmogelijk (zie ook par. 3.2 - Beeldpresentatie).

Volgens AGARD (1980) is het bijzonder moeilijk om de beelden van meerdere monitoren, die op elkaar gestapeld zijn, correct op elkaar aan te laten sluiten. Vandaar dat, indien meerdere monitoren gebruikt worden om een groot veld te presenteren, deze meestal naast elkaar geplaatst worden. Verticaal is het veld dan beperkt. Voor het presenteren van beelden die een grote hoek beslaan, wordt dan ook vaak gebruik gemaakt van projectie. De beelden worden geprojecteerd op een scherm voor of op een koepel (dome) rondom de cabine van het voertuig. Echter ook bij projectie is het onmerkbaar op elkaar aan laten sluiten van meerdere kanalen niet eenvoudig. Behalve dat de scène-inhoud correct door moet lopen, moeten ook luminantie en kleur niet zichtbaar van elkaar verschillen.

Als men de visuele hoek per kanaal groter maakt zal dat, bij een gelijkblijvend aantal scanlijnen of pixels per kanaal, de resolutie verslechteren. De gewenste resolutie kan zo de maximale veldgrootte voorschrijven. Worden er pixels aan een kanaal toegevoegd om de afname in resolutie tegen te gaan, dan heeft dat weer als bezwaar dat, bij een gegeven reken capaciteit van het beeldsysteem, de bijwerkk frequentie afneemt (zie ook par. 3.7 - Bijwerkk frequentie).

Het is dus een probleem om een groot veld met een hoge resolutie aan te bieden. Een oplossing is de zogenaamde "area of interest" (AOI). Hierbij wordt een groot veld gebruikt met een lage resolutie. Een apart kanaal beeldt een klein veld met een hoge resolutie af op de positie waar de bestuurder naar kijkt. Zie verder bij par. 3.5 - Resolutie.

3.1.4 Veldgrootte en simulatorziekte

Naast het bezwaar van de hoge kosten en het probleem van de afstemming, hebben grote velden mogelijk nog een ander nadeel. Er lijkt een samenhang te zijn tussen grote velden en het optreden van simulatorziekte.

Kellogg en Gillingham (1986) merken op dat, met het verschijnen van vliegsimulatoren met grote velden, piloten ook symptomen begonnen te rapporteren die leken op de traditionele luchtziekte. Uit een overzicht van Kennedy e.a. (1989), omvattende 10 vliegsimulatoren, blijkt ook dat beeldsystemen met grote velden het meest frequent ongemak bezorgen. Simulatorziekte kwam het meest voor bij helicoptersimulatoren met gecollimeerde beelden, met veldgroottes tussen 130°-200° h. en 30°-50° v., en met een bewegingssysteem. De simulatoren met de laagste frequentie simulatorziekte waren "fixed wing" vliegtuigsimulatoren, met beelden die op een koepel geprojecteerd werden, en zonder bewegingssysteem. Maar het optreden van bewegingsziekte had geen eenduidig verband met veldgrootte of aanwezigheid van een bewegingssysteem.

Uit een literatuuroverzicht van Casali & Frank (1986) naar voorkomen van simulatorziekte in vlieg- en rijssimulatoren, blijkt ook weer de tendens dat simulatorziekte frequenter optreedt bij grote velden. Maar ook hier is geen duidelijk verband tussen simatoreigenschappen en het optreden van bewegingsziekte. Wel noemen Casali en Frank ook andere beeldeigenschappen die mogelijk een rol spelen bij het optreden van simulatorziekte, zoals de hoeveelheid detail in de getoonde scènes en de vervormingen in de beelden.

Het idee dat grote beelden, waarbij men meer dan bij kleine beelden de sensatie heeft te bewegen in de scene, bevorderlijk zouden zijn voor het optreden van simulatorziekte, past in de "neural mismatch" theorie, volgens welke bewegingsziekte wordt veroorzaakt door discrepanties tussen de visuele- en de vestibulaire en proprioceptieve zelfbewegingsinformatie (Bles e.a., 1991).

In een evaluatie-rapport van een AGARD conferentie, speciaal gewijd aan simulatorziekte (AGARD, 1987), wordt echter niet meer gesproken over grote velden als zijnde bevorderlijk voor het optreden van symptomen. Ook over andere mogelijke verbanden tussen simulator-ontwerp en simulatorziekte worden geen eenduidige uitspraken gedaan. Wel wordt in dit opzicht speciale zorg uitgesproken over het toepassen van hoofd- of oog-gekoppelde Area of Interest (par. 3.5.5).

3.1.5 *Gewenste veldgrootte voor vliegsimulatoren*

Gezien de bezwaren van grote velden en tegelijkertijd de vraag daarnaar, moet naar een compromis worden gezocht. Hoe groot moeten de buitenbeelden voor simulatoren zijn om de gewenste taken bevredigend uit te kunnen voeren? De minste validiteitsproblemen zijn uiteraard te verwachten als de veldgrootte van de beelden in de simulator gelijk wordt gemaakt aan die in het werkelijke voertuig. Dat betekent voor de meeste simulatoren grote velden. Het visuele veld van de mens is 190° h. bij 113° v., als hoofd en ogen gefixeerd zijn. Kan men vrijelijk hoofd en ogen bewegen dan is het horizontaal groter dan 360° en verticaal 170° (Baarspul, 1990). In voertuigen wordt het zicht op de buitenwereld beperkt door de carrosserie van het voertuig. Bij gevechtsvliegtuigen is het zichtbare veld het grootst, tot meer dan 300° h. en rond 150° v. (Clapp, 1985a). De prestatie op verscheidene deeltaken in simulatoren bleek echter bij (zeer) kleine buitenbeelden niet noemenswaardig te verslechteren. Zo werd het vermogen van piloten om een vliegtuig te besturen niet meetbaar slechter bij reductie van de veldgrootte tot 15° h. (Brown, 1976). Uit een onderzoek van Collyer e.a (1980) bleek dat veilig landen en opstijgen in een simulator nog mogelijk was bij veldgrootte van 10° h. bij 10° v.. Ook werd er geen significant verschil gevonden bij opstijgen en vliegen tussen velden van 48° h. bij 36° v. en 300° h. bij 150° v. (Perry e.a., 1977, in: Dixon e.a., 1988). Het enige verschil was dat bij kleinere velden piloten meer op de instrumenten vertrouwden. Lintern, Wightman & Westra (1984) vonden evenmin een effect van veldgrootte bij de training van landen op een vliegdekschip in een simulator.

Voor andere taken lijken grotere velden wel vereist te zijn. Kraft e.a (1982) vonden een significant verschil tussen kleine (40° h. bij 30° v.) en grote (114° h. bij 30° v.) velden als piloten in de simulator een bocht moesten maken voor de landing. Bij het kleine veld maakten de proefpersonen scherpere bochten dan bij het grote veld. Behalve voor het correct maken van bochten in een vliegtuig is een groot veld ook belangrijk bij het op geringe hoogte boven de grond vliegen (nap-of-the-earth). Dixon e.a (1989) vonden dat voor bombardieren vanaf geringe hoogte een veld van 160° h. bij 60° v. of meer nodig was voor het bereiken van bevredigende prestaties in een vliegsimulator. Een veld van 127° h. bij 36° bleek te klein voor deze taak.

Overigens vonden Kraft e.a. (1982) bij hun onderzoek naar het effect van veldgrootte op de landingsprestatie in een vliegsimulator, tevens een interactie-effect tussen veldgrootte en de scene-inhoud van de beelden. Bevatte de scènes veel detail dan was de prestatie beter bij het grote veld, bij detail-arme scènes was de prestatie beter bij het kleine veld. Lintern, Wightman & Westra (1984) vonden bij een vergelijkbare taak, het landen op een vliegdekschip, eenzelfde interactie-effect. Een verklaring voor dit verschijnsel ontbreekt.

Volgens een Military Standard (1970) is voor helicopters de veldgrootte in werkelijkheid 320° h. bij meer dan 90° v. (tot 70° boven de horizon; zijwaarts komen verticale velden tot -50° onder de horizon).

3.1.6 Gewenste veldgrootte voor rijnsimulatoren

Bij auto's is de grootte van het visuele veld van de bestuurder verticaal recht-vooruit ongeveer 40° (25° boven de horizon; 15° eronder). Horizontaal beslaat het veld, uitgezonderd eventuele achteruitkijkspiegels, rond de 200° . Daarvan neemt de voorruit tenminste 60° in beslag. Bij tanks kan het horizontale visuele veld van de bestuurder, wanneer die in de bovendekse positie zit, afhankelijk van het type, van ca. 120° h. oplopen tot meer dan 200° h.; naar boven toe is het veld dan onbeperkt.

In een rijnsimulator zou een veld van ongeveer 50° h. bij 40° v. het minimum zijn om enigszins realistische verkeerssituaties te kunnen presenteren (Haug e.a., 1990). Bij 40° v. is het wegoppervlak te zien vanaf ongeveer 4 meter voor de (gesimuleerde) auto; borden boven de weg zijn zichtbaar tot ongeveer 10 meter voor de auto. Een veld van 50° h. is wel erg beperkt. Ook met het gebruik van achteruitkijkspiegels (par. 8.1) blijven er dan nog aanzienlijke "dode hoeken" over. Voor manoeuvres als het veranderen van rijbaan, invoegen of afslaan naar rechts zou het andere verkeer niet voldoende afgebeeld kunnen worden (Haug e.a., 1990). Ook als zijverkeer op kruisingen gezien moet worden of voor het correct nemen van zeer scherpe bochten is een groot horizontaal veld gewenst (Korteling & Padmos, 1990).

Bij kleine buitenbeelden zijn de schattingen wat betreft de snelheid van voortbewegen vaak minder juist (Tenkink, 1989). Wellicht komt dat doordat hoofdzakelijk perifeer het visuele veld beperkt is en, zoals eerder al genoemd is, het perifere veld belangrijk is voor de bewegingssensatie. Salvatore (1968) vond dat proefpersonen in een auto hun snelheid significant hoger schatten als ze alleen

perifeer zicht hadden op de omgeving, dan wanneer ze recht vooruit een even klein beeld (25°) hadden. De snelheidsschattingen vanuit de periferie lagen dichterbij de werkelijke snelheid.

De Daimler-Benz simulator heeft een veldgrootte van 180° h. bij 30° v. en gebruikt daarvoor 6 kanalen die op de binnenkant van een koepel projecteren (Drosdol & Panik, 1985). Voor de nog te bouwen National Advanced Driving Simulator is een vergelijkbare veldgrootte voorgesteld, van 180° h. bij 39° v. (Haug e.a., 1990).

3.1.7 Gewenste veldgrootte voor vaarsimulatoren

Volgens van Breda e.a. (1983) is op scheepsbruggen in werkelijkheid het uitzicht in de orde van 280° h. bij 45° v. recht vooruit, en 30° v. opzij. Deeltaken kunnen op simulatoren uiteraard met veel kleinere velden worden geoefend of bestuurd. Schuffel (1974) gebruikt bijvoorbeeld voor een koershoud-taak beelden van 15° h..

3.1.8 Conclusies

De maximale veldgrootte van simulatorbeelden wordt bepaald door de veldgrootte in het werkelijke voertuig. Gevechtsvliegtuigen hebben het grootste veld, rond de 300° h. bij 150° v.; auto's hebben 200° h. bij 40° v.;

Een veldgrootte van dergelijke afmetingen heeft als nadelen dat het, bij behoud van resolutie, kostbaar is, en dat er bij grote velden frequenter simulatorziekte optreedt.

Bij veel deeltaken heeft de grootte van het veld geen kritische invloed op de prestatie. Bij rijsimulatoren zou 50° h. bij 40° v. de minimaal bruikbare veldgrootte zijn. Landen in een vliegsimulator is ook nog goed mogelijk bij een veld van 50° h. bij 40° v.. Voor het (simuleren van) vliegen op geringe hoogte (NOE) lijkt een veldgrootte van 160° h. bij 60° v. het minimaal aanvaardbare.

3.2 Beeldpresentatie

3.2.1 Monitoren

De beelden in simulatoren worden gepresenteerd met behulp van monitoren of projectoren. Zoals al genoemd is in par. 3.1 - Veldgrootte, zal men meerdere monitoren moeten gebruiken om de gewenste veldgrootte te bereiken en ondertussen een aanvaardbare resolutie te behouden. Direct zicht op enkele naast elkaar geplaatste monitoren heeft als nadeel dat er relatief grote, donkere scheidingsgebieden zitten tussen de kanalen, als gevolg van de kasten van de monitoren. Een groot continu beeld is dus onmogelijk.

Een ander bezwaar van direct zicht op monitoren dat genoemd wordt, is dat vanwege de beperkte afmetingen van monitoren, vaak een korte kijkafstand nodig is om voldoende veldgrootte per monitor te bereiken. Voor een veldgroot-

te van 60° diagonaal, bij een gebruikelijke beeldgrootte van 60 cm diagonaal, is bijvoorbeeld een kijkafstand van slechts 52 cm nodig. Als gevolg van de geringe kijkafstand zou de illusie van diepte in de scène, gegeven door het perspectief, grotendeels teniet worden gedaan (AGARD, 1980). Het optreden van oogvermoeidheid wordt ook aangewend als argument tegen zo'n kleine kijkafstand. Dit lijkt echter niet erg plausibel, gegeven het feit dat dergelijke kijkafstanden tot een monitor ondermeer bij kantoorwerk normaal zijn. Om bovengenoemde problemen te verminderen zouden volgens AGARD (1980) de beelden op minstens 2 meter afstand gepresenteerd moeten worden (zie ook par. 3.2.4). Om in dat geval een redelijke veldgrootte te bereiken, moet men de beelden op schermen projecteren of de beelden afkomstig van monitoren collimeren.

3.2.2 Collimatie

Bij collimatie worden met behulp van lenzen of half- en holle spiegels de lichtstralen van ieder beeldpunt zo gebroken dat ze parallel gaan lopen. Optisch komt het hele beeld zo op oneindig te staan (AGARD, 1981). Gecollimeerde beelden van 2 à 3 monitoren kunnen horizontaal vrijwel naadloos worden aaneengeschakeld (afgezien van mogelijke kleur- of helderheidsverschillen), teneinde het gezichtsveld te vergroten. Een groot gecollimeerd beeld kan ook worden verkregen door drie naadloos aaneengesloten (relatief kleine) geprojecteerde beelden via een zeer grote holle spiegel te presenteren (Todd, 1988; Kent, 1990).

Doordat de afgebeelde scène optisch op oneindig staat komen de accommodatie en het waargenomen perspectief overeen (althans in vliegsimulatoren), hetgeen de illusie van diepte zou versterken, ook al staan de monitoren zelf dicht bij de waarnemer (Geltmacher, 1988). Volgens Padmos (1989a) is een andere verklaring voor de gewaarwording van diepte bij een gecollimeerd beeld aannemelijker. Bij zijwaartse verplaatsing van het oog van de waarnemer is de parallax in de gecollimeerde scène heel klein, alsof die zich op grote afstand bevindt. Hierdoor ontstaat één van de weinige binoculaire diepte cues in de simulator, namelijk de binoculaire dispariteit tussen de scène en de cabine van de simulator. Dit versterkt de perceptie van afstand tussen het buitenbeeld en de rand van het beeld in de cabine. Ook de bewegingsparallax tussen scene en cabine, die ontstaat als de waarnemer zijn hoofd beweegt, kan bijdragen tot de dieptege-
waarwording.

Dezelfde effecten wat betreft de illusie van diepte, zijn in principe ook te bereiken door de beelden op geruime afstand van de waarnemer te projecteren. Het voordeel van collimatie ten opzichte van projectie is dat het totale beeldpresentatie-systeem compacter is, dat het minder onderhoud vraagt, dat het goedkoper is en dat het minder weegt. Dit laatste is van belang in verband met het bewegingssysteem (moving base) van de simulator. Wat betreft luminantie, resolutie en contrast schijnt er in het algemeen geen verschil tussen geprojecteerde en gecollimeerde beelden te zijn (SEOS, mondelinge mededeling). Zonder collimatie is het luminantieniveau van monitoren aanzienlijk hoger dan

van geprojecteerde beelden. Maar na collimatie is er geen verschil meer, omdat collimatiesystemen een groot deel van het licht absorberen (par. 3.3.3).

Een ander probleem bij collimatie is dat de grootte- en afstandswaarneming van nabije objecten erdoor wordt aangetast. Dit speelt vooral een rol bij simulatie van voertuigen waarbij de ooghoogte boven het terrein gering is, zoals bijvoorbeeld bij auto's (ongeveer 1,2 m). Men kan de illusie krijgen zich hoger boven de grond te bevinden dan in het werkelijke voertuig het geval is. Deze ooghoogte-illusie wordt volgens Padmos (1989a) veroorzaakt door eerder genoemde gewaarwording van grote afstand van de gecollimeerde scène. Daardoor ontstaat er een conflict in het onderste deel van de beeld, waar het perspectief een kleinere afstand suggereert. Het menselijk visueel systeem zou dit conflict oplossen door de waargenomen ooghoogte hoger te plaatsen dan volgens het simulatormodel zou moeten. Bij vliegtuigen of (zee)schepen, waar de dichtstbijzijnde objecten zich toch meestal op grote afstand tot de waarnemer bevinden, speelt dit probleem meestal geen rol, behalve wellicht in de laatste fase van een vliegtuiglanding.

Iavecchia e.a. (1988) en Roscoe (1989) vinden echter in vliegtuigsimulatoren (en ook bij Helmet Mounted Displays en Head Up Displays) ook een systematische overschatting van de afstand bij gebruik maken van gecollimeerde beelden. Zij wijden dit aan een onwillekeurig te sterke accommodatie (ondanks het optisch op oneindig staan van het beeld) in de richting van het "resting focus of accommodation". Aangezien men met een geaccommodeerd oog beelden kleiner waarneemt dan met een oog dat op oneindig is gefocusseerd, zou dit leiden tot een overschatting van de afstand van objecten. Zij bevelen daarom aan om deze beelden enigszins vergroot ($\times 1,25$) aan te bieden. Voor rijnsimulatoren lijkt dit ons geen goede oplossing (par. 3.1.1).

Bij projectie van beelden komt de ooghoogte-illusie niet voor. Vandaar dat voor rijnsimulatoren projectie vermoedelijk te verkiezen is boven collimatie.

3.2.3 Projectie

Bij projectie heeft men nog de keus tussen doorzicht- of opzicht projectie en tussen een vlak of een gekromd projectiescherm. Het voordeel van doorzichtprojectie is dat het contrast wat beter is dan bij opzichtprojectie (zie ook par. 3.4 - Contrast-ratio) en dat de luminantie groter kan zijn. Het vermijden van een "hot spot", dat is een veldgedeelte in de richting van oog naar projector met een (aanzienlijk) hogere luminantie dan gemiddeld over het veld, is echter niet eenvoudig bij de gangbare veldgrootten per kanaal.

Van vlakke projectieschermen is het bezwaar dat het (heel) moeilijk is om scheidingsgebieden de overgang van kanalen onzichtbaar te maken. Op gekromde schermen, zoals een koepel (dome), kunnen de kanalen vloeiend op elkaar aansluiten, dankzij de mogelijkheid van "edge blending". Bij het projecteren op gekromde schermen kunnen zich wel vervormingen voordoen in de beelden, aangezien normaal gesproken ervan uit wordt gegaan dat deze op een recht vlak worden geprojecteerd. Vooral aan de randen van het scherm kunnen de vervor-

mingen opvallend zijn. Sommige beeldsystemen houden bij het berekenen van de (geometrie in de) beelden al rekening met die vervormingen. Een andere mogelijkheid is om bij de uiteindelijke projectie te compenseren voor de vervormingen (SEOS, 1990).

3.2.4 *Viewing area en kijkafstand*

De gepresenteerde beelden in simulatoren zijn zo opgebouwd dat een waarnemer in principe slechts vanuit één punt een perspectivisch volledig correct beeld krijgt. Er kan dus maar één enkele waarnemer zijn, die bij een kleine kijkafstand zelfs zijn hoofd stil moet houden. In simulatoren is dat vaak onwenselijk. Neem bijvoorbeeld scheepssimulatoren. Op de gesimuleerde brug van het schip moeten meerdere personen, die soms wel enkele meters bewegingsruimte hebben, min of meer hetzelfde perspectief zien. De "viewing area", het gebied waarbinnen een waarnemer nog een acceptabel beeld ziet, moet in dat geval, horizontaal, wel enkele meters groot zijn. Een boei op grote afstand moet vanuit alle mogelijke waarnemingsposities op de brug in ongeveer dezelfde richting gezien worden. Met andere woorden, de parallax in de simulatorbeelden moet binnen bepaalde grenzen blijven.

Bij projectie wordt de grootte van de viewing area grotendeels bepaald door de afstand tussen de waarnemer en het projectiescherm. Afhankelijk van de benodigde viewing area zal die afstand groter moeten zijn. Om, gegeven de gewenste grootte van de viewing area, de minimaal vereiste kijkafstand te bepalen, is een, niet gevalideerde, vuistregel op te stellen:

$$\text{minimale kijkafstand} = \frac{\text{benodigde viewing area}}{\tan(\text{max. toegestane parallax})}$$

Bij rijssimulatoren, met één waarnemer, wordt een kijkafstand tussen de 3 en 4 m gebruikt. Bij de Daimler-Benz rijssimulator is die afstand bijvoorbeeld 3,7 m. Bij een effectieve viewing area van, zeg, 5 cm treedt dan altijd nog een parallax op van 0,8 graad. Voor een rijssimulator lijkt een veel grotere parallax niet aanvaardbaar. Een kijkafstand van tenminste 3 m lijkt dus aan te bevelen.

Het collimeren van monitorbeelden levert een viewing area op van enkele centimeters (AGARD, 1980). Een nadeel van gecollimeerde beelden is wel dat buiten de viewing area het beeld vaak sterk vervormt (Brown, 1976), terwijl zonder collimatie de degradatie van de beelden meestal gradueel is (AGARD, 1981).

Met gecollimeerde projectorbeelden kan een veel groter viewing area worden bereikt: 2 m horizontaal bij 0,5 m verticaal (AGARD, 1980), waardoor twee waarnemers (bijv. 1e en 2e vlieger) er naar kunnen kijken.

3.2.5 *Conclusies*

Uit oogpunt van ruimtebesparing, de grootte van de viewing area, en het realisme, is het aan te bevelen de beelden afkomstig van monitoren of projecto-

ren te collimeren. Wel kan collimatie de afstands- en grootte waarneming van objecten op geringe afstand tot de waarnemer storen. Vooral bij rijsimulatie kan dat hinderlijk zijn. Daarom is het wenselijk bij rijsimulatoren de beelden te projecteren, zonder collimatie. In dat geval moet de kijkafstand tot het projectiescherm niet kleiner zijn dan 3 m.

3.3 Luminantie

3.3.1 Definitie

Voor het beschrijven van het luminantieniveau van simulatorbeelden bestaan er meerdere maten. Bedoeld kan worden de luminantie van kleine punten (piek luminantie) of het luminantieniveau van meer uitgebreide vlakken, bijvoorbeeld de lucht, ook wel aangeduid met rasterluminantie (Farrell & Booth, 1975). De maximale luminantie van kleine punten is bij beeldsystemen vaak een factor 2 groter dan die van grotere vlakken. De laatste is voor simulatorbeelden over het algemeen relevanter. De piekluminantie is van toepassing op af te beelden lichtpunten in de scène.

Het luminantieniveau van de beelden is van invloed op de gezichtsscherpte van de waarnemer (par. 2.1.1 voor definitie). Een toename in de luminantie gaat, tot een bepaald punt, gepaard met een verbetering van de gezichtsscherpte. De maximale en minimale luminantieniveaus bepalen ook de contrast-ratio die mogelijk is voor een beeldsysteem.

3.3.2 Wenselijke luminantie in simulatoren

Een toename in de (piek)luminantie van kleurendia's van 69 tot 500 cd/m² ging gepaard met een toename in de subjectief beoordeelde kwaliteit (van der Zee & Boesten, 1980). Volgens Farrell & Booth (1975) is voor het correct localiseren van objecten in een scène een luminantie-niveau van minstens 35 cd/m² nodig en is in het algemeen voor moeilijker taken een grotere luminantie nodig. In vliegsimulatoren worden luminantieniveaus van 15-20 cd/m² voor het verbeelden van een zonnige dagscène al acceptabel gevonden (AGARD, 1981). Hierbij gaat het dan ook om de piekluminantie. Ook in filmtheaters wordt voor het tonen van heldere, zonnige dagen slechts 20-30 cd/m² gebruikt (Baarspul, 1990). Vergelijk dit met een heldere, zonnige, dag in werkelijkheid, als de luminantie van de lucht meer dan 3000 cd/m² en die van de grond minstens 300 cd/m² bedraagt.

In de bioscoop zowel als in de simulatorcabine moet, bij de gangbare luminantieniveaus van de beelden, het verlichtingsniveau laag zijn om een aanvaardbaar contrast te behouden. Dit kan bezwaarlijk zijn als de bestuurder ook in de cabine goed moet kunnen zien, bijvoorbeeld voor het aflezen van metertjes of voor kaartlezen.

Als na te streven maximale luminantieniveaus voor simulatorbeelden wordt 300 tot 400 cd/m² genoemd (AGARD, 1980; Clapp, 1985a). Ondermeer met als reden om de omgevingsverlichting in de cabine gedurende dag-scènes te kunnen verhogen (Kent, 1990). Functioneel is er voor nog hogere luminantieniveaus geen reden, omdat de gezichtsscherpte boven de 400 cd/m² nauwelijks meer verbetert (Pirenne, 1948).

De Federal Aviation Administration stelt echter als eis voor vliegsimulatoren, die geschikt zijn voor trainingsfase III (de meest veeleisende), een maximale luminantie voor dagscènes van slechts 20 cd/m² (FAA, 1980). Bij een luminantie van 20 cd/m² is de gezichtsscherpte gemiddeld 80% van de gezichtsscherpte bij een luminantie van 400 cd/m². Voor niet kritische (deel)taken zal dat geen bezwaar opleveren (zie par. 3.5 - Resolutie). Een laag luminantieniveau stelt wel beperkingen aan het mogelijk contrast.

Bij vrij lage luminantieniveaus kunnen verschillende storende verschijnselen vermeden worden die wel optreden bij hoge niveaus. Zo kunnen grote vlakken, bijvoorbeeld de lucht, bij een luminantie van 100 cd/m² of meer waarneembaar gaan flikkeren bij een opfrisfrequentie van 50 Hz (zie ook par. 3.8 - Opfrisfrequentie). Ook verslechtert de resolutie van CRT-monitors of -projectoren bij hoge luminantieniveaus (BARCO, 1988). Voor een grotere luminantie moet de sterkte van de elektronenstraal toenemen, waardoor de spotgrootte op het beeldscherm toeneemt en de resolutie afneemt. Zogenaamde light valve-projectoren hebben dat bezwaar niet, doordat het luminantieniveau en de resolutie niet gekoppeld zijn (Gold, 1990). Volgens Todd (1988) is het toepassen van light valve-projectoren bij simulatie echter nog niet mogelijk, omdat deze nog niet in staat zijn om in real-time beelden te produceren. Daarnaast zijn deze projectoren aanzienlijk duurder dan conventionele CRT-projectoren.

Voor het afbeelden van dagscènes zou het luminantieniveau volgens Geltmacher (1988) in ieder geval zo hoog moeten zijn dat het oog in het fotopische bereik zit, dat is rond de 10 cd/m². Voor het valide weergeven van nachtscènes (in verband met de verminderde gezichtsscherpte en het verminderde contrast- en kleurzien vermogen bij lage luminanties), moet de minimum luminantie (ver) onder de 1 cd/m² kunnen dalen, met behoud van voldoende contrast. Dit zal lang niet altijd mogelijk zijn. Door gebruik te maken van lichtpunten kan de suggestie van een nachtscène echter worden versterkt. Een andere mogelijkheid om nachtscènes te imiteren is het plaatsen van een grijsfilter tussen de beelden en de waarnemer.

3.3.3 Luminantie in huidige simulators

De meeste beeldsystemen van simulators hebben een maximale piekluminantie tussen de 20 en 30 cd/m² (Baarspul, 1990). De maximale luminantie van grote vlakken ligt over het algemeen slechts tussen de 5 en 15 cd/m². Deze waarden gelden voor (CRT-)projectie en voor gecollimeerde monitorbeelden. Bij direct zicht op een monitor zijn luminantie-niveaus tot enkele honderden cd/m² mogelijk. Maar bij collimatie absorberen de collimerende optische elementen een groot deel van het licht. Het percentage van de licht dat geabsorbeerd wordt,

wordt geschat op 80% (AGARD, 1980) tot meer dan 90% (Haber, 1986). Met de zogenaamde light valve-projectoren is het mogelijk om luminantieniveaus van ruimschoots over de 1000 cd/m^2 te bereiken (Gold, 1990).

Over de minimale luminantie van beeldsystemen wordt in de gebruikte literatuur geen melding gemaakt. Minimale luminantieniveaus worden mede beïnvloed door de omgevingsverlichting (zie par. 3.4 - Contrast-ratio). Mogelijk dat om die reden het minimale niveau van het beeldsysteem niet bij voorbaat gegeven kan worden.

3.3.4 *Conclusies*

De maximale luminantieniveau van simulatorbeelden ligt momenteel in het algemeen tussen de 20 en 30 cd/m^2 . Deze waarden zijn voldoende voor het overtuigend verbeelden van (zonnige) dagscènes, mits het niveau van de omgevingsverlichting laag is. Wil men meer verlichting hebben in de simulatorcabine, dan zal het luminantieniveau van de beelden ook verhoogd moeten worden; gesproken wordt over $300\text{-}400 \text{ cd/m}^2$.

3.4 Contrast-ratio

3.4.1 *Definitie*

Bij beeldsystemen zijn er meerdere betekenissen mogelijk van het begrip contrast-ratio (AGARD, 1981). Vaak wordt de contrast-ratio gebruikt voor het beschrijven van de ratio van de maximale luminantieniveau bij een relatief klein, volledig wit, veld en het minimale luminantieniveau, bij een volledig donker veld (display contrast). Deze ratio hoeft echter niet te corresponderen met het maximale contrast in een afgebeelde scène, waarin vele contouren zitten. Immers de maximale luminantie bij een relatief klein gebied, hoeft niet te gelden voor de oppervlakte van het gehele beeld. Verder wordt het minimale luminantieniveau van de simulatorbeelden door 3 factoren beïnvloed: a) ruis (minimale fosforluminantie); b) strooilicht van buitenaf, in dit geval de cabine van de simulator; c) strooilicht binnen het presentatiesysteem (van andere kanalen, of door reflectie van de halfspiegel in de collimator) of vanaf het presentatiesysteem via de cabine.

Bij de genoemde meetmethode spelen slechts a) en b) een rol. Terwijl aangenomen mag worden, dat in de praktijk bij simulatoren c) de belangrijkste factor is. Een zinnvoller definitie van contrast-ratio is daarom de luminantieverhouding van een wit/zwart schaakbordpatroon, met velden van enkele graden groot, en van resp. maximum en minimum luminantie. In dat geval geeft het strooilicht een realistisch minimum-zwart niveau (SEOS, 1990).

3.4.2 *Problemen*

De contrast-ratio is dus, wat betreft de factoren ruis en strooilicht van buitenaf, gerelateerd aan de luminantieniveaus van het beeldsysteem. In par. 3.3 - Luminantie bleek al dat voor simulatorbeelden, na collimatie of bij projectie, de maximale luminantie zelden boven de 20-30 cd/m² komt. Het vergroten van het contrast door middel van het vergroten van de maximale luminantie, kan echter een vermindering van de resolutie tot gevolg hebben.

Het is tevens van belang op te merken, dat bij dynamische beelden de contrast-ratio kleiner kan zijn dan bij statische beelden, vooral voor kleinere details zoals lichtpunten. Dit wordt veroorzaakt door verschillende integratie- en vervalprocessen in de afbeeldapparatuur, of in de apparatuur die het beeld opneemt (nalichttijd), wat de luminantiedistributie van een bewegend object breder maakt. In een CGI-systeem met CRT-monitor zouden deze processen vrij onbeduidend zijn, maar ze kunnen aanzienlijk zijn bij video-maquette-systemen of CGI-systemen met trage monitoren (AGARD, 1981).

3.4.3 *Belang van contrast*

Het contrast heeft een belangrijke invloed op het mogelijk oplossend vermogen van het oog (van Nes & Bouman, 1967). Voor deeltaken waarin men kleine objecten moet herkennen op grote afstand, kan de contrast-ratio van de beelden daarom kritisch zijn (Kennedy e.a., 1988). De (gesimuleerde) afstand waarover de oriëntatie van een object gedetecteerd kon worden, bleek bij een grote contrast-ratio (23:1) 40% groter dan bij een kleine ratio (2,2:1). Ook als het gaat om het zien van contouren met een laag intrinsiek contrast in relatief donkere gedeelten van het beeld, is een grote contrast-ratio wenselijk.

Bij vliegen op grote hoogte ziet men in werkelijkheid zelden contouren met een groot contrast. Een bestuurder van een auto of tank hoeft, om juist te navigeren, alleen objecten te detecteren die relatief dichtbij zijn. Daarvoor is een groot visueel veld vereist, maar het contrastniveau is niet zo kritisch (Bess, 1989). Allen e.a. (1977) vonden dat bij vermindering van de contrast-ratio's van de belijning op de weg 5:1 tot 1,4:1, het handhaven van de positie in een auto op de weg geleidelijk moeilijker werd. Het effect was echter klein.

In werkelijkheid neemt, als gevolg van het vertewaas, het contrast af met het toenemen van de afstand van objecten. Het gebruik van vertewaas in simulatorbeelden kan nuttig zijn om tot een betere afstandsschatting te komen (zie par. 6.1 - Meteorologische effecten).

3.4.4 *Gewenste contrast-ratio*

Als ideale contrast-ratio in simulatoren wordt wel 1000:1 genoemd; dit benadert de werkelijkheid (AGARD, 1980). Deze waarde is momenteel te bereiken met direct zicht, in het pikkedonker op een goede monitor. Het strooilicht (factoren b. en c.) is dan te verwaarlozen. Verder is zo'n contrast-ratio met de huidige luminantieniveaus van simulatorbeelden zinloos.

De meeste bestaande enkel-kanaals beeldsystemen hebben een contrast-ratio die varieert tussen 15:1 en 25:1 (Baarspul, 1990). Voor het merendeel van de toepassingen zal dit voldoende zijn. Voor gewone (CRT)projectoren is 25:1 wel ongeveer het maximum, waarbij het contrast bij doorzichtprojectie over het algemeen beter is dan bij opzichtprojectie. Zogenaamde light valve-projectoren kunnen een ratio van 100:1 halen.

Bij projectie vermindert het contrast bij toenemende veldgrootte van de beelden. Zo zou bij opzichtprojectie en een veld van 140° h. en 35° v. de contrast-ratio niet meer dan circa 10:1 bedragen (SEOS, 1990).

3.4.5 *Conclusies*

De gebruikelijke contrast-ratio in simulatorbeelden ligt tussen de 10:1 en 25:1. Voor de meeste toepassingen is dat voldoende groot. In gevallen dat kleine objecten op grote afstand herkend moeten worden, of bij het zien van contouren met een laag contrast in donkere scènes, kan een grotere contrast-ratio gewenst zijn. De als ideaal voorgestelde ratio van 1000:1 lijkt echter vooralsnog niet haalbaar.

3.5 Beeldresolutie

3.5.1 *Definitie*

Resolutie staat bij een beeldsysteem voor het vermogen om kleine details herkenbaar af te beelden. Het wordt als één van de belangrijkste kenmerken van beeldsystemen van simulatoren beschouwd. Helaas is het begrip resolutie niet eenduidig gedefinieerd. Zo moet er onderscheid gemaakt worden tussen adresseerbare resolutie en afgebeelde resolutie.

Adresseerbare resolutie verwijst naar het aantal beeldpunten (pixels) of -lijnen (locaties) dat door de beeldgeneratie computer op het scherm kan worden geadresseerd. Afgebeelde resolutie slaat op de optische resolutie zoals die uiteindelijk wordt waargenomen, en door een fotometer wordt gemeten (Snyder, 1988). In het algemeen is de afgebeelde resolutie slechter dan de adresseerbare resolutie. Overstraling tussen de beeldpunten en aliasing-effecten (par. 3.10 - Anti-aliasing) kunnen hiervan de oorzaak zijn.

De zgn. "Kell factor" geeft de vermindering van resolutie aan ten gevolge van discrete bemonstering (sampling) met scanlijnen (zoals bij TV raster beelden) van een bepaalde spatiële frequentie, ten opzichte van een analoge (bv. optische) filtering met dezelfde spatiële frequentie. Hoewel er verschillende waarden voor de Kell factor in omloop zijn, afhankelijk van precieze definitie en meetmethode, is de waarde 0,7 in de meeste gevallen een redelijke benadering (Hsu, 1986).

De afgebeelde resolutie kan eigenlijk alleen exact worden gespecificeerd in relatie tot de MTF (Modulation Transfer Function). Deze beschrijft de con-

trastverzwakking als functie van de spatiële frequentie. De meest optimistische definitie is de zogenaamde "limiting resolution", waarbij de MTF 0,024 bedraagt. Snyder (1988) geeft tevens de MTF van verschillende andere definities van resolutie. BARCO (1988) noemt ook enkele definities waarbij opgemerkt wordt dat, mits niets anders wordt gespecificeerd, vaak de resolutie behorende bij $MTF=0,25$ wordt bedoeld. Deze resolutie is vaak een factor 0,6 kleiner dan de limiting resolution.

Resolutie kan worden uitgedrukt in (beeld)lijnen per graad visuele hoek, (optische) lijnpaaren² of perioden per graad, of in pixels per graad. In plaats van "per graad" komt ook voor de aanduiding "per (bruikbare) beeldhoogte of -breedte" of "per afstandseenheid". De eenheid "lijnen per beeldhoogte" is zinvol bij het beoordelen van een monitor onafhankelijk van de kijkafstand. De eenheid "beeldlijnen per graad" is voor een monitor slechts zinvol in combinatie met een gegeven kijkafstand. Meestal wordt echter de kijkafstand bij simulatoren zodanig gekozen dat de hoekvergroting van het voorwerp-monitorbeeld-waarnemer systeem 1:1 is (zie par. 3.2 - Beeldpresentatie). Dan kan men de resolutie in beeldlijnen per graad interpreteren als betrokken op de voorwerpsruimte.

In het vervolg zal als eenheid voor resolutie het aantal beeldlijnen per graad (afgekort l/g), betrokken op de voorwerpsruimte, gebruikt worden. Wordt resolutie zonder meer genoemd, dan gaat het om de afgebeelde limiting resolution.

Uit het voorgaande volgt dat, voor de hier gehanteerde resolutiemaat, de kleinste van de volgende twee resoluties van belang is: 1) de adresseerbare resolutie van het beeldsysteem (uitgedrukt in pixels/graad) maal 0,7 (Kell factor), tenzij voldoende anti-aliasing is toegepast; of 2) de afgebeelde resolutie van het display.

3.5.2 Benodigde resolutie bij verschillende taken

Het vermogen van het oog om kleine details waar te nemen wordt gezichtscherpte genoemd (voor definitie zie par. 2.1.1). Een praktische grenswaarde voor de gezichtsscherpte is 1 bgmin^{-1} . Deze wordt door circa 85% van de personen boven de 18 jaar gehaald of overtroffen, bij optimale kijkomstandigheden (Walraven & Blokland, 1980). Een beeldresolutie van 60 l/g (30 lijnpaaren/g) komt dus overeen met een gezichtsscherpte 1 (zie Boff e.a., 1986, voor een vergelijking van diverse meetmethoden voor gezichtsscherpte), en zou dus voor 85% van de waarnemers een effectieve achteruitgang in beeldscherpte betekenen vergeleken bij het zien van werkelijke scènes.

Westerink en Roufs (1988) onderzochten voor geprojecteerde dia's met een gemiddelde luminantie van 30 cd/m^2 , de subjectieve beeldkwaliteit als functie van de resolutie. Zij vonden een verzadiging bij ongeveer 50 l/g.

² De verwarring wordt nog vergroot doordat optische lijnpaaren ook wel worden aangeduid als optische lijnen.

Volgens P. Eisen (persoonlijke mededeling) is echter een resolutie van 40 l/g voldoende om door proefpersonen, die zonder kritische taak naar het beeld kijken, als "goed" gekwalificeerd te worden. Bovendien is de resolutie van het oog mede afhankelijk van de luminantie van het beeld. Gezien de (vrij lage) luminantieniveaus van simulatorbeelden (zie par 3.3 Luminantie), zal de subjectief aanvaardbare kwaliteit voor het beeld vermoedelijk nog lager kunnen zijn dan 40 l/g. De Daimler-Benz rijnsimulator heeft een resolutie van 20 l/g. Toen deze resolutie een factor 2 slechter werd gemaakt gaf dat volgens de beheerder van de simulator een onacceptabele verslechtering (Padmos, 1989b).

Indien de resolutie van het beeldsysteem echter minder is dan overeenkomend met gezichtsscherpte 1 kan dat, afhankelijk van de taak, verschillende functionele problemen geven. Zo worden kleine objecten of objecten op grote afstand minder opvallend en herkenbaar dan in werkelijkheid (AGARD, 1980; Kennedy e.a., 1988). Bij het landen, of het rijden op een snelweg, kan dit zeer hinderlijk zijn. Miller e.a. (1983) stellen dat voor het correct simuleren van sommige verkeerssituaties tegemoetkomend verkeer al op vele honderden meters zichtbaar, zoniet herkenbaar, moet zijn. Het op ware grootte afbeelden van tekst op borden langs de weg stelt eveneens hoge eisen aan de resolutie, omdat de gebruikte lettergrootte in werkelijkheid vaak gerelateerd is aan voldoende leesafstand voor een waarnemer met een gezichtsscherpte 1 (van Norren, 1981; Haug e.a., 1990).

Een resolutie van 60 l/g voor beeldsystemen van (vlieg)simulatoren wordt dan ook als ideaal genoemd (AGARD, 1980; Clapp, 1985a). Anderen stellen minder hoge eisen. De Federal Aviation Administration (1980) eist voor vliegsimulatoren bestemd voor fase III-training een beeldresolutie van niet meer dan 20 l/g. Korteling (1991) vermoedt, mede op grond van een theoretische beschouwing over het zien bij het autorijden, dat een (veel?) lagere resolutie dan 60 l/g toereikend is voor de training van (beginnende) chauffeurs.

Een algemene vuistregel voor de benodigde resolutie (in l/g) voor het herkennen van objecten met voldoende groot contrast, van een bepaalde groote (in m) op een bepaalde afstand (in m), volgt uit het Johnson-criterium, dat zegt dat voor het herkennen van een object tenminste 8 beeldlijnen over het object moeten vallen (Bess, 1989; Clapp, 1985b):

$$\text{benodigde resolutie} = \frac{0,14 \cdot \text{object afstand}}{\text{object grootte}}$$

Voor detectie zijn er tenminste 2 beeldlijnen nodig; de benodigde resolutie hiervoor is dus 1/4 van die voor herkennen.

De hier gegeven vuistregels zijn maar ruwe benaderingen; voor meer uitvoerige behandelingen van herkennen zij verwezen naar v. Meeteren (1990) en Overington (1982).

3.5.3 Resolutie in huidige beeldsystemen

Van de meeste monitors die momenteel gebruikt worden in simulatoren wordt een resolutie opgegeven van hoogstens 20 l/g, bij een veldgrootte van circa 60° diagonaal (Baarspul, 1990). Er bestaan wel monitors met een betere resolutie, tot 40 l/g (Proffitt & Kaiser, 1986; Foley, 1987). Meestal gaat het bij dit soort opgaven om adresseerbare resolutie, waarbij de afgebeelde resolutie dus nog minder dan 0,7 maal zo laag zal zijn. Calligrafische beeldschermen hebben over het algemeen een wat hogere effectieve resolutie dan rasterschermen, mede doordat aliasing daar een mindere rol speelt, maar zijn weer beperkt in het aantal kleuren dat ze af kunnen beelden (Baarspul, 1990). Tevens is de hoeveelheid mogelijk detail bij calligrafische beelden beperkt.

CRT-projectoren geven een resolutie die in dezelfde orde van grootte is als die van monitoren. De 20 l/g adresseerbare resolutie zal in de praktijk soms nog lager worden, bijvoorbeeld 6-8 l/g, als gevolg van (minderwaardige) anti-aliasing door smoothing (AGARD, 1980).

3.5.4 Resolutie bij bewegende beelden

Bij bewegende beelden is de resolutie meestal minder dan bij statische beelden. Bij dynamische beelden kan de MTF van een beeldsysteem verslechteren door factoren als de nalichttijd van de gebruikte fosforen (display decay time), of als gevolg van het optreden van interacties met samplingprocessen wat aliasing-effecten kan geven (Welch, 1982).

De gezichtsscherpte verslechtert echter ook bij dynamische beelden (dynamic acuity). Indien een schermfosfor wordt gebruikt met een nalichttijd die niet veel groter is dan nodig om waarneembaar flikkeren bij 60 Hz te voorkomen, zal de verminderde dynamische gezichtsscherpte eerder grenzen stellen aan de detailgrootte die nog opgelost wordt, dan de verminderde beeldresolutie (P. Eisen, persoonlijke mededeling).

3.5.5 Resolutie en veldgrootte

Het aantal pixels dat een digitaal beeldsysteem per tijdseenheid kan schrijven wordt aangegeven met de "pixel fill rate". Om een betere resolutie te bereiken moet het aantal pixels dat bij dezelfde veldgrootte op het beeldscherm geschreven wordt, toenemen. Om tot een afgebeelde resolutie van 60 l/g (dat betekent dus een adresseerbare resolutie van tenminste 90 pixels per graad) te komen, betekent dat voor een standaard veldgrootte per kanaal van 48° h. bij 36° v. ruim 9 miljoen pixels per frame, dus 540 miljoen pixels per seconde bij 60 Hz bijwerkfrequentie! Beeldsystemen met een dergelijke capaciteit bestaan (nog) niet; de huidige beeldsystemen leveren 40-160 miljoen pixels per seconde.

Uit het bovenstaande blijkt dat, als men grotere velden zou willen hebben bij gelijkblijvende resolutie, er nog zwaardere eisen worden gesteld aan de capaciteit van de beeldgeneratie computer. Met de huidige stand van de techniek is het onmogelijk om grote velden met een goede resolutie te produceren.

Een oplossing voor dit probleem is de "area of interest" (AOI) (Geltmacher, 1988; Longridge e.a., 1989; Tong, 1990). Hierbij maakt men gebruik van het gegeven dat de maximale gezichtsscherpte zich in een klein gebied van $\pm 2^\circ$ rond de kijkrichting bevindt. Bij deze methode wordt er een groot beeld met een lage resolutie geprojecteerd. Een apart kanaal projecteert daar overheen een klein veld met een grote resolutie (AOI) op de plaats waar de bestuurder naar kijkt. Om te zorgen dat deze vrijelijk zijn blik over het beeld kan laten gaan, moet de AOI mee bewegen met bewegingen van het hoofd en liefst ook met die van de ogen. Vooral dat laatste is niet eenvoudig. Tevens is het belangrijk dat de overgang van het gebied met relatief grote resolutie en de rest van het beeld geleidelijk verloopt.

Een andere oplossing is om slechts het centrale deel van het afgebeelde gezichtsveld uit te voeren met een hoge resolutie. De pixels worden zodanig verdeeld over het veld dat de beste resolutie zich rond het (centrale) fixatiepunt bevindt. Naar de randen van het veld toe, wordt de resolutie, d.w.z. het aantal pixels per graad, steeds lager (Geltmacher, 1988). Hierbij beweegt het gebied met de hoogste resolutie niet automatisch mee met het hoofd of de ogen.

3.5.6 *Conclusies*

Een (afgebeelde, limiting) resolutie van 60 lijnen per graad lijkt nodig voor kritische visuele deeltaken (bv. tijdig lezen van tekens op verkeersborden, inhalen bij tegenliggers, zien van verre boeien). De daarbij behorende adresseerbare resolutie van 90 pixels per graad is echter nog slechts voor relatief kleine velden te verwezenlijken.

De bestaande beeldsystemen in simulatoren hebben een resolutie die zelden boven de 15 lijnen per graad uitkomt. In veel gevallen lijkt dit toch subjectief bevredigend te zijn. Voor de combinatie van hoge resolutie met grote velden is men aangewezen op een apart kanaal van beperkte afmetingen maar hoge resolutie (area of interest), dat mee beweegt met het hoofd of de ogen; dit is echter een verre van eenvoudige techniek.

3.6 **Kleur- en helderheidsstappen**

3.6.1 *Belang van kleur*

Het toevoegen van kleur (eigenlijk: kleurverschillen of -contrasten) aan simulatorbeelden heeft als belangrijkste voordeel dat het mogelijk wordt om objecten beter te onderscheiden van hun achtergrond (Farrell & Booth, 1975). Kleur is zodoende nuttig bij taken waarbij het herkennen en identificeren van specifieke objecten belangrijk is. Daarnaast is een verdienste van kleur dat het de beelden realistischer maakt en daarmee de acceptatie door bestuurders vergroot (Brown, 1976).

Of kleur verder nog een bijdrage levert aan de prestatie in simulatoren is maar de vraag. Kellogg, Kennedy & Woodruff (1983) lieten ervaren piloten een

bombardeertaak uitvoeren in een vliegsimulator met afwisselend zwart-wit en kleuren beelden. Er bleek geen significant verschil tussen de prestaties in de twee condities.

Een bezwaar van het gebruik van kleur, is dat de resolutie van kleurenschermen over het algemeen lager is dan die van monochrome schermen. Subjectief wordt de resolutie van kleurenschermen echter beter beoordeeld dan van monochrome schermen, dankzij de toevoeging van kleurcontrasten (AGARD, 1981).

3.6.2 *Kleur in simulatorbeelden*

Kleur is onder te verdelen in 3 aspecten: kleurtoon, verzadiging en helderheid. Gezamenlijk vormen ze de kleurenruimte (colour space). Vaak worden met het woord kleur slechts de aspecten kleurtoon en verzadiging bedoeld; waar het geen verwarring kan geven wordt hier "kleur" in beide betekenissen gebruikt. De beschikbare omvang van de kleurenruimte van een monitor of projector is afhankelijk van de gebruikte schermfosforen. In het algemeen is de omvang voldoende om alle reflectiekleuren af te beelden.

De meeste moderne CGI-systemen beschikken over 24 bits RGB, wat in theorie voldoende is voor het gelijktijdig afbeelden van 16 miljoen ($=256^3$) verschillende kleur-helderheidscombinaties. In de praktijk zullen verschillende lagere RGB-waarden niet of nauwelijks zichtbaar zijn als gevolg van de geringe contrast-ratio's in simulatorbeelden. Maar al valt de helft van het totaal aantal kleuren af, dan is het resterende aantal nog ruimschoots genoeg voor het genereren van beelden die, qua kleur, realistisch zijn.

De afgebeelde kleuren hoeven niet eens geheel realistisch te zijn. Waarnemers zijn vrij tolerant voor afwijkingen van de kleuren in beelden met de kleuren in werkelijkheid (Brown, 1976). Belangrijk is wel dat de kleuren binnen de scène steeds consistent zijn. Bij het gebruik van meerdere monitoren voor meerdere kanalen is het ook belangrijk dat de kleuren van de afzonderlijke kanalen niet zichtbaar gaan verschillen, als gevolg van de instabiliteit van de monitoren. Om dat te voorkomen zouden de kleurverschillen van aangrenzende kanalen niet groter moeten zijn dan 2 à 3 CIELUV eenheden (Sproson, 1983). De CIELUV eenheden beschrijven een perceptief uniforme kleuren ruimte (Wyszecki & Stiles, 1982).

3.6.3 *Luminantiestappen*

Om de schaduweffecten als gevolg van de oriëntatie bij gekromde vlakken (zie par. 6.5 - Schaduweffecten) af te beelden, moet de luminantie van die vlakken geleidelijk veranderen. Om voor de waarnemer de overgangen tussen opeenvolgende helderheidsveranderingen vloeiend te laten verlopen, moeten de minimale luminantiestappen over het gehele luminantiebereik voldoende klein zijn. Dit kan vermoedelijk op bevredigende wijze geschieden door het totale luminantiebereik zodanig te verdelen in stappen dat opeenvolgende stappen niet meer dan een constante factor van 1,01 à 1,02 verschillen. Bij een contrast-ratio van 25:1 betekent dat respectievelijk ruim 300 à 150 luminantiestappen. Volgens de

voorgaande paragraaf blijven er dan nog 16 miljoen / 300 à 150 onafhankelijke combinaties van kleurtoon en verzadiging over. Een andere mogelijkheid is om een gradatie volgens de CIELUV- of Munsell-schaal te construeren (Wyszecki & Stiles, 1982).

3.6.4 *Conclusies*

De meeste moderne CGI-systemen kunnen ongeveer 16 miljoen kleuren genereren. Dat is voldoende om alle reflectiekleuren realistisch af te beelden. Tussen aangrenzende kanalen mag het kleurverschil niet meer bedragen dan 2-3 CIELUV-eenheden.

Voor het geleidelijk laten verlopen van helderheidsveranderingen, zouden opeenvolgende luminantiestappen maximaal met een factor 1,01 of 1,02 mogen verschillen.

3.7 **Bijwerkfrequentie (update frequency)**

3.7.1 *Definitie*

De bijwerkfrequentie in CGI-systemen is de frequentie (in Hz) waarmee een nieuwe beeldinhoud kan worden gegenereerd. Of preciezer gezegd, de frequentie waarmee de coördinaten van elk polygoon in de af te beelden scène bijgesteld kunnen worden in de beeldgeneratie pijplijn (AGARD, 1981). Bijwerkfrequentie wordt ook wel beeldfrequentie (frame-rate) genoemd (hoewel dat verwarring kan geven met de in par. 3.8 te introduceren opfrisfrequentie van de monitor of projector, die ook vaak met beeldfrequentie wordt aangeduid). De bijwerkfrequentie draagt in belangrijke mate bij aan de totale vertraging in het beeldsysteem van simulatoren, zie par. 3.9 - Beeldvertraging.

De bijwerkfrequentie is bij een gegeven rekensnelheid (uit te drukken in "pixel fill rate") gerelateerd aan de hoeveelheid pixels in het display en aan de hoeveelheid detail in de afgebeelde scène, of, meer in het algemeen, de scène-complexiteit (voor definitie zie par. 4.1.3). De hoeveelheid pixels is evenredig met de veldgrootte en de resolutie. Omdat de scène-complexiteit kan verschillen van beeld tot beeld, is ook de bijwerkfrequentie in het algemeen niet constant (maar wel aan een maximum gebonden). Het reduceren van de scène-complexiteit en de resolutie is dan ook een manier om de bijwerkfrequentie te verhogen (Profitt & Kaiser, 1986).

Voor de bijwerkfrequentie is niet slechts het aantal afgebeelde pixels van belang, maar ook de pixels die behoren bij objecten die (gedeeltelijk) worden afgeschermd door naderbij gelegen objecten. Een maat voor de gemiddelde mate van afdekking in een scène is de "depth complexity". Hoewel meermalen getalsmatige aanduidingen hiervan worden gegeven (o.a. Bess, 1989), hebben wij geen exacte definitie van deze grootheid kunnen vinden. Vermoedelijk is de depth complexity gelijk aan het totaal oppervlak van de zichtbare en afgedekte polygoon, gedeeld door het totaal oppervlak van de zichtbare polygoon.

Samengevat, kan dan de haalbare bijwerkfrequentie bij benadering als volgt worden uitgedrukt:

$$\text{bijwerk freq.} = \frac{\text{pixel fill rate}}{\text{aantal pixels} \times \text{depth complexity}}$$

3.7.2 Belang van bijwerkfrequentie

In een voertuigsimulator is het erg belangrijk dat men een illusie van continue beweging door de omgeving heeft. De beweging in computer gegenereerde beelden is echter nooit continu, maar stapsgewijs. Door een voldoende aantal discrete beelden per seconde aan te bieden is het wel mogelijk de illusie van continue beweging op te wekken. Bij welke bijwerkfrequentie die illusie voldoende optreedt zal afhangen van de hoeksnelheden waarmee, in werkelijkheid, objecten gezien vanuit het voertuig bewegen. Dit verschilt per type voertuig en de daarin uitgevoerde taken.

De bijwerkfrequentie voor voertuigen die zich met lage snelheid voortbewegen (schepen) of die zich op grote hoogte bevinden (vliegtuigen) hoeft veel minder hoog te zijn, dan bij het simuleren van snelle voertuigen die zich dicht bij de grond (veel detail) voortbewegen, zoals auto's, helicopters, en vliegtuigen die op geringe hoogte vliegen.

3.7.3 Gewenste bijwerkfrequentie

Stapsgewijze beweging is te vergelijken met schijnbare beweging (apparent motion). Bij schijnbare beweging bleek de maximale verplaatsing van een punt of voorwerp, waarbij de waarnemer nog de indruk heeft van continue beweging, rond de 15 boogminuten per stap te liggen (Braddick, 1974; Sperling, 1976). Uitgaande van die maximale verplaatsing tussen opeenvolgende beelden, is het mogelijk de minimaal vereiste bijwerkfrequentie vast te stellen, wanneer de af te beelden hoeksnelheden bekend zijn:

$$\text{min. bijwerkfreq. (frames/s)} = \frac{\text{hoeksnelheid (bgmin/s)}}{\text{max. verplaatsing (bgmin/frame)}}$$

Bij een te simuleren hoeksnelheid van 10°/s en een maximale verplaatsing van 15 bgmin/frame betekent dat een bijwerk frequentie van 40 Hz.

Naast de illusie van continue beweging, is de hoogte van de bijwerkfrequentie ook bepalend voor het zich voordoen van anomalieën in de beelden. Zo kunnen, bij een te lage bijwerkfrequentie, lijnen die aanvankelijk glad waren, bij een verandering van richting van het eigen voertuig een getand uiterlijk krijgen. Ook kunnen, bij zo'n richtingsverandering, beelden van kleine objecten in breedte toenemen en zelfs lijken te verdubbelen. De ernst van deze verschijnselen is mede afhankelijk van de hoeksnelheid van het eigen voertuig. Deze anomalieën tasten het realisme van de simulatie aan, en kunnen ervoor zorgen dat bestuur-

ders gebruik leren maken van abnormale cues (AGARD, 1981). Bij een bijwerkfrequentie van 60 Hz of meer zouden dergelijke verschijnselen meestal minder ernstig zijn (Baarspul, 1990).

Bij het simuleren van rijden of laag boven de grond vliegen (NOE) is een hoge bijwerkfrequentie, van 60 Hz of meer gewenst (Haber, 1986). K  ppler (1986) vergeleek, in een rijnsimulator, bij bijwerkfrequenties variërend tussen 13 en 67 Hz, de subjectieve beoordeling van zowel de beeldkwaliteit als de hanteerbaarheid van de auto (vehicle handling quality). Bij toenemende frequenties verbeterde de beoordeling van beide factoren. Een bijwerkfrequentie van 30 Hz zou voor de gebruikte rijnsimulator een redelijk minimum zijn.

Voor het handhaven van een voldoende rijkdom aan detail in de scènes, in combinatie met een hoge bijwerkfrequentie, is een aanzienlijk rekenvermogen van het beeldsysteem vereist. Veel van de huidige beeldsystemen hebben een bijwerkfrequentie van 60 Hz, maar het aantal polygonen dat bij 60 Hz afgebeeld kan worden is vaak slechts de helft van wat er bij 30 Hz mogelijk is.

3.7.4 *Conclusies*

Om tot een illusie van continue beweging te komen is een bijwerkfrequentie van minimaal 30 Hz vereist. Afhankelijk van de hoeksnelheden van objecten in de scène is een hogere frequentie nodig. Dit mede met oog op het vermijden van anomalieën in de beelden. Een bijwerkfrequentie van 60 Hz is voor rij- en laag vlieg (NOE)-taken, die de zwaarste eisen stellen, in de meeste gevallen voldoende hoog.

3.8 **Opfrisfrequentie (refresh rate)**

3.8.1 *Definitie*

Is de bijwerkfrequentie (par. 3.7) een eigenschap van de beeldgeneratie-computer, de opfrisfrequentie is een eigenschap van de monitor of projector waar het beeld uiteindelijk mee afgebeeld wordt. Ook bij beeldsystemen met een maquette speelt de opfrisfrequentie zodoende een rol. De opfrisfrequentie (refresh rate³) is de frequentie (in Hz) waarmee de electronenstraal elk punt op het beeldscherm (buis) doet oplichten (Rolfe en Staples, 1986). Hoewel in plaats van opfrisfrequentie meestal de term beeldfrequentie (frame rate) wordt gebruikt, vermijden we dit woord teneinde verwarring met bijwerkfrequentie te voorkomen. Slechts bij videobeelden is de bijwerkfrequentie altijd gelijk aan de opfrisfrequentie.

³ De term refresh rate wordt, verwarrend genoeg, ook wel gebruikt voor de rasterfrequentie bij interlaced beelden (Agard, 1981; Baarspul, 1990). Deze is dan het dubbele van de refresh rate in de hier gegeven definitie (zie par. 3.8.3).

3.8.2 *Voorkomen van flikkeren*

Zodra de electronenstraal in de beeldbuis van een monitor een punt heeft doen oplichten, begint het "uit te doven" in een tempo dat afhankelijk is van de nalichttijd van het gebruikte schermfosfor. De opfrisfrequentie is primair bepalend voor het al dan niet zien van beeldflikkeringen (afgezien van het gebruik van interlacing; zie par. 3.8.3). Als de opfrisfrequentie niet voldoende hoog is, zal het beeld waarneembaar flikkeren, wat afleidt en vermoeiend is voor de ogen. De opfrisfrequentie waarbij de beelden niet meer zichtbaar flikkeren (flicker suppression refresh rate, FSRR) hangt van verschillende factoren af. Tot die factoren behoren ondermeer of het om dynamische of statische beelden gaat, het luminantieniveau van de beelden, de grootte van het verlichte gebied, en de nalichttijd van het fosfor.

Bij statische beelden kan volstaan worden met een lage opfrisfrequentie (< 50 Hz), mits in combinatie met schermfosforen die langzaam uitdoven. Bij bewegende beelden zijn fosforen nodig die snel uitdoven omdat anders "blurring" of "smearing" optreedt. De opfrisfrequentie moet dan hoger zijn. Bij de gebruikelijke luminantieniveaus van simulatorbeelden is een frequentie van 50 à 60 Hz voldoende hoog. Bevatten de beelden echter oppervlakken die meer dan 10° visuele hoek beslaan en is de luminantie daarvan enkele honderden cd/m^2 (bij direct zicht op een monitor) dan moet de opfrisfrequentie minstens 70-80 Hz zijn om zichtbaar flikkeren te vermijden (Farrell & Booth, 1975). Deze hoge frequenties hebben, behalve met het hoge luminantieniveau, ook te maken met de grootte van het oppervlak. De FSRR neemt namelijk lineair toe met de logaritme van het oppervlak van de stimulus (Boff & Lincoln, 1988).

3.8.3 *Interlacing*

Interlacing is een techniek die wordt gebruikt bij relatief lage opfrisfrequenties, teneinde de zichtbaarheid van beeldflikkeringen te verminderen. Moderne CGI-systemen kunnen veelal een opfrisfrequentie van 60 tot 85 Hz leveren, waarbij interlacing overbodig is.

Als echter het signaal dat het beeld op monitoren verzorgt een beperkte bandbreedte heeft, zoals het geval is met televisie, wordt er een lagere bovengrens gesteld aan de opfrisfrequentie. Dan is het mogelijk flikkeren van het beeld te voorkomen met de zogenaamde interlace-techniek (van Wezel, 1977). Hierbij worden afwisselend de fosforen op de even en oneven rasterlijnen aangestraald. Een geschreven raster (field) bestaat dan afwisselend de even of oneven lijnen en elk compleet beeld (frame) bestaat uit 2 rasters. Dus is de rasterfrequentie bij interlacing dubbel zo groot als de opfrisfrequentie. Aangezien de rasterfrequentie bepalend is voor de gewaarwording van flikker, wordt de zichtbaarheid van flikker, bij dezelfde opfrisfrequentie, door interlacing dus sterk verminderd. Televisiebeelden, die ook voor maquette beeldsystemen worden gebruikt en die standaard interlaced zijn, hebben een opfrisfrequentie van 25 Hz, en dus een rasterfrequentie van 50 Hz (in verschillende landen, o.a. de VS, worden resp. 30 Hz en 60 Hz gebruikt als opfris- en rasterfrequentie).

Een nadeel van interlacing kan zijn dat, bij een lijnresolutie van minder dan ca. 30 l/g, contouren die parallel of vrijwel parallel lopen aan de scanlijnen zichtbaar kunnen gaan trillen. Bij interlacing is het ook mogelijk, dat de resolutie met 50% afneemt wanneer een contour loodrecht op de scanlijnen beweegt, met een snelheid die overeenkomt met opfrisfrequentie (Paul Eisen, persoonlijke mededeling).

3.8.4 *Relatie met bijwerkfrequentie*

De meeste CGI-systemen zijn tegenwoordig uitgerust met een zogenaamd "double framebuffer". Afwisselend wordt het ene buffer uitgelezen en op het scherm geschreven, terwijl het andere gevuld wordt door de display processor (zie par. 1.5.3). Iedere keer na het uitlezen van een buffer (waarvoor een vaste tijd staat, afhankelijk van de toegepaste opfrisfrequentie) wordt gekeken of het andere buffer al vol is. Zo ja, dan wordt de volgende opfriscyclus genomen uit dat andere buffer met het bijgewerkte beeld; zo nee, dan wordt er nog een opfriscyclus uitgevoerd uit dat ene buffer met het oude beeld. Op deze wijze is de effectieve bijwerkfrequentie gelijk aan de opfrisfrequentie gedeeld door een geheel getal, dat afhangt van de maximum haalbare bijwerkfrequentie bij de betreffende scène (Rolfe en Staples, 1986).

Bij CGI-systemen met één framebuffer, zoals die van Link Miles Image III(T), is de opfrisfrequentie gelijk aan de bijwerkfrequentie. Een nadeel van dergelijke systemen is dat de beelden kunnen gaan flikkeren, wanneer de bijwerkfrequentie door de grote complexiteit van de scène (tijdelijk) te laag wordt.

3.8.5 *Conclusies*

Bij de huidige luminantieniveaus van beeldsystemen is in de meeste gevallen een opfrisfrequentie van 60 Hz voldoende om waarneembaar flikkeren van de beelden te voorkomen. Een opfrisfrequentie van 85 Hz, zoals sommige beeldsystemen gebruiken, zal echter in alle gevallen flikkeren onderdrukken. Interlacing kan nadelige visuele effecten hebben; moderne monitoren kunnen echter zonder interlacing een opfrisfrequentie van 60-85 Hz aan.

3.9 **Beeldvertraging**

3.9.1 *Definitie*

Visuele systemen in simulatoren reageren niet onmiddellijk op een (verandering in het) inputsignaal als gevolg van een handeling van de bestuurder. De netto vertraging van het beeldsysteem is de totale tijd tussen het moment dat er input plaatsvindt betreffende een verandering van de oogpositie (die wordt bepaald door de positie van het gesimuleerde voertuig), en het moment dat de corresponderende verandering in de beelden gepresenteerd wordt. Voor de totale beeldvertraging komt daar ook nog het bemonsteringsinterval van de bedienings-

middelen en de rekentijd van het voertuig dynamisch model bij. Die laatste is in het algemeen in de orde van 10 ms. In dit rapport gaat het om de totale beeldvertraging.

Bij beeldsystemen met een maquette is een belangrijke bron van beeldvertraging de traagheid van de bewegende delen van de camera. Bij CGI-systemen is de bijwerkfrequentie een belangrijke factor in de beeldvertraging (AGARD, 1981). Beeldvertraging wordt mede veroorzaakt doordat de verschillende achtereenvolgende berekeningen aan het beeld tijd kosten (transport delay).

3.9.2 *Effecten van beeldvertraging*

Beeldvertraging kan ongunstige effecten hebben op de prestaties in een simulator en zou simulatorziekte kunnen veroorzaken. Hoe ernstig deze effecten zijn zal deels afhangen van het gesimuleerde voertuig. Bij voertuigen die in werkelijkheid traag reageren, bijvoorbeeld schepen, zal de tolerantie voor beeldvertraging groter zijn dan bij snel reagerende voertuigen zoals auto's. Hoewel voor schepen ook de toelaatbare beeldvertraging aan een bovengrens is gebonden, in verband met de noodzaak van het accuraat waarnemen van subtiele veranderingen van koershoeksnellheid (par. 2.3.3), zal de tegenwoordig bereikte beeldvertraging in simulatoren daarvoor zelden kritisch zijn. Bij vlieg simulatie bleek de beeldvertraging bij simulatie van "trage" vliegtuigtypen groter te mogen zijn dan bij "snellere" typen, om tot hetzelfde prestatieniveau te komen (Cardullo & Brown, 1990).

Riccio, Cress & Johnson (1987) vonden, in een vlieg simulator, bij een beeldvertraging tot 100 ms geen noemenswaardige effecten op de prestatie. De taken betroffen het op constante hoogte houden en een vaste koers handhaven bij random verstoringen. Een beeldvertraging van 100 ms zou ook geen belangrijk effect op de training in een vlieg simulator hebben (Cardullo & Brown, 1990). Volgens Bailey e.a. (1987) was een beeldvertraging van 150 ms bij vliegen zelfs nog aanvaardbaar. Bij het landen op een vliegdekschip in een simulator bleek bij een beeldvertraging van 117 ms de "roll variability" kleiner tijdens het naderen van de landingsbaan dan bij een vertraging van 217 ms (Lintern e.a., 1984).

Vertraging in het beeldsysteem zou ernstiger gevolgen hebben voor de prestatie en het gevoel van welbevinden van de bestuurder dan vertragingen in het bewegingssysteem, aldus Frank e.a. (1988). Ook het asynchroon lopen van het beeld- en bewegingssysteem zou simulatorziekte kunnen veroorzaken door een discrepantie tussen de visuele en vestibulaire informatie. Als een asynchroniteit tussen beeld en beweging technisch onvermijdelijk is, dan wordt aanbevolen om de vertraging van het beeld zo klein mogelijk te houden (Bunker, 1978). In ieder geval moet men het beeldsysteem niet laten achterlopen op het bewegingssysteem (Frank e.a., 1988). De Federal Aviation Administration (1980) geeft voor fase II en III simulatoren als maximaal toegestane discrepantie in responstijd tussen beeld- en bewegingssysteem 150 ms.

3.9.3 Toelaatbare beeldvertraging

De IZF-scheepssimulator had een beeldvertraging van 100-150 ms; dit gaf goede resultaten (v. Breda, persoonlijke mededeling). Bij vliegsimulators lijken beeldvertragingen tot 100 ms geen aantoonbaar invloed op de prestatie in de simulator te hebben en zelfs 150 ms wordt nog aanvaardbaar genoemd. De beeldvertraging die nog getolereerd wordt is echter afhankelijk van het soort deeltaak. Veel kritischer is het verschil in vertraging tussen meerdere, aangrenzende (beeld)kanalen. Als die verschillen waarneembaar zijn, kan dat zeer storend zijn. Voor dezelfde vliegsimulator waar een totale vertraging per kanaal van maximaal 100 ms toegestaan is, mag het verschil in vertraging tussen de afzonderlijke kanalen niet meer dan 3 ms bedragen (Cardullo & Brown, 1990).

Allen & Jex (1981) adviseren voor rijsimulators een maximale vertraging van 40-60 ms. Dat de maximale vertraging bij rijsimulators kleiner zou moeten zijn dan voor vliegsimulators, kan komen doordat auto's in het algemeen sneller reageren op handelingen van de bestuurder dan verkeersvliegtuigen. Ook is voor (hoog vliegende) vliegtuigen het beeld vaak minder belangrijk voor de indruk van beweging. Voor een taken als het laag boven de grond vliegen (NOE) met een gevechtsvliegtuig en voor helicopter vliegen mag verwacht worden dat dezelfde maximale beeldvertraging geldt als voor rijsimulators.

De meeste moderne CGI-systemen hebben beeldvertraging van rond de 80 ms (Ashkenas, 1986). Ook het beeldsysteem van de Daimler-Benz rijsimulator heeft een vertraging van 80 ms (Drosdol & Panik, 1985). Dit bleek, na enige tijd, geen problemen op te leveren voor de bestuurder (Padmos, 1989b).

3.9.4 Conclusies

Vertragingen in het beeldsysteem van 100 ms hebben bij vliegtaken geen belangrijke effecten op de prestatie en training in simulators. Voor rijsimulators wordt een maximale vertraging van 40-60 ms. aangeraden, al lijkt 80 ms ook nog aanvaardbaar. Het verschil in beeldvertraging tussen aangrenzende kanalen mag slechts enkele ms bedragen.

Bij vliegsimulators moet het verschil in de vertragingen van het beeldsysteem en het bewegingsysteem niet groter zijn 150 ms. Dit mede in verband met het voorkomen van simulatorziekte. In het geval dat de vertragingen van beeld- en bewegingsysteem niet gelijk kunnen zijn, wordt aangeraden om het bewegingsysteem achter te laten lopen bij het beeldsysteem, in plaats van andersom.

3.10 Anti-aliasing

3.10.1 Definitie

Aliasing in beelden is het gevolg van het feit dat deze tot stand komen door bemonster(sampling)-processen, zowel in het temporele als het spatiële domein. Aliasing treedt op als de frequenties in het beeldsignaal groter zijn dan de helft

van de bemonsterfrequentie (Nyquist frequentie). Aliasing leidt tot een aantal anomalieën die hinderlijk kunnen zijn en afbreuk doen aan het realisme van de beelden.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen temporele en spatiële aliasing. Een bekende anomalie, als gevolg van temporele aliasing, is het stroboscopische effect. Het op film- of televisiebeelden schijnbaar achteruit draaien van de spaken in een wiel is een bekend voorbeeld. In een simulator kunnen ook bijvoorbeeld de paaltjes langs een weg of de strepen op de weg stil lijken te staan of in de verkeerde richting, dezelfde richting als de waarnemer, bewegen. Temporele aliasing heeft nauw verband met de snelheid waarmee het beeldscherm "opgefrist" wordt (opfrisfrequentie) en waarmee nieuwe beelden geschreven worden (bijwerkfrequentie). Volgens Yan (1985) worden de effecten van temporele aliasing verondersteld minder storend te zijn dan die van spatiële aliasing en is het ook moeilijker er wat aan te doen. Of er beeldsystemen bestaan die een remedie, in real-time, hebben tegen temporele aliasing is onbekend.

Als er bij beeldsystemen gesproken wordt over anti-aliasing wordt er gedoeld op *spatiële* anti-aliasing. Spatiële aliasing effecten zijn een typisch verschijnsel bij digitaal gegenereerde beelden. Bij gewone, analoge, televisiebeelden zorgt de beperkte bandbreedte van het inputsignaal voor een spatieel low pass filter. Bij simulatorbeelden die opgenomen worden door een camera boven een maquette, zal spatiële aliasing dus geen groot probleem zijn.

De beelden van CGI-systemen worden echter opgebouwd uit mathematisch gedefinieerde veelhoeken (polygonen) met "oneindig scherpe" contouren (bevatten theoretisch oneindig hoge spatiële frequenties). Deze contouren worden bemonsterd door een mozaïek van pixels van eindige afmetingen, waar de beelden die de computer uitrekent in afgebeeld worden. Of een pixel een deel van een vlak afbeeldt, wordt bepaald door het al of niet vallen van dat deel over het centrum van het pixel (Szabo, 1978; Magnenat-Thalmann en Thalmann, 1987)). Omdat de randen van de computer gegenereerde vlakken "oneindig scherp" zijn, en de pixels niet oneindig klein, wordt niet voldaan aan de Nyquist-voorwaarde. Naburige delen van contouren kunnen het centrum van een pixel juist wel of juist niet omvatten, en worden zodoende afwisselend verschoven afgebeeld.

3.10.2 *Effecten van aliasing*

Szabo (1978) noemt een aantal anomalieën die kunnen optreden als gevolg van spatiële aliasing. De meest voorkomende anomalie is het zogenaamde stair-stepping. Dit treedt op als een rand of lijn vrijwel parallel loopt aan de scanlijnen, waarop de pixels liggen. De rand krijgt een gekarteld uiterlijk, doordat niet alle pixels waar de rand doorheen loopt de rand afbeelden. Vooral in dynamische beelden is dit zeer opvallend. De karteltjes op de rand lijken te "lopen". Indien de breedte van een lijn ongeveer gelijk is aan een pixel, kunnen er gaten in de lijn vallen (line break-up) als de lijn het centrum van een pixel mist. Ook dit valt meer op wanneer het beeld beweegt. Vooral bij vliegsimulators wordt

het beeld van de horizon hierdoor verstoord; daarom wordt vaak een verticaal raster toegepast.

Bij "crawling" lijkt de vorm van een object te veranderen. Kleine veranderingen in positie of oriëntatie kan een deel van een object schijnbaar in grootte doen veranderen, doordat een rand net het centrum van een pixel passeert en de kleur van het hele pixel bepaalt. Een andere anomalie treedt op als een vlak kleiner dan een pixel door het beeld beweegt. Zo'n vlak kan het midden van een pixel passeren of missen. Passeert het, dan wordt het afgebeeld door een heel pixel; wordt het centrum gemist, dan wordt het vlakje niet afgebeeld. Het gevolg is dat het vlakje aan en uit knippert. Dit fenomeen wordt scintillation genoemd en kan zeer storend zijn. Daarbij beperkt het de effectieve resolutie (Kell-factor, par. 3.5.1) wat bijvoorbeeld nadelig is voor het lezen van letters.

Genoemde fenomenen maken het beeld in de simulator onrustig en kunnen de aandacht afleiden. Ook zal de waarneembaarheid van kleine details (bijv. letters op verkeersborden) nadelig beïnvloed worden. Bij simulatie kan aliasing bovendien nadelig zijn omdat het cues voor oriëntatie of snelheid op kan leveren die in de werkelijkheid niet bestaan. Ook wordt als mogelijk nadeel genoemd dat leerlingen in simulatoren door de aanwezigheid van aliasing-effecten habitueren aan ongebruikelijke objecten of bewegingen (AGARD, 1981).

3.10.3 *Technieken ter voorkoming van aliasing*

De ideale anti-aliasing techniek is het beperken van de bandbreedte van de af te beelden spatiële frequenties tot de helft van de bemonsterfrequentie. Modernere CGI systemen hebben verschillende methoden om die techniek te benaderen (Magnenat-Thalmann & Thalmann, 1987; Yan, 1985). Een eenvoudige techniek, die veel toegepast wordt, is de zogenaamde bed-of-nails (BON) benadering (Yan, 1985).

Hierbij wordt elk pixel onderverdeeld in meerdere subpixels. Deze subpixels worden zelf niet afgebeeld, maar uitsluitend gebruikt om de intensiteit van het hele pixel te berekenen. Voor het centrum van elk subpixel wordt bijgehouden of het bedekt wordt door een vlak. De intensiteit van een pixel wordt bepaald door het aantal subpixels dat bedekt wordt. Hoe minder subpixels bedekt, hoe geringer de intensiteit. Deze methode leidt ook tot randen die gekarteld zijn, maar de randen hebben een lager contrast. De waarnemer ziet de pixels met een gemiddelde kleur niet als een apart vlakje, ook al zijn de individuele pixels nog waarneembaar. Het resultaat geeft de indruk van een redelijk rechte rand. Een zeer klein detail, dat zonder anti-aliasing flikkerde (scintillating), wordt nu afgebeeld door een heel pixel met een lagere intensiteit.

Anti-aliasing met subpixels kan per individueel pixel gebeuren, of voor meerdere pixels tegelijkertijd. De specificatie van anti-aliasing is meestal in het aantal subpixels per pixel of pixels. Hoe meer subpixels per pixel hoe beter het ideaal benaderd wordt. Hoeveel subpixels nodig zijn is mede afhankelijk van de resolutie van het beeldsysteem. Een goede resolutie betekent meer pixels per beeld. Om dezelfde beeldkwaliteit te bereiken is zodoende het aantal benodigde subpixels per pixel kleiner dan bij een slechtere resolutie.

Proefpersonen bleken bij een lage resolutie (10 pixels per graad bij een veld van ruim 16°) een voorkeur te hebben voor beelden met anti-aliasing, 8×8 subpixels, boven beelden zonder anti-aliasing (Booth e.a., 1987). Bij een betere resolutie (tot 30 pixels/ $^\circ$), verdween deze voorkeur. Echter werd bij een zeer lage resolutie, 64×64 pixels voor een volledig beeld, waarbij de grootte van een individueel pixel 15 bgmin was, geen onderscheid meer gemaakt tussen wel of geen anti-aliasing. De beelden waren dan van zo'n slechte kwaliteit dat anti-aliasing daar geen verbetering meer in kon brengen.

Het toevoegen van subpixels doet de tijd nodig voor het berekenen van de kleur van elk pixel toenemen en daarmee, bij gelijke reken capaciteit, de maximale bijwerkk frequentie afnemen. Het aantal subpixels per pixel kan dus niet eindeloos uitgebreid worden. De beelden met 8×8 subpixel anti-aliasing uit het onderzoek van Booth e.a. (1987) werden ook niet in real-time gegenereerd. Veel voorkomend bij beeldsystemen met anti-aliasing is 4×4 subpixels/pixel bij een resolutie tussen de 10 en 20 pixels per graad.

Een andere, meer recente, techniek voor anti-aliasing, die soms wel "edge anti-aliasing" genoemd wordt, werkt efficiënter dan de BON-methode en vraagt zodoende minder rekenvermogen. Bij deze techniek wordt anti-aliasing uitsluitend uitgevoerd rond contouren. Immers aliasing doet zich alleen daar voor. Bij elke contour wordt het intensiteits- en/of kleurverschil "uitgesmeerd" over de pixels die rondom de contour liggen. In het midden van een egaal vlak kan geen aliasing optreden, dus dat gebied wordt overgeslagen. Uiterlijk is het resultaat van deze techniek gelijk aan die met subpixels.

3.10.4 Aantal benodigde subpixels

Op grond van de resultaten van Booth e.a. (1987), waarbij een weinig kritische taak werd toegepast, zou bij een resolutie beter dan 30 pixels per graad ($0,5 \text{ bgmin}^{-1}$) anti-aliasing weinig toevoegen aan de beeldkwaliteit. Hetzelfde geldt voor een resolutie slechter dan 4 pixels per graad. De resolutie van beelden in simulatoren ligt over het algemeen tussen de 7 en 20 pixels per graad. Dus in het gebied waar anti-aliasing zin heeft.

Omdat een gezichtsscherpte groter dan 2 zelden voorkomt, zullen objecten kleiner dan een halve boogminuut zelden nog waargenomen worden. Het wegvallen daarvan in simulatorbeelden zal dus niet storend zijn. Dat betekent dat de subpixels niet kleiner hoeven te zijn dan een halve boogminuut. Bij een resolutie van 60 pixels/graad betekent dat 2 bij 2 subpixels. In geval van een slechtere resolutie moet het aantal subpixels groter zijn. Is de resolutie bijvoorbeeld slechts 15 pixels/graad dan zijn wel 8 bij 8 subpixels nodig voor een (zeer) goede beeldkwaliteit.

3.10.5 Conclusies

Een veelgebruikte methode voor het voorkomen van (spatiële) aliasing in beelden is het onderverdelen van elk pixel in een aantal subpixels. Meer subpixels geeft een mooier resultaat, maar kost ook meer rekenvermogen. Bij

een betere resolutie (meer pixels per graad) zijn minder subpixels per pixel nodig om hetzelfde resultaat te bereiken.

Voor het vaststellen van het aantal benodigde subpixels, gegeven de resolutie, is het handig de (denkbeeldige) hoekgrootte van de subpixels als uitgangspunt te nemen. Voor een aanvaardbare beeldkwaliteit zou in veel gevallen van minder kritische taken een subpixel-grootte van 2 bgmin voldoende zijn. Om een zeer goede beeldkwaliteit te bereiken moet de grootte van een subpixel in de orde van 0,5 bgmin liggen.

4 BEELDCAPACITEIT

De beeldeigenschappen in dit hoofdstuk bepalen, samen met de eigenschappen in hoofdstuk 5, de complexiteit van de beelden. De beeldcomplexiteit is het aantal objecten dat in één beeld (frame) gepresenteerd kan worden en de hoeveel detail-informatie, inclusief textuur en schaduw-effecten, die die objecten bevatten. Voor een uitvoerige behandeling van de diverse technieken die worden aangewend om de in deze hoofdstukken genoemde effecten te bereiken, zij verwezen naar het boek van Magnenat-Thalmann en Thalmann (1987).

4.1 Polygonen/kanaal

4.1.1 Definitie

De objecten in computer gegenereerde beelden worden meestal opgebouwd uit polygonen. Een polygoon (ook wel "face" genoemd) wordt in het algemeen gedefinieerd als een veelhoek in een plat vlak met een bepaalde kleur. Bij polygonen is het aantal randen (edges) gelijk aan het aantal hoekpunten (vertices). Dit aantal varieert meestal tussen 3 en 8 per polygoon (Wyckoff, 1989). Indien gebogen oppervlakken afgebeeld moeten worden, dan wordt dat benaderd door een aantal polygonen zodanig te rangschikken dat het de indruk van een kromming geeft, eventueel geholpen door Gouraud-shading (zie 5.5 Schaduw-effecten).

4.1.2 Maximum aantal af te beelden polygonen

Hoeveel polygonen een beeldsysteem kan afbeelden wordt beperkt door het rekenvermogen van de beeldgeneratie-computer en de bijwerk(update)-frequentie die de gebruiker nog aanvaardbaar vindt. Overschrijdt het aantal af te beelden polygonen de rekencapaciteit, dan is er sprake van "overload". In geval van overload kan de bijwerkfrequentie afnemen en het beeld kan gaan flikkeren of vervormen. Sommige beeldsystemen hebben wel een zogenaamde "overload control", om de gevolgen van overload te minimaliseren. Dit is echter slechts voor korte tijd een oplossing. Zie verder par. 10.2 - Overload management.

Met het toenemen van het rekenvermogen van de beeldgeneratie-computers is het maximum aantal te produceren polygonen de laatste tijd sterk toegenomen. Huidige CGI-systemen kunnen 500 (Link Miles: IMAGE IV) tot 8000 (Real World: Super Reality) polygonen per frame produceren met een bijwerkfrequentie van 30 Hz. Dat betekent dus maximaal 240.000 polygonen per seconde. Wordt een hogere bijwerkfrequentie verlangd, bijvoorbeeld van 60 Hz, dan neemt het aantal te produceren polygonen meestal evenredig af.

Een parameter die meestal kritischer is voor de te behalen bijwerkfrequentie dan het maximum aantal polygonen, is de "pixel fill rate", in combinatie met de "depth complexity" (gedefinieerd in par. 3.7.1). Wyckoff (1989) vermeldt dat, om een complexe scène met een voldoende hoge frequentie bij te kunnen werken, bij

een resolutie van rond de $1000 * 1000$ pixels, een pixel fill rate van zeker 100 miljoen/seconde nodig is.

4.1.3 *Factoren die het gewenste aantal polygonen bepalen*

Het aantal polygonen dat per kanaal afgebeeld moet worden is primair gerelateerd aan: de grootte van het veld van één kanaal en de gewenste maximum zichtafstand (deze vormen samen de zogenaamde "footprint area"), de gewenste dichtheid van objecten in het gesimuleerde gebied, en de hoeveelheid detail per object (Bess, 1989). Deze zijn weer afhankelijk van het voertuig dat men simuleert en de taken die men daarin wilt uitvoeren. Overigens kunnen details op een plat vlak vaak beter worden weergegeven door textuurpatronen dan door polygonen; zie par. 5.2 - Textuur. Veldgrootte en maximum zichtafstand worden behandeld in resp. par. 3.1 en 4.2.

De dichtheid van polygonen is mede bepalend voor, wat genoemd wordt, de "complexiteit" van de afgebeelde scènes (Bess, 1989). Andere factoren daarbij zijn de gebruikte shading-techniek voor de polygoon-oppervlakken (zie par. 5.5 - Schaduw-effecten) en de textuur op de polygonen. Een bekend zwak punt van CGI-systemen zijn hun arme en onnatuurlijke (cartoonlike) beelden.

Scènes die arm zijn aan objecten of details van bekende grootte maken het correct navigeren en oriënteren in een simulator moeilijk (Kraft e.a., 1982; Lintern e.a., 1987; Kleiss e.a., 1988). Daarnaast zou bij toepassing van gecolli-meerde beelden in voertuigsimulatoren, de illusie van grote ooghoogte verergeren door het geringe aantal details in de beelden (Padmos, 1989a).

4.1.4 *Belang van grote scène-complexiteit*

Hoe rijk een scène moet zijn voor het adequaat uitvoeren van bepaalde taken is een simulator is onderwerp van vele onderzoeken. Zie voor algemene overwegingen ook par. 2.3 - Visuele informatie voor de bestuurder, en par. 2.4 - Visuele informatie in simulatoren. Bij vliegsimulatie bleken drie-dimensionale objecten bijzonder effectief als cues voor veranderingen in hoogte. De waargenomen grootte van bekende objecten noemden piloten ook als cue (Kleiss e.a., 1988). In dit onderzoek bleek dat het min of meer realistisch afbeelden van objecten geen effect had op de snelheid en juistheid van de hoogteschattingen, mits de objectgrootte natuurgetrouw was en de herkenbaarheid voldoende. De objectdichtheid, uitgedrukt in het aantal objecten per gesimuleerde vierkant mijl, had een significant effect. De hoogteschattingen verbeterden tot het hoogste niveau van objectdichtheid, 175 objecten/mijl².

Proefpersonen die een bombardeer-taak moesten leren boven een schematisch landschap van lijnen (grid), maakten meer fouten dan proefpersonen die dezelfde taak leerden boven een meer realistisch landschap, met veel herkenbare elementen zoals wegen, velden en gebouwen (Lintern e.a., 1987). Opvallend was dat proefpersonen die de taak leerden boven het meer realistische landschap, later ook goed konden presteren boven het lijnen-landschap. Zij die de taak

boven de lijnen hadden geleerd, behaalden echter bij geen van beide landschappen hetzelfde hoge niveau als de andere groep.

Ook voor het in de juiste positie brengen van een vliegtuig ten opzichte van de landingsbaan was een rijkere scène-inhoud bevorderlijk (Kraft e.a., 1982). Lintern e.a. (1984) vonden eenzelfde effect bij het landen op een, gesimuleerd, vliegdekschip. In de rijke detail-conditie werd dit schip afgebeeld met meerdere polygonen, in de arme-conditie enkel door lichtpunten. De Federal Aviation Administration (1980) verlangt van vliegsimulatoren voor fase III-training een rijkdom aan detail van de afgebeelde scènes die correspondeert met 1000 polygonen voor dagscènes.

Aan de andere kant hoeft volgens Fox & Clark (1986) een vliegsimulator bestemd voor onderzoek geen gedetailleerde beelden te produceren. Binnen een veld van 100° h. bij 100° v. zouden 400 polygonen per beeld voldoende zijn. Ook houden sommigen er rekening mee dat aan het begin van de training in een (vlieg)simulator een rijke scène-inhoud de prestatie juist kan hinderen (Warren & Riccio, 1985; Lintern e.a., 1987). Volgens Gilson e.a. (1990) komt dit omdat het de leerling extra zou belasten. De leerling zou alleen de meest essentiële cues aangeboden moeten krijgen, waarop hij dan alle aandacht kan richten zonder afgeleid te worden door minder belangrijke informatie.

Een probleem is nu wel om vast te stellen welke informatie voor de te leren taak belangrijk is. Het lijnen-landschap uit het onderzoek van Lintern e.a. (1987) zou vanuit deze visie duidelijk te weinig of weinig bruikbare informatie bevatten.

4.1.5 *Gewenst aantal polygonen*

Doordat men zich in een vliegtuig over het algemeen op aanzienlijke hoogte boven de grond bevindt, hoeven de buitenbeelden in vliegsimulatoren zelden veel details te bevatten. Het laatste stadium van de landing zal meestal het meest kritiek zijn in dit opzicht. Een uitzondering is het op (zeer) geringe hoogte vliegen van gevechtsvliegtuigen en helicopters, om vijandelijke radar te ontwijken. Bij dit nap-of-the-earth (NOE) vliegen, wordt met hoge snelheden hoogstens enkele tientallen meters boven de grond gevlogen. Vanuit die positie bevatten de beelden bijzonder veel detail en zijn ook veel details vereist voor het correct waarnemen van de hoogte en de ruimte om te manoeuvreren door de piloot (Kellogg & Miller, 1984; Haber, 1986). Volgens Costenbader (1984) zijn maximaal 500.000 polygonen per gesimuleerde vierkante nautische mijl vereist zijn om tijdens NOE-vluchten voldoende rijke scènes aan te bieden. Voor deze taak zou een beeldsysteem dat tot 8000 polygonen per kanaal kan genereren goede diensten bewijzen.

Bij rijden is de hoeveelheid detail die de bestuurder ziet in het algemeen groter dan bij gewoon vliegen, als gevolg van de geringere hoogte waarop men zich bevindt. Hoeveel polygonen nodig zijn bij adequate rijsimulatie is weer taakafhankelijk. Proefpersonen van McRuer & Klein (1975) hadden al voldoende aan slechts 2 rijbaan-markeringen om een auto goed op de weg te houden bij sterke, gesimuleerde, zijwind.

Voor juiste afstands- en snelheidsschattingen zijn aanzienlijk rijkere beelden nodig. Om maar niet te spreken over het rijden in een stad en wanneer de bestuurder te maken heeft met andere voertuigen (AGARD, 1980).

Voor rijden blijken min of meer acceptabele beelden te bereiken te zijn met 250 polygonen per kanaal van 48° bij 35°, waarbij textuur slechts op het grondvlak en de lucht is aangebracht. Dat is het aantal van IMAGE III(T) van Link Miles. De rijnsimulator die op dit moment als de meest realistische geldt, die van Daimler-Benz, kan 250 polygonen per kanaal van 30° bij 30° produceren, maar heeft geen textuur. Het beeld bij de Daimler-Benz-simulator wordt bestreken door 6 kanalen naast elkaar; de totale beeldgrootte is dus 180° h. bij 30° v. (Drosdol & Panik, 1985). Voor de National Advanced Driving Simulator, die de opvolger van de DB-simulator in de VS moet worden, wil men 1350 polygonen per kanaal van 39° bij 39° bereiken (Haug e.a., 1990).

4.1.6 *Conclusies*

Het aantal benodigde polygonen is afhankelijk van het voertuig dat gesimuleerd wordt en de taken die daarmee verricht moeten worden. Voor elementaire rijnsimulatie zijn 250 polygonen per kanaal van ongeveer 50° h. bij 35° v. aanvaardbaar. Voor een goede beeldkwaliteit bij rijnsimulatoren, zijn 1000 polygonen per kanaal voldoende, mits in combinatie met textuur.

Voor vliegsimulatie is het vereiste aantal polygonen in het algemeen kleiner dan bij rijden. Een uitzondering is het vliegen op (zeer) geringe hoogte (NOE), waarbij het gewenste aantal polygonen per kanaal kan oplopen tot 8000.

4.2 Maximale zichtbaarheidsafstand van objecten (depth of field)

4.2.1 *Belang van beperkte zichtbaarheidsafstand*

Door, in CGI-beelden, de afstand in het terrein waarover objecten nog zichtbaar zijn te beperken, is het mogelijk het aantal te verwerken polygonen te reduceren. Sommige beeldsystemen, bijvoorbeeld het G2000-beeldsysteem van Star Technology, kunnen tijdelijk de zichtbaarheidsafstand beperken, als middel om de gewenste bijwerkfrequentie (zie par. 3.8 - Bijwerkfrequentie) te handhaven.

4.2.2 *Belang van ruime zichtbaarheidsafstand*

Tot welke afstand de zichtbaarheid beperkt kan worden zonder nadelige gevolgen voor de prestaties in de simulator, is afhankelijk van het soort voertuig en de uit te voeren taken. Voor het correct navigeren van een auto of tank hoeven objecten slechts tot ongeveer 300 m afstand zichtbaar te zijn (Waldram, 1985; Godthelp en Tenkink, 1990; laatstgenoemden presenteren zichtcriteria voor de meest belangrijke rijtaken). Voor veel manoeuvres voor snelverkeer is echter het detecteren, c.q. herkennen van objecten (bijv. tegenliggers, aanwijsborden voor discontinuïteiten) over afstanden tot 1200 meter nodig (Godthelp en Tenkink, 1990). Objecten op nog grotere afstand kunnen bijdragen aan de alge-

mene oriëntatie. Wat betreft het realisme zou de maximale object-afstand, in een rijsimulator, beter in de orde van 3000 meter kunnen zijn. Dit komt redelijk overeen met de afstand waarover men, in vlak landschap, in veel gevallen kan kijken.

Vanuit vliegtuigen kan het zicht enkele tientallen kilometers bedragen. Kruk & Regan (1983) lieten piloten in de lucht een signaal geven zodra ze een ander vliegtuig konden detecteren. De afstanden waarbij dat gebeurde lagen tussen de 5.500 en 10.600 m, met een gemiddelde van 8.600 m. Proefpersonen in een onderzoek van Kennedy e.a. (1988) konden in een vliegsimulator de oriëntatie van vliegtuigen op gemiddeld 6 km afstand detecteren. Dat was het geval bij een contrast-ratio van 23:1 en een resolutie van 1 bgmin/TV-lijn. Bij het landen van vliegtuigen zouden piloten ook gebruik maken van objecten aan de horizon voor het bepalen van hun hoogte.

Voor de meeste schepen is volgens Schuffel (1986) het minimum vaarzicht om de route te kunnen vervolgen gelijk aan 5 maal een scheeps lengte. Bij een gangbare scheeps lengte van 200 m wordt het benodigd vaarzicht dus 1 km. Ten behoeve van de oriëntatie op open zee worden bij helder zicht lichten nog tot op 50 km afstand waargenomen (NHO, 1969).

Het afbeelden van objecten tot op grote afstanden bij scheeps- en vliegsimulatoren vergt minder rekencapaciteit dan bij rijsimulatoren, omdat scènes vanuit schepen en vliegtuigen over het algemeen weinig details per km² bevatten.

De resolutie van het beeldsysteem zal echter vaak een beperking gaan vormen voor het afbeelden van herkenbare objecten van beperkte afmeting op (zeer) grote afstand (Kennedy e.a., 1988; zie ook par. 3.5 - Beeldresolutie).

4.2.3 *Conclusies*

Voor rijden moeten objecten tot minimaal 300 meter afstand zichtbaar zijn. Beter is als objecten tot ongeveer 1500 m afstand getoond kunnen worden. Voor het realisme is 3000 m en meer nog beter.

Voor vliegsimulatoren is een maximale object-afstand van 6 tot 10 km nodig voor het tijdig detecteren van andere vliegtuigen.

Voor simulatie van (grote) schepen is minimaal noodzakelijk een vaarzicht van 1 km. Ten behoeve van oriëntatie komen zichtafstanden tot 50 km voor.

4.3 Continu beschikbaar terrein (gaming area)

4.3.1 *Definitie*

Het continu beschikbaar terrein of "gaming area" is het gebied of terrein waar overheen gevlogen of doorheen gereden kan worden (met behoud van de gewenste zichtafstand; zie par. 4.2) zonder dat er aanpassingen nodig zijn, hetzij in de database van een CGI-systeem, hetzij in de maquette. Bij een beeldsysteem met een maquette is de grootte van dit gebied beperkt door de schaal waarop de

maquette gemaakt is en de grootte van de maquette. De geringe afmetingen van het terrein, niet meer dan enkele km², is een belangrijk nadeel van maquette-systemen, met name voor vlieg simulatie. Het beschikbaar terrein wordt bij CGI-systemen beperkt door de grootte van het beschikbaar geheugen.

4.3.2 *Gewenst beschikbaar terrein*

Voor vlieg simulatoren wordt als ideale grootte van het beschikbaar terrein 300.10⁶ km² genoemd (AGARD, 1980). Zo groot is wellicht wat overdreven, maar een gebied van 500 bij 500 km is geen overbodige luxe als men enige tijd met topsnelheid rechtuit wil vliegen met gevechtsvliegtuigen. Uiteraard is een gebied van dit formaat alleen mogelijk met computer gegenereerde beelden.

Voor rij simulatoren zijn minder grote gebieden nodig. Hoe groot is afhankelijk van de taken die men wil uitvoeren met de simulator. Maar in ieder geval moet het gebied niet kleiner dan 10 km² zijn. Om een flink stuk over een autosnelweg te kunnen rijden is een stuk weg van 60-80 km wenselijk. In combinatie met een gewenste zichtafstand van 3000 m leidt dat reeds tot een aanzienlijk oppervlak. De database van de Daimler-Benz rij simulator heeft beslaat een gebied van maar liefst 512 bij 512 km (Drosdol & Panik, 1985).

Voor scheepssimulatoren wordt het minimum vereiste terrein bepaald door de overweging dat voor onderzoek een vaart van 5 km door een kanaal mogelijk moet zijn (Schuffel, 1986). Gecombineerd met een minimum zicht van, zeg, 2 km vooruit en 1 km opzij komt men dan op een terrein van 15 km². Voor kustnavigatie is een gebied tot 400 km² nodig. Wil men daarbij ook een zicht van 50 km leveren dan komt men op een terrein van ca. 5000 km² uit. Op volle oceaan is een buitenbeeld voor simulatie alleen relevant voor detectie en identificatie van andere schepen en het controleren van gevaar voor aanvaring.

In par. 4.1.3 kwam reeds de "trade-off" tussen de grootte van het gesimuleerde gebied en de hoeveelheid detail die in het gebied aangebracht kan worden. Ruwweg komt dat erop neer: hoe groter het continu beschikbaar terrein hoe kleiner de hoeveelheid mogelijk detail. Ten eerste kost het modelleren van objecten in een uitgestrekt gebied veel tijd en ook de capaciteit van het geheugen van het beeldsysteem kan uiteindelijk beperkingen opleggen.

4.3.3 *Conclusies*

Voor vlieg simulatie hoeft het continu beschikbare terrein niet veel groter te zijn dan zo'n 500 bij 500 km. Het terrein dat rij simulatoren nodig hebben is aanzienlijk kleiner. Maar als in een rij simulator het rijden op een autosnelweg tot de taken behoort, dan moet er 60-80 km weg beschikbaar zijn. Voor scheepssimulatoren is voor een beperkte navigatietaak het minimum noodzakelijke terrein 15 km². Maar voor kust-avigatie kan maximum 5000 km² nodig zijn.

5 POLYGOON BEWERKINGEN

In dit hoofdstuk gaat het o.a. om effecten die toegevoegd kunnen worden aan het oppervlak van polygonen, met uitzondering van de in par. 3.6 behandelde (constante) kleur en helderheid. Daarbij wordt de kleur en helderheid van de pixels binnen polygonen differentieel beïnvloed. De beschreven effecten hebben belangrijke consequenties voor de complexiteit, en daarmee het realisme, van de beelden van CGI-systemen. Voor een uitvoerige behandeling van de toegepaste beeldtechnieken zij verwezen naar het boek van Magnenat-Thalmann en Thalmann (1987).

5.1 Niveaus van detail (level of detail)

5.1.1 Definitie

Eerder is al ter sprake gekomen dat het aantal polygonen dat CGI-systemen gelijktijdig kunnen afbeelden, met een aanvaardbare bijwerkfrequentie, beperkt is. Daarom is het belangrijk om hulpmiddelen te gebruiken, waarmee realistisch beelden gepresenteerd kunnen worden, zonder de polygoon-capaciteit te overschrijden. Eén oplossing is het gebruik van twee-dimensionale textuurpatronen (zie par. 5.2 - Textuur). Een ander is het toepassen van verschillende niveaus van detail.

Met het toenemen van de afstand van een object tot een waarnemer, worden de details van het object steeds minder zichtbaar en blijft alleen de globale contour van het object over. In CGI-systemen kan dit gebruikt worden door meerdere versies van een object, die verschillen in de hoeveelheid detail binnen het object, op te slaan in de database. Afhankelijk van de afstand van de waarnemer tot het object wordt een andere versie afgebeeld. Is het object ver weg dan kan het door een beperkt aantal polygonen gerepresenteerd worden. Komt het object dichterbij dan wordt er overgegaan naar een hoger niveau van detail, waarbij voor hetzelfde object meer polygonen nodig zijn. Doordat alleen de objecten die dichtbij staan uit veel polygonen bestaan blijft de hoeveelheid polygonen die op elk moment gegenereerd moeten worden beperkt (Wyckoff, 1989). In het algemeen moeten de verschillende versies van een object bij het modelleren geconstrueerd moeten worden. Maar bij sommige beeldsystemen schijnt dit automatisch te kunnen gebeuren.

In toepassingen waarbij de beelden weinig objecten bevatten, bijvoorbeeld varen op open zee of vliegen op grote hoogte, is het gebruik van verschillende niveaus van detail minder belangrijk. Bij laag vliegen en rijden, vooral bij terreinrijden, kan het echter zeer nuttig zijn, gezien de grote rijkdom aan detail in de werkelijkheid. Bij rijden, vliegen of varen langs vaste routes, zal een deel van de objecten in de scene slechts op grote afstand worden gezien. Deze objecten kunnen met aanzienlijk minder detail worden gemodelleerd dan de objecten die ook op korte afstand worden gezien.

5.1.2 *Overgang tussen verschillende niveaus*

Als men te grove stappen neemt tussen opeenvolgende niveaus van detail, kan men bij de overgang van het ene naar het andere niveau de details, of het object zelf, opeens tevoorschijn zien springen (popping up). Dit toont erg onnatuurlijk en zou misleidende afstand- of snelheidscues kunnen geven.

Om verschillende versies van een object geleidelijk te laten wisselen is de mogelijkheid om de mate waarin objecten (polygonen) transparant zijn te kunnen variëren van groot nut (zie ook par. 5.4 - Transparante polygonen). Voor een vloeiende overgang laat men het object op het ene niveau steeds meer transparant worden, terwijl het object op het volgende niveau steeds minder transparant wordt (Yan, 1985). Dit kan ook toegepast worden als een object aanvankelijk te ver weg was om af te beelden (kleiner dan de effectieve resolutie) en vervolgens dichterbij komt. Gebruik makend van transparantie verschijnt het object geleidelijk in de scène, in plaats van plotseling op te duiken.

5.1.3 *Gewenst aantal niveaus van detail*

Hoeveel niveaus van detail gewenst zijn is onduidelijk. Het aantal zal ondermeer afhangen van de object-rijkdom van de af te beelden scènes, de maximale afstand van objecten en de snelheid waarmee het voertuig naar de objecten toe of van de objecten af beweegt. Het is voor te stellen dat het aantal mogelijke niveaus van detail niet zo klein moet zijn dat, ondanks het gebruik van variatie in transparantie, de overgangen tussen opeenvolgende niveaus duidelijk waarneembaar blijven. Een modern beeldsysteem als de G2000 van de firma Star Technology heeft 10 mogelijke niveaus van detail. Voor de geleidelijke overgang tussen verschillende niveaus van detail is tevens het aantal mogelijke stappen (niveaus) in transparantie van belang. Het BBN GT 100 beeldsysteem van de firma Bolt, Beranek & Newman heeft 16 niveaus van transparantie. Het IMAGE IV-systeem van Link Miles heeft er zelfs 32. Hoe meer transparantie-niveaus, des te vloeiender zal de overgang tussen verschillende niveaus van detail kunnen verlopen.

Naast objecten kunnen textuurpatronen ook op verschillende niveaus van detail opgeslagen zijn. Reden hiervoor is echter het voorkomen van aliasing-effecten als flikkeren (scintillating) wanneer de textuur-elementen kleiner worden dan de pixels. Bij verschillende niveaus van textuur-detail geldt eveneens dat voor een zo ongemerkt mogelijke overgang van ene naar andere niveau het variëren van de transparantie aan te raden is. Meer over niveaus van detail bij textuur in par. 5.2 - Textuur.

5.1.4 *Conclusies*

Het opslaan van objecten op verschillende niveaus van detail (levels of detail), afhankelijk van de afstand tot het oogpunt, kan het aantal gelijktijdig af te beelden polygonen reduceren. Hoeveel niveaus van detail nodig zijn is niet

duidelijk. Een modern beeldsysteem als de G2000 van Star Technology heeft 10 niveaus van detail.

De overgang tussen verschillende niveaus van detail moet vloeiend verlopen. Dat kan gebeuren door de mate waarin de polygonen, van het object op verschillende niveaus van detail, transparant zijn geleidelijk te variëren. Het aantal niveaus van transparantie is dan ook van belang.

5.2 Textuur

5.2.1 Definitie

Met textuur wordt in het algemeen bedoeld een globale representatie van de fijne details binnen een oppervlak. Als het gaat om computer-gegenereerde beelden dan wordt met textuur nog een ruimer begrip aangeduid. Namelijk alle structuren die op een plat vlak (polygoon) worden afgebeeld. Zo kunnen bijvoorbeeld ook de gevel van een huis, inclusief ramen en deuren, of de patronen op verkeersborden behandeld worden als een textuurpatroon.

5.2.2 Belang van textuur

Het gebruiken van textuur heeft voor CGI-systemen als belangrijk algemeen voordeel dat het mogelijk is veel details af te beelden, zonder dat hiervoor extra polygonen nodig zijn. In combinatie met transparante polygonen kunnen ook onregelmatige objecten, zoals bomen of rookpluimen, eenvoudig gemodelleerd worden (afgezien van wind-effecten). Hiervoor is dan slechts een beperkt aantal polygonen nodig. Zodoende worden er minder zware eisen gesteld aan het rekenvermogen van het beeldsysteem (AGARD, 1980).

Textuur kan een in principe een rol spelen bij het waarnemen van de snelheid van de eigen voortbeweging, (dit zal vooral gelden indien het een herkenbaar patroon met realistische afmetingen betreft), voor het schatten van afstanden, of voor het waarnemen van veranderingen in hoogte (Kellogg en Miller, 1984). Daarnaast kan textuur op vlakken duidelijkheid geven over de oriëntatie daarvan; dit is onder meer belangrijk voor het inschatten van hellingen in een terrein, en kan textuur met realistische afmetingen helpen bij de schatting van afstand (Chappelow & Smart, 1982).

Genoemde soorten informatie zijn van belang voor een bestuurder. Toch is er geen eenduidige invloed aangetoond van het toevoegen van textuur in (vlieg)simulatorbeelden op de prestatie (Chappelow en Smart, 1982; Wolpert e.a., 1983; Warren en Riccio, 1985; Johnson e.a., 1989). Opgemerkt dient te worden dat de in deze experimenten gebruikte textuurpatronen een nogal primitief karakter hadden.

Evenwel zorgde het onzichtbaar klein maken van textuur, in een helicoptersimulator, voor een sterke verslechtering in het beoordelen van de voorwaartse en zijwaartse snelheid (Ashkenas, 1986). Ook rapporteerden piloten bij gesimuleerd nap-of-the-earth vliegen, dat ze meer moeite hadden met het schatten van hun

hoogte en snelheid als de textuur op verticale vlakken afwezig was (Simpson & Wilson, 1990).

Bij scheepssimulatoren kan het afbeelden van golven door middel van bewegende textuur (par. 5.3) ook belangrijk zijn, in verband met het kunnen zien van de zeegang en de eigen voortbeweging. Schuffel (1984) toonde aan dat textuur in het beeld van een scheepssimulator een duidelijke verbetering gaf van de, voor schepen zo belangrijke, verandering in koershoeksnelheid.

5.2.3 *Generatie van textuur*

Beeldsystemen met een maquette hebben automatisch al textuur, dat ook op een realistische manier "stroomt" bij voortbeweging en verandert met de afstand. CGI-systemen hadden aanvankelijk geen textuur. Later kwamen er systemen met textuur, maar dan alleen op horizontale vlakken, en dan nog slechts in helderheid gemoduleerd (bijv. Link Miles IMAGE III(T)). Tegenwoordig is textuur op zowel verticale als horizontale vlakken, met zowel kleur- als helderheidsmodulatie ook op low-cost systemen verkrijgbaar. Zo kunnen ook bergen of muren met textuur bekleed worden.

Textuur op polygonen wordt, in CGI-systemen, bereikt door het "uitspreiden" (mapping) van een twee-dimensionaal textuurpatroon over de pixels van een vlak. Dit uitspreiden wordt bereikt door voor elk zichtbaar pixel op een polygoon de corresponderende coördinaten te berekenen. Elk punt op een polygoon valt altijd op dezelfde coördinaat van het textuurpatroon. Hierdoor zit het textuurpatroon als het ware vast aan het vlak, en zal daarom altijd het juiste perspectief vertonen, gegeven de oriëntatie van het waarnemer ten opzichte van het vlak (Yan, 1985). De textuurpatronen kunnen bestaan uit (pseudo)random variaties in kleur en helderheid of uit tekeningen, of uit foto's van bestaande delen van landschappen, die digitaal opgeslagen zijn. Dit laatste wordt dan foto-textuur genoemd. Ook fractals worden wel gebruikt als textuurpatroon.

De (pseudo)random textuurpatronen liggen op een soort tegels (tiles) die beperkt in omvang zijn. Als uitgestrekte vlakken van textuur voorzien moeten worden, dan worden de patronen eenvoudig herhaald. Daarom hoeven de individuele textuurpatronen niet groot te zijn, 64 bij 64 textuur-elementen (texels) per patroon zou al voldoende zijn (Gardiner & Hadfield, 1990). Deze "synthetische" textuurpatronen missen echter vaak het realisme van foto-textuur.

Foto-textuurpatronen representeren specifieke details van bestaande delen van landschappen. Hierdoor kunnen ze niet eindeloos herhaald worden en moet er bij gebruik van foto-textuur een groot aantal verschillende patronen voorradig zijn. Foto-textuur vereist zodoende aanzienlijk meer geheugencapaciteit dan de synthetische textuur en is daarom ook duurder. Ook moeten de tegels voor foto-textuur groter zijn dan bij de textuurpatronen die herhaalt kunnen worden. Gardiner & Hadfield (1990) achten tot 512 bij 512 texels per patroon gewenst. Ondermeer bij IMAGE IV\AWARDS van Link-Miles heeft men zowel de herhalende tegels als fototextuur toegepast. Hierdoor zijn de kosten voor realistische textuur beduidend lager (Jarvis, 1990). Het FEL-TNO ontwikkeld sinds enkele jaren ook een beeldsysteem met foto-textuur.

5.2.4 Niveaus van detail voor textuur

De waargenomen textuur van een gegeven oppervlak hangt af van de afstand en van de verdeling van de textuur-elementen. Bij een volkomen homogene verdeling van die elementen zal voorbij een bepaalde afstand geen textuur meer waarneembaar zijn. De visuele hoek van de elementen is dan te klein geworden, evenals hun onderlinge afstanden. De textuur "verdicht". Deze textuur-gradiënt is volgens Gibson (1950) een belangrijke cue voor het waarnemen van relatieve afstand.

Is de verdeling van textuur-elementen daarentegen onregelmatig dan kunnen deze onregelmatigheden in een bepaald afstandsgebied zelf weer als een textuurpatroon worden waargenomen. Natuurlijk worden de onregelmatig verdeelde textuur-elementen ook steeds kleiner met het toenemen van de afstand en zijn op een gegeven afstand niet meer als individuele elementen te onderscheiden. Wel kan dan een groepering van meerdere elementen als één nieuw element in een ander textuurpatroon gezien worden. Bij het toenemen van de afstand kunnen op deze wijze steeds andere textuurpatronen ontstaan, met steeds grovere elementen.

Voor realistische simulatie is het belangrijk dat computer gegenereerde textuur op dezelfde wijze verloopt met de afstand. Wanneer de textuur-elementen of texels zeer klein worden kan dat echter problemen geven. Worden de elementen van het formaat van 1 pixel of kleiner, dan zullen ze afwisselend wel of niet afgebeeld worden, afhankelijk of ze het centrum van een pixel bedekken. Voor de waarnemer kan het textuur dan gaan flikkeren (scintillation; zie ook par. 3.10 - Anti-aliasing). Er zijn verschillende oplossingen om dit te voorkomen.

Een effectieve en relatief goedkope methode om textuur te filteren is "clamping". Hierbij wordt aan de hand van het aantal texels dat een bepaald pixel beslaat, de intensiteit van de textuur op elk pixel vastgesteld. Een andere veel gebruikte methode is het zogenaamde MIP-mapping. MIP staat voor Multum In Parvo (veel in klein). Een MIP-map bestaat uit verschillende versies van hetzelfde textuurpatroon, die steeds meer gefilterd zijn en steeds minder texels bevatten. Deze maps worden in het geheugen opgeslagen en representeren afnemende niveaus van detail (levels of detail). Bij het groter worden van de afstand wordt een lager niveau gebruikt (Gardiner & Hadfield, 1990). MIP-textuur is duurder dan clamping, maar het resultaat voor de waarneming is ook wat beter.

Rich (1989) noemt nog 2 andere methoden om textuur te filteren, aangeduid met "summed-area tables" en "two-pass transform". De kosten en kwaliteit overwegend, kiest hij MIP-mapping echter als de beste methode. Volgens Gardiner & Hadfield (1990) geeft het gelijktijdig gebruiken van 4 maps (niveaus van textuur-detail) al heel bevredigende resultaten geeft.

Om te voorkomen dat op grote oppervlakken de overgang tussen verschillende niveaus van textuur-detail duidelijk zichtbaar is, moet de ene geleidelijk verschijnen, terwijl de andere geleidelijk verdwijnt. Dit kan gebeuren door de 2 versies in de buurt van de overgang te vermengen (Yan, 1985).

5.2.5 Gewenst aantal textuurpatronen

Het aantal verschillende textuurpatronen, bijvoorbeeld voor gras, asfalt of tegels, dat CGI-systemen konden produceren was aanvankelijk niet groot. IMAGE III(T) van Link Miles heeft bijvoorbeeld 8 verschillende textuurpatronen die gelijktijdig afgebeeld kunnen worden. De laatste jaren is het aantal textuurpatronen dat on-line opgeslagen kan worden sterk toegenomen. De firma Bolt, Beranek & Newman beweert een beeldgeneratie-systeem te hebben dat tot 256 textuurpatronen on line op kan slaan. Of zo'n groot aantal echt nodig is, is twijfelachtig. Maar 5 verschillende patronen tegelijkertijd is wel het minimum voor het maken van enigszins realistische beelden. Aan de andere kant zijn 50 textuurpatronen al heel aanvaardbaar.

Het kan nuttig zijn om op één polygoon verschillende textuurpatronen af te beelden. IMAGE III(T) heeft deze mogelijkheid niet, maar het ESIG-1000 beeldsysteem van de firma Evans & Sutherland kan tot 4 textuurpatronen per polygoon genereren (Haug, e.a., 1990)

Behalve het aantal mogelijke textuurpatronen is het ook van belang op hoeveel vlakken textuur aangebracht kan worden en of dat kan bij elke oriëntatie van de vlakken, behalve horizontaal en verticaal. In ieder geval kan bij het ESIG-1000 systeem textuur worden aangebracht op alle polygoonen (Haug e.a., 1990). Verder bestaat hierover geen duidelijkheid.

5.2.6 Conclusies

Textuur moet liefst op vlakken in alle oriëntaties mogelijk zijn. Vooral bij terreinrijden moeten ook hellingen en terreinhobbels van textuur kunnen worden voorzien. De textuurpatronen moeten, behalve de intensiteit en de kleur van pixels, bij voorkeur ook de mate waarin de pixels transparant zijn, kunnen moduleren. Het aantal textuur-elementen (texels) per textuurtegel moet bij fototextuur groter zijn dan bij synthetische textuur. Er wordt gesproken over respectievelijk maximaal 512 bij 512 en 64 bij 64 texels.

Het aantal verschillende textuurpatronen zou niet onder de 5 mogen en niet boven de 50 hoeven te liggen. Er zijn echter beeldsystemen die veel meer dan 50 patronen beschikbaar hebben.

Het gebruik van verschillende niveaus van detail van textuur is bevorderlijk voor het realisme en kan aliasing effecten voorkomen. In dit verband wordt de MIP-mapping techniek aanbevolen. Voor een geleidelijke overgang tussen niveaus van detail moet de transparantie van de verschillende niveaus gevarieerd kunnen worden.

5.3 Bewegende textuur

Bij bewegende textuur gaat het niet om de textuur die beweegt als gevolg van de beweging van het voertuig, maar om textuur die binnen de scène zelf beweegt. Zoiets is bijvoorbeeld te gebruiken voor het afbeelden van stromende water.

IMAGE III(T) van Link-Miles heeft, ondermeer ten behoeve van het amfibievoertuig YPR-765, de mogelijkheid om stromend water te simuleren. De stroomrichting en -snelheid zijn daarbij variabel.

Het simuleren van golven kan belangrijk zijn bij scheepssimulatoren. Het beeldsysteem van de Susan-scheepssimulator in Hamburg heeft de mogelijkheid tot het simuleren van golfbewegingen. Dit beeldsysteem is van de firma Krupp-Atlas.

5.4 Transparante polygonen

Een belangrijke toepassing van objecten met variabele transparantie zijn, is reeds genoemd in par. 5.1 - Niveaus van detail, en par. 5.2 - Textuur: het maken van een vloeiende overgang van het ene naar het andere niveau van detail.

Geheel of gedeeltelijk transparante vlakken kunnen ook erg handig zijn voor het modelleren van ingewikkelde, onregelmatige objecten, zoals bomen. Een boom bestaat dan uit een transparante polygoon, waarop een textuurpatroon wordt "geplakt" (mapping) dat de kroon van de boom representeert. Een dergelijke boom oogt erg realistisch, en iets wat achter de boom staat kan nog gedeeltelijk zichtbaar zijn.

Eveneens kunnen transparante, gekleurde polygonen gebruikt worden om vlakken met textuur gedeeltelijk in te kleuren. Dezelfde gevel-textuur kan dan uitgevoerd worden met ramen en deuren in verschillende kleuren. Een groot voordeel is dat voor voorwerpen die op deze manier gevormd zijn, slechts een klein aantal polygonen nodig is (Holt, 1985; Wyckoff, 1989).

Gedeeltelijk doorzichtige polygonen kunnen daarnaast ook gebruikt worden om slagschaduw en rook te imiteren, voor het weergeven van de draaiende rotors van een helicopter, of voor ruiten in andere voertuigen.

5.5 Schaduw-effecten

5.5.1 Definitie

Schaduw en zijn intensiteitsverschillen over oppervlakken ten gevolge van hun oriëntatie ten opzichte van een lichtbron, meestal de zon, of intensiteitsverschillen op een vlak als er een object tussen dat vlak en de lichtbron staat. In dat laatste geval spreekt men over slagschaduw. Schaduw op vlakken als gevolg van hun oriëntatie worden ook wel aangeduid met de term "shading"; slagschaduw met "shadows".

Schaduw op of over vlakken zouden een belangrijke invloed hebben op de indruk van diepte of afstand in simulatorbeelden (AGARD, 1981) en de vorm van objecten (Cavanagh & Leclerc, 1989). Zodoende zijn schaduw sterk bepalend voor het realisme van een scène. Bomen die geen enkele schaduw werpen op de grond onder zich, lijken bijvoorbeeld te zweven in het landschap.

Een bol waarvan het oppervlak geen enkele verschil in intensiteit bezit, ziet er uit als een platte schijf.

5.5.2 *Generatie van schaduwen*

Bij beeldsystemen met een maquette vormen zich automatisch schaduwen door de lampen boven de maquette en doordat de voorwerpen op de maquette ook werkelijk drie-dimensionaal zijn.

Bij computer-gegenereerde beelden moeten schaduwen apart gemaakt worden. Zo kunnen slagschaduwen gesimuleerd worden door donkere, eventueel gedeeltelijk transparante, polygonen die in de juiste geometrie ten opzichte van de gesimuleerde lichtbron op het grondvlak liggen. De polygonen voor de slagschaduwen zouden bij het modelleren van de database gedefinieerd moeten worden. Het is tot nu toe onbekend of het ook mogelijk is dat het bepalen van de oriëntatie van de slagschaduwen automatisch gebeurt, bij gegeven positie van de lichtbron. Bij computer-animatie is dit wel mogelijk, maar daarbij is het niet nodig de beelden in real-time bij te werken zoals bij voertuigsimulatie.

Voor het produceren van schaduwen op vlakken ten gevolge van de oriëntatie zijn er verschillende technieken. In volgorde van verfijndheid en realisme zijn dat (Wyckoff, 1989):

- 1 Flat shading. Vlakken met verschillende oriëntaties worden in computer gegenereerde beelden weergegeven door verschillende polygonen. Bij flat shading wordt de luminantie van iedere polygoon bepaald via de cosinus van de hoek tussen de normaalvector op de polygoon en de lichtbron-richting. De resulterende luminantie geldt dan voor het hele oppervlak van de polygoon.
- 2 Gouraud shading. Deze techniek is geschikt voor het simuleren van gekromde oppervlakken. Bij Gouraud-shading wordt voor elke vertex van een polygoon de luminantie bepaald door van iedere vertex de normaalvector te definiëren (= gemiddelde van normaalvectoren op aangrenzende vlakken) en daarvan de hoek te bepalen met de lichtbron-richting. Deze luminantiewaarden worden lineair geïnterpoleerd over het oppervlak van de polygoon. Zo kunnen gekromde oppervlakken worden weergegeven met relatief weinig polygonen. Voor het realistisch afbeelden van objecten die rond lijken zijn normaliter veel polygonen nodig. Polygonen representeren immers doorgaans platte vlakken. In combinatie met de juiste shading-techniek kan men eenvoudiger, met minder polygonen, een gebogen vlak suggereren (Rowley, 1986).
- 3 Phong shading. Bij deze techniek wordt per pixel de luminantie berekend door de lineaire interpolatie van de richting van de vertex-normaalvectoren over het oppervlak van de polygoon. Deze techniek wordt evenals Gouraud-shading toegepast voor het weergeven van gekromde oppervlakken.

5.5.3 *Gewenste shading-techniek*

Phong shading geeft het meest realistische resultaat, omdat de Machband-effecten, die bij Gouraud-shading op kunnen treden op de grens van 2 polygonen, achterwege blijven. Van de 3 technieken vraagt het echter ook de meeste

rekencapaciteit. Daarentegen is er tussen Gouraud en flat shading wat reken-capaciteit betreft niet veel verschil.

Atherton & Caporael (1985) lieten proefpersonen de bovengenoemde shading-technieken beoordelen op natuurgetrouwheid en esthetische waarde. Ze vonden significante verschillen tussen Phong, Gouraud en flat shading, maar tussen de eerste twee was het verschil het kleinst. De kleine verbetering in realisme weegt volgens Atherton & Caporael (1985) niet op tegen het extra rekenvermogen dat Phong-shading vereist. Voor simulatorbeelden lijkt op dit moment Gouraud-shading daarom de aangewezen techniek. Flat shading geeft duidelijk minder realistische beelden dan Gouraud-shading.

Behalve bovengenoemde vormen van shading bestaat er ook zogenaamde fixed shading. Dit is toe te passen om verlopende grijswaarden af te beelden. De luminantie van elke vertex van een polygoon kan worden opgegeven en de luminantie varieert over het oppervlak van de polygoon, maar is onafhankelijk is van de positie van de zon of andere lichtbron.

Ook is het mogelijk om kleuren geleidelijk over een polygoon te laten veranderen, het zogenaamde "color blending" (Haug e.a., 1990). Hiermee zijn speciale effecten te bereiken als bijvoorbeeld het afbeelden van olievlekken. Bij color blending bepaalt de kleur van elke vertex het mengen van de kleuren.

5.5.4 Conclusies

Schaduwen kunnen belangrijke informatie geven over de positie en oriëntatie en vorm van objecten. Voor het simuleren van slagschaduwen (shadows) worden polygoonen gebruikt. Voor het afbeelden van schaduwen op een vlak als gevolg van vorm of oriëntatie van dat vlak (shading) zijn er verschillende technieken. Phong-shading geeft bij de imitatie van kromme vlakken het meest realistische resultaat, maar vraagt veel rekenvermogen. Gouraud-shading is weliswaar iets minder mooi, maar vergt veel minder rekenvermogen. Het eenvoudigste is flat-shading. Dit geeft bij het imiteren van kromme vlakken duidelijk minder realistische beelden dan Gouraud-shading.

6 LICHT- EN ZICHTEFFECTEN

6.1 Meteorologische effecten

6.1.1 *Belang van meteorologische effecten*

Meteorologisch zicht is het zicht dat beperkt wordt door mist, nevel, regen of sneeuw. Hierbij hoort ook de vertewaas, de vermindering van het zicht over grote afstanden. Deze vertewaas kan een rol spelen bij afstandsschatting, met name bij vliegen of varen. Piloten zouden op basis van de vermindering van het contrast een schatting maken van hun afstand tot een object (Sieverding, 1984). Het variëren van het zicht kan belangrijk zijn bij de training, om het uitvoeren van handelingen bij slecht zicht te oefenen. Voor onderzoek naar vlieg-, rij- of vaargedrag bij verminderd zicht is deze mogelijkheid uiteraard van groot belang. Ook zal, met name bij vliegen en varen, een vertewaas het realisme van de beelden vergroten.

6.1.2 *Generatie van meteorologische effecten*

Bij beeldsystemen met een maquette kunnen min of meer realistische mist-effecten verkregen worden met behulp van een rookgenerator. In CGI-systemen is de impressie van verminderd zicht door mist of nevel te bereiken door de kleur van de polygonen, als functie van de afstand tot de waarnemer, meer of minder te veranderen in de richting van een egale mist-kleur, grijs-wit. Voor het imiteren van vertewaas zou meer blauw toegevoegd moeten worden. Bij beeldsystemen met een Z-buffer (zie par. 10.1 - Afdekken van objecten), kunnen de afstandswaarden die daarin opgeslagen zitten gebruikt worden voor het bepalen van de kleurverandering van de polygonen in de diepte (Brune & Metze, 1990). Het contrast moet natuurgetrouw afnemen als functie van de afstand. Hiervoor wordt vaak gebruik gemaakt van non-lineaire mist- of nevel functies (Wyckoff, 1989). In sommige beeldsystemen, onder andere IMAGE III, worden (pseudo-) mist-effecten bereikt door een verlopend waas rond de horizon af te beelden. Dit geeft niet meer dan een suggestie en is zeker niet natuurgetrouw. Er zijn allerlei variaties mogelijk in de hoogte waarop mist hangt, de dichtheid en de regelmatigheid (mistbanken). Afhankelijk van het voertuig en de taken waarvoor men de simulator wil gebruiken zullen die mogelijkheden meer of minder belangrijk zijn. Bij vliegen zal het een grotere rol spelen dan bij rijden. Verminderd zicht door sneeuw of regen wordt zelden genoemd in specificaties van beeldsystemen. Uitzondering zijn de specificaties voor de National Advanced Driving Simulator (Haug e.a, 1990), waarbij het zicht moet kunnen variëren tussen 30 km en 1 m. Deze ondergrens zou nodig zijn in verband met verminderd zicht als gevolg van regen of sneeuw. Wel kunnen sommige CGI-systemen sneeuwlandschappen afbeelden of een terrein waar het net geregend heeft. Bij meteorologische effecten horen ook wolken. Deze kunnen sterk bepalend zijn voor een indruk van de aard van het weer dat gesimuleerd wordt. De wolkenpa-

tronen en de zicht-effecten als gevolg van het vliegen door de wolken dienen bij vliegsimulatoren overeen te stemmen met de gesimuleerde weersgesteldheid.

6.1.3 *Conclusies*

De mogelijkheid om het zicht realistisch te variëren is belangrijk voor het uitvoeren van verschillende taken. Het zicht moet kunnen variëren tussen volkomen helder en minder dan 10 m.

Een vertewaas lijkt nuttig voor het schatten van afstanden en verhoogt het realisme van de beelden.

6.2 *Tijd-van-de-dag effecten*

6.2.1 *Definitie*

Behalve de categorieën dag, nacht en schemering zijn daarbinnen nog allerlei variaties in lichtniveau denkbaar. Bij maquettes is een geringe omgevingsverlichting moeilijk te realiseren door de beperkte gevoeligheid van de camera. Bij CGI-systemen moet eventueel de globale kleur van de scène en de positie van de zon aangepast kunnen worden; slagschaduwen en schaduwen als gevolg van oriëntatie moeten correct veranderen. Lichten (openbare verlichting, lichten in huizen, lichten van voertuigen) moeten meer of minder zichtbaar worden. De verschillende lichtniveaus en -verhoudingen in de scène zullen van te voren gemodelleerd moeten zijn.

Voor het realistisch afbeelden van nachts scènes moet het minimale luminantieniveau van de monitor of projector voldoende laag zijn (zie verder paragraaf 3.3 Luminantie).

6.2.2 *Licht van koplampen*

Het licht van de koplampen van het voertuig zelf vormt ook een lichtbron in schemer- of nachts scènes. Bij een maquette is dit moeilijk te realiseren omdat met echte kleine lampjes gewerkt moet worden. Om daarmee de intensiteit en de stralenbundels van de koplampen correct te imiteren is problematisch. Bij enkele CGI-systemen is het in principe mogelijk om stralenbundels met verschillende vormen en intensiteiten te modelleren. Met het toenemen van de afstand moet de sterkte van de verlichting van vlakken door de koplampen afnemen. Om dit adequaat te simuleren zou men gebruik kunnen maken van het Z-buffer (Brune & Metze, 1990) (zie ook par. 10.1 - Afdekken van objecten).

Het realistisch simuleren van de verlichtingseffecten van koplampen, inclusief die van retro-reflecterend materiaal is echter zeer moeilijk. Daarvoor moeten de reflectie-eigenschappen van de beschreven materialen bekend zijn. Voor zover dat al het geval is, zijn de algoritmen die de reflecties berekenen complex. Het uitvoeren van die algoritmen in real-time, wat voor voertuigsimulatie noodzakelijk is, is onmogelijk of zeer kostbaar (Proffitt & Kaiser, 1986).

6.3 Lichten

6.3.1 *Belang van lichten*

Bij het simuleren van dag-, nacht- en schemer-scènes moeten ook lichtpunten en hun eventuele verlichtingseffecten worden afgebeeld. De lichtpunten zijn in zekere zin het nachtelijk equivalent van de polygonen. In specificaties van beeldsystemen staat het aantal af te beelden polygonen en lichtpunten dan ook meestal samen vermeld.

6.3.2 *Generatie van lichten*

Lichtpunten kunnen op verschillende manieren gegenereerd worden. Één methode is, om een lichtpunt te representeren door een polygoon van enkele pixels groot. Een andere methode, die een realistischer resultaat geeft, is om de lichtpunten te definiëren als vectoren met een bepaalde coördinaat op het scherm. De punten lichten op als een electronenstraal ze aanstraalt. Deze calligrafisch geschreven lichtpunten vallen te combineren met de polygonen die via het gewone rasterscan display worden afgebeeld. De vector-lichtpunten kunnen zelfs 1 pixel beslaan en kunnen variëren in intensiteit. De maximale intensiteit van deze lichtpunten is groter dan die van de polygoon-lichtpunten. Een nadeel is echter dat het speciale eisen stelt aan het beeldsysteem en de display.

6.3.3 *Mogelijkheden van lichten*

De lichtpunten in simulatorbeelden moeten kunnen variëren in kleur, lichtsterkte en grootte. In verband met de afstandsschatting is het van belang dat de waargenomen sterkte van de lichtpunten op de juiste wijze (invers kwadratisch) afhankelijk is van de waarnemingsafstand. Bij vlieg- en scheepssimulatoren moet het mogelijk zijn om bakens te simuleren waarbij de lichtsterkte afhankelijk is van de hoek waaronder de lichten waargenomen worden.

Een speciale versie van dergelijke bakens, zogenaamde VASI's (vertical approach slope indicators), is alleen van toepassing bij vliegsimulatoren. Bij deze bakens ziet de piloot een andere kleur, afhankelijk of het vliegtuig onder of boven de correcte helling de landingsbaan nadert.

Andere mogelijkheden zijn dat lichtpunten kunnen flikkeren (bijvoorbeeld een stoplicht dat buiten werking staat) of dat een deel van de lichtpunten kan bewegen, voor het geval dat het gaat om de lichten van bewegende voertuigen. Ook moeten lichtbronnen afgedekt worden door objecten die dichterbij de waarnemer staan, occulting moet dus ook bij lichtpunten mogelijk zijn (zie ook par. 10.1 - Afdekken van objecten).

Polygonen met een relatief grote helderheid ("lichtgevend") kunnen gebruikt worden voor het weergeven van verlichte vlakken die in grootte of vorm kunnen veranderen, zoals het licht dat openbare verlichting op de straat werpt, of verlichte ramen van gebouwen (Haug e.a., 1990).

6.3.4 *Gewenste aantal lichtpunten*

In nachtscènes krijgt men een groot deel van de visuele informatie uit lichtpunten. De hoeveelheid benodigde lichtpunten is weer afhankelijk van de te verrichten taken. Voor het simuleren van een landingsbaan in de nacht zijn veel lichtpunten nodig. Deze geven belangrijke informatie bij het landen. Bij rijden in het donker kunnen de lichten langs de weg ook behulpzaam zijn bij snelheids- of afstandsschattingen. De Federal Aviation Administration (1980) eist voor vliegsimulatoren bestemd voor training-fase III, 4000 lichtpunten per frame. IMAGE III van Link Miles kan tot 1000 lichtpunten per frame afbeelden, maar modernere beeldsystemen kunnen vaak tot 6000 lichtpunten gaan; waarbij er vaak sprake is van een uitwisseling tegen polygonen, bijvoorbeeld 25 lichtpunten tegen een polygon.

6.3.5 *Conclusies*

De lichtpunten moeten kunnen variëren in kleur, intensiteit en grootte en kunnen flikkeren of bewegen, afhankelijk van de aard van de lichtbronnen die ze simuleren. Zowel aard als aantal is sterk afhankelijk het soort voertuig en de omgeving. Voor het realistisch afbeelden van een landingsbaan in de nacht worden 4000 lichtpunten geëist. Voor goede afstandsschatting dient de waargenomen sterkte van lichten een correcte functie van afstand en richting van de waarnemer te zijn.

7 BEWEGENDE OBJECTEN

Met bewegende objecten wordt bedoeld: objecten die zelfstandig door de scène bewegen. Het gaat dus niet om de beweging van objecten ten gevolge van de voortbeweging van de waarnemer.

7.1 Bewegende onderdelen van stationaire of bewegende objecten

Genoemd is al het gebruik van deels transparante polygonen om de draaiende rotorbladen van een helicopter of vliegtuig weer te geven. Bewegende delen van objecten die langzamer bewegen dan propellers, moeten door werkelijk bewegende vlakken gesimuleerd worden. Hierbij valt te denken aan radarantennes, bewegende bakens of molens. Of, als het om bewegende onderdelen van bewegende objecten gaat, aan wielen van voertuigen, of benen van fietsers of voetgangers. In de literatuur worden objecten met bewegende onderdelen aangeduid met "articulated (=gelede) objects". Feitelijk kunnen alle objecten die bewegen volgens een vaste, vooraf bepaalde, baan binnen een bepaald deel van de scène (zoals een verkeersstroom van gelijk translerende voertuigen), worden aangeduid als articulated objects (Wyckoff, 1989).

Veel huidige beeldsystemen (bijv. Star Technology en Megatek) hebben de mogelijkheid van het afbeelden van articulated objects.

7.2 Bewegende voertuigen

7.2.1 *Gewenst aantal bewegende voertuigen*

Voor rij- en schietsimulatoren, en in bepaalde gevallen ook bij vlieg- en vaarsimulatie, is de aanwezigheid van andere bewegende voertuigen gewenst. Hoeveel bewegende voertuigen of andere voorwerpen nodig zijn, is er weer erg afhankelijk van de taak en van de omgeving waarin men zich bevindt. Analyse van videobanden van veel voorkomende (auto)verkeerspatronen leerde dat er hoogstens 10 bewegende voertuigen tegelijkertijd in het beeld rechtvooruit voorkomen (Haug e.a., 1990). Dit gold ook bij zeer druk verkeer. De meeste bewegende objecten komt men over het algemeen in de stad tegen, in de vorm van voertuigen of voetgangers. Om dit soort situaties voldoende realistisch te simuleren, tegen redelijke kosten, zouden 16, gelijktijdig, bewegende objecten voldoende zijn (FAAC, 1990). Bij vliegen is het aantal andere bewegende voertuigen dat men om zich heen kan hebben aanzienlijk kleiner dan bij rijden.

7.2.2 *Eisen aan bewegende voertuigen*

Bij het afbeelden van bewegende objecten moet er rekening mee worden gehouden dat ze andere objecten of vlakken kunnen afdekken, of zelf afgedekt kunnen worden, de occulting (zie par. 10.1 - Afdekken van objecten) moet dus

correct zijn. Bewegende voertuigen moeten ook meebewegen met de onregelmatigheden in het terrein waar ze overheen bewegen daar ze anders lijken te zweven (Brune & Metze, 1990). Om een juiste plaatsbepaling van bewegende objecten te bevorderen is een meebewegende slagschaduw (door middel van een transparant polygon, par. 5.4) ook een nuttige voorziening.

Voor sommige te simuleren taken (bijvoorbeeld het volgen van een ander voertuig) is het voldoende dat afgebeelde voertuigen een vast koersverloop hebben, met een al of niet constante snelheid. Voor onderzoek naar, en training van, interacties tussen weggebruikers is het echter belangrijk om zowel koers als snelheid van één of meer afgebeelde voertuigen onafhankelijk te kunnen variëren (Haug e.a., 1990). Het oefenen of onderzoeken van soort situaties is bij uitstek geschikt voor simulatoren, aangezien men in een simulator geen werkelijk risico loopt.

In de scheepvaart is het detecteren van een eventuele botsingskoers met andere vaartuigen, ook op grote afstand, van groot belang (deze wordt waargenomen door het niet veranderen van de peiling). Daarom zal de mogelijkheid van het simuleren van andere vaartuigen, met kritische positie, koers en snelheid, vaak belangrijk zijn. Hierbij is dan vaak ook een grote resolutie en/of het gebruik van een verrekijker (par. 8.1 - (electro-)optische hulpmiddelen) nodig.

7.2.3 Bewegende voertuigen in huidige beeldsystemen

Bij beeldsystemen met een maquette is een beperkt aantal bewegende voertuigen op de grond mogelijk die bijvoorbeeld met behulp van magneetstrips worden voortbewogen. De vrijheid van deze voertuigen om zich door het terrein te bewegen is zeer beperkt en het onvoorspelbaar maken van de bewegingen is een gecompliceerde opgave. Vliegtuigen of helicopters boven de maquette laten bewegen is moeilijk realistisch te verwezenlijken.

CGI-systemen, ook de goedkopere, kunnen vaak meerdere voertuigen met voorspelbare bewegingen afbeelden, als "articulated objects" (par. 7.1 - Bewegende onderdelen van objecten). De firma Star Technology claimt bijvoorbeeld dat hun G2000 beeldsysteem 100 bewegende objecten bij 30 Hz bijwerkfrequentie kan afbeelden. Het gelijktijdig afbeelden van meerdere onafhankelijk bewegende objecten, met verschillende snelheden en koersen die onder besturing van een proefleider of programma staan, is minder vanzelfsprekend.

Het maximum aantal van dit soort objecten varieert van systeem tot systeem. Het CT-5A beeldsysteem van de fabrikant Evans & Sutherland, dat in de Daimler-Benz rijnsimulator gebruikt wordt, heeft de mogelijkheid tot 5 onafhankelijk bewegende objecten. Het modernere ESIG 1000 systeem van Evans & Sutherland dat in de National Advanced Driving Simulator geïnstalleerd zal worden, kan 16 objecten gelijktijdig onafhankelijk laten bewegen (Haug e.a., 1990).

7.2.4 *Conclusies*

Bij het afbeelden van bewegende voertuigen moet er rekening mee worden gehouden dat ze andere objecten kunnen afdekken of zelf afgedekt kunnen worden. Tevens moeten ze met de onregelmatigheden van de ondergrond mee bewegen.

Het afbeelden van meerdere voertuigen die bewegen volgens een vaste baan is voor veel huidige CGI-systemen mogelijk. Voor onderzoek naar, en training van, interacties met andere voertuigen is het echter belangrijk om zowel koers als snelheid van één of meerdere afgebeelde voertuigen onafhankelijk en onvoorspelbaar te kunnen variëren.

Voor rijsimulators lijkt het weergeven van maximaal 16 bewegende voertuigen in één scène meestal voldoende te zijn.

7.3 Animatie-effecten

In real-time kunnen verschillende versies van een object geselecteerd worden die in de database opgeslagen liggen. Hiermee kunnen veranderingen van voorwerpen vertoond worden, bijvoorbeeld het exploderen van een voertuig, of het vervormen van een voertuig bij een botsing. In dat geval zijn er verschillende versies die verschillende stadia van de explosie of botsing representeren. Deze worden in de juiste volgorde na elkaar afgebeeld. Door de versies geleidelijk in elkaar over te laten vloeien, zijn de overgangen niet storend (Haug e.a., 1990; Star Technology, 1990).

8 SIMULATIE VAN (ELECTRO-)OPTISCHE HULPMIDDELEN

(Electro-)optische hulpmiddelen zijn extra opties waarover sommige CGI-systemen beschikken. Slechts voor een beperkt aantal taken zullen dergelijke hulpmiddelen gesimuleerd hoeven te worden.

8.1 Achteruitkijkspiegels en verrekijkers

In een rijnsimulator is het nuttig om ook beelden in de achteruitkijkspiegels te hebben. Voor elke spiegel moet een apart beeldkanaal gebruikt worden. De bestuurder kijkt door de spiegels in de cabine naar de monitors of projectieschermen. Voor de zijspiegels kunnen de benodigde velden klein zijn, 20° horizontaal bij 15° verticaal. Voor de binnenspiegel moet het gewenste veld wat groter zijn, ongeveer 35° horizontaal bij 15° verticaal (Haug e.a., 1990).

Zijspiegels kunnen als bolle spiegels zijn uitgevoerd om een groter veld te beslaan. Er treedt dan beeldverkleining op. Wanneer in de simulatorcabine bolle spiegels zijn aangebracht, moet er wel voor gezorgd worden dat de veldgrootte van de beelden groot genoeg is om de gehele spiegel te vullen.

Een andere mogelijkheid is de beelden van het kanaal voor de spiegel zelf dusdanig aan te passen of te vervormen dat het overeenkomt met wat men in een bolle of anderszins niet-doorsnee spiegel zou zien. De werkelijke spiegels in de cabine kunnen dan gewoon plat zijn. Dit is nuttig als men verschillende typen spiegels wil vergelijken.

Belangrijk is dat de bestuurder ook een deel van de auto zelf in de spiegels kan zien. Hierdoor kan de bestuurder zijn positie van zijn auto op de weg en ten opzichte van andere voertuigen bepalen (Haug e.a., 1990).

De helderheid van de beelden in de achteruitkijkspiegel mag niet groter zijn dan de helderheid van beeld recht vooruit, en mag hooguit een factor 2 kleiner zijn. De resolutie van beelden voor de spiegels hoeft niet erg goed te zijn, men hoeft geen verkeersborden te lezen in de spiegel of andere fijne details te zien. Volgens Haug e.a. (1990) mag de bijwerkfrequentie (maar niet de opfrisfrequentie) van de achteruitkijkspiegel kanalen lager kan zijn dan die van het beeld recht vooruit. Volgens Haug e.a. zal bij de te realiseren National Advanced Driving Simulator de bijwerkfrequentie respectievelijk 25 Hz en 42 Hz bedragen.

Voor bepaalde taken bij vaarsimulatie kan het gebruik van verrekijkers nodig zijn. Aangezien de beperkte resolutie van simulatorbeelden gebruik van een echte verrekijker zinloos maakt, zal deze gesimuleerd dienen te worden door middel van een apart beeldkanaal met de gewenste vergroting en corresponderende veldgrootte en resolutie, waarmee de scene kan worden afgetast.

8.2 Helderheidsversterkers en warmtebeelden

Bij sommige CGI-systemen, de duurdere, zou de mogelijkheid bestaan tot het simuleren van warmtebeelden. Voorwerpen die in werkelijkheid warmer zijn dan hun omgeving worden, in de simulatie, helderder afgebeeld (Wyckoff, 1989).

Ook zijn er mogelijkheden om de beelden in de simulator zo aan te passen dat de bestuurder die door een helderheidsversterker naar een scène kijkt, eenzelfde beeld ziet als in werkelijkheid het geval zou zijn. Een helderheidsversterker is het meest gevoelig voor lange golflengtes (rood en infrarood). Simulatorbeelden bevatten uiteraard geen infrarood. Om voor dat gemis te compenseren moeten objecten die van nature niet rood zijn, zoals bomen, met aangepaste kleuren en helderheden afgebeeld kunnen worden (Green & Grayston, 1989).

Dit soort beelden vereist een aparte voorziening in de database. Vooral voor militaire training is dit van belang.

8.3 Middelen om afstand te bepalen

Bij tanks en helicopters wordt gebruik gemaakt van een laser-puls om de afstand tot een object te bepalen. Sommige beeldsystemen kunnen dat ook simuleren (Wyckoff, 1989). De vereiste informatie over de afstand is direct voorhanden in de Z-buffer (Brune & Metze, 1990; zie ook par. 10.1 - Afdekken van objecten).

Een optie van het ESIG 1000 beeldsysteem van Evans & Sutherland is de zogenaamde "line of sight ranging" (Haug e.a., 1990). Hiermee kan de afstand vastgesteld worden tot de dichtstbijzijnde polygoon, langs een bepaalde kijkrichting. De kijkrichting kan vast zijn en naar één punt in het visuele veld van de waarnemer wijzen of mee bewegen met de bewegingen van de ogen.

Een andere toepassing van de line of sight ranging is om te bepalen of vanuit de cabine van het voertuig andere bewegende voertuigen zichtbaar kunnen zijn. Het ESIG-1000 beeldsysteem kan van 8 bewegende objecten de zichtbaarheid bepalen.

9 INTERACTIES VAN HET VOERTUIG MET DE OMGEVING

In dit hoofdstuk worden uitsluitend de consequenties voor de beelden als gevolg van de interacties van het voertuig met de omgeving behandeld. De effecten op het bewegings- of geluidssysteem van de simulator blijven buiten beschouwing.

9.1 Terrein interacties

In simulatie moeten de fysische eigenschappen van het terrein waarover het voertuig rijdt corresponderen met de visuele eigenschappen. Hierbij valt te denken aan een oneffen ondergrond, verschillen in wrijving of rolweerstand van het terrein, glad of stroef wegdek, of veranderingen in dwars- of langshelling van het terrein waarover gereden wordt. Deze eigenschappen van het terrein hebben effecten op het voertuiggedrag en moeten daarom ook merkbaar zijn in zowel de beelden, als in het bewegings- of geluidssysteem van de simulator.

Daartoe moet op elk moment de aard van het terrein onder het voertuig worden bepaald, vanaf één of meer punten op het voertuig. Het beste is, als de gesteldheid van de ondergrond, of de hoogte, wordt vastgesteld op de positie van alle wielen of rupsen van het voertuig (Brune & Metze, 1990). Het BBN GT100 beeldsysteem van de firma Bolt, Beranek & Newman beschikt over 8 controlepunten.

Bij gesimuleerde helicopters of vliegtuigen kan op dezelfde wijze, via een aantal meetpunten op het voertuig, de hoogte van het voertuig boven de grond worden bepaald. Dit kan nuttig zijn bij het landen, bijvoorbeeld om het moment van "touch down" vast te stellen, of om eventuele botsingen met bergen en bomen vast te stellen.

Ook voor andere voertuigen die zich door de scène bewegen is het belangrijk dat ze met de onregelmatigheden van het terrein mee bewegen (par. 7.2.2 - Eisen aan bewegende voertuigen).

9.2 Botsingen met objecten

Voor een realistische simulatie moet de bestuurder weten wanneer een ander object het voertuig raakt. Bepalen of een ander voorwerp het voertuig heeft geraakt wordt gewoonlijk gedaan door voor een aantal geselecteerde punten op het voertuig te bepalen of een ander voorwerp daar gepasseerd is. Dit kunnen obstakels in het terrein zijn of andere bewegende voertuigen. Ook kan er een denkbeeldige doos rond het voertuig gedefinieerd worden en is er sprake van een botsing als iets binnen die doos komt. Met een Z-buffer (zie par. 10.1 - Afdekken van objecten) kan een botsing vastgesteld worden indien een voorwerp voorbij een kritische z-waarde komt (Brune & Metze, 1990).

Een onderscheid tussen lichte botsingen (bv. een bermpaaltje) en zware botsingen (bv. een huis) kan nuttig zijn bij training (Padmos, 1989a). Voor zover bekend zijn er geen beeldsystemen die dit onderscheid kunnen maken.

Behalve het detecteren van botsingen voor het voertuig waar de waarnemer in zit, kan hetzelfde ook toegepast worden bij andere bewegende voertuigen in het beeld. Het ESIG 1000 beeldsysteem van Evans & Sutherland kan voor maximum 16 voertuigen, waaronder dat waar de waarnemer in zit, bijhouden of er sprake is van een botsing, met een bijwerkfrequentie van 6 Hz. Wordt het aantal beperkt tot 1 voertuig dan kan dit bij een bijwerk frequentie van 60 Hz (Haug e.a., 1990).

Voor bepaalde onderzoeken betreffende het rijgedrag kan het ook nodig zijn dat snelheid of koers van afgebeelde voertuigen reageren op het gedrag van de bestuurder van het simulator-voertuig.

10 MODELLEER HULPMIDDELEN

Modelleerhulpmiddelen kunnen het opbouwen en wijzigen van een database voor een beeldsysteem eenvoudiger maken. Het zijn in feite geen eigenschappen van de simulatorbeelden, daar ze zelf niet zichtbaar zijn in de beelden. Wel kunnen de hulpmiddelen, met name de twee eerst te noemen, de kwaliteit van de beelden sterk beïnvloeden.

10.1 Afdekken van objecten (occluding)

10.1.1 *Belang van afdekken*

Objecten die op verschillende afstanden van een waarnemer staan, dekken elkaar geheel of gedeeltelijk af. Het gedeeltelijk schuil gaan van een object achter een ander object geeft informatie over de relatieve afstanden van die objecten tot de waarnemer.

Bij bewegingen van de waarnemer kan het aantal objecten dat afgedekt wordt en mate waarin veranderen. Dit dynamisch verschijnen en verdwijnen van objecten bij beweging is in feite gekoppeld aan de bewegingsparallax, welke een belangrijke cue is voor afstands- en snelheidschatting. Voorwaarde voor het optreden van bewegingsparallax is wel dat de afgebeelde scène een behoorlijk aantal objecten bevat die zich op verschillende afstanden van de waarnemer bevinden.

Naast het bevorderen van het realisme, kan in CGI-systemen het afdekken van objecten, ook wel *occluding* genoemd, als extra voordeel hebben dat van polygoon die schuil gaan achter andere polygoon, de kleur ook niet berekend hoeft te worden. Dit kan het beroep op de rekencapaciteit van de beeldgeneratie-computer verminderen. In beeldsystemen met een maquette vindt *occluding* automatisch plaats en vormt het verder geen probleem.

10.1.2 *Afdekken in CGI-beelden*

In computer-gegenereerde beelden moet *occluding* expliciet gedefinieerd worden. Deze beelden worden polygoon voor polygoon opgebouwd. Om elkaar overlappende vlakken correct af te beelden moet het probleem van "geometrische prioriteit" opgelost worden: welk vlak bevindt zich het dichtst bij de waarnemer, en dekt daarmee achterliggende vlakken af? Dit kan op meerdere manieren worden bereikt.

Bij sommige beeldsystemen, bijvoorbeeld IMAGE III/T van Link Miles, moet tijdens het modelleren aan de polygoon een prioriteit worden toegekend. Polygoon met een lagere prioriteit worden afgedekt door polygoon met een hogere prioriteit. Zo'n prioriteitstoekenning is slechts correct voor een beperkt gebied van waarnemer-posities. Dat betekent dat daarbuiten, objecten die verder weg gelegen zijn, door dichterbij gelegen objecten kunnen "heen schijnen". Om bij het modelleren de prioriteiten, vanuit meerdere waarnemer-posities, correct toe te kennen is ook niet eenvoudig.

Een andere techniek voor het bereiken van occulting, die zulke bezwaren niet heeft, is het zogenaamde Z-buffer. Veel moderne CGI-systemen beschikken over deze techniek. Bij de Z-buffer techniek wordt aan het begin van elke bijwerkcyclus automatisch van elk pixel, in de af te beelden polygonen, de afstand van het pixel in het perspectief (z-coördinaat) tot het (virtuele) oogpunt bepaald (Brune & Metze, 1990).

Een Z-buffer bestaat uit een random access geheugen met een geheugenplaats voor elk pixel, waarin de afstand (z-waarde) van het pixel wordt opgeslagen. Het aantal bits van elke geheugenplaats is bepalend voor de graad van nauwkeurigheid van de afstandsbeoordeling.

In de Display Processor (par. 1.5.3) worden voor de constructie van een frame achtereenvolgens kandidaat-pixels voor het framebuffer ingevoerd, die overeenkomen met polygonen op verschillende afstand. De berekende z-waarde van elk kandidaat-pixel wordt vergeleken met de z-waarde op die geheugenplaats. Slechts als de z-waarde kleiner is (als dus het betreffende kandidaat-pixel, vanuit het virtuele oogpunt gezien, vóór het vorige pixel staat), dan wordt deze nieuwe z-waarde in het Z-buffer opgeslagen en de kleur van het pixel berekend. Op deze manier worden de pixels overschreven die behoren tot polygonen die afgedekt moeten worden.

Aangezien de beslissing wel of niet afbeelden per pixel wordt genomen en niet per polygoon, kunnen de polygonen op elk mogelijke manier in de diepte gerangschikt zijn (Brune & Metze, 1990).

10.1.3 *Nadelen van het Z-buffer*

Op de grens van polygonen die elkaar gedeeltelijk overlappen kan bij het Z-buffer aliasing (par. 3.10) optreden. De kleur van een pixel wordt immers bepaald door de polygoon met de kleinste z-waarde. Indien het dichtstbijzijnde polygoon minder dan de helft van het pixel bedekt, zal het volgende polygoon de kleur van het pixel bepalen.

Enkele beeldsystemen lossen dat bezwaar op door, analoog aan een gangbare anti-aliasing techniek, een subpixel Z-buffer te gebruiken, die van elk subpixel de z-waarde bijhoudt en het pixel een gemiddelde kleur geeft afhankelijk van het aantal subpixels dat door de overlappende polygonen bedekt wordt. Dit zou zeer mooie resultaten geven, maar het vereist veel rekenvermogen, daar de capaciteit van het Z-buffer met een factor moet worden vergroot die gelijk is aan het toegepaste aantal subpixels per pixel (Rich, 1989).

Als efficiëntere oplossing wordt het zogenaamde A-buffer genoemd. Op de grens van twee, elkaar deels overlappende, polygonen wordt met het A-buffer de kleur van een pixel bepaald door de mate waarin de polygonen het pixel bedekken en de z-afstanden van de polygonen. Het A-buffer gebruikt ook subpixels, maar deze spelen uitsluitend een rol in gevallen dat een pixel niet geheel door een polygoon bedekt wordt, dus op de grens van polygonen.

Met het A-buffer worden tegelijkertijd afgedekte vlakken verwijderd en anti-aliasing toegepast. Naarmate het verschil in de z-afstanden tussen 2 polygonen groter is, draagt de kleur van het dichtstbijzijnde polygoon relatief meer bij aan

de kleur van het pixel. De effectieve resolutie is met het A-buffer beter dan met het Z-buffer (Carpenter, 1984).

Een ander nadeel van het Z-buffer is dat het minder geschikt is voor grote velden. De z-waarde van objecten aan de rand van de scène nadert immers naar 0. Daardoor kan een correcte prioriteits-bepaling onmogelijk worden. Door het gebruik van de "werkelijke afstand" (actual range) of R-diepte kan wel op elke positie in de ruimte de prioriteit vastgesteld worden (Gardiner & Hadfield, 1990). Een bezwaar van het R-buffer is weer dat polygonen die afgedekt worden, niet volledig genegeerd worden bij de beeldberekening (full pixel elimination), zoals het Z-buffer dat wel doet. Gebruikt het beeldsysteem een R-buffer dan moet het aantal polygonen dat het beeldsysteem per tijdseenheid kan berekenen groter zijn dan bij het gebruik van een Z-buffer bij dezelfde scène-complexiteit.

Naast de Z-buffers, A-buffers en R-buffers zijn er nog andere technieken voor het bepalen de prioriteit. Het Z-buffer is één van de eenvoudigste. Rich (1989) noemt als andere technieken de scanline occulting algoritmen en de scanline Z-buffers. Deze hebben ook weer nadelen, vooral als het gaat om het afbeelden van textuur.

10.1.4 *Conclusies*

Het bepalen van interpositie door expliciet een prioriteit aan de polygonen toe te kennen is ingewikkeld en geeft niet altijd het gewenste resultaat.

Een Z-buffer is een handiger methode, maar heeft nadelen in geval van een groot veld, en bij anti-aliasing. Voor een groot veld zou een R-buffer de problemen op kunnen lossen. Helaas negeert een R-buffer niet het gehele afgedekt polygoon. De bezwaren met betrekking tot anti-aliasing zijn te verhelpen door een A-buffer te gebruiken.

10.2 **Overload management**

Een vorm van (automatische) "overload management" is nuttig om in het geval dat de capaciteit van de beeldgeneratie-computer overschreden wordt, storende effecten als flikkeren of het wegvallen van polygonen te voorkomen. Vooral bij rijden of laag boven de grond vliegen, waar de beelden veel details bevatten en snelle manoeuvres mogelijk zijn, kan overload makkelijk optreden.

Het doel van de "Overload Managers" van beeldsystemen is om een gewenste bijwerkfrequentie of een gewenste dichtheid van objecten te handhaven en dat zo onopvallend mogelijk te doen. De aanpassingen moeten geleidelijk worden verminderd, zodat ze niet sterk de aandacht trekken.

Als het gaat om het handhaven van een bepaalde bijwerk frequentie dan moet de complexiteit van de scène verminderd worden. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden. Er kan worden overgegaan naar een lager niveau van detail, het zicht kan beperkt worden door extra nevel toe te voegen of objecten op grote afstand worden verwijderd (Star Technology, 1990).

Voor het handhaven van een gegeven scène-complexiteit moet de beschikbare rekentijd voor elke beeld uitgebreid worden. Dit gebeurt door de bijwerkfrequentie bij te stellen (Haug e.a., 1990).

Het is belangrijk al bij het modelleren rekening te houden met het voorkomen van overload. Daarvoor moeten de condities die tot overbelasting kunnen leiden eenduidig gespecificeerd zijn. Ook is het nuttig als tijdens het modelleren aangegeven wordt of de bewuste scène mogelijk het rekenvermogen overbelast, gegeven de bijwerkfrequentie.

10.3 Line of sight ranging

De mogelijkheid van line of sight ranging werd al genoemd in par. 8.3 - Middelen om afstand te bepalen. Een andere toepassing van de line of sight functie is bij het modelleren. Men kan dan eenvoudig een willekeurig polygoon op het scherm aanwijzen, en deze vervolgens identificeren. Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk kleuren van polygonen te veranderen, zonder in de database eerst deze polygonen op te moeten zoeken (Haug e.a., 1990).

10.4 Modelleerstation

Een modelleerstation is nuttig voor het off-line modelleren, terwijl de simulator in gebruik is. Daarnaast kan een geschikte modelleeromgeving de modelleertaak eenvoudiger en sneller doen verlopen. Dit is van groot belang gezien de enorme inspanning die het vereist om een scène met voldoende uitgestrektheid en complexiteit handmatig, polygoon voor polygoon, te modelleren.

Belangrijke functies voor zo'n modelleerstation zijn ondermeer de mogelijkheden om objecten uit het geheugen ("uit voorraad") in het landschap te plaatsen of objecten te verplaatsen, om kleuren, textuurpatronen en vormen aan te passen, om hoogte- of diepteprofielen van een tekening of kaart over te nemen, overload indicaties of indicaties van mechanische terreineigenschappen te geven.

11 INSTRUCTIE HULPMIDDELEN

Het betreft hier uitsluitend die hulpmiddelen voor instructie welke direct betrekking hebben op de beelden in de simulator. Er zijn talloze hulpmiddelen voor instructie, maar slechts enkele zijn direct van toepassing op de beelden.

11.1 Vijand detectie (threat occulting)

Hiermee is het mogelijk te bepalen of de bestuurder een vijandig voertuig kan zien of andersom of een vijand het voertuig van de waarnemer kan zien (Wyc-koff, 1989). Hoe deze optie precies werkt is niet duidelijk. Mogelijk is dat het met behulp van eenzelfde techniek gebeurd als waarmee bepaald wordt welke objecten afgedekt zijn, zoals het Z-buffer.

Vijand detectie zou met name nuttig zijn, in militaire toepassingen om te bepalen of een piloot succesvol is geweest bij het vliegen door een gebied en in het ontwijken van de vijandelijke radar.

11.2 Beïnvloeden gesimuleerde omgeving

Tijdens de opleiding kan het nuttig zijn de leerling te confronteren met onverwachte situaties. De instructeur kan dit reguleren door zelf, vanaf de instructie-console, veranderingen aan te brengen in de omgeving waar het gesimuleerde voertuig doorheen beweegt. Te denken valt aan het plotseling verschijnen van een ander voertuig, of van obstakels op het traject van het voertuig.

12 OVERZICHT VAN GEVONDEN KWALITEITSEISEN

Dit hoofdstuk bestaat uit een tabellarisch overzicht van de gewenste kwaliteit van buitenbeelden van voertuigsimulatoren. Indien mogelijk zijn, indien er sprake is van duidelijk verschillende eisen voor de verschillende soorten voertuigen, deze eisen uitgesplitst per voertuig. Ook worden in het algemeen zowel minimum eisen geformuleerd, waarbij een aanvaardbaar omgevingsbeeld zal worden verkregen voor niet-kritische deeltaken, als ook maximum te stellen eisen, waarbij veel kritische taken kunnen worden uitgevoerd. Dit overzicht is tevens te gebruiken als checklist, om na te gaan welke beeldkenmerken in aanmerking kunnen worden genomen bij het formuleren van eisen.

De overwegingen die in de vorige hoofdstukken zijn gegeven, blijven echter een belangrijk hulpmiddel voor de lezer om keuzen te maken voor te stellen eisen.

Beeldeigenschap	soort taak	niet-kritische taak	kritische taak
Veldgrootte	vliegen rijden varen	50° h. 40° v. 50° h. 40° v.	300° h. 150° v. 200° h. 40° v. 280° h. 45° v.
Beeldpresentatie	vliegen rijden varen	monitoren\projectoren, gecollimeerd projectoren projectoren, gecollimeerd	
Luminantie		20 - 30 cd/m ²	300 - 400 cd/m ²
Contrast-ratio		10:1 - 25:1	100:1 - 1000:1
Beeldresolutie (afgebeeld)		15 lijnen/graad de corresponderende adresseerbare resoluties dienen tenminste 1,5 x zo groot te zijn	60 lijnen/graad
Kleur-helderheidscombinaties		16 miljoen kleuren	
luminantiestappen			150 - 300

Beeldeigenschap	soort taak	niet-kritische taak	kritische taak
Bijwerkfrequentie		30 Hz	60 Hz
Opfrisfrequentie		50 - 60 Hz	70 - 80 Hz
Beeldvertraging	vliegen	150 ms	100 ms
	rijden	80 ms	40 ms
	varen	> 150 ms	100 - 150 ms
Anti-aliasing (subpixel grootte)		2 bgmin	0,5 bgmin
Achteruitkijkspiegels	rijden		20 - 35° h. 15° v.
Polygonen/kanaal per frame (50° h. 40° v.)	vliegen	100	8000
	rijden	250	1000
Maximale zichtbaarheids-afstand van objecten	vliegen	3 km	6 - 10 km
	rijden	300 m	3 km
	varen	1 km	50 km
Continu beschikbaar terrein	vliegen	100 km ²	250.000 km ²
	rijden	10 km ²	80-100 km ²
	varen	15 km ²	5.000 km ²
Niveaus van detail		5(?)	10 - 30

Beeldeigenschap	soort taak	niet-kritische taak	kritische taak
Textuur		op horizontale vlakken; modulatie kleur, helderheid; 64 * 64 texels; 5 patronen	op vlakken in alle oriëntaties; modulatie kleur, helderheid, transparantie; 512 * 512 texels; 50 patronen
Bewegende textuur		vooral bij varen	
Transparante polygonen		belangrijk voor niveau van detail, slagschaduw- wen, inkleuren van textuur, maken van grillige contouren	
Schaduw-effecten		flat shading	Gouraud shading
Meteorologische effecten			zicht tussen helder en minder dan 10 m; vertewaas
Tijd-van-de-dag effecten			schaduw- en lichten, verlichting door koplampen
Lichten (aant. lichtpunten/frame)	vliegen	1000	4000 waargenomen sterkte juiste functie van af- stand en kijkrichting
Aantal bewegende voertuigen	rijden	5	16
Bewegende onderdelen van stationaire of bewegende objecten	rijden		wielen
Animatie effecten			

Beeldeigenschap	soort taak	niet-kritische taak	kritische taak
(Electro-)optische hulpmiddelen	militair rijden varen	helderheidsversterkers; warmtebeelden achteruitkijkspiegels verrekijker	
Middelen om afstand te bepalen		laser-puls, line-of-sight ranging	
Voertuig-terrein interacties		4 - 8 controlepunten	
Botsingen met bewegende objecten (aantal voertuigen)	1		16; onderscheid lichte en zware botsingen
Afdekken van objecten		prioriteit toekennen, Z-buffer	A-buffer, R-buffer, subpixel Z-buffer
Overload management			automatisch
Line of sight ranging			
Modellerstation			
Vijand detectie			
Beïnvloeden gesimuleerde omgeving			

Song of the simulator - REPRISE

It's a Barnum and Bailey world,
 Just as phoney as it can be,
 But it wouldn't be make believe
 If you'd believe in me

Op. cit. Roscoe (1980)

13 SLOTBESCHOUWING

Uit de beschouwingen in dit rapport kan men afleiden dat, voor een simulator die valide moet zijn voor een groot aantal kritische taken, hoge eisen gesteld moeten worden aan het beeldsysteem. Men komt dan al spoedig uit bij het maximum van wat met de huidige techniek te verwezenlijken is.

Een probleem bij het vervaardigen van dit rapport was echter, dat het moeilijk was om de uitspraken van de literatuur op hun waarde te schatten. Dit komt den dele door de soms zeer matige wetenschappelijke kwaliteit van de artikelen. Soms lijkt het er op dat de bomen tot in de hemel groeien: beweringen over noodzakelijke voorzieningen aan beeldsystemen lijken soms meer te worden ingegeven door overwegingen van technische beschikbaarheid, dan door bewezen noodzaak voor opleiding of onderzoek.

Een fundamenteeler probleem is dat voor een bepaalde deeltaak, waarvoor bijvoorbeeld het schatten van afstand belangrijk is, vele soorten cues kunnen bijdragen aan de noodzakelijke informatie (par. 2.2 - Waarneming van diepte en beweging). Het is bijzonder moeilijk om algemeen geldige uitspraken te doen over de verschillende trade-offs die mogelijk zijn. In de inleiding werd reeds gewezen op de moeilijkheid van harde evaluatie van bepaalde beeldeigenschappen. In feite is er nog niet zoveel harde kennis over de noodzakelijke natuurgelouwigheid van (trainings)simulatoren bijgekomen sinds de uitspraak van AGARD (1980, op. cit.):

"Defining the perceptual cues needed to train is the area that has the biggest shortfall since there are hardly any generalizable data."

Voor simulatoren die gebruikt worden als opleidingsinstrument zullen overwegingen van kosten-effectiviteit niet spoedig tot grote beperkingen leiden in de toe te passen beeldsystemen. Immers, opleidingen in echte vliegtuigen, schepen of wapensystemen zijn meestal zeer duur. Toch is het daarbij van belang om, op langere termijn, inzicht te krijgen in de leeroverdracht die voor de verschillende deelmannoeuvres te behalen is, als functie van de kwaliteit van het beeldsysteem en de andere informatie systemen zoals geluid- en bewegingssysteem. Ook de acceptatie van het leermiddel door instructeur en leerling zal daarbij een zekere rol spelen.

Voor het IZF-TNO, als adviseur van de krijgsmacht, betekent dit dat de ervaring met simulatoren moet worden uitgebreid. Niet slechts door middel van onder-

zoek, maar ook door concrete bijstand en participatie in militaire simulatorprojecten.

Voor simulatoren in gebruik als onderzoeksinstrument, in ieder geval de simulatoren die op het IZF-TNO in gebruik zullen worden genomen, is het beschikbare budget beperkt. Ook al zijn de mogelijkheden van de minder dure computer-beeldsystemen de laatste jaren sterk toegenomen, het ligt niet voor de hand dat het binnen de mogelijkheid van het IZF zal gaan behoren om een "high end" simulator of beeldsysteem aan te schaffen.

Dit betekent dat het soort onderzoek op simulatoren dient te worden afgestemd op de beschikbare mogelijkheden. De onderhavige studie ondersteunt de stelling dat men bij het onderling aanpassen van onderzoek en simulatorvoorzieningen niet lichtvaardig te werk mag gaan. Alvorens een bepaald onderzoek uit te voeren op een simulator met een beperkte mate van natuurgetrouwheid, dient men expliciet na te gaan in hoeverre de afwijkingen van de werkelijkheid de validiteit van de conclusies uit het onderzoek zullen beperken.

Om hierin voldoende inzicht te krijgen is meta-onderzoek op simulatoren nodig: onderzoek gericht op de evaluatie van een simulator als onderzoeks- (of opleidings)instrument. Gegeven de hiervóór gesignaleerde moeilijkheid om harde uitspraken te doen over te stellen eisen aan simulatorbeelden, is op veel van de in dit rapport aangestipte gebieden onderzoek gewenst. Tot de belangrijkste onderzoekbare vragen met betrekking tot simulatorbeelden behoren ons inziens:

- Hoe kan de hoogte-illusie die optreedt bij het gebruik van gecollimeerde beelden voor rijdende voertuigen het meest effectief worden bestreden?
- Wat is de minimale kijkafstand tot geprojecteerde beelden, mede in relatie tot de gewenste viewing area en de toegestane beeldparallax?
- Wat is de meest effectieve presentatie van cues voor het schatten van snelheid en richting van zelfbeweging en van afstanden (o.a. i.v.m. veldgrootte, textuur, aard en plaatsing van objecten)?
- Wat is de toegestane vertraging van beeldveranderingen na stapvormige bedieningshandelingen en, mede in verband hiermee, wat is de toegestane bijwerkkrequentie?
- Hoe belangrijk is het ondersteunen van beeldinformatie door mechanische bewegingscues (door een bewegingsplatform, door een trillingssysteem, of door een zgn. G-seat), mede in verband met het bestrijden van simulatorziekte?

Korteling (1991) komt, naar aanleiding van literatuuroverzicht, tot een meer gedetailleerde uitwerking van onderzoeksvragen die betrekking hebben op de benodigde visuele informatie voor rijnsimulatoren, mede met het oog op gebruik van deze simulatoren als opleidingsinstrument. Verschillende van deze vragen corresponderen met hierboven genoemde.

Dit literatuuronderzoek heeft ook de overtuiging doen groeien dat het geven van advies over simulatoren, evenals als het doen van onderzoek met simulatoren, niet iets is wat men er "even bij" kan doen. De omvang van dit rapport illustreert dat simulatorkunde alleen al met betrekking tot het beeldsysteem een apart vak

is, waarin een veelheid van technische en wetenschappelijke kennis is verwerkt. In dit verband diene weer een citaat uit AGARD (1980):

".... research on defining the perceptual cues needed will be expensive and time consuming."

Daarbij zal het een grote technische en organisatorische inspanning vergen om doeltreffende simulatoren samen te stellen uit de verschillende subsystemen die in de Inleiding zijn genoemd: dynamisch voertuigmodel; beeldsysteem (inclusief het meestal bewerkelijke terreinmodel); bewegingsplatform (inclusief een adequate aansturing); geluidssysteem; en bestuurderscabine (inclusief aanwijsinstrumenten en krachten van besturingsorganen).

REFERENCES

- AGARD (1980). Fidelity of simulation for pilot training. NATO, AGARD-AR-159.
- AGARD (1981). Characteristics of flight simulator visual systems. NATO AGARD-AR-164.
- AGARD (1987). Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness. AGARD Conference Proceedings no. 433, Neuilly s. Seine.
- Allen, R.W., O'Hanlon, J.F., McRuer, D.T. et. al. (1977). Driver's visibility requirements for roadway delineation. Vol. 1: Effects of contrast and configuration on driver performance and behaviour. FHWA-report FHWA-RD-77-165. STI Hawthorne CA.
- Allen, R.W. & Jex, H.R. (1981). Driving simulation - Requirements mechanization and application. SAE Paper 800448; also SAE Trans. Vol. 89, 1981, 1769-1780.
- Ashkenas, I.L. (1986). Collected flight and simulation comparisons and considerations. AGARD, Flight Simulation, 1986.
- Atherton, P.R. & Caporael, L.R. (1985). A subjective judgement study of polygon based curved surface imagery. Human factors in computing systems. Conference Proceedings, 1985, p. 27-34.
- Baarspul, M. (1990). Review of flight simulation techniques. Progress in aerospace sciences, 27(1), 1-120.
- Bailey, R.E., Knotts, L.E., Horowitz, S.J. & Malone, H.L. (1987). Effects of time delay on manual control and flying qualities during in-flight and ground based simulation. Proceedings AIAA Flight Simulation Conference.
- BARCO (1988). Cursusboek voor gebruikers van BARCO video-projectoren. Giesbeek: INTER Video Communicaties.
- Bess, R.D. (1989). Tradeoffs in the configuration of computer image generation systems. I/ITSC Conference Proceedings, 478-485.
- Bles, W., Korteling, J.E., Marcus, J.T., Riemersma, J.B.J. en Theeuwes, J. (1991). Bewegingsperceptie in moving-base simulatoren. Rapport IZF 1991 A-17, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Boer, J.P.A. (1990). Een stappenplan voor de aanschaf van simulatoren. Concept-rapport, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Boff, K.R., Kaufman, L. & Thomas, J.P. (eds.) (1986). Handbook of perception and human performance, Vol. 1: Sensory processes and perception, Wiley, New York.
- Boff, K.R. & Lincoln, J.E. (eds.) (1988). Engineering data compendium: Human perception and performance. Wright-Patterson Air Force Base, OH.: Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory.
- Booth, K.S., Bryden, M.P., Cowan, W.B., Morgan, M.F. & Plante, B.L. (1987). On the parameters of human visual performance, an investigation of the benefits of antialiasing. Human Factors in Computing Systems IV.
- Braddick, O. (1974). A short-range process in apparent motion. Vision Res., 14, 519-527.

- Breda, L. v., Donselaar, H. v. en Schuffel, H. (1983). Voorstudie ten behoeve van een navigatiebrug der 90-er jaren. Rapport 4769 6.4/R52, Maritiem Research Instituut Nederland, Rotterdam.
- Brown, J.L. (1976). Visual elements in flight simulation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 47(9), 913-924.
- Brune, G. & Metze, W. (1990). Simulation of distance-dependent functions in visual systems for training simulators using the Z-buffer technique. *Proceedings Industry Training Equipment Conference*, 36-39.
- Bunker, M.W. (1978). Training effectiveness versus simulation realism. *SPIE Vol. 162 Visual simulation and image realism*, 76-82.
- Cardullo, F.M. & Brown, Y.J. (1985). Visual systems lags: the problems, the cause, the cure. *Proceedings Image V Conference*, Monroe, E.G. (Ed.), June 1990, 31-42.
- Carpenter, L. (1984). The A-buffer, an antialiased hidden surface method. *Computer Graphics*, 18(3), 103-108.
- Casali, J.G. & Frank, L.H. (1986). Perceptual distortion and its consequences in vehicular simulation: basic theory and incidence of simulator sickness. *Transportation Research Record* 1059.
- Cavanagh, P. & Leclerc, Y.G. (1989). Shape from shadows. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 3-27.
- Chappelow, J.W. & Smart, J.A. (1982). Putting texture in perspective. In: *Flight Simulation - Avionics and Aeromedical Aspects*. The Royal Aeronautical Society, London.
- Clapp, R.E. (1985a). Problems of the visual display in flight simulation. *SPIE Vol. 549, Image Quality: An Overview*, 64-70.
- Clapp, R.E. (1985b). The rastered eye; vision in television. *SPIE Vol. 526, Advances in display technology V*, 36-42.
- Collyer, S.C., Ricard, G.L., Anderson, M., Westra, D.P. & Perry, R.A. (1980). Field of view requirements for carrier landing training (AFHRL-TR-80-10, AD-A087 012). Williams AFB, AZ.: Operations Training Division, Air Force Human Resources Laboratory.
- Costenbader, J.L. (1984). CIG data bases in an instance: bits and pieces. In: E.G. Monroe (Ed.) *Proceedings IMAGE III Conference*, 152-163.
- Dixon, K.W., Martin, E.L., Rojas, V.A. & Hubbard, D.C. (1988). The effects of field-of-view on pilot performance in the C-130 WST. In: *Proceedings Interservice/Industry Training Systems Conference*, 362-369.
- Dixon, K.W., Martin, E.L. & Krueger, G.M. (1989). The effect of stationary and head-driven field-of-view sizes on pop-up weapons delivery. In: *Proceedings Interservice/Industry Training Systems Conference*, 137-140.
- Dörfel, G. (1976). The influence of visual experience and degree of stylization on height and distance judgements in aircraft approach scenes. In: *AGARD CP-198 Flight simulation*.
- Drosdol, J., Panik, F. (1985). The Daimler-Benz riving simulator: a tool for vehicle development. SAE paper 850334. International Congress & Exposition, Detroit, MI.

- Eriksson, E.S. (1973). Movement parallax during locomotion. *Perception and Psychophysics*, 16, 197-200.
- Federal Aviation Administration (FAA), (1980). Advisory circular: aircraft simulator and visual system evaluation and approval. Washington, D.C.: Department of transportation.
- FAAC (1989). White paper on truck driving simulator trade studies. FAAC report no. FR4158U/4823-022. FAAC Inc., Ann Arbor, MI.
- Farrell, R.E. & Booth, J.M. (1975). Design handbook for imagery interpretation equipment. Boeing Aerospace Company, December, 1975.
- Fischetti, M.A. & Truxal, C. (1985). Simulating "The right stuff". *IEEE Spectrum*, 38-47.
- Foley, J.D. (1987). Interfaces for advanced computing. *Scientific American* 257(4), 82-90.
- Fox, T.A. & Clark, P.D. (1986). Development of computer-generated imagery for a low-cost real-time terrain imaging system. Proc. IEEE on Aerospace and Electronics Confer. (cat. nr. 86CH2307-7), MACON, Dayton, Ohio.
- Frank, L.H., Casali, J.G. & Wierwille, W.W. (1988). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors* 30(2), 201-271.
- Gardiner, D.H. & Hadfield, S.O. (1990). Low cost visual systems challenges. In: E.G. Monroe (Ed.) *Proceedings IMAGE V Conference*, 321-328.
- Geltmacher, H.E. (1988). Recent advances in computer image generation simulation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Gibson, J.J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gilson, R.D., Myler, H.R. & Gibbons, S.C. (1990). Taxonomic transformations of visual media selections into display specifications. In: E.G. Monroe (Ed.) *Proceedings IMAGE V Conference*, 23-29.
- Godthelp, J. en Tenkink, E. (1990). Zichtcriteria voor wegen en informatiedragers langs de weg. Rapport IZF 1990 C-10, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Gogel, W.C. & Tietz, J.D. (1974) The effect of perceived distance on perceived movement. *Perception and Psychophysics*, 16, 70-78.
- Gold, R.S. (1990). Color projection displays. In: *Colour in electronic displays*, NATO Defence Research Group, Technical Report AC/243 (panel 8)/TR/5.
- Graham, C.H. (Ed.) (1965). *Vision and visual perception*. New York: Wiley.
- Green, M. & Grayston, L. (1989). Displays for NVG flight simulation. In: *Proceedings Interservice/Industry Training Systems Conference*, 289-291.
- Grind, W.A. v.d., Doorn, A.J. v. en Koenderink, J.J. (1983). Detection of coherent movement in periphally viewed random-dot patterns. *J.Opt.Soc.Am.*, 73, 1674-1682.
- Haber, R.N. (1986). Flight simulation. *Scientific American*, July, 90-97.
- Harrington, T.L., Harrington, M.K., Quon, D., Atkinson, R., Cairns, R. & Kline, K. (1985). Perception of orientation of motion as affected by change in divergence of texture, change in size and in velocity. *Perceptual and Motor Skills*, 61, 875-886.

- Haug, E.J. et al. (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.
- Hochberg, J. (1971). Perception II, Space and movement. In: Kling, J.W. and Riggs, L.A. (eds.), *Experimental Psychology* (3rd ed.), 475-550. Holt, Rinehart & Winston, New York.
- Holt, D.J. (1985) Simulators: How real does the visual system need to be? *Aerospace Engineering*, September, 16-22.
- Hsu, S.C. (1986). The Kell Factor: past and present. *SMPTE Journal*, February, 206-214.
- Iavecchia, J.H., Iavecchia, H.P. and Roscoe, S.N. (1988). Eye accommodation to head-up virtual images. *Hum. Fact.* 30, 689-702.
- Jarvis, K.M. (1990). Photomap texture for the medium cost/performance visual system. In: *Industry Training Equipment Conference*, 24-28.
- Jennings, J.A.M. & Charman, W.N. (1981). Off-axis image quality in the human eye. *Vision Res.*, 21, 445-456.
- Johnson, W.W., Tsang, P.S., Bennett, C.T. and Phatak, A.V. (1989). The visually guided control of simulated altitude. *Aviat.Space.Env. Med.*, Febr. 1989, 152-156.
- Käppler, W.-D. (1986). Using a driving simulator to investigate vehicle handling properties. In H.P. Willumeit (Ed.), *Human Decision Making and Manual Control*. Elsevier Science Publishers BV.
- Kellogg, R.S., Kennedy, R.S. & Woodruff, R.R. (1983). Comparison of colour and black-and-white visual displays as indicated by bombing performance in the 2B35 TA-4J flight simulator. *Displays*, April, 106-107.
- Kellogg, R.S. & Gillingham, K.K. (1986). United States Air Force experience with simulator sickness, research and training. In: *Proceedings of the Human Factors Society, 30th Annual Meeting*, 427-429.
- Kellogg, R.S. & Miller, M. (1984). Visual perceptual aspects of low level, high speed flight and flight simulation. In: E.G. Monroe (Ed.) *Proceedings IMAGE III Conference*, 22-36.
- Kennedy, R.S., Berbaum, K.S., Collyer, S. May, J.G. & Dunlap, W.P. (1988). Spatial requirements for visual simulation of aircraft at real-world distances. *Human Factors*, 30(2), 153-161.
- Kennedy, R.S., Lilienthal, M.G., Berbaum, K.S., Baltzley, D.R. & McCauley, M.E. (1989). Simulator sickness in U.S. Navy flight simulators. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, January, 10-16.
- Kent, W.S. (1990). Visual simulation in the commercial airframe manufacturer's training environment. In: E.G. Monroe (Ed.) *Proceedings IMAGE V Conference*, 231-239.
- Kleiss, J.A., Curry, D.G. & Hubbard, D.C. (1988). Effect of three-dimensional object type and density in simulated low-level flight. In: *Proceedings of the Human Factors Society, 32th Annual Meeting*, 1299-1303.

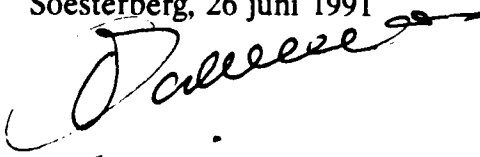
- Korteling, J.E. (1990). Proposal for a new performance evaluation and feedback system for the Leopard 2 driving simulator. Rapport IZF 1990 A-40, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Korteling, J.E. (1991). Visuele informatie in rijssimulatoren; literatuurstudie en onderzoeksvoorstel. Rapport IZF 1991 B-5, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Korteling, J.E. & Padmos, P. (1990). De Leopard 2 rijssimulator als leerhulpmiddel. Rapport IZF 1990 A-3, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Korteling, J.E. en Randwijk, M.J. van (1991). Simulatoren en verkeersoefenterreinen in de militaire rijopleiding; literatuurstudie en advies. Rapport IZF 1991 A-11, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Kraft, C.L., Anderson, C.D. & Elworth, C.L. (1982). Peripheral cues and color in visual simulation. Proceedings of the Human Factors Society, 26th Annual Meeting, 906-910.
- Kruk, R., Regan, D., Beverley, K.I. & Longridge, T. (1983). Flying performance on the advanced simulator for pilot training and laboratory tests of vision. *Human Factors*, 25(4), 457-466.
- Kruk, R. & Regan, D. (1983). Visual test results compared with flying performance in telemetry-tracked aircraft. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 54, 906-911.
- Larish, J.F. & Flach, J.M. (1990). Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *J. of Exp. Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 295-302.
- Lee, D.N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time to collision. *Perception*, 15, 437-459.
- Leibowitz, H.W. & Post, R.B. (1982) The two modes of processing concept and some implications. In: J. Beck (Ed.), *Organization and representation in perception*. New Jersey: Erlbaum.
- Lintern, G.D.C., Wightman, D.C. & Westra, D.P. (1984). An overview of the research program at the visual technology research simulator. Naval Training Equipment Center, Orlando, Florida. In: E.G. Monroe (Ed.), *Proceedings IMAGE III Conference*, 206-221.
- Lintern, G.D.C., Thomley-Yates, K.E., Nelson, B.E. & Roscoe, S.N. (1987). Content, variety, and augmentation of simulated visual scenes for teaching air-to-ground attack. *Human Factors*, 29(1), 45-59.
- Longridge, T., Thomas, M., Fernie, A., Williams, T. & Wetzel, P. (1989). Design of an eye-slaved area of interest system for the simulator complexity testbed. In: *Proceedings Interservice/Industry Training Systems Conference*.
- Magnenat-Thalmann, N. & Thalmann, D. (1987). *Image synthesis. Theory and practice*. Berlin: Springer Verlag.
- McRuer, D.T. & Klein, R.H. (1976). Comparison of human driver dynamics in an automobile on the road with those in simulators having complex and simple visual displays. Paper 173A presented at the 55th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.

- Meehan, J.W. & Triggs, T.J. (1988). Magnification effects with imaging displays depend on scene content and viewing condition. *Human Factors* 30(4), 487-494.
- Meeteren, A. v. (1990). Characterization of task performance with viewing instruments. *J. Opt. Soc. Amer. A/Vol. 7*, 2016-2023.
- Military Standard (1970). Aircrew station vision, requirements for military aircraft. MIL-STD-850B, Dept. of Defence, Washington DC.
- Miller, H.R., Allen, R.W. & Stein, A.C. (1983). Driver factors, simulators and other instrumented measurement approaches. In: *Proceedings of the International Congress and Exposition. SEA Technical Paper 830563*.
- Nes, F.L. van & Bouman M.A. (1967). Spatial modulation transfer in the human eye. *J. of Opt. Soc. Am.*, 57, 401-406.
- NHO (1969). List of Lights. Netherlands' Hydrographic Office, 's-Gravenhage.
- Norren, D. van (1981). Informatiedragers langs de weg: een overzicht van zichtbaarheidsproblemen. Rapport IZF 1981 C-25. Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Norren, D. van, Schuffel, H, Riemersma, J.B.J. en Boer, L.C. (1986). Naar een nieuwe buitenbeeldsimulator: de wetenschappelijke vraagstellingen. Rapport IZF 1986 I-7, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Ogle, K.N. (1962). Spatial localization through binocular vision. In: Davson, H. (ed.), *The eye*, vol. 4, 271-324, Acad. Press, New York.
- Overington I. (1982). Towards a complete model of photopic visual threshold performance. *Opt. Eng.* 21, 1, 002-013.
- Padmos, P. (1989a). Visual modelling errors in the Leopard 2 driving simulator. Rapport 1989-6, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Padmos, P. (1989b). Bezoeken aan de Daimler-Benz rijnsimulator te Berlijn en de SUSAN scheepssimulator te Hamburg. Reisverslag. Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Pirenne, M.H. (1948). *Vision and the eye*. London: Chapman & Hall.
- Proffitt, D.R. & Kaiser, M.K. (1986). The use of computer graphics animation in motion perception research. *Behavioral Research Methods, Instruments & Computers* 18(6), 487-492.
- Regan, D. & Beverley, K.I. (1978). Looming detectors in the human visual pathway. *Vision Research*, 18, 415-421.
- Regan, D. & Beverley, K.I. (1983). Visual fields for frontal plane motion and for changing size. *Vision Research*, 23, 673-676.
- Regan, D.M., Kaufman, L., Lincoln, J. (1986). Motion in depth and visual acceleration. In: Boff, K.R., Kaufman, L. & Thomas, J.P. (eds.), *Handbook of perception and human performance*, Vol. 1, Wiley, New York.
- Riccio, G.E., Cress, J.D. & Johnson, W.V. (1987). The effects of simulator delays on the aquisition of flight control skills: control of heading and altitude. *Proceedings of the Human Factor Society, 31 Annual Meeting*, 1286-1290.
- Rich, H.H. (1989). Tradeoffs in creating a low-cost visual simulator. In: *Proceedings Interservice/Industry Training Systems Conference*, 214-223.
- Riemersma, J.B.J. (1987). Visual cues in straight road driving. Proefschrift, Rijksuniversiteit Groningen.

- Rogers, B. & Graham, M. (1979). Motion parallax as an independent for depth perception. *Perception* 8, 125-13
- 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. (1980). *Aviation Psychology*. Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa.
- Roscoe, S.N. (1989). The eyes prefer real images. Ch. 10 in Jensen, R.S. (ed.), *Aviation Psychology*, 231-239. Gower Technical, Aldershot, USA.
- Rowley, T.W. (1986). Flight simulator visual systems. *International Conference on Simulators*, 26-30.
- Salvatore, S. (1968). The estimation of vehicular velocity as a function of visual stimulation. *Human Factors*, 10(1), 27-32.
- Salvendy, G. (Ed.) (1987). *Handbooks of human factors*. New York: Wiley.
- Schuffel, H. (1984). The interaction of rate of movement presentation with ship's controllability. *Proc. 3rd Int. Conf. on Marine Simulation*, 151-159. Marin, Rotterdam.
- Schuffel, H. (1986). Human control of ships in tracking tasks. *Dissertatie Katholieke Universiteit Noord-Brabant, Tilburg*.
- SEOS (1990). *Projection display system*. SEOS Displays Ltd. Burgess Hill, West Sussex.
- Sieverding, M.J. (1984). Simulating speed and height cues in the C-130 weapon system trainer. In: E.G. Monroe (Ed.), *Proceedings IMAGE III Conference*, 70-77.
- Simpson, M. & Wilson, I. (1990). Can't see the ground for the cues!. In: *Industry Training Equipment Conference*, 7-13.
- Snyder, H.L. (1988). Image Quality. In: Helander, M. (Ed.), *Handbook of human-computer interaction*. Elsevier Science Publishers B.V..
- Sperling, G. (1976). Movement perception in computer-driven visual displays. *Behavior Research methods & Instrumentation*, 8(2), 144-151.
- Sproson, W.N. (1983). *Colour science in television and display systems*. Bristol: Adam Hilger Ltd.
- Star Technoloy (1990). *Graphicon 2000 - Technical overview*.
- Szabo, N.S. (1978). Digital image anomalies: static and dynamic. *SPIE Vol. 162, Visual simulation & Image Realism*, 11-15.
- Tenkink, E. (1989). *Rijden met beperkt uitzicht: een literatuurstudie*. Rapport IZF 1989-61, TNO Instituut voor Zintuigfysiologie, Soesterberg.
- Todd L.T. (1988). Projection displays for flight simulators. In: *RAE: Flight simulation*, 164-176.
- Tong, H.M. (1990). An eye-slaved visual system for tactical combat training - the Harrier GR MK5 simulator. In: E.G. Monroe (Ed.), *Proceedings IMAGE V Conference*, 71-78.
- Waldram, J.M. (1985). The roving eye: dynamic perspective. *Lightning Research and Technology* 17(4), 153-161.

- Walraven, J. (1980). Evaluation of spatial task performance with the Oldelft PC1MC nightvision goggle. Rapport IZF 1980 C-5, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Walraven, J. & Blokland, N.H. (1980). Leesbaarheidproblemen bij de NS: het dienstkaartje van de treinmachinist en het spoorboekje. Rapport IZF 1980 C-26. Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Warren, R. & Riccio, G.E. (1985). Visual cue dominance hierarchies: implications for simulator design. In: Fight simulation/simulators. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.
- Warren R. & Wertheim, A.H. (Eds.) (1990). Perception and control of self-motion. New: Jersey: Erlbaum.
- Welch, B.L. (1982). Characteristics of flight simulator visual systems. In: Flight simulation - visual and aeromedical aspects; Proceedings of the International Conference. London: Royal Aeronautical Society.
- Westerink, J.H.D.M. en Roufs, J.A.J. (1988). A local basis for perceptually relevant resolution measures. SID 88 Digest, 360-363.
- Wezel, R. v. (1977). Video handboek. Muiderkring, Bussum.
- Wickens, C.D., Todd, S. & Seidler, K. (1989). Three-dimensional displays: perception, implementation, applications. Crew System Ergonomics Information Analysis Center: State-of-the-Art report-89-01.
- Wolpert, L. (1990) Field-of-view information for self-motion perception. In: R. Warren & A.H. Wertheim (Eds.) Perception & control of self-motion. New: Jersey: Erlbaum.
- Wolpert, L., Owen, D.H. & Warren, R. (1983). The isolation of optical information and its metrics for the detection of descent. In: D.H. Owen (Ed.), Optical flow and texture variables useful in simulating self-motion (II) (Final Tech. Report) Columbus: Ohio State University, Department of Psychology.
- Wyckoff, B.H. (1989). Managing cost/performance tradeoffs for successful visual training. In: Interservice/Industry Training Systems Conference, 471-477.
- Wylie, F.J. (1976). The use of radar at sea. The Institute of Navigation, London.
- Wyszecki, G. & Stiles, W.S. (1982) Color science. New York: Wiley.
- Yan, J.K. (1985). Advances in computer-generated imagery for flight simulation. IEEE Computer graphics & Applications, 5(8), 37-51.
- Zee, E. van der & Boesten, M.H.W.A. (1980). The influence of luminance and size on the image quality of complex scenes. IPO Annual progress report 1, 69-75.

Soesterberg, 26 juni 1991



Dr. P. Padmos

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD 91-2164	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER IZF 1991 B-6
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 731.2	5. CONTRACT NUMBER B91-13	6. REPORT DATE June 26, 1991
7. NUMBER OF PAGES 102	8. NUMBER OF REFERENCES 142	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Requirements for outside-world images of vehicle simulators; a literature survey		
11. AUTHOR(S) M.V. Milders and P. Padmos		
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) TNO Defence Research Schoemakerstraat 97 2628 VK Delft		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) In the following, the term vehicle simulator includes flight, driving, and ship simulators, in use for training or research. In order to transfer knowledge, acquired on a vehicle simulator, to the control of a real vehicle, the quality of simulation of images from the outside world has to meet certain criteria. Perfectly imitating the real world is not required in general. In this report, the requirements to be made to the images shown in vehicle simulators are founded as well as possible, taking into account the type of simulated vehicle and the tasks to be performed in the simulator. The literature consulted deals with the properties of the human visual system and with the visual information used by vehicle operators. Incorporated are studies of performance or (quasi-)transfer of training, in relation to image properties. A large number of image features is treated per chapter. In addition to physical properties, related primarily to image presentation, attention has been paid to image content. Attempts were made to formulate explicit conclusions, per feature and task type, on the required level of reproduction, taking into account the desired validity of simulation. Many of the features treated apply exclusively to Computer Generated Images (CGI); some apply also to video-modelboard image systems. For some features there was a paucity of information, therefore these features had to be treated incompletely. The report culminates into a tabulated summary of quality requirements, separating out critical and non-critical tasks. In a closing regard, the difficulty to speak in general terms on image properties required for training and research is indicated. Suggestions for further research are given. It is stressed that working with simulators demands a large investment in expertise, technique, and organization.		
16. DESCRIPTORS Simulators Vehicles Flying Driving Displays Training		IDENTIFIERS Sailing Image Computer Generated Image (CGI)
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

VERZENDLIJST

1. Hoofddirecteur van TNO-Defensieonderzoek
2. Directie Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling Defensie
3. {
Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
- 4, 5. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KLu
Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
6. {
Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
- 7, 8, 9. Hoofd van het Wetensch. en Techn. Doc.- en Inform.
Centrum voor de Krijgsmacht
10. Ing. P.J. de Haas, DMKL/OMAT
11. Maj. J. v.d. Brug, COKL
12. Dr. J. Krol, COKL
13. OW1 Th.I.M. v.d. Wetering, OCC/RTS/RIET
14. Adj. J. van Vugt, PIROC
15. J. Rogge, KMA, Afd. Technische Studies, Breda
16. Ir. P.L.J. van Lieshout, FEL

Extra exemplaren van dit rapport kunnen worden aan-
gevraagd door tussenkomst van de HWOs of de DWOO.
