

TNO-rapport
TNO-TM 1995 A-56

titel
**Visuele informatie in rijsimulatoren:
koershouden op een rechte weg**

TNO Technische Menskunde

Archief VH 10

Kampweg 5
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg

Telefoon 03463 56211
Fax 03463 53977

auteurs
**B. Kappé
J.E. Korteling**

datum
10 oktober 1995

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

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

aantal pagina's : 44 (incl. bijlagen,
excl. distributielijst)

© 1995 TNO

titel : Visuele informatie in rijssimulatoren: koershouden op een rechte weg
auteurs : Drs. B. Kappé en dr. J.E. Korteling
datum : 10 oktober 1995
opdrachtnr. : A92/KL/307
IWP-nr. : 788.1
rapportnr. : TNO-TM 1995 A-56

Bij de KL bestaat een toenemende behoefte aan advies met betrekking tot de vraag welke visuele informatie in een rijssimulator dient te worden aangeboden om de perceptief-motorische onderdelen van de rijtaak goed te kunnen vervullen. Met deze kennis is men in staat alleen de noodzakelijke beeldinformatie aan te bieden, waardoor op de kosten van het computer gegenereerde beeld (CGI) kan worden bespaard. Zo wordt het CGI efficiënt gebruikt, en kan effectief worden getraind. Hiervoor wordt in opdracht van het COKL het project 'Visuele informatie in voertuig simulatoren' uitgevoerd. In dit kader is een exploratieve studie verricht naar de visuele informatie die bestuurders gebruiken bij het sturen op een rechte weg. Hierbij is aansluiting gezocht bij de uit de literatuur bekende gegevens over de visuele perceptie van zelfbeweging. Dit betekent dat het voertuiggedrag niet wordt beschreven in termen van "yaw rate" en "heading" maar in termen als "laterale positie", "laterale snelheid" en "rotatiesnelheid". De centrale vraag in deze studie is welke visuele informatie bestuurders gebruiken om deze voertuigparameters in het simulatorbeeld waar te nemen.

Het rapport bestaat uit drie delen. Ten eerste een studie naar de wijze waarop de bestuurder de statische (positie en oriëntatie) en dynamische (translatie en rotatie) toestand van het voertuig ten opzichte van de (rechte) weg in het simulatorbeeld kan waarnemen. Ten tweede werd aan de hand van een literatuurstudie onderzocht welke visuele informatie een bestuurder ook daadwerkelijk gebruikt bij het besturen van zijn voertuig. Hierbij blijven een aantal vragen open, die in een experiment zijn onderzocht.

In het experiment werd de visuele informatie over de laterale positie, laterale translatie en rotatie van het voertuig gemanipuleerd, voor zowel ervaren als onervaren bestuurders. De manipulaties bestonden uit het wegnemen van een gedeelte van de wegbelijning, het onderbreken daarvan, en het aanbrengen van objecten in de omgeving. Bovendien is gekeken naar effecten van een fixatiepunt op het kruispunt van weg en horizon, teneinde de onervaren bestuurders een "ervaren" kijkstrategie op te leggen.

Uit de resultaten blijkt dat de bestuurders de translatie richting (i.e. de koers) van het voertuig vooral regelen aan de hand van de bewegingsparallax als gevolg van een laterale translatie. Normaliter is deze bewegingsparallax moeilijk waarneembaar, omdat het voertuig een grote voorwaartse translatiesnelheid heeft, waardoor alle elementen in het visuele veld expanderen. Echter, in de wegbelijning is de expansie afwezig: als exact evenwijdig aan de weg wordt gereden staan deze lijnen stil in het visuele veld. Dit betekent dat in wegbelijning de bewegingsparallax als gevolg van een laterale translatie zeer goed zichtbaar is, en dat de translatie richting van het voertuig met een grote nauwkeurigheid kan worden waargenomen.

Naast de effecten van wegbelijning op het waarnemen van de translatie richting, bleek ook de aanwezigheid van objecten ver voor het voertuig de controle van de translatie richting te vergemakkelijken. Dit komt doordat de visuele effecten van een voorwaartse translatie (i.e. expansie) kwadratisch afnemen met de afstand, maar de effecten van een laterale translatie (i.e. bewegingsparallax) lineair. Hierdoor zal ver voor het voertuig de bewegingsparallax groter zijn dan de expansie.

De visuele effecten van een rotatie van het voertuig lijken niet door de bestuurders te worden gebruikt bij het sturen op een rechte weg. Als rotatie van het voertuig wordt gecompenseerd door het maken van een oogrotatie in tegenovergestelde richting (zoals bij het fixeren op het kruispunt van weg en horizon) is de bestuurder beter in staat zijn voertuig te besturen. Normaal gesproken worden compensatoire oogrotaties (op basis van visuele informatie tot 1 Hz rotatiefrequentie) ondersteund door vestibulaire reflexen (vanaf 1 Hz). In een fixed base rijssimulator is de afwezigheid van de vestibulaire informatie merkbaar doordat de bestuurders beter presteren als zij actief fixeren.

Onervaren bestuurders blijken, vergeleken met de ervaren bestuurders, relatief minder goed in staat hun laterale positie en laterale snelheid in het nabij gelegen deel van de wegbelijning waar te nemen. Er worden een aantal alternatieven voor visuele omgevingen genoemd waarmee onervaren bestuurders specifiek kunnen worden getraind in het gebruik van de informatie in het nabij gelegen gedeelte van de omgeving.

INHOUD	Blz.
SAMENVATTING	5
SUMMARY	6
1 INLEIDING	7
1.1 Voertuiggedrag	7
1.2 Visuele waarneming	8
1.2.1 Statische waarnemer	8
1.2.2 Dynamische waarnemer	9
1.3 De perceptie van optic flow	14
1.4 Het gebruik van optic flow	15
1.5 Vraagstelling	17
2 METHODEN EN TECHNIKEN	18
2.1 Proefpersonen	18
2.2 Apparatuur	18
2.3 Design	19
2.4 Taak	25
2.5 Procedure	25
2.6 Verzamelen en bewerken van de data	25
3 RESULTATEN	26
3.1 Belijning	26
3.2 Objecten	28
3.3 Fixatie	30
3.4 Stippellijnen	32
3.5 Hogere-orde interacties	32
4 DISCUSSIE	36
4.1 Effecten van verschillende soorten wegbelijning	36
4.1.1 Laterale positie	36
4.1.2 Laterale snelheid	37
4.1.3 Rotatiesnelheid	37
4.1.4 Samenvatting van de belijningseffecten	38
4.2 Rotaties	38
4.2.1 Visuele informatie	38
4.2.2 Vestibulaire informatie	39
4.3 Ervaring en het gebruik van visuele informatie	40
5 CONCLUSIE	42
6 AANBEVELINGEN	42
REFERENTIES	44

Rapport nr.: TNO-TM 1995 A-56

Titel: Visuele informatie in rijsimulatoren: koershouden op een rechte weg

Auteurs: Drs. B. Kappé en dr. J.E. Korteling

Instituut: TNO Technische Menskunde
Afd: Vaardigheden

Datum: oktober 1995

DO Opdrachtnummer: A92/KL/307

Nummer in MLTP: 788.1

SAMENVATTING

Bij de KL bestaat een toenemende behoefte aan advies met betrekking tot de vraag welke visuele informatie in een rijsimulator dient te worden aangeboden om de perceptief-motorische onderdelen van de rijtaak goed te kunnen vervullen. In dat kader wordt, in opdracht van het COKL, een onderzoek verricht naar de minimaal benodigde visuele informatie voor het besturen van voertuigen (project 'Visuele informatie in voertuigsimulatoren'). Het onderzoek is erop gericht op de kosten van computer-gegenereerde beelden te besparen, doordat alleen de noodzakelijke visuele informatie wordt aangeboden. In de onderhavige exploratieve studie is gekeken naar de visuele informatie die de bestuurder nodig heeft voor het sturen op een rechte weg.

Als eerste is in kaart gebracht op welke wijze de bestuurder de statische (positie en oriëntatie) en dynamische (translatie en rotatie) toestand van het voertuig op de weg in het simulatorbeeld kan waarnemen. Vervolgens werd onderzocht hoe het rijgedrag van ervaren en onervaren bestuurders verandert als de informatie over de laterale positie, laterale translatie en rotatie van het voertuig ten opzichte van de weg wordt gemanipuleerd. De manipulaties bestonden uit het wegnemen van een gedeelte van de wegbelijning, het onderbreken daarvan, en het aanbrengen van een groot aantal objecten in de omgeving. Bovendien is gekeken naar effecten van een fixatiepunt op het kruispunt van weg en horizon, teneinde de onervaren bestuurders een 'ervaren' kijkstrategie op te leggen.

Uit de resultaten blijkt dat de bestuurders vooral de bewegingsparallax als gevolg van een laterale translatie gebruiken bij het sturen op een rechte weg. Ook blijkt dat de visuele effecten van een voertuigrotatie niet worden gebruikt. Bestuurders kunnen een rotatie van het voertuig compenseren door middel van een oogrotatie in tegenovergestelde richting. Als bestuurders deze techniek wordt opgelegd door het aanbrengen van een fixatiepunt wordt hun stuurprestatie verbeterd. Dit geldt vooral voor onervaren bestuurders. In een echte auto worden voertuigrotaties ook door het vestibulaire systeem waargenomen, waarmee de compensatoire oogbewegingen reflexmatig worden gegenereerd. In een fixed-base rijsimulator is de afwezigheid van vestibulaire informatie merkbaar, maar worden door actief fixeren op het fixatiepunt de compensatoire oogbewegingen toch gemaakt.

Onervaren bestuurders blijken, vergeleken met de ervaren bestuurders, relatief minder goed in staat hun laterale positie en snelheid in het nabij gelegen deel van de wegbelijning waar te nemen. Er worden een aantal mogelijke visuele omgevingen genoemd waarmee onervaren bestuurders specifiek kunnen worden getraind in het gebruik van de informatie in het nabij gelegen gedeelte van de omgeving.

Visual information in vehicle simulators: lateral control on a straight road**B. Kappé and J.E. Korteling****SUMMARY**

The Royal Netherlands Army has an increasing need for advice concerning the visual information needed by a driver in a driving simulator in order to perform perceptual-motor parts of the driving task. This knowledge can be used to formulate the CGI-requirements in such a way that the cost-benefit ratio can be improved. In this connection the research project 'Visual information in vehicle simulators' is carried out. The current explorative study investigates the visual information the driver uses while driving on a straight road.

First, a theoretical analysis describes the driver's perception of the static (position, orientation) and dynamic (translation, rotation) state of his vehicle from the visual information in the simulator's CGI. Then, in an experiment the information on the lateral position, lateral translation and rotation of the vehicle was manipulated and the effect on the driving behaviour of experienced and inexperienced drivers was measured. The manipulations consisted of the partial removal of the edge lines, intermitting the edge lines, or the addition of a great number of objects in the environment. In order to force inexperienced drivers to employ an 'experienced' viewing strategy, the effect of a fixation mark on the road's vanishing point at the horizon was investigated. The results show that the visual information the drivers use to control their vehicle is motion parallax generated by lateral translations. The visual effects of the rotation of the vehicle are likely to be compensated by an eye rotation in the opposite direction. Inexperienced drivers can be forced to compensate the visual effects of a vehicle rotation by the fixation mark at the vanishing point of the road. In normal driving situations, vestibular information generates reflexive eye rotations that compensate for the vehicle rotations. In a fixed-base driving simulator the vestibular information on vehicle rotation is absent and no compensatory reflexes are generated. By active fixation on the vanishing point of the road the driver is able to reduce the lack of vestibular information in a fixed-base driving simulator.

Compared with experienced drivers, the inexperienced drivers are less able to perceive their lateral position and lateral speed in the proximal part of the edge lines. In order to improve the simulated environments by which inexperienced drivers can train in the use of this proximal information several possible visual environments are mentioned.

1 INLEIDING

Voertuigsimulatoren kunnen zowel voor trainings- als voor onderzoeksdoeleinden effectief worden toegepast wanneer gebruik van het operationele systeem duur, inefficiënt, milieu-belastend, gevaarlijk of praktisch gezien onmogelijk is. De visuele informatie wordt daarbij meestal door middel van een computer-gegenereerd beeld (computer generated image, CGI) aangeboden. CGI simulatoren zijn altijd beperkt in de hoeveelheid en kwaliteit van de beeldinformatie die kan worden aangeboden. Omdat voertuigsimulatoren duur zijn en omdat de kosten voor een zeer belangrijk deel door de omvang en kwaliteit van het beeldsysteem worden bepaald, bestaat er behoefte aan kennis omtrent de mogelijkheden om tegen lage kosten toch voldoende visuele informatie te kunnen aanbieden. Deze behoefte geldt vooral voor het simuleren van landvoertuigen waarbij de kosten/baten verhouding relatief ongunstig is.

In dit rapport wordt de visuele informatie over de bewegingen van het voertuig bestudeerd vanuit het perspectief van de bestuurder. Het idee is dat ervaren bestuurders specifieke visuele cues gebruiken bij het controleren van hun voertuig. Het lijkt zinnig dat leerling bestuurders in trainingssimulatoren juist déze cues gepresenteerd krijgen, zodat het leerproces vanzelf op de juiste (of meest informatieve) cues wordt gericht. Hierdoor wordt het leerproces geoptimaliseerd en worden de simulatorkosten zoveel mogelijk beperkt.

In de inleiding wordt allereerst het voertuiggedrag beschreven in termen van positie, orientatie, translatie en rotatie. Daarna is gekeken naar de visuele informatie aan de hand waarvan het voertuiggedrag in theorie kan worden waargenomen. Vervolgens worden een aantal experimenten besproken waarin is gekeken naar de visuele informatie die ervaren en onervaren bestuurders gebruikten bij het besturen van het voertuig.

1.1 Voertuiggedrag

De momentane toestand van een voertuig kan worden opgesplitst in een *statische* en een *dynamische* component. Beide componenten kunnen worden beschreven door middel van drie-dimensionale vectoren.

De statische component bestaat uit de *positie* en *oriëntatie* van het voertuig. De positie van het voertuig wordt beschreven door een 3D positievector; de oriëntatie wordt beschreven door een 3D oriëntatievector. De positie en oriëntatie van het voertuig worden gerelateerd aan de weg. Op een rechte weg is de laterale positie gerelateerd aan de weg-as, de longitudinale positie aan het vertrekpunt. De hoogte van het voertuig boven de weg beschouwen we als constant. Bij de beschrijving van orientatie van het voertuig op een rechte, vlakke weg is alleen de orientatie ten opzichte van de verticale as van belang.

De dynamische component van het voertuiggedrag wordt beschreven door een combinatie van 3D *translatie*- en *rotatie*- vectoren. De translatie-vector kan in drie componenten worden opgesplitst. Een longitudinale component evenwijdig aan de weg-as, een laterale component loodrecht op de weg-as en een verticale component loodrecht op het wegvlak. De translatierichting van het voertuig (de koers) is de vectorsom van de longitudinale en laterale snelheid. De koers van het voertuig ten opzichte van de weg-as is gelijk aan de inverse

tangens van de laterale gedeeld door de longitudinale snelheid. Bij relatief kleine laterale snelheden is de translatie-richting lineair afhankelijk van de laterale snelheid. De verticale translatie wordt in deze analyse niet meegenomen aangezien we de verticale positie als constant beschouwen.

De rotatie-vector beschrijft de oriëntatieverandering van het voertuig. De rotatie-as loopt door het voertuig, waardoor tijdens een rotatie de positie van het voertuig niet verandert. Voor het koershouden op een rechte weg zijn alleen rotaties om de verticale as relevant.

In de praktijk zal de dynamische toestand van het voertuig door een combinatie van translatie- en rotatie-vectoren worden beschreven. Het is de taak van de bestuurder de statische en dynamische toestand van het voertuig te controleren. Dit gebeurt aan de hand van visuele, auditieve, vestibulaire en somatosensorische informatie. Voor autorijden is vooral de visuele informatie van belang. In het volgende wordt hierop nader ingegaan.

1.2 Visuele waarneming

Bij de analyse van de visuele informatie die door een bestuurder kan worden waargenomen, kan worden uitgegaan van alle optische informatie die voor een waarnemingspunt beschikbaar is. In dit verband heeft Gibson (1950) het begrip de *optic array* geïntroduceerd. De *optic array* kan men zich voorstellen als de perspectivische projectie van de omgeving op een bolvormig scherm dat het waarnemingspunt volledig omringt. Dit is vergelijkbaar met het door de computer gegenereerd beeld in een simulator. Dit beeld bevat een deel van de optische array die de bestuurder zou zien als hij daadwerkelijk in de kunstmatige omgeving zou rijden.

De informatie die door een bestuurder in de *optic array* wordt waargenomen hangt af van zijn kijkrichting. De kijkrichting bepaalt welk deel van de *optic array* op het netvlies wordt geprojecteerd, en met de hoogste resolutie wordt bemonsterd. Aangezien het oog een openingshoek van ongeveer $190^\circ \times 120^\circ$ (H×V) heeft, zal altijd een groot deel van de *optic array* worden waargenomen.

Indien we veronderstellen dat de positie van het hoofd ten opzichte van het voertuig vast is zullen hiervoor dezelfde statische en dynamische eigenschappen gelden als voor het voertuig¹. Oogbewegingen kunnen echter rotatiecomponenten toevoegen aan de door het voertuig gegenereerde bewegingen. Deze oogbewegingen zijn in principe in staat om de rotatiecomponent uit de voertuigbewegingen te compenseren (Koenderink, 1986).

1.2.1 Statische waarnemer

Een van de belangrijkste visuele elementen in de *optic array* van een bestuurder is de weg. De geometrie van een weg wordt gekenmerkt door de lijnvormige begrenzingen. Uit de (veranderende) oriëntatie van de lijnvormige elementen kan het wegverloop worden bepaald.

¹Dit is niet helemaal juist. Aangezien het hoofd van de bestuurder zich meestal niet op een rotatie-as van het voertuig bevindt wordt het oog bij voertuigrotatie in een curvilineaire (cirkelvormige) baan gebracht worden. Daarnaast is de positie van het hoofd niet vast, maar kan het door voertuig bewegingen heen en weer worden geschud. Op een rechte weg zijn deze effecten te verwaarlozen.

De oriëntatie van een weg in de optic array is afhankelijk van twee factoren. Allereerst de geografische oriëntatie van de weg in de *omgeving*. Een weg die naar het oosten loopt heeft een andere oriëntatie dan een weg die naar het noorden loopt. Ten tweede is de laterale afstand van het waarnemingspunt tot de weg van belang. De projectie van een lijn in de *optic array* maakt alleen een rechte hoek met de horizon indien het waarnemingspunt zich loodrecht boven de lijn bevindt (Riemersma, 1979a). De hoek met de horizon wordt kleiner indien de laterale afstand tot de lijn groter wordt.

De laterale positie van het voertuig kan door een bestuurder op twee manieren uit de optic array worden bepaald. Ten eerste door gebruik te maken van de lijnen vlakbij het voertuig, waarbij de laterale afstand tot de lijn kan worden waargenomen aan de hand van de horizontale positie van het meest nabije deel van de lijn. Ten tweede door de hoek die de wegbelijning maakt met de horizon (Riemersma, 1979a). De twee methoden zijn complementair en kunnen tegelijk worden gebruikt. Ze verschillen alleen met betrekking tot het deel van de optic array dat wordt gebruikt. De eerste methode heeft als voordeel dat ze ook op niet-rechte wegen bruikbaar is omdat ze gebruik maakt van informatie die vlak voor het voertuig aanwezig is. De tweede methode geeft op dit soort wegen informatie over het wegverloop.

In de optic array is ook informatie over de oriëntatie van het voertuig aanwezig. Gibson (1950) definieerde de optic array ten opzichte van de waarnemer. Aan de hand van de voor hem zichtbare delen van het interieur en exterieur van het voertuig, en de proprioreceptieve informatie over zijn oriëntatie in het voertuig, bijvoorbeeld ten opzichte van het stuurwiel, is de waarnemer in staat de oriëntatie van het voertuig waar te nemen. De oriëntatie van het voertuig ten opzichte van de weg kan worden waargenomen door de visuele hoek tussen de door de waarnemer gepercipieerde oriëntatie van het voertuig en het kruispunt van weg en horizon.

1.2.2 Dynamische waarnemer

Indien het waarnemingspunt wordt verplaatst, zoals dat bijvoorbeeld het geval is met oog van een rijdende bestuurder, ontstaat *optic flow* (Gibson, 1950). Optic flow is het geheel aan bewegingen dat in de optic array wordt gegenereerd door de bewegingen van het waarnemingspunt. Analoog aan de optic array is ook de optic flow aan de wetten van het perspectief onderworpen. Gibson (1950) noemt optic flow daarom ook wel *motion perspective*. Net als in de optic array bepaalt de kijkrichting welk deel van de optic flow op het netvlies wordt geprojecteerd (Gibson, 1950).

De bewegingen van elementen in de optic array kan men beschrijven met behulp van (2D) vectoren, en de optic flow kan men als een bolvormig vectorveld ('flowveld') beschouwen. Het gedrag van elementen in de optic flow kan wederom worden beschreven aan de hand van translatie- en rotatievectoren. Om verwarring te voorkomen wordt, tenzij anders vermeld, in het vervolg met translatie en rotatie de bewegingen van het waarnemingspunt aangeduid, en niet de gegenereerde bewegingen in de optic flow.

Rotatie

In de optic flow die ontstaat bij een rotatie van het waarnemingspunt (Fig. 1) is de hoeksnelheid voor alle punten in de projectie gelijk (Longuet-Higgins & Prazdny, 1980). De

elementen uit de optic array worden om de rotatie-as gerooteerd zonder dat daarbij de structuur (of inhoud) van de optic array verandert. In dit flowveld zijn zowel translatie- als rotatievectoren aanwezig. De mate waarin deze twee vectoren bijdragen aan de bewegingen van de elementen uit de optic array is afhankelijk van de excentriciteit van het element ten opzichte van de rotatie-as. In het vlak loodrecht op de rotatie-as kunnen de bewegingen met een translatievector worden beschreven. Op andere excentriciteiten bewegen de elementen in de optic array volgens cirkelbanen, en wordt de beweging beschreven door een combinatie van translatie- en rotatievectoren. Dicht bij de rotatie-as is de bijdrage van de translatievectoren klein en de bijdrage van de rotatievectoren groot.

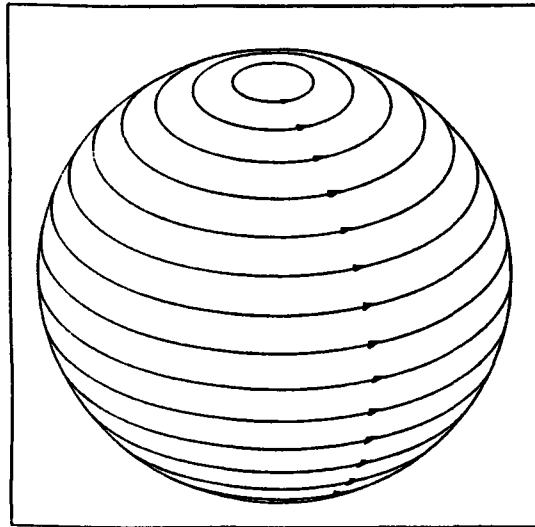


Fig. 1 Optic flow door een rotatie van het waarnemingspunt.

De optic flow die wordt waargenomen is afhankelijk van de kijkrichting ten opzichte van de rotatie-as. Indien een waarnemer haaks op de rotatie-as kijkt, zoals bij het ja of nee schudden met het hoofd, neemt hij een flowveld met hoofdzakelijk translaties waar. De rotatievectoren in het flowveld zijn moeilijk zichtbaar, zij bevinden zich perifeer, in het verlengde van de rotatie-as. Indien men om de kijkas roteert, zoals dat het geval is als men naar de voeten kijkt bij het draaien van een pirouette, neemt men een flowveld met hoofdzakelijk rotaties waar. Translatievectoren zijn dan in het perifere gezichtsveld zichtbaar. Door de grote openingshoek van het oog zullen altijd verschillende combinaties worden waargenomen.

Het is belangrijk te realiseren dat de rotatiecomponenten in voertuigbewegingen kunnen worden gecompenseerd door tegengestelde oogrotaties. Hierdoor kan het optische effect van de rotatiecomponent in de voertuigbewegingen volledig worden opgeheven².

²Indien het oog zich niet op de rotatie as van het voertuig bevindt wordt het volgens een cirkelvormige baan bewogen. Na compensatie van de rotatie component is er een residuele, door translatie gegenereerde optic flow, die wordt gegenereerd door de translatie die het oog ondergaat bij het bewegen volgens de cirkelbaan. Dit effect is klein.

Translatie

Gibson (1950) heeft zich in zijn analyse van de optic flow vooral met translaties bezig gehouden. In tegenstelling tot de rotatie van het waarnemingspunt wordt bij een translatie van het waarnemingspunt de structuur van de optic array vervormd; de inhoud ervan verandert. Fig. 2 laat een afbeelding zien van het flowveld dat door een translatie wordt gegenereerd. Het patroon waarin de vectoren in het flowveld zijn geordend is voor elke translatie identiek (Koenderink, 1986; Longuet-Higgins & Prazdny, 1980). De translatie-richting bepaalt hoe dit patroon is georiënteerd in de optic array.

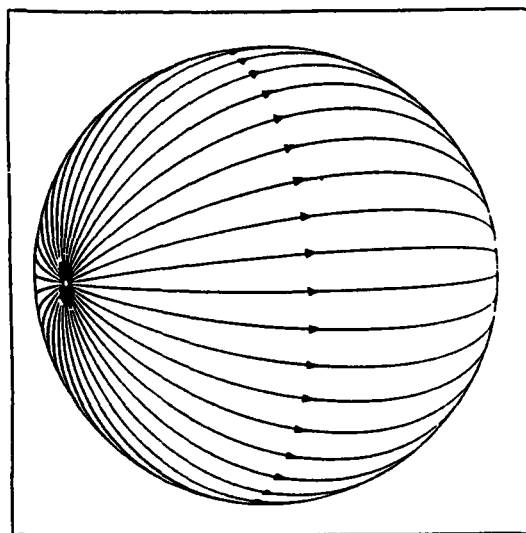


Fig. 2 Optic flow door translatie van het waarnemingspunt.

De lengten van de vectoren uit het flowveld zijn afhankelijk van twee factoren. Ten eerste de translatiesnelheid van het waarnemingspunt, die de lengte van alle vectoren verandert. Ten tweede de afstand tussen het waarnemingspunt en het punt dat door de vector wordt beschreven. Objecten die ver weg zijn zullen relatief langzamer transleren dan objecten die dichtbij staan (bewegingsparallax). Hierdoor is er in een translatoir flowveld afstands-informatie aanwezig (Koenderink, 1986).

Het flowveld dat door een translatie wordt gegenereerd kan worden opgesplitst in twee componenten (Koenderink, 1986). Exact in het verlengde van de translatie-richting zijn de richtingen van de vectoren radiaal, ze lijken uit één punt vandaan te komen (Fig. 3).

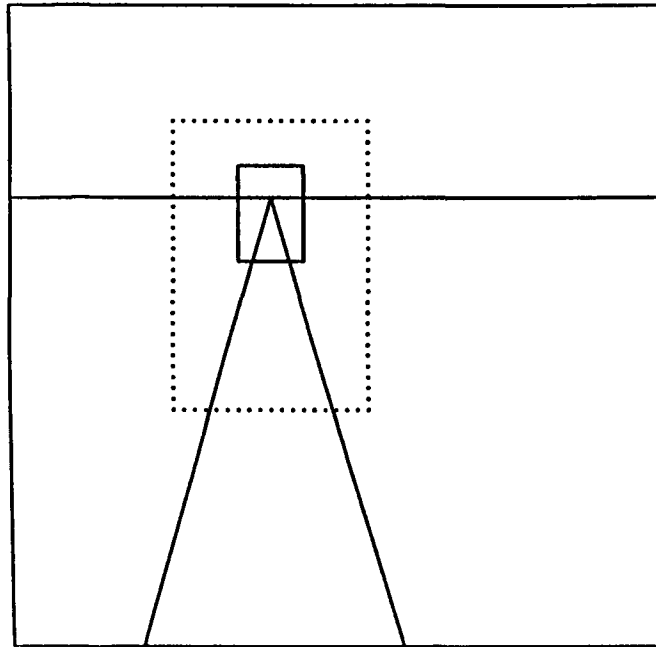


Fig. 3 Expansie.

Dit punt is door Gibson (1950) de focus of expansion genoemd. In een expanderend flowveld zijn alleen translatievectoren aanwezig. In het vlak loodrecht op de translatierichting lopen de vectoren parallel. Dit wordt ook wel parallax genoemd. Bewegingsparallax kan men waarnemen indien men evenwijdig aan een weg kijkt terwijl men van laterale positie verandert (Fig. 4). Doordat de lengte van de translatievectoren afneemt met de afstand lijkt er een roterende component aanwezig die de oriëntatie van lijnen in de optic array verandert.

Deze is echter niet gelijk aan een door een rotatie om de kijkas gegenereerde rotatie van de optic array, omdat alleen de lijnen die niet parallel aan de bewegingsrichting lopen van orientatie veranderen. Dit kan men waarnemen bij een (haakse) kruising. Als men van laterale positie verandert zal de orientatie van de wegbelijning veranderen, terwijl de orientatie van de kruisende weg gelijk blijft.

Met behulp van de basiscomponenten expansie en parallax kan men de transformaties in de optic array als gevolg van een translatie voor een willekeurige kijkrichting beschrijven (Koenderink, 1986) Afhankelijk van de hoek tussen kijk- en translatierichting zal een flowveld met een bepaalde combinatie van expansie en parallax op het netvlies worden geprojecteerd. Door de grote openingshoek van het oog worden altijd combinaties van expansie en parallax waargenomen (b.v. als men een weg loodrecht kruist, en in de bewegingsrichting kijkt, lijkt deze alleen te transleren, maar in de ooghoeken aanschouwt men de weg loodrecht op de rijrichting en zal deze van oriëntatie veranderen).

De combinatie van expansie- en parallaxcomponenten in een flowveld is niet lineair. De mathematische beschrijving van het flowveld is uiterst complex (Koenderink, 1986; Longuet-Higgins & Prazdny, 1980) en valt buiten het bereik van dit rapport.

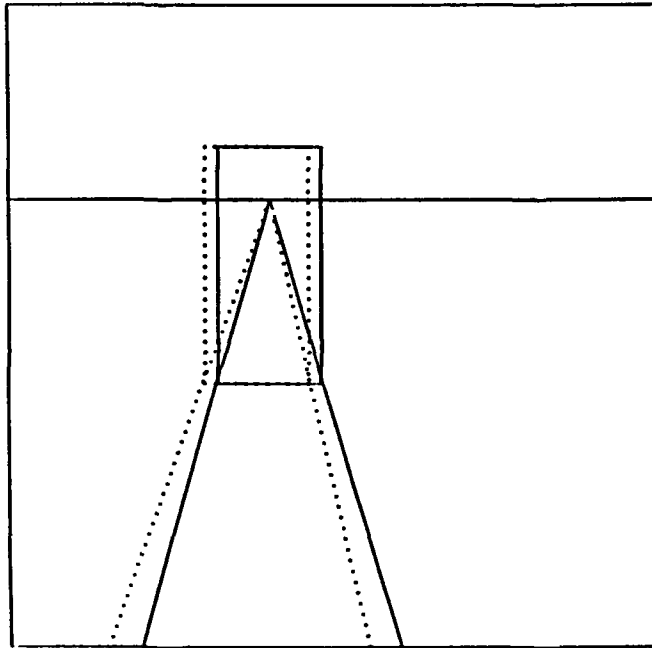


Fig. 4 Parallax.

De weg voor een translerende waarnemer

De transformaties van de rijweg zoals die worden waargenomen door een translerende waarnemer zijn afhankelijk van twee factoren. De belangrijkste factor is de translaterichting ten opzichte van de weg-as. De translaterichting bepaalt in welk deel van het flowveld de weg zich bevindt en daarmee hoe de weg in het flowveld wordt getransformeerd. Indien exact parallel aan de weg wordt gereden zal de weg alleen expanderen. Als de bestuurder een koersfout maakt rijdt hij niet exact parallel aan de weg en is er ten opzichte van de weg-as een laterale translatiecomponent aanwezig. Hierdoor zal er een parallaxbeweging in de wegbelijning worden gegenereerd en verandert de oriëntatie van de weg in de optic array. Een laterale translatie zal overigens, analoog aan de perceptie van de statische laterale positie, ook als een translatie van de lijnen vlak bij het voertuig zichtbaar zijn.

De tweede factor die transformaties van de weg bepaalt is de momentane laterale positie van de waarnemer. Hoe groter de laterale afstand tot een zijlijn des te langzamer deze zal transformeren (Riemersma, 1987).

De doorgetrokken lijnen op het wegdek bevatten geen elementen die de expanderende component dragen. Indien men exact parallel aan zo'n lijn beweegt staat deze stil in de optic array. Hierdoor is voor een translerende bestuurder alleen de laterale component van zijn bewegingen zichtbaar in de wegbelijning.

In de volgende paragraaf wordt een aantal experimenten besproken waarin werd bekeken in hoeverre een bestuurder in staat is om de visuele effecten van de voertuig bewegingen waar te nemen.

1.3 De perceptie van optic flow

Er is in het verleden een aantal experimenten gedaan naar koersperceptie aan de hand van informatie uit optic flow. De stimulus die daarvoor werd gebruikt bestond doorgaans uit random dots. Random dots worden gebruikt voor het onderzoeken van optic flow omdat zij naast beweging geen andere informatie dragen, zoals oriëntatie en vorm. In een aantal experimenten moesten de proefpersonen op een scherm de koers waarin zij dachten te bewegen aanwijzen. Bij een gesimuleerde nadering tot een loodrecht op de bewegingsrichting staand vlak bleken de proefpersonen slecht in staat hun bewegingsrichting waar te nemen (Llewellyn, 1971; Johnston e.a., 1973; Warren, 1976). De fouten lagen in de orde van 5° tot 10° . Later zijn experimenten uitgevoerd met een meer gevoelige drempelbepalingsmethode (two-alternative forced choice), met de beweging parallel aan een randomdot grondvlak (Warren, 1988, 1990, 1991). De minimaal waarneembare koersfout lag toen in de orde van 1° . Voor het besturen van een voertuig is deze drempel echter nog te hoog. Een koersfout van 1° bij 120 km/h leidt tot een laterale snelheid van 0.58 m/s. Riemersma (1982) vond in een veldexperiment op een rechte weg een standaarddeviatie van de laterale snelheid van 0.05 tot 0.1 m/s. Dit impliceert dat de door random dots gegenereerde optic flow de bestuurder niet voldoende informatie geeft over de koers van het voertuig, en dat hij nog andere informatie bij het controleren van het voertuig gebruikt.

Riemersma (1979b) heeft in een laboratorium experiment gekeken of bestuurders hun gesimuleerde laterale translatie en rotatie in een expanderend flowveld konden waarnemen. Hierbij werden op een scherm na elkaar twee scènes met expanderende flow geprojecteerd, met of zonder een laterale translatie of rotatie-component. De proefpersoon moest aangeven of hij dit verschil nog kon waarnemen. Er werden twee soorten scènes gebruikt. Een scène met belijning zoals deze op een 80 km/h weg voorkomt, i.e., twee zijlijnen op een afstand van 7.20 meter van elkaar, en een onderbroken middenstreep in een 3-9 patroon (3 meter streep, 9 meter onderbreking). De tweede scène bestond uit een aantal random dots. De snelheid was 30 of 120 km/h. Uit de resultaten bleek dat proefpersonen in de random dot scène niet goed konden discrimineren tussen de condities met en zonder laterale translatie. Alleen in de conditie met 30 km/h voorwaartse en 50 cm/s laterale snelheid was het verschil zichtbaar (koersfout 3.4°). In de scène met wegbelijning was echter een laterale translatie van 5 cm/s (koersfout 0.08° , bij 120 km/h) reeds te onderscheiden. De rotatiecomponent was in de belijnings- en random dot scènes steeds even goed zichtbaar. Expansie met een rotatie van $0.18^\circ/s$ kon worden onderscheiden van een pure expansie.

Het verschil in perceptie van de laterale translatiecomponent in random dot en belijnings-scène kan worden verklaard door de aanwezigheid van expanderende optic flow. Doordat de voorwaartse snelheidscomponent veel groter is dan de laterale, zal de laterale component slechts een kleine richtingverandering in de bewegingen van de expanderende random dots veroorzaken. In tegenstelling tot de random dots dragen de doorgetrokken lijnen geen expanderende flow. De laterale translatiecomponent is hier direct zichtbaar, als translatie van de lijnen vlak voor het voertuig en als oriëntatieverandering van de lijnen als geheel.

De optische effecten van een rotatie zijn afstand-onafhankelijk. Doordat de expansiesnelheid van punten bij de horizon nagenoeg nul is, en de effecten van rotatie hier net zo groot zijn als dichtbij, valt het verschil tussen de belijnings- en random dot scène voor de rotatie-component weg en kan deze in beide soorten scènes even goed worden waargenomen.

Uit bovenstaande analyse blijkt dat bestuurders hun bewegingen op de weg nauwkeurig konden waarnemen. Hiermee is echter de vraag welke component(en) van de optic flow de bestuurders gebruiken bij het besturen van hun voertuig nog niet beantwoord.

1.4 Het gebruik van optic flow

Riemersma (1982, 1983) heeft in twee veldexperimenten onderzocht welke informatie uit de optic array bestuurders gebruiken bij het koershouden op een rechte weg. Als maat voor de kwaliteit van de perceptie van een bepaalde component van de voertuigbeweging nam hij de standaarddeviatie van deze component. De gedachte is dat de variatie in bijvoorbeeld de laterale snelheid klein is indien laterale translaties goed worden waargenomen.

In bepaalde condities in deze experimenten werd het zicht beperkt op het proximale deel van de omgeving (0.5–20 m) door het afdekken van het onderste gedeelte van de voorruit van de auto. Door het afdekken wordt de perceptie van de afzonderlijke bewegingscomponenten selectief beïnvloed.

De informatie over de statische laterale positie werd volgens Riemersma niet aangetast door de beperking van het visuele veld. Hij ging ervan uit dat de laterale positie uitsluitend door middel van de oriëntatie van de wegbelijning wordt waargenomen (Riemersma, 1987; p. 48). Deze aanname was gebaseerd op een onderzoek van Bouma en Andriessen (1968), waarin werd aangetoond dat de nauwkeurigheid (in graden) waarmee een punt in het verlengde van een lijnstuk kon worden gezet nagenoeg onafhankelijk van de lengte van het lijnstuk was. Echter, indien de afstand van het punt tot het uiteinde van het lijnstuk toeneemt, zoals dat in dit experiment gebeurde, zal de nauwkeurigheid waarmee de laterale positie kan worden waargenomen (in cm), afnemen met deze afstand. Hierdoor zal de perceptie van de statische laterale positie afhankelijk zijn van de optische afstand tot het uiteinde van de lijn. Naast de oriëntatie van het lijnstuk in de optic array kon echter ook de horizontale positie van het meest nabije deel van de lijn worden gebruikt bij het bepalen van de laterale positie. Ook met deze laatste methode vermindert de perceptie van de laterale positie als de optische afstand tot het uiteinde van de lijn toeneemt.

De perceptie van de laterale translatie werd volgens Riemersma door het afdekken wel gedegenereerd. Hij constateerde dat de translatiesnelheid van lijnen vlak voor het voertuig het grootst is. Door het afdekken van het proximale gedeelte van de omgeving worden juist deze grote en snelle bewegingen weggenomen. Echter, het is aangetoond dat bewegingsperceptie over een groot bereik afstands-invariant is (Van de Grind, Koenderink & Van Doorn, 1992), doordat de bewegingsgevoeligheid en resolutie van het visuele systeem meeschaalt met de kleiner wordende objecten en bewegingen op grotere afstanden. Dit impliceert dat als naar de horizon wordt gekeken, de beweging van de wegbelijning over een groot afstandsbereik met eenzelfde nauwkeurigheid kan worden waargenomen.

Op grond van het bovenstaande gaan wij er daarom van uit dat het afdekken van het onderste gedeelte van de voorruit de perceptie van de laterale translatie niet hindert, maar dat de perceptie van de laterale positie moeilijker wordt.

De perceptie van de optic flow die door een rotatie wordt gegenereerd wordt niet aangetast door het afdekken van het onderste gedeelte van de voorruit, omdat deze informatie vooral zichtbaar is in de flow van elementen die verweg staan, bijvoorbeeld bij de horizon.

De beperkingen van het proximale visuele veld veroorzaakte in het eerste experiment van Riemersma (1982) bij ervaren bestuurders een significante toename in standaarddeviatie van laterale positie en laterale snelheid. Bij totaal onervaren bestuurders werden *geen* significante effecten van het beperkte uitzicht gevonden. Riemersma (1982) leidde hieruit af dat onervaren bestuurders de informatie over hun laterale positie en laterale translatie niet gebruikten, maar vooral de visuele effecten van rotaties gebruikten bij het bepalen van hun koers.

In het tweede experiment van Riemersma (1983) werd wederom het proximale deel van het visuele veld afgedekt. Voor ervaren bestuurders was de variatie in laterale positie significant hoger indien de voorruit was afgedekt, maar, in tegenstelling tot de resultaten van zijn eerdere experiment, werd géén verhoging in de variatie van de laterale snelheid gevonden. In dit experiment was echter, naast de doorgetrokken zijlijnen, op de weg ook een onderbroken middenstreep (3-9 patroon) op het wegdek aanwezig. De afwezigheid van effecten van proximale occlusie kan worden verklaard door aan te nemen dat proefpersonen de onderbroken middenlijn, en niet de continue zijlijnen, gebruiken voor het sturen. In een eerder experiment waarin lijnonderbreking systematisch was gevarieerd vond Riemersma (1982) zowel voor ervaren als voor onervaren bestuurders een grotere variatie in laterale positie en laterale snelheid bij onderbroken belijning. Dit kan door twee factoren zijn veroorzaakt: 1) onderbroken lijnen leveren als zodanig minder (lijn)informatie dan doorgetrokken lijnen, 2) alleen onderbroken lijnen genereren bij voorwaartse beweging radiale optische flow die de waarneming van laterale positie en laterale translatie verstoort. Dit laatste zou worden ondersteund doordat Riemersma (1982) geen effect van lijnonderbreking op rotatie-snelheid ('heading rate') vond. Deze informatie is immers ook bij onderbroken lijnen altijd en volledig beschikbaar in de buurt van de horizon, waar de expanderende flow nagenoeg ontbreekt.

De prestaties van de onervaren proefpersonen in het experiment van Riemersma (1982) werden niet gehinderd door het afdekken van het zicht op de proximale omgeving. Als we echter het kijkgedrag van de onervaren bestuurders analyseren stuiten we op een paradox. Een onderzoek van Mourant en Rockwell (1972) liet zien dat onervaren bestuurders vooral proximaal, vlak voor de motorkap, fixeren, terwijl de ervaren bestuurders distaal, op het kruispunt van weg en horizon, fixeren. Hoewel de onervaren bestuurders vlakbij fixeren, bleken ze geen hinder te hebben van het belemmeren van het uitzicht op dit deel van de omgeving. Dit betekent dat belemmering van de suboptimale ('onervaren') kijkstrategie geen nadelig effect heeft op de prestatie. Wellicht zal bevordering van de optimale ('ervaren') kijkstrategie daarom een verbeterde stuurprestatie tot gevolg hebben.

Naast het bevorderen van de ervaren kijkstrategie heeft het aanbrengen van een fixatiepunt nog een belangrijk effect. Normaal gesproken kunnen rotaties van het hoofd, en dus ook het voertuig, door tegengestelde oogrotaties worden gecompenseerd. Hierdoor is het mogelijk tijdens snelle rotaties toch op een voorwerp te fixeren (b.v. op de handen tijdens ja of nee schudden). Afhankelijk van de rotatie frequentie worden deze compensatoire oogbewegingen door visuele dan wel vestibulaire signalen reflexmatig ondersteund (Opto Kinetic Reflex, resp. Vestibulo Oculomotor Reflex). Bij rotatie frequenties lager dan 1 Hz vooral visueel, bij hogere rotatiefrequenties vooral vestibulair. In een fixed-base rijnsimulator is de vestibulaire stimulatie afwezig. Door actief fixeren kan het gebied waarin op basis van visuele

informatie wordt gecompenseerd worden vergroot, en wordt voor de afwezigheid van vestibulaire informatie over de voertuigbewegingen gedeeltelijk gecompenseerd.

1.5 Vraagstelling

Naar aanleiding van het bovenstaande overzicht, waarin een antwoord is gezocht op de vraag welke visuele informatie bestuurders gebruiken bij het besturen van hun voertuig op een rechte weg, blijven een aantal vragen open. Allereerst is onduidelijk wat het effect is van het afdekken van het onderste deel van de voorruit, waardoor het zicht op het proximale deel van de omgeving werd verhinderd. Wordt door deze manipulatie de perceptie van de laterale translatie gehinderd of wordt hierdoor juist de perceptie van de laterale translatie gedegene-reerd. Op grond van theoretische argumenten kan de aanname van Riemersma (1982, 1983) dat hierdoor de perceptie van de laterale translatie wordt gehinderd, worden verworpen, maar een simulatorexperiment waarin de informatie over de laterale positie, translatie en rotatie op analoge wijze wordt gemanipuleerd zal hierover meer duidelijkheid geven.

Ten tweede: wat zijn de verschillen tussen ervaren en onervaren bestuurders met betrekking tot het gebruik van visuele informatie. De prestaties van de onervaren bestuurders in het experiment van Riemersma (1982) werden niet beïnvloed door het afdekken van de voorruit, wat erop wijst dat ze vooral van de visuele effecten van de rotatie van het voertuig gebruik maakten. Echter, in een rijdend voertuig zullen rotaties van het voertuig ook vestibulaire cues genereren. Het is zeer wel mogelijk dat de onervaren bestuurders juist op deze cues hun voertuig bestuurden. In een fixed-base rijnsimulator ontbreken de vestibulaire cues, en wordt alleen de visuele informatie bestudeerd.

Daarnaast is er onduidelijkheid over de kijstrategie van onervaren bestuurders; zij kijken vlak voor de motorkap, maar gebruiken de daar aanwezige informatie over de laterale translaties niet. Een fixatiepunt op het kruispunt van weg en horizon, daar waar de ervaren bestuurders kijken, kan de onervaren bestuurders een ervaren kijkstrategie opleggen. Door het fixeren op het fixatiepunt worden tevens compenserende oogbewegingen gegenereerd, waarmee de visuele effecten van een voertuigrotatie worden gecompenseerd. Hiermee wordt het gebrek aan vestibulaire stimulatie in een fixed-base rijnsimulator ondervangen.

Naar aanleiding van deze vragen werden de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

Waarin verschillen ervaren en onervaren bestuurders met betrekking tot het gebruik van de beschikbare visuele informatie bij het sturen op de rechte weg?

Het antwoord op deze vraag maakt het mogelijk om in simulatoren dié cues te presenteren die door ervaren bestuurders worden gebruikt, maar door onervaren bestuurders (nog) niet. Door de onervaren bestuurders te trainen in het gebruik van juist deze cues kan de training worden geoptimaliseerd.

In hoeverre is de perceptie van de laterale positie, laterale snelheid en rotatiesnelheid van belang voor het koershouden op een rechte weg en wat is het effect van het wegnemen van delen van de wegbelijning of het onderbreken daarvan op de perceptie van deze variabelen?

Aan de hand van deze vraag wordt onderzocht welke visuele informatie de bestuurder gebruikt bij het sturen op een rechte weg, en welke elementen in de optic array deze informatie dragen.

Wat is het effect van een fixatiepunt op het koershouden op een rechte weg in een rijnsimulator?

Het aanbrenge van een fixatiepunt is wellicht een eenvoudige manier om onervaren bestuurders een 'ervaren' kijkstrategie op te leggen. Daarnaast wordt door te fixeren voor de rotatiecomponent uit de voertuigbewegingen gecompenseerd, waardoor het gebrek aan vestibulaire informatie wordt verminderd.

2 METHODEN EN TECHNIEKEN

2.1 Proefpersonen

Aan het experiment namen 40 proefpersonen deel, 20 ervaren en 20 onervaren bestuurders. De ervaren bestuurders reden meer dan 3000 km per jaar en hadden in totaal meer dan 10.000 km gereden. De onervaren bestuurders hadden geen rijbewijs, en, naar eigen zeggen, nog nooit een auto bestuurd. De gemiddelde leeftijd van de ervaren bestuurders was 24.0 jaar (SD 3.0) en van de onervaren bestuurders 23.1 jaar (SD 3.75). Alle proefpersonen hadden minimaal een opleiding op HBO niveau. De gezichtsscherpte van de proefpersonen was normaal of tot normaal gecorrigeerd. De proefpersonen werden betaald voor hun medewerking (f10,- per uur).

2.2 Apparatuur

Het experiment werd uitgevoerd in de rijnsimulator van TNO Technische Menskunde. Fig. 5 geeft de basisconfiguratie van deze fixed-base rijnsimulator weer.

De simulator is uitgebreid beschreven door Van der Horst, Janssen en Hoekstra (1991), maar werd sindsdien van een nieuw beeldgeneratie-systeem voorzien (Evans & Sutherland ESIG 2000). De simulator was opgebouwd uit 5 modulen:

- De supervisor (een LIJN 486, 33 MHz computer), die de verschillende componenten van de rijnsimulator bestuurd, en de communicatie (tussen de onderdelen van de simulator en met de proefleider) en de opslag van data verzorgde.
- Het voertuigmodel (een IBM 286, 12 MHz computer), dat het gedrag van een Volvo 240 simuleerde, en de positie en oriëntatie van het voertuig berekende.
- De beeldgenerator (Evans & Sutherland ESIG 2000), genereerde zichtbare visuele informatie aan de hand van de positie en oriëntatie uit het voertuigmodel. De bijwerk-frequentie van de beelden was 30 Hz.
- De mock-up. De proefpersoon zat in een fixed-base mock-up van een Volvo 240 waarin alle normale bedieningselementen aanwezig waren (gas-, rem- en koppelingspedaal, stuurwiel, schakelpook, etc.). In dit experiment functioneerde alleen het stuur. Mede aan

de hand van de stuurstand werd door het voertuigmodel de positie en de koers van de auto berekend. De bestuurder kreeg de juiste tegenkracht op het stuur door middel van een frictiemotor. Het geluid van motor, banden en wind werd via een luidspreker gesimuleerd. De snelheid van het voertuig was gefixeerd op 80 km/h.

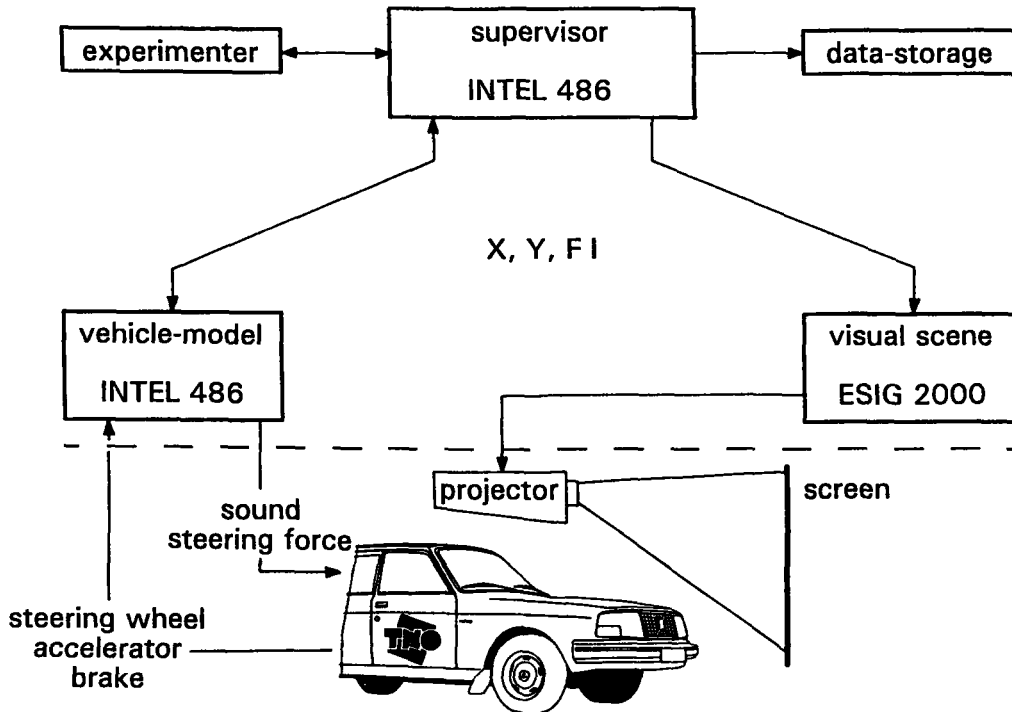


Fig. 5 De TNO-TM rijsimulator.

- Het projectiesysteem. De beelden werden door middel van een BARCOGRAPHICS 800 projector op een scherm voor de mock-up geprojecteerd. De resolutie van de projector was 1024×1024 pixels in kleur (24 bit RGB), de verversingsfrequentie was 60 Hz. Het projectiescherm stond op een afstand van 3.60 m van de proefpersoon en mat $3.40 \text{ m} \times 2.25 \text{ m}$. De grootte van het geprojecteerde beeld bedroeg 50° horizontaal en 35° verticaal. De resolutie bedroeg 20 pixels/graad horizontaal en 30 pixels/graad verticaal.

2.3 Design

Behalve ervaring, als de enige tussen-proefpersonen variabele, werden in het experiment 5 onafhankelijke variabelen binnen-proefpersonen gemanipuleerd. Drie daarvan werden volledig factorieel gecombineerd:

- belijning
- omgevingsobjecten
- fixatiepunt.

Dit leverde 12 condities op. Hieraan werden 4 condities met stippellijnen toegevoegd. Deze kwamen voort uit een factoriële combinatie van:

- hoeveelheid lijn
- hoeveelheid flow.

Algemene omgevingskenmerken

De database bevatte twee elementen die in alle condities zijn gebruikt. Allereerst een textuur op de weg en in de omgeving. Deze textuur bestond uit twee componenten: een grove textuur die al op 50 meter voor het voertuig geleidelijk zichtbaar werd met daaroverheen een fijne textuur, die pas op 10 meter voor het voertuig zichtbaar werd. Daarnaast was in alle condities een horizon aanwezig.

Belijning

Om inzicht te krijgen in het gebruik van proximale en distale gedeelten van de wegbelijning voor de perceptie van voertuigbewegingen was de wegbelijning op drie manieren uitgevoerd: **volledig** (Fig. 6 a), **proximaal** (0–20 m voor het voertuig, Fig. 6 b) en **distaal** (20–1500 m voor het voertuig, Fig. 6 c). Deze afstanden waren zo gekozen dat de visuele hoek tussen motorkap en horizon in tweeën werd gedeeld. De belijning bestond uit twee doorlopende zijlijnen zonder middenstreep. De lijnen waren 15 cm breed, en lagen op 3.6 m van elkaar. Om te voorkomen dat er onbedoeld lijnvormige contrasten zouden ontstaan was er geen verschil in kleur, contrast of textuur tussen wegdek en omgeving.

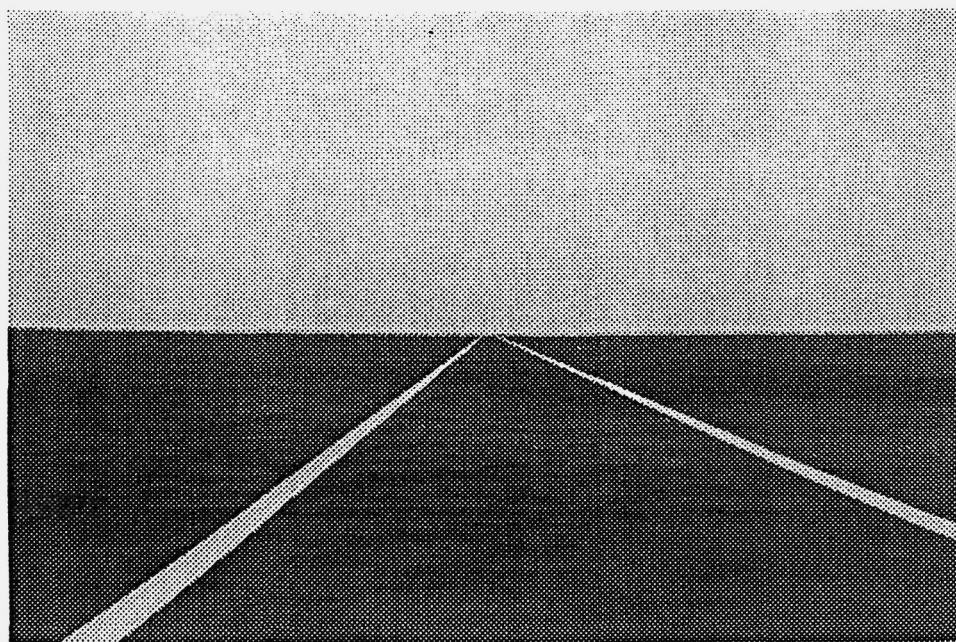
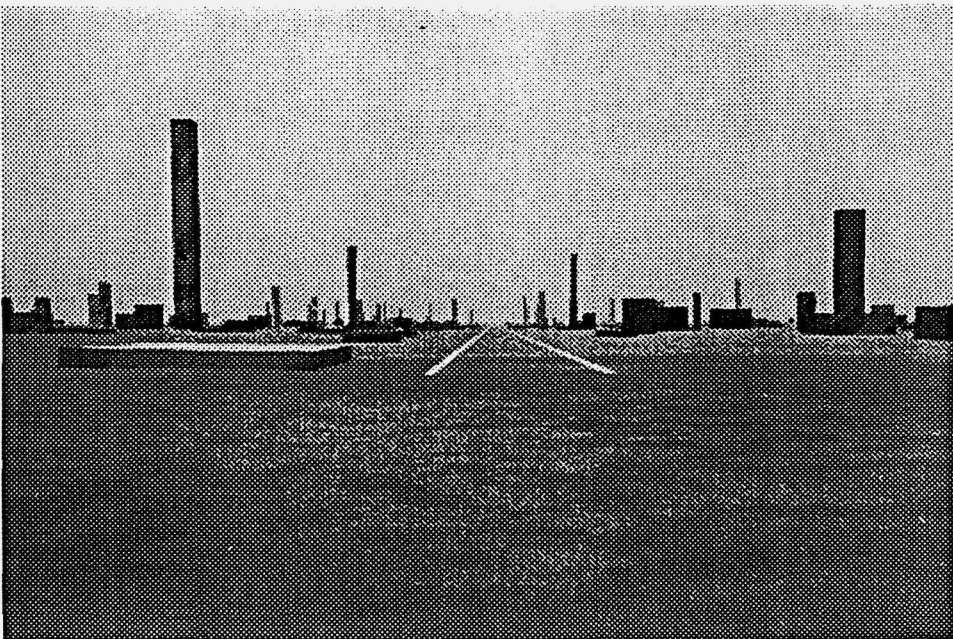
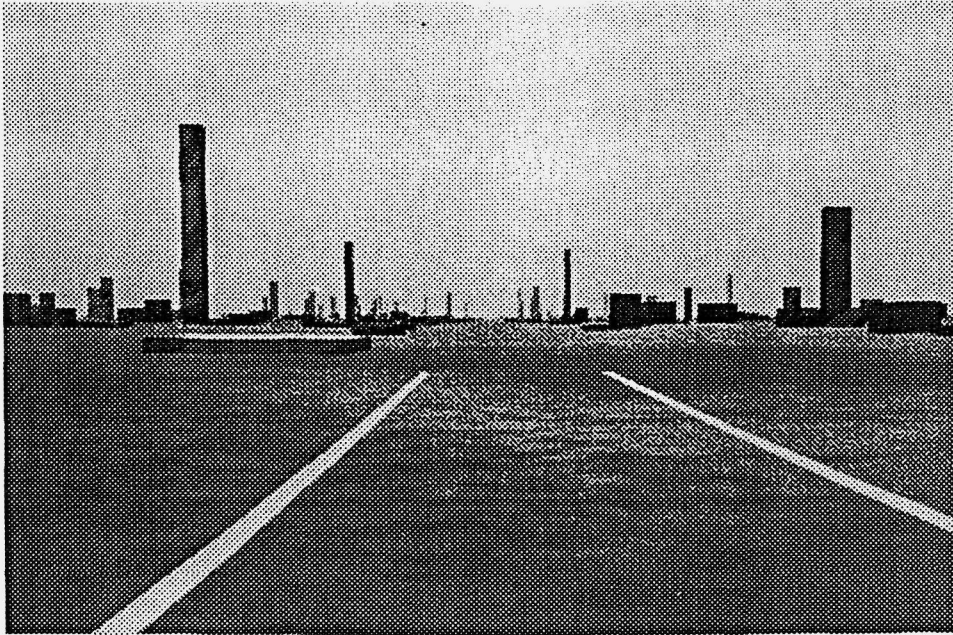


Fig. 6 a: Volledige belijning in lege omgeving, b: Proximale belijning in omgeving met objecten, c: Distale belijning in omgeving met objecten.

Vervolg Fig. 6 (b boven; c onder)



Omgevingsobjecten

Het is mogelijk dat een omgeving met alleen wegbelijning de bestuurder reeds voldoende informatie geeft over de bewegingen van het voertuig. We vergeleken deze eenvoudige omgeving daarom met een complexe, waarin een groot aantal objecten in de omgeving van de weg werden geplaatst. De objecten genereren optic flow die informatie draagt over de positie, translatie en rotatie van het voertuig.

De objecten bestonden uit blokvormige elementen met een aantal verschillende afmetingen. Het grondoppervlak was 3×3 (50%) of 6×6 (50%) meter. De elementen lagen random verspreid met een gemiddelde van 1 element per 25×25 m, en er waren ongeveer 3500 elementen in de omgeving geplaatst. Tabel I geeft een overzicht van de verdeling van de laterale positie en hoogte van de elementen.

Tabel I De verdeling en hoogte van de omgevingsobjecten.

hoogte in m	percentage	dwarsafstand in m tot het midden van de weg
0.5	75	3-100
2	10	10-500
4	7.5	10-500
8	2.5	10-500
16	2.5	10-500
32	2.5	10-500

De verticale zijden van de elementen hadden een grove textuur met een hoog contrast. De elementen hadden felle en contrastrijke kleuren. De boven en voorzijde in heldere kleuren, de laterale zijden donker. Dit komt overeen met een zonnestand met een azimut van 180° en elevatie 45° . Fig. 7 a geeft een voorbeeld van een lege omgeving, Fig. 7 b geeft een voorbeeld van een omgeving met objecten.

Fixatie

Om de onervaren bestuurders een kijkstrategie op te leggen die overeenkomt met die van ervaren bestuurders werd een fixatiestreepje op het kruispunt van weg en horizon aangebracht. Het fixatiestreepje bestond uit een op 1000 m afstand voor het voertuig uit bewegende rechthoek (afmetingen 1×5 m). Indien werd gefixeerd was de rechthoek nog net zichtbaar als een verticaal lijntje op het kruispunt van weg en horizon. Om er zeker van te zijn dat de bestuurders fixeerden werd de rechthoek per trail 4×1 keer met een random interval naar de proefpersoon toebevoegen (zie formule).

$$\text{Afstand} = 750 + 250 * [\cos(2 * \frac{t}{5})]$$

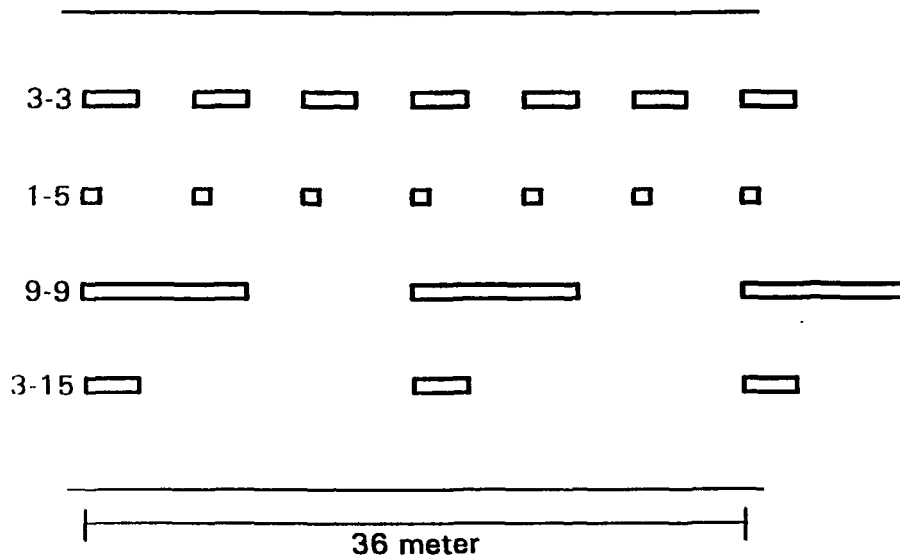


Fig. 7 de verschillende soorten stippellijnen.

De verandering was zó gekozen dat deze alleen goed zichtbaar was indien werd gefixeerd. De bestuurders dienden door het intrappen van het, niet als zodanig functionerende, rempedaal aan te geven dat zij de verandering hadden gezien. Aan de proefpersonen die alle veranderingen waarnamen werd een bonus uitgekeerd. Uiteindelijk is slechts aan 1 (ervaren) proefpersoon geen bonus uitgekeerd. Deze had 5 veranderingen gemist. Aangezien dit slechts 2% van het totaal aantal veranderingen was, zijn de gegevens van deze proefpersoon meegenomen in de analyse.

Stippellijnen

Om inzicht te krijgen in de vraag of de oorzaak van verminderde stuurprestaties bij stippellijnen eerder in termen van hoeveelheid belijning of in termen van hoeveelheid (storende) flow moet worden gezocht, werd hoeveelheid wegbelijning en het aantal onderbrekingen per lengte-eenheid gevarieerd. Deze onafhankelijke variabelen en de daaruit volgende condities zijn in de onderstaande tabel weergegeven. Hierbij stelt het eerste cijfer de lijnlengte (m) voor en het tweede cijfer de lengte (m) van de opening.

Tabel II de lengte van het lijnstuk en de onderbreking voor de verschillende stippelijncondities.

		belijning	
		veel	weinig
flow	veel	3-3	1-5
	weinig	9-9	3-15

Bij veel belijning was de hoeveelheid lijn, op de totale afstand, 1 op 2 en bij weinig lijn was deze verhouding $3 \times$ zo hoog nl. 1 op 6. Bij veel flow was er 1 onderbreking op 6 meter en bij weinig flow was de afstand per onderbreking $3 \times$ zo groot, 1 op 18. In Fig. 7 is te zien hoe de belijning was uitgevoerd. In de condities met stippellijnen ontbraken omgevingsobjecten en een fixatiepunt.

Verstoringssignaal

De stuurtaak werd bemoeilijkt door een verstoringssignaal ('zijwind') op de stuurinput van het voertuigmodel. Het verstoringssignaal bestond uit een door een laagdoorlaatfilter afgefilterde witte ruis. Het effect van het verstoringssignaal op het gedrag van het voertuig is weergegeven in Tabel III, waarin de standaarddeviatie en het gemiddelde van de laterale positie, laterale snelheid en koershoek zijn weergegeven. De verstoring was alleen op het simulatorbeeld zichtbaar en was niet teruggekoppeld op het stuurwiel. Fig. 8 geeft het frequentiespectrum van het verstoringssignaal. Duidelijk is te zien dat het verstoringssignaal vooral frequenties tussen 0 en 1 Hz bevatte.

Tabel III De kenmerken van het verstoringssignaal.

	gemiddelde	standaarddeviatie
laterale snelheid	0.45 m/s	0.25 m/s
rotatiesnelheid	-0.0006°	0.016°/s

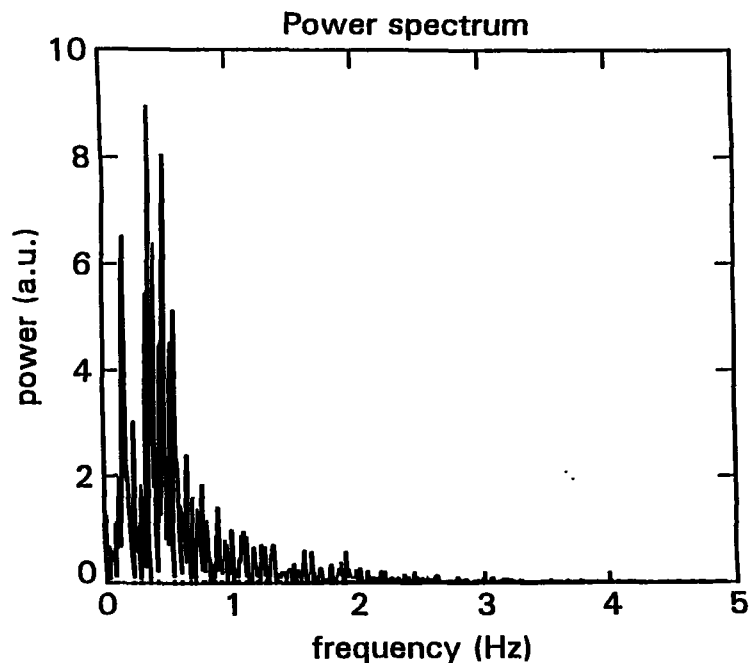


Fig. 8 Frequentiespectrum van het verstoringssignaal.

2.4 Taak

De proefpersonen werd gevraagd midden op de weg te rijden, en het effect van de 'zijwind' zo goed mogelijk te corrigeren. In de condities met de fixatietaak moesten de proefpersonen bij elke verandering van het fixatiestreepje op de, niet als zodanig functionerende, rem trappen.

2.5 Procedure

Allereerst reden de proefpersonen alle 16 condities gedurende 30 seconden in random volgorde. Tijdens het experiment werden 6 blokken van 8 ritten gemaakt. De zestien condities werden in twee opeenvolgende blokken afgewerkt, en werden drie keer herhaald. De proefpersonen wisselden elkaar af: een proefpersoon reed, de ander rustte. De volgorde van de condities was gebalanceerd door middel van een 16×16 digram latijns kwadraat (Wagenaar, 1969).

2.6 Verzamelen en bewerken van de data

Tijdens het experiment werden drie variabelen geregistreerd:

- Laterale positie
- Laterale snelheid
- Rotatiesnelheid.

Door een fout in het verstoringsignaal bleek dat tijdens een aantal ritten het verstoringsignaal gedurende de laatste 26 s van de ritten (90 s) constant was. Om de condities voor alle proefpersonen gelijk te houden is dit niet veranderd, en is dit gedeelte van de rit bij de verwerking van de data niet meegenomen.

Tijdens de rit werden de waarden van de afhankelijke variabelen met een frequentie van 10 Hz uit het voertuigmodel uitgelezen. Vervolgens werd voor elke rit om de 16 s ($4 \times$) de standaarddeviatie voor de betreffende variabele berekend. Op deze data werd een variantie-analyse (ANOVA) uitgevoerd, met ervaring als between-subject variabele en belijning, objecten en fixatie als within-subject variabelen. Aangezien geen significant herhalingseffect of een significant verschil in standaarddeviatie gedurende de rit werd gevonden, waren er 12 (3×4) metingen per cel. De drie belijningscondities zijn als geheel en in paren geanalyseerd. Voor de 4 onderbroken belijningscondities werd een aparte ANOVA uitgevoerd, met ervaring als tussen-proefpersoon en flow en belijning als binnen-proefpersoon variabelen, en 12 herhalingen per cel.

3 RESULTATEN

Zoals verwacht sturen ervaren bestuurders beter dan onervaren bestuurders. De data laten zien dat ervaren bestuurders een lagere variatie in laterale positie [$F(1,38)=29, p<0.001$], laterale snelheid [$F(1,38)=42, p<0.001$] en rotatiesnelheid [$F(1,38)=58, p<0.05$] hadden dan onervaren bestuurders (Fig. 9 a,b,c).

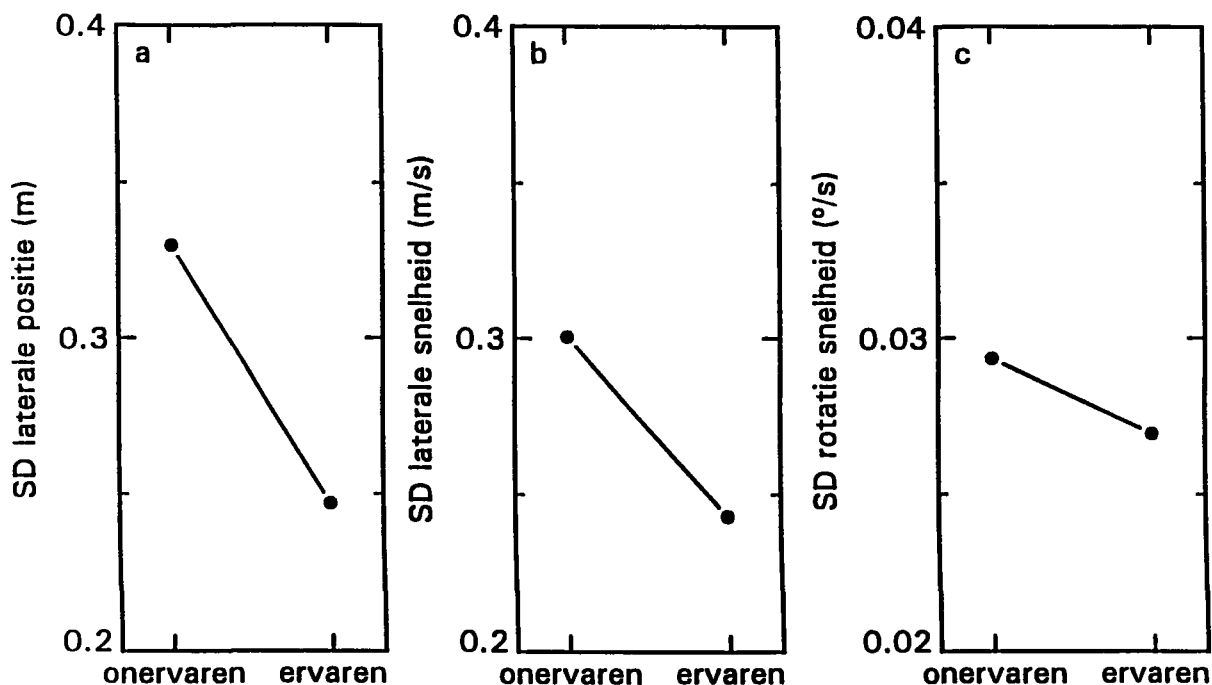


Fig. 9 Het effect van ervaring op de variatie in laterale positie a, de variatie in laterale snelheid b, en de variatie in rotatiesnelheid c.

3.1 Belijning

De drie typen wegbelijning (volledig, proximaal en distaal) hadden effect op de laterale positie [$F(2,76)=59, p<0.001$], laterale snelheid [$F(2,76)=28, p<0.001$] en rotatiesnelheid [$F(2,76)=79, p<0.001$] (Fig. 10 a,b,c).

Fig. 10 a toont dat vergeleken met volledige belijning de variatie in laterale positie met proximale belijning lager was [$F(1,38)=8.9, p<0.05$], en met distale belijning hoger [$F(1,38)=109, p<0.001$] was. Vergeleken met volledige belijning was de variatie in laterale snelheid hoger in de conditie met proximale belijning [$F(1,38)=42.3, p<0.001$] (Fig. 10 b). De variatie in rotatiesnelheid was, vergeleken met de volledige belijning, hoger met proximale belijning [$F(1,38)=82.9, p<0.001$] en lager met distale belijning [$F(1,38)=12.4, p<0.01$] (Fig. 10 c).

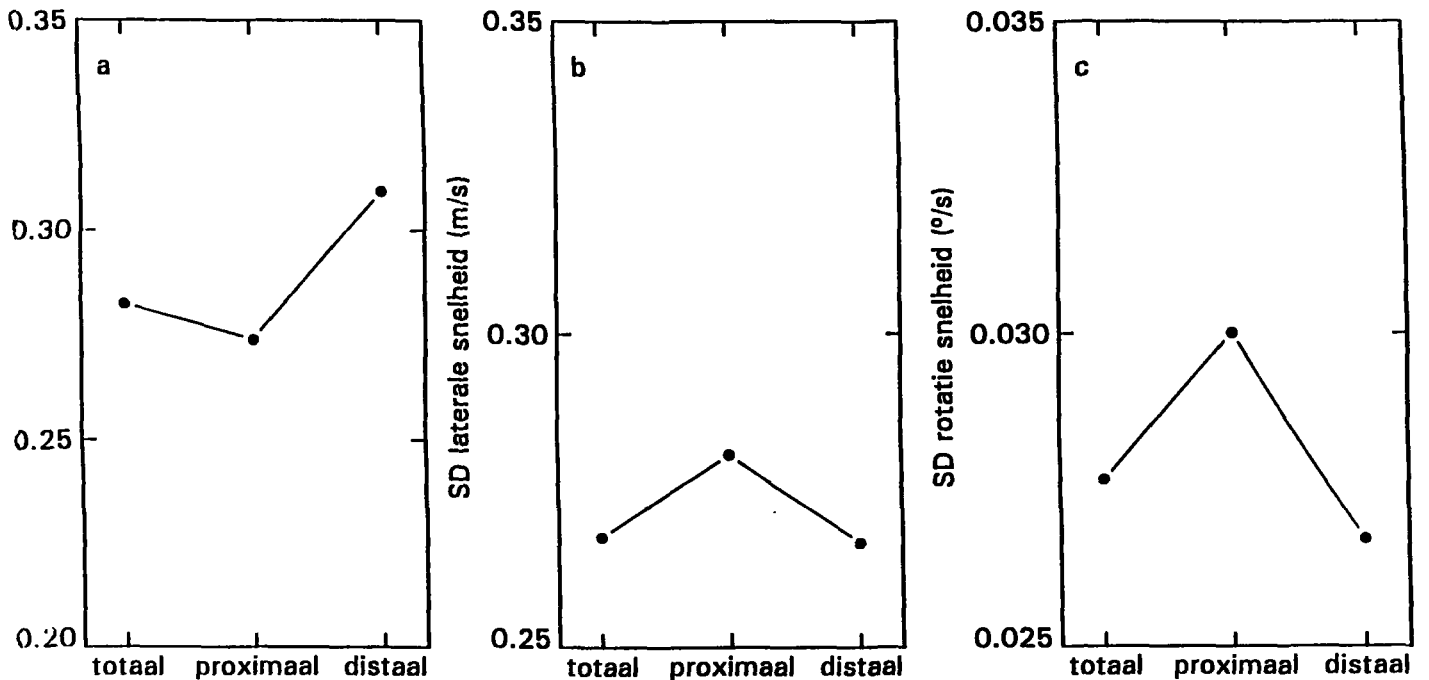


Fig. 10 Het effect van de verschillende soorten belijning op de variatie in laterale positie a, de variatie in laterale snelheid b en de variatie in rotatiesnelheid c.

Met betrekking tot laterale snelheid was er een significante interactie tussen ervaring en belijningscondities [$F(2,76)=4.8$, $p<0.05$]. Fig. 11 a laat zien dat ervaren bestuurders, vergeleken met de volledige belijning, bij proximale belijning significant minder extra variatie in laterale snelheid hebben dan de onervaren bestuurders [$F(1,38)=10.5$, $p<0.01$]. Net als voor de onervaren bestuurders [$F(2,38)=12.1$, $p<0.001$] was de variatie in laterale snelheid voor ervaren bestuurders bij proximale belijning significant hoger dan bij volledige of distale belijning [$F(2,38)=18.0$, $p<0.001$] (Fig. 11 a). Ook was er een interactie met betrekking tot de variatie in rotatiesnelheid [$F(2,6)=3.3$, $p<0.05$]. Fig. 11 b laat zien dat alleen de ervaren bestuurders dan met volledige belijning met distale belijning significant minder variatie in rotatiesnelheid vertoonden [$F(1,38)=5.9$, $p<0.05$]. Het effect van proximale belijning was op deze variabele voor beide groepen gelijk; in de omgeving met onderbroken belijning hadden de ervaren bestuurders significant minder variatie in laterale positie [$F(1,38)=32.5$, $p<0.001$] en laterale snelheid [$F(1,38)=27.6$, $p<0.001$] dan de onervaren proefpersonen (Fig. 11 a,b).

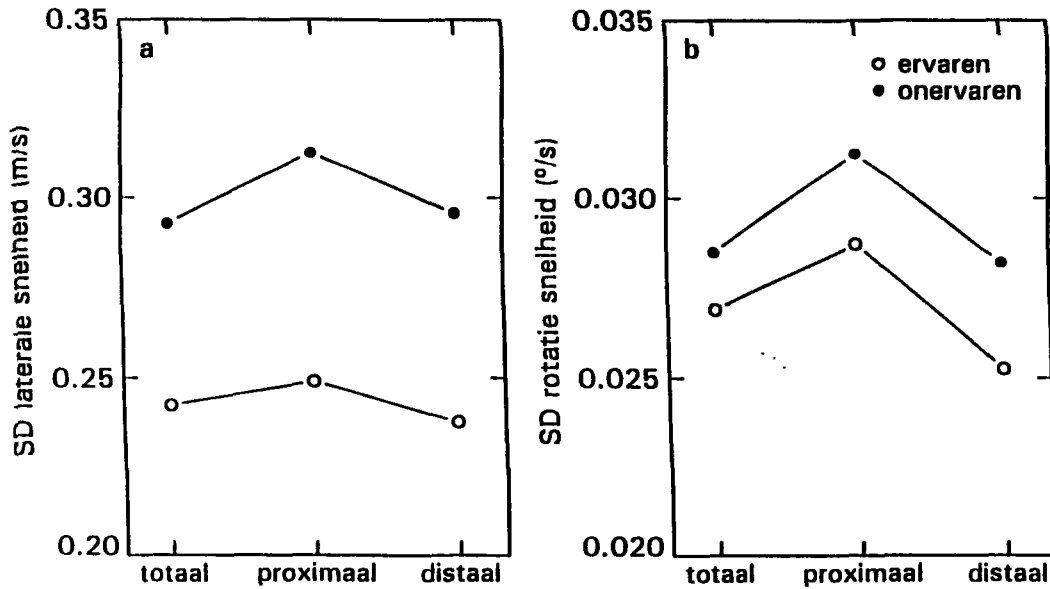


Fig. 11 De variatie in laterale snelheid a en de variatie in rotatiesnelheid b als functie van ervaring en het soort belijning.

3.2 Objecten

Indien er objecten in de scene aanwezig waren, hadden de bestuurders minder variatie in laterale positie [$F(1,38)=11$, $p<0.005$] en meer variatie in rotatiesnelheid [$F(1,38)=11$, $p<0.05$] (Fig. 12 a,b). Voor wat betreft rotatiesnelheid was er een significante interactie met fixatie.

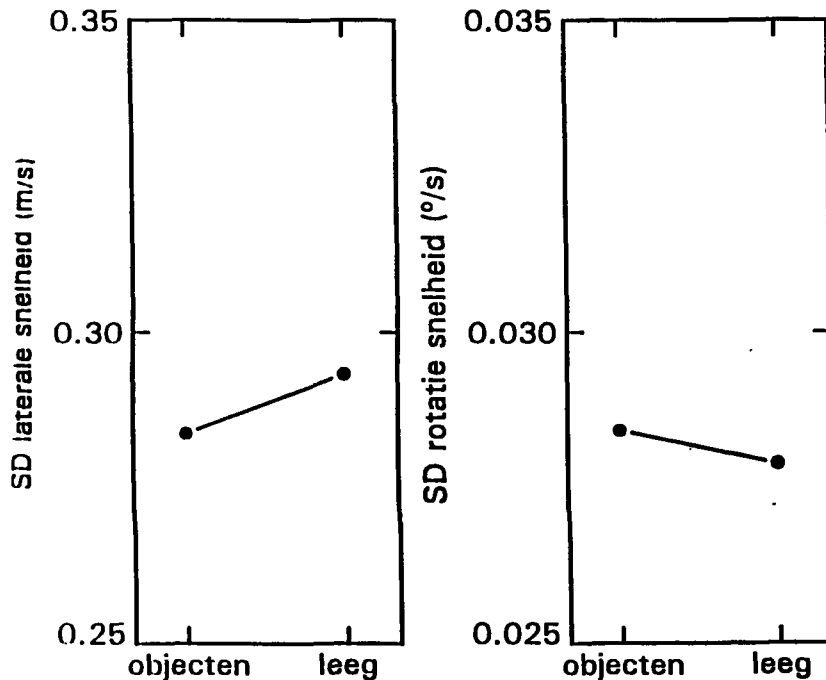


Fig. 12 Het effect van de aanwezigheid van objecten op de variatie in laterale positie a en de variatie in rotatiesnelheid b.

De data lieten een interactie tussen ervaring en objecten zien [$F(1,38)=4.2$, $p<0.05$]. Fig. 13 laat zien dat de verhoging van de variatie in rotatiesnelheid door de aanwezigheid van objecten in de omgeving voor ervaren bestuurders groter was dan voor onervaren bestuurders.

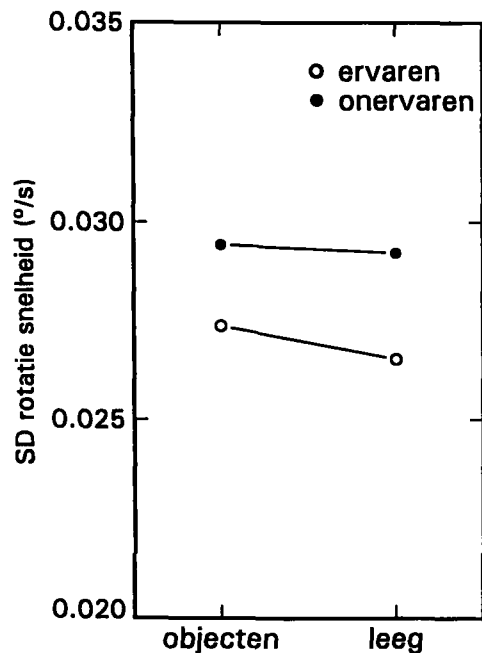


Fig. 13 De variatie in rotatiesnelheid als functie van ervaring en de aanwezigheid van objecten.

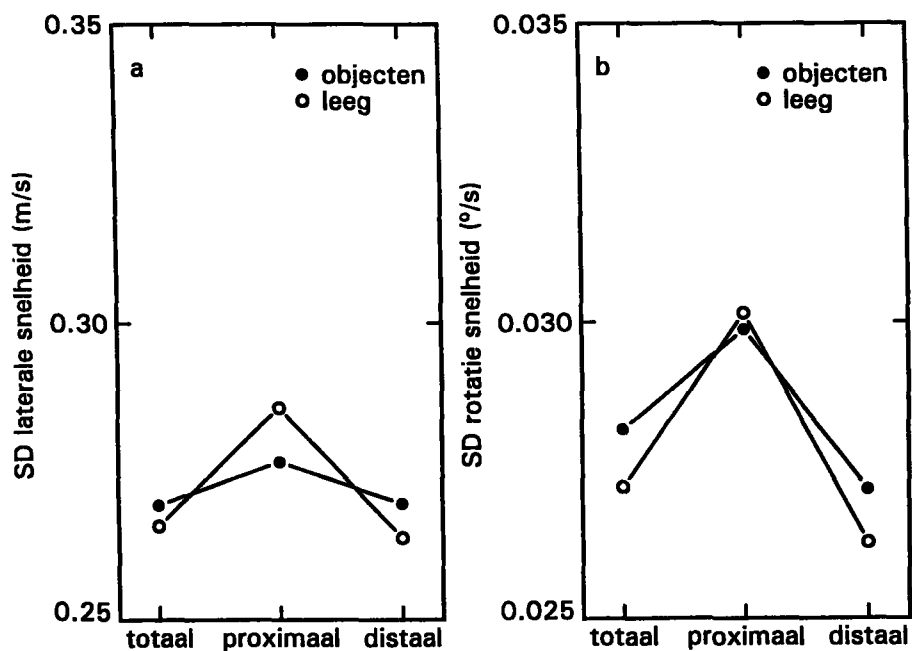


Fig. 14 De variatie in laterale snelheid a en rotatiesnelheid b als functie van het soort belijning en de aanwezigheid van objecten.

Alleen in de proximale belijningsconditie waren bestuurders bij aanwezigheid van objecten beter in staat hun variatie in laterale en rotatiesnelheid te beperken [$F(2,76)=9.7, p<0.01$] en [$F(2,76)=9.6, p<0.001$]. Deze interacties worden getoond in Fig. 14 a en b.

3.3 Fixatie

Zowel de variatie in laterale snelheid als de variatie in rotatiesnelheid werden lager indien op het punt op de kruising van weg en horizon werd gefixeerd [$F(1,38)=48, p<0.001$] en [$F(1,38)=41, p<0.001$] (Fig. 15 a,b).

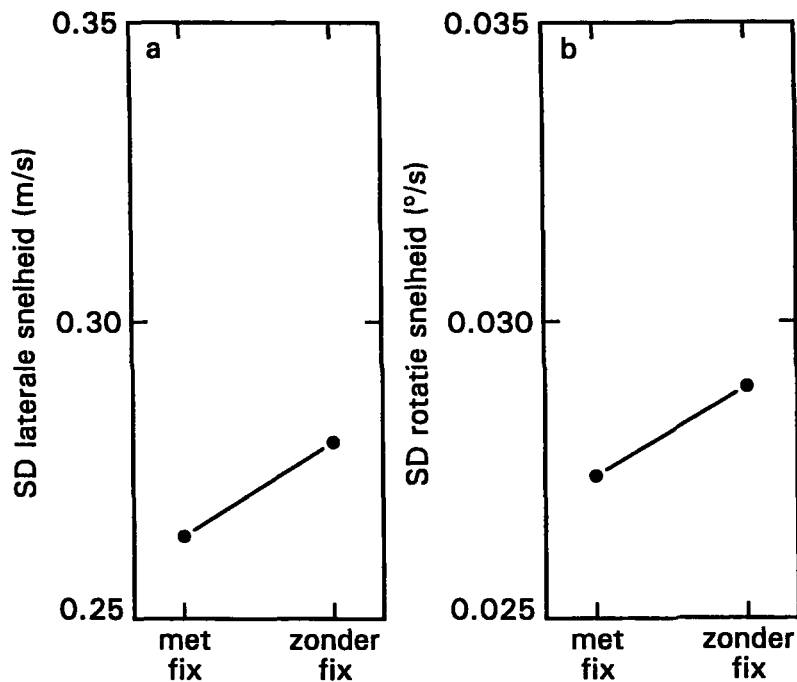


Fig. 15 Het effect van de aanwezigheid van een fixatiepunt op de variatie in laterale snelheid a en rotatiesnelheid b.

Een interactie tussen ervaring en het fixatiepunt (Fig. 16) liet zien dat onervaren bestuurders door aanwezigheid van het fixatiepunt hun laterale snelheidsvariatie relatief beter konden beperken [$F(1,38)=8.9, p<0.01$].

Een interactie tussen belijning en fixatie [$F(2,76)=8.8, p<0.01$] liet zien dat indien de bestuurders op het kruispunt van weg en horizon fixeerden dit vooral de variatie in rotatiesnelheid met proximale belijning verminderde [$F(1,38)=28.5, p<0.001$]. Deze vermindering was kleiner bij volledige belijning [$F(1,38)=16.2, p<0.005$] en distale belijning [$F(1,38)=8.3, p<0.01$] (Fig. 17).

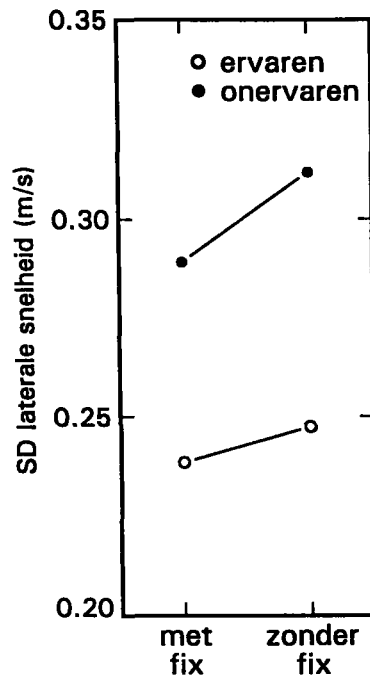


Fig. 16 De variatie in laterale snelheid als functie van ervaring en de aanwezigheid van een fixatiepunt.

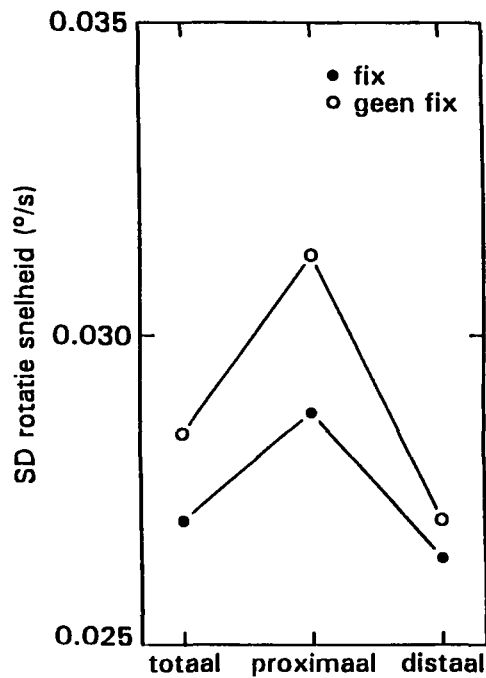


Fig. 17 De variatie in rotatiesnelheid als functie van de soort belijning en de aanwezigheid van een fixatiepunt.

Indien er objecten in de omgeving aanwezig waren verminderde de variatie in rotatiesnelheid als werd gefixeerd op het fixatiepunt [$F(1,38)=4.4$, $p < 0.05$], zie Fig. 18.

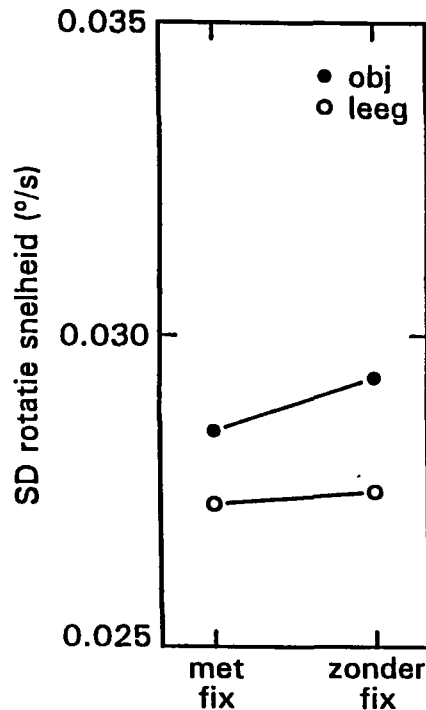


Fig. 18 De variatie in rotatiesnelheid als functie van de aanwezigheid van objecten en een fixatiepunt.

3.4 Stippellijnen

In de omgeving met stippellijnen bleek alleen de *hoeveelheid* lijn van invloed op de prestatie van de bestuurders. Er werd dus geen effect gevonden van de hoeveelheid flow in de lijn. Fig. 19 (a,b) laat zien dat de variatie in laterale positie [$F(1,38)=11.1$, $p < 0.005$] en laterale snelheid [$F(1,38)=10.4$, $p < 0.005$] verminderde als de hoeveelheid lijn in de onderbroken lijn groter was. Ervaren bestuurders hadden in de omgeving met stippellijnen minder variatie in laterale positie [$F(1,38)=32.5$, $p < 0.001$] en laterale snelheid [$F(1,38)=27.6$, $p < 0.001$] dan de onervaren proefpersonen (Fig. 20 a,b).

3.5 Hogere-orde interacties

Een interactie tussen ervaring, belijning en objecten op de laterale positie variatie [$F(2,76)=3.5$, $p < 0.05$], liet zien dat de aanwezigheid van omgevingsobjecten de variatie in laterale positie verlaagt behalve voor ervaren proefpersonen in de proximale belijnings conditie (Fig. 21 a). Ook de variatie in laterale snelheid was significant voor deze conditie [$F(2,76)=3.3$, $p < 0.05$]. Fig. 21 b laat zien dat alleen onervaren proefpersonen een toename in de variatie van laterale snelheid vertoonden bij afwezigheid van objecten in de proximale belijningsconditie.

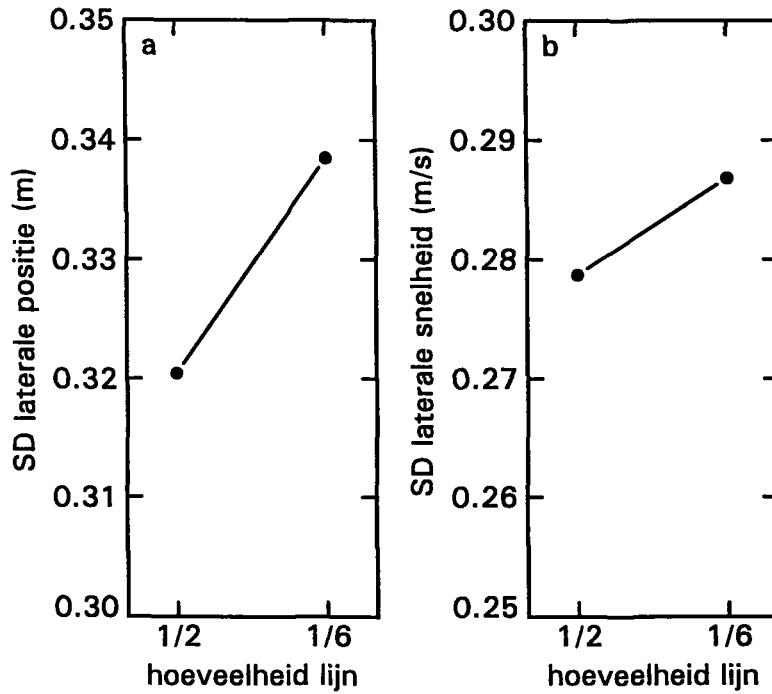


Fig. 19 Het effect van onderbroken wegbelijning op de variatie in laterale positie a en de variatie in laterale snelheid b.

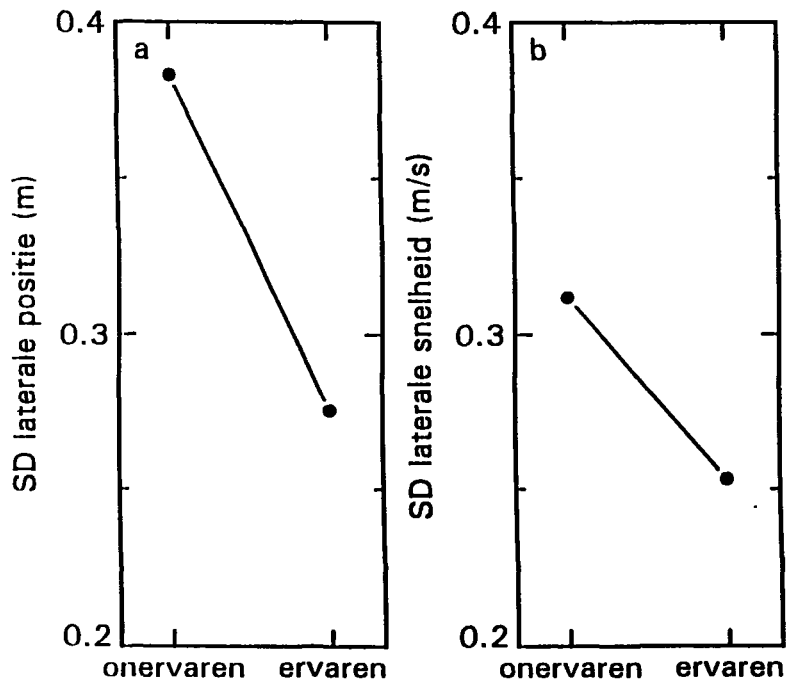


Fig. 20 De variatie in laterale positie a en de variatie in laterale snelheid b als functie van ervaring op een weg met onderbroken belijning.

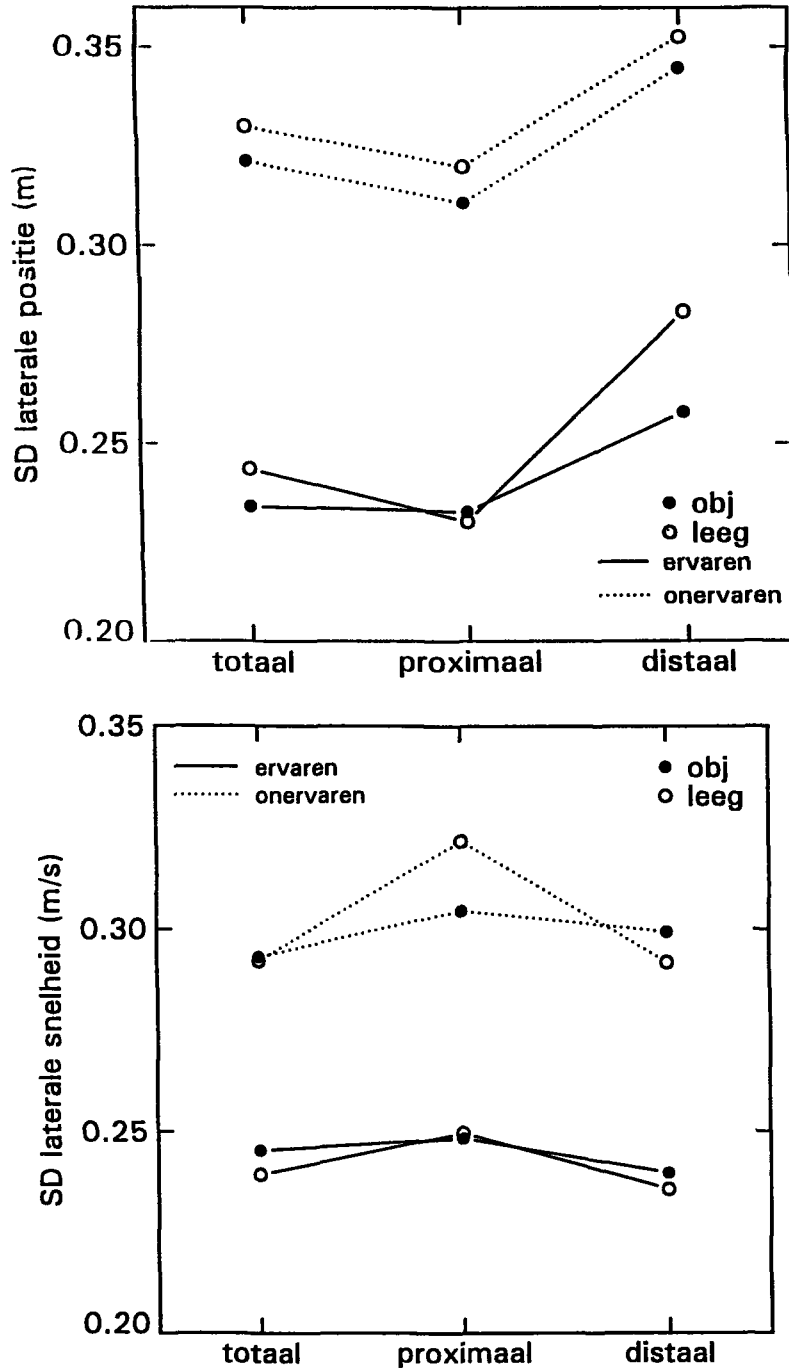


Fig. 21 De variatie in laterale positie a en laterale snelheid b als functie van ervaring, de soort belijning en de aanwezigheid van objecten.

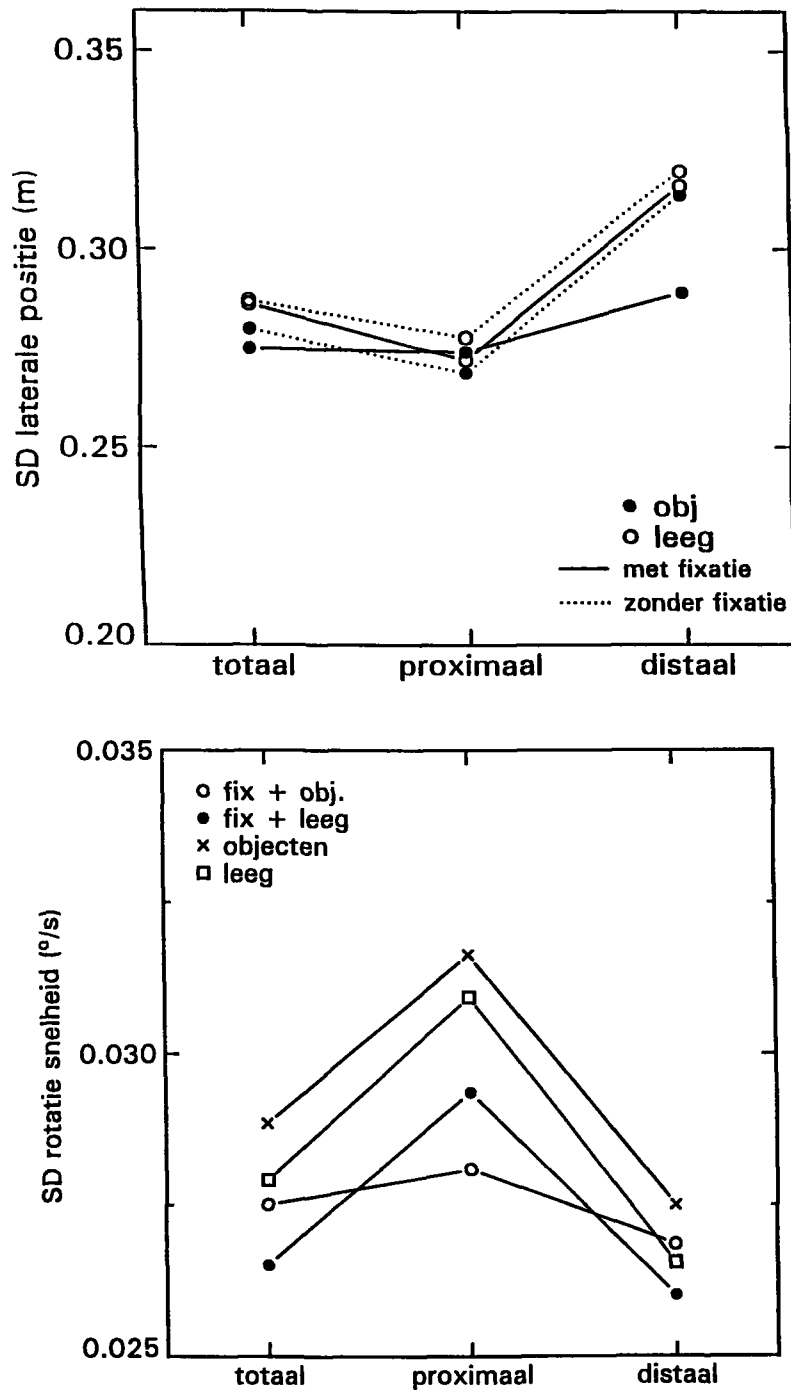


Fig. 22 De variatie in laterale positie a en rotatiesnelheid b als functie van de soort belijning, de aanwezigheid van objecten en de aanwezigheid van een fixatiepunt.

Ook de interactie tussen belijning, objecten en fixatie vertoonde een significant effect op de laterale positie variatie [$F(2,76)=3.7, p<0.05$]. Fig. 22 a laat zien dat belijningseffecten op de laterale positie variatie, i.e. een kleine afname bij proximale belijning en een forse stijging bij distale belijning vrijwel verdwenen bij aanwezigheid van objecten met een fixatiepunt. De variatie in rotatiesnelheid [$F(2,76)=4.5, p<0.05$] (Fig. 22 b) was ook significant in deze conditie. Fig. 22 b laat zien dat de belijningseffecten op de variatie in rotatiesnelheid, i.e. een forse verhoging van de variatie in rotatiesnelheid in de proximale belijningsconditie en een kleine verlaging hiervan in de distale belijningsconditie niet gold in de aanwezigheid van objecten met een fixatiepunt.

4 DISCUSSIE

Uit de resultaten blijkt dat ervaren bestuurders beter in staat zijn de variatie in laterale positie, laterale snelheid en rotatiesnelheid te beperken dan de onervaren bestuurders (Fig. 9 a,b,c). Hiermee worden de resultaten van de experimenten van Riemersma (1982, 1983) bevestigd. De huidige bevindingen duiden er voorts op dat het koershouden op een rechte weg in de gebruikte fixed-base rijnsimulator globaal gezien overeenstemt met het gedrag in een veldexperiment met een geïnstrumenteerde auto.

4.1 Effecten van verschillende soorten wegbelijning

De plaats waar de wegbelijning zichtbaar is, en het soort stippellijn dat is gebruikt, heeft een duidelijk effect op de stuurprestatie. De effecten worden voor elke afhankelijke variabele apart besproken.

4.1.1 Laterale positie

De variatie in laterale positie is, vergeleken met volledige belijning, in de omgeving met distale belijning hoger (Fig. 14 a). Dit bevestigt het vermoeden dat de waarneming van laterale positie achteruitgaat met een toename van de optische afstand tot de lijn. De laterale positie kan worden afgeleid uit de oriëntatie van de wegbelijning ten opzichte van de horizon en uit de horizontale positie van het meest nabije gedeelte van de belijning ten opzichte van bijvoorbeeld de motorkap. De variatie in laterale positie is, vergeleken met volledige belijning, lager in een omgeving met proximale belijning (Fig. 14 a). Gezien de gelijke lengte (wat betreft visuele hoek) van de proximale en distale belijning, mag je verwachten dat de oriëntatie van deze lijnstukken even goed kan worden waargenomen. Het grote verschil in laterale positievariatie met proximale en distale belijning suggereert dat laterale positie niet uit de oriëntatie van de wegbelijning wordt waargenomen, maar vooral uit de horizontale positie van de wegbelijning vlak voor de motorkap. Deze strategie heeft als voordeel dat ook op niet-rechte wegen de laterale positie op dezelfde wijze kan worden waargenomen. De oriëntatie van de wegbelijning geeft op dit soort wegen informatie over het wegverloop.

Manipulatie van de lengte en hoeveelheid onderbrekingen van onderbroken belijning, liet zien dat de variatie in laterale positie groter werd naarmate de hoeveelheid lijn afnam (b.v. van een 3-3 naar 1-5 patroon, waarbij de hoeveelheid lijn met een factor 3 afneemt). De waarschijnlijke verklaring is dat telkens als een lijnelement volledig achter de motorkap was verdwenen de optische afstand tot het begin van het volgende lijnelement relatief groot was. Dit effect wordt sterker naarmate de hoeveelheid lijn in de onderbroken wegbelijning afneemt. Op grond van de al eerder besproken resultaten van Bouma e.a. (1968), kunnen we aannemen dat de oriëntatie van een onderbroken lijn even goed kan worden waargenomen als de oriëntatie van een niet-onderbroken lijn. Het voorgaande geeft opnieuw een aanwijzing dat de laterale positie niet uit de oriëntatie van belijning, maar uit de laterale positie van het meest nabije deel van de belijning wordt afgeleid.

4.1.2 Laterale snelheid

De variatie in laterale snelheid was, vergeleken met volledige belijning, gelijk in een omgeving met distale belijning, maar hoger in een omgeving met proximale belijning (Fig. 14 b). Doordat bewegingsperceptie bij de mens op een afstandsonafhankelijke manier in het zenuwstelsel is geïmplementeerd (Van de Grind e.a., 1992), kan de bewegingsparallax in de wegbelijning over een groot afstandsbereik met gelijkblijvende nauwkeurigheid worden waargenomen. Dit verklaart de onveranderd lage variatie in laterale snelheid bij distale belijning. De variatie in laterale snelheid bleek echter verhoogd indien de belijning alleen in het proximale deel van de omgeving aanwezig was. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de wegbelijning weliswaar in twee gelijke delen is opgedeeld wat de optische hoek betreft, maar dat in het gebied rond de fovea, waar het distale gedeelte van de lijn wordt geprojecteerd, het aantal receptoren en bewegingsdetectoren veel groter is dan in de periferie. Dit grotere aantal detectoren vergemakkelijkt waarschijnlijk het waarnemen van de lijnbeweging.

De hogere variatie in laterale snelheid in de omgeving met proximale wegbelijning kan worden vergeleken met een lagere variatie in laterale positie in deze omgeving. Dit wijst erop dat de laterale translatie niet werd waargenomen door het vergelijken van twee statische laterale posities.

De variatie in laterale snelheid in een omgeving met onderbroken wegbelijning nam toe als de hoeveelheid lijn afnam (Fig. 19 a,b). De bewegingsparallax als gevolg van een laterale translatie is alleen goed zichtbaar in de doorgetrokken lijnstukken van de onderbroken belijning. Als de hoeveelheid lijn afneemt zal ook de informatie over de laterale translatie afnemen en wordt de variatie in laterale snelheid hoger. De perceptie van de laterale translatie werd niet verstoord door een toename van de hoeveelheid expanderende flow (door de stippellijnen vaker te onderbreken, zonder de verhouding lijn/onderbreking te veranderen).

4.1.3 Rotatiesnelheid

De variatie in rotatiesnelheid was, vergeleken met volledige belijning, hoger in een omgeving met proximale belijning en lager in een omgeving met distale belijning (Fig. 14 c). De verhoogde variatie met proximale belijning en een lagere variatie met distale belijning is in overeenstemming met de gedachte dat de rotatie van het voertuig het beste waarneembaar is

uit de beweging van punten in het distale deel van de omgeving, waar de expanderende flow als gevolg van translaties nagenoeg afwezig is.

Het onderbreken van de wegbelijning had geen invloed op de variatie in rotatiesnelheid. Dit ondersteunt de resultaten van het experiment van Riemersma (1979b), waarin de perceptie van laterale translatie en rotatie in een expanderend flowveld werd onderzocht. Hier werd geen verschil gevonden in de perceptie van de rotatiecomponent in een expanderend flowveld tussen lijn en random dot stimuli. Door de lage expansiesnelheid van punten bij de horizon kan de rotatiecomponent steeds goed worden waargenomen.

4.1.4 Samenvatting van de belijningseffecten

Refererend naar het bovenstaande kunnen we concluderen dat bestuurders hun laterale positie vooral door de horizontale positie van de wegbelijning vlak voor het voertuig waarnemen. De laterale translatie kan over een groot afstandsbereik worden waargenomen, waarbij de informatie in het distale deel van het visuele veld het belangrijkste is. Informatie over de rotatie van het voertuig wordt vooral ver voor het voertuig waargenomen.

4.2 Rotaties

4.2.1 Visuele informatie

Er zijn een aantal aanwijzingen dat de visuele informatie over de rotatie van het voertuig een ondergeschikte rol speelt bij het sturen op een rechte weg.

Ten eerste wordt de variatie in rotatiesnelheid groter als er objecten in de omgeving aanwezig zijn (Fig. 12 b), en kan de aanwezigheid van objecten de variatie in rotatiesnelheid in de proximale belijningsconditie niet verminderen (Fig. 14 b). Objecten die ver voor het voertuig zichtbaar zijn dragen veel informatie over de rotatiecomponent, zeker als er alleen proximale belijning is aangebracht. De gedachte dat de variatie van een afhankelijke variabele laag is in een omgeving met veel informatie over deze variabele gaat hier dus niet op, omdat deze kennelijk op indirecte wijze wordt gecontroleerd.

Een tweede aanwijzing is het effect van een fixatiepunt op het kruispunt van weg en horizon. Als de bestuurder hierop fixeert worden de visuele effecten van de voertuigrotatie door middel van tegengestelde oogrotaties gecompenseerd. Hierdoor blijven alleen expansie en parallax zichtbaar. Fig. 15 b laat zien dat de variatie in rotatiesnelheid verminderde als op het kruispunt van weg en horizon werd gefixeerd, ook in aanwezigheid van objecten (Fig. 18). Fig. 17 laat zien dat in een omgeving met proximale belijning de variatie in rotatie verminderde als werd gefixeerd, maar alleen als er objecten in de omgeving aanwezig waren (Fig. 22 b). Kennelijk is er naast informatie over de rotatie van het voertuig ook nog andere informatie in de objecten zichtbaar.

Uit het feit dat de variatie in rotatiesnelheid verhoogd was als er veel informatie over de voertuigrotatie in het CGI aanwezig was, en verlaagd was als de visuele effecten van een voertuigrotatie door middel van een oogrotatie werden gecompenseerd, kan worden afgeleid

dat de rotatie van het voertuig niet aan de hand van de visuele effecten van voertuigrotaties wordt gecontroleerd.

Fig. 15 a laat zien dat de bestuurders minder variatie in laterale snelheid vertoonden als zij op het kruispunt van weg en horizon fixeerden. De meest voor de hand liggende verklaring hiervoor is dat door de compensatoire oogbewegingen de parallaxbeweging in de wegbelijning zichtbaar is zonder dat deze verstoord wordt door de translaties die door de rotaties worden gegenereerd. Fig. 14 a laat zien dat objecten de variatie in laterale snelheid in de proximale belijningsconditie verminderen. Kennelijk is er in de parallaxbeweging van objecten ver voor het voertuig nog informatie over de laterale translatie aanwezig. Dit is te begrijpen doordat de snelheid waarmee punten bewegen in een flowveld met expansie of parallax anders verlopen met de afstand. Expanderende bewegingen nemen af met het *kwadraat* van de afstand, terwijl parallaxbewegingen *lineair* afnemen. Dit betekent dat ver voor het voertuig de parallax als gevolg van een laterale translatie groter is dan de expansie als gevolg van een voorwaartse translatie. Hierdoor is bij het rijden op een rechte weg in de flow van objecten ver voor het voertuig de informatie over de laterale translatie van het voertuig relatief beter zichtbaar dan in de flow van nabije objecten. Ook hier geldt dat de parallaxbeweging van de objecten het beste waarneembaar is als wordt gefixeerd, waarmee de versturende bewegingen in het simulatorbeeld als gevolg van een rotatie worden gecompenseerd (Fig. 16).

Indien er objecten in de omgeving waren geplaatst bleek dat de variatie in laterale positie verminderd was (Fig. 12 a). Een verklaring hiervoor kan zijn dat de objecten relatief dicht bij de weg stonden (minimaal slechts 3 meter) waardoor de bestuurders hun laterale positie nauwkeuriger controleerden, of dat de horizontale positie van de zijkant van de blokken, als extra cue naast de horizontale positie van de wegbelijning, kon worden gebruikt bij het controleren van de laterale positie. Fig. 22 a laat zien dat in een omgeving met distale belijning de aanwezigheid van objecten de variatie in laterale positie verminderde, maar dan alleen als er werd gefixeerd. Kennelijk zijn de translaties van het beeld die door de rotaties van het voertuig worden gegenereerd versturend voor de perceptie van de laterale positie. Als wordt gefixeerd worden de rotaties uitgefilterd en is op het netvlies de horizontale positie van de wegbelijning zonder de versturende translaties zichtbaar. Hieruit kan worden afgeleid dat de horizontale positie van de wegbelijning *op het netvlies* van belang is bij de perceptie van de laterale positie, en niet de horizontale positie van de wegbelijning *ten opzichte van de motorkap*. Immers, het maakt voor de horizontale positie van de wegbelijning ten opzichte van de motorkap niet uit of wordt gefixeerd of niet.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat bestuurders hun voertuig vooral besturen aan de hand van de bewegingsparallax van wegbelijning en omgevings objecten die ontstaan bij een laterale translatie, aangezien de visuele effecten van een voertuigrotatie worden door middel van tegengestelde oogrotaties worden gecompenseerd.

4.2.2 Vestibulaire informatie

Uit de literatuur is bekend dat de reflexmatige oogbewegingen, die voor een rotatiebeweging van de waarnemer compenseren, kunnen worden opgesplitst in twee componenten. De eerste component maakt alleen gebruik van visuele informatie (de 'Opto Kinetic Reflex' (OKR), Carpenter, 1977). De tweede component gebruikt informatie uit de vestibulaire kanalen

('Vestibular Oculomotor Reflex' (VOR), Carpenter, 1977). De OKR en de VOR zijn beide werkzaam in een verschillend frequentiebereik, OKR *tot* frequenties van ± 1 Hz, de VOR *vanaf* ± 1 Hz (Carpenter, 1977). Aangezien dit experiment is uitgevoerd in een fixed-base rijsimulator is vestibulaire informatie over voertuigrotaties afwezig en kan de VOR niet optreden. Hierbij moet worden opgemerkt dat in dit experiment de rotaties van het gesimuleerde voertuig zowel wat betreft frequentie als amplitude groter waren dan dat ze normaal gesproken op een rechte weg voorkomen. Echter, bij heftige voertuigbewegingen, zoals bijvoorbeeld tijdens terreinrijden, zullen deze rotatiefrequenties zeker voorkomen.

Een oplossing voor het gebrek aan vestibulaire informatie in fixed-base rijsimulators zou kunnen zijn dat men, door middel van een laagdoorlaatfilter, alleen rotatiefrequenties lager dan 1 Hz in het simulatorbeeld weergeeft. Hierdoor kunnen de compensatoire oogrotaties volledig op basis van de OKR worden uitgevoerd. Een andere oplossing is het aanbrenge van een fixatiepunt waardoor de bestuurder wordt gedwongen de oogvolgbewegingen actief te maken. Door actief volgen wordt het frequentiegebied waarin kan worden gecompenseerd op basis van visuele informatie vergroot.

Een vergelijkbaar gebrek aan vestibulaire informatie doet zich ook voor bij op afstand bestuurd voertuigen (RPV's). Ook hier maakt de camera rotaties zonder dat de bestuurder op basis van vestibulaire reflexen compensatoire oogbewegingen kan maken. Om dit tegen te gaan zou men de rotatie van de camera aan boord van de RPV kunnen beperken tot frequenties van minder dan 1 Hz (b.v. door middel van gyroscopen), of men zou de bestuurders van RPV's kunnen leren om rotaties zoveel mogelijk oogvolgbewegingen te maken door te fixeren op ver weg gelegen objecten.

4.3 Ervaring en het gebruik van visuele informatie

De interactie tussen ervaring en de aanwezigheid van objecten laat zien dat voor ervaren bestuurders de variatie in rotatiesnelheid als gevolg van de aanwezigheid van objecten relatief meer toenam dan voor de onervaren bestuurders (Fig. 14). Ervaren bestuurders kijken op het kruispunt van weg en horizon en compenseren voor de rotatiecomponent van de voertuigbewegingen. Het kan zijn dat deze bestuurders als ze in een fixed-base rijsimulator in een omgeving rijden waarin de rotatie van het voertuig wordt benadrukt door het aanbrenge van objecten, meer van de rotatieinformatie gebruik gaan maken, en dus slechter gaan presteren.

De interactie tussen ervaring en fixatie laat zien dat onervaren bestuurders, vergeleken met ervaren bestuurders, relatief minder variatie in laterale snelheid vertoonden als ze op het kruispunt van weg en horizon fixeerden (Fig. 16). Dit is in overeenstemming met de bevinding dat onervaren bestuurders dicht voor de motorkap fixeren (Mourant & Rockwell, 1972). Doordat ze gedwongen worden op het kruispunt van weg en horizon te kijken zullen de onervaren bestuurders voor de rotatiecomponent uit de voertuig bewegingen compenseren, waardoor de bewegingsparallax als gevolg van laterale translaties beter zichtbaar wordt.

Het blokkeren van het zicht op het proximale deel van het visuele veld, zoals dat door Riemersma (1982, 1983) werd gebruikt, komt overeen met het aanbrenge van alleen distale belijning in het huidige experiment. Riemersma (1982, 1983) vond, voor zowel ervaren als onervaren bestuurders, geen effect van het wegnemen van het zicht op het proximale deel

van de belijning op de variatie in rotatiesnelheid. In het huidige experiment waren de ervaren bestuurders in de hiermee vergelijkbare distale belijningsconditie relatief beter in staat de variatie in rotatiesnelheid te beperken dan de onervaren bestuurders. Bovendien waren ervaren bestuurders bij distale belijning beter in staat hun rotatiesnelheid te beperken dan in een omgeving met volledige belijning (Fig. 11 b). Mogelijk maken ervaren bestuurders in de distale belijningsconditie zelfs zonder fixatiepunt oogvolgbewegingen door op het kruispunt van weg en horizon te fixeren. Hierdoor is de parallaxinformatie in de distale belijning beter zichtbaar en kan de laterale translatie, en dus de rotatiesnelheid van het voertuig beter worden gecontroleerd. Fig. 11 a laat zien dat ervaren bestuurders inderdaad weinig variatie in laterale snelheid hadden in de omgeving met distale belijning. Onervaren bestuurders hadden in een omgeving met distale of volledige belijning evenveel variatie in laterale snelheid.

In een omgeving met proximale belijning (Fig. 11 a) vertoonden onervaren bestuurders, vergeleken met volledige belijning, relatief meer variatie in laterale positie dan de ervaren bestuurders. Dit gold alleen in een lege omgeving (Fig. 21 b). Kennelijk kunnen onervaren bestuurders hun laterale translatie goed waarnemen aan de hand van de bewegingsparallax in de objecten, en het distale deel van de belijning (Fig. 11 a), maar minder goed in de bewegingen van het proximale gedeelte van de wegbelijning. Een verklaring hiervoor kan zijn dat ervaren bestuurders zijn getraind in het gebruik van deze informatie doordat het zicht op de weg vaak wordt geblokkeerd door een voorligger, waardoor alleen de parallax-beweging van lijnen vlak voor het voertuig beschikbaar is voor het controleren van de laterale translatie.

Fig. 21 a laat zien dat voor ervaren bestuurders de aanwezigheid van objecten de variatie in laterale positie niet verminderde in een omgeving met proximale belijning, in tegenstelling tot de onervaren bestuurders waar wel een vermindering werd gevonden. Kennelijk hebben ervaren bestuurders aan het proximale gedeelte van de wegbelijning al genoeg om hun laterale positie te controleren.

Uit de verschillen tussen ervaren en onervaren bestuurders blijkt dat ervaren bestuurders relatief beter in staat zijn hun laterale positie en snelheid waar te nemen in het proximale deel van de belijning (Fig. 21 a,b). Bovendien maken onervaren bestuurders meer gebruik van de visuele effecten van een voertuigrotatie (Fig. 13, 16).

Men kan de onervaren bestuurders dwingen dezelfde cues te gebruiken als de ervaren bestuurders door alleen de belijning vlak voor het voertuig te benadrukken. Dit kan door alleen lijnen in het proximale gedeelte van de omgeving aan te brengen, of het zicht op de belijning te beperken door een voorligger of door mist of een verte-waas. Bovendien moeten de visuele effecten van een voertuigrotatie worden gecompenseerd. Zoals eerder is aangegeven, kan dit door een fixatiepunt op het kruispunt van weg en horizon aan te brengen, door de rotatiefrequentie van het gesimuleerde voertuig te beperken tot maximaal 1 Hz, of door een combinatie van deze twee. Het fixatiepunt kan tevens dienen om de onervaren bestuurders te leren 'door hun voorligger heen te kijken' naar de verkeerssituatie aldaar.

5 CONCLUSIE

Uit de resultaten blijkt dat bij het sturen op een rechte weg de door een laterale translatie gegenereerde bewegingsparallax de belangrijkste bron van visuele informatie is. Als de informatie over de rotatie van het voertuig wordt benadrukt door de aanwezigheid van objecten in de buurt van de horizon, en er is geen fixatietaak, dan vermindert de stuurprestatie: de variatie in laterale positie, laterale translatie en rotatiesnelheid wordt groter. Daarentegen, als voor de voertuigrotatie door middel van tegengestelde oogrotaties wordt gecompenseerd door middel van een fixatietaak, is de bestuurder beter in staat de variatie in laterale positie, laterale snelheid en rotatiesnelheid te beperken. Normaal gesproken is geen fixatietaak nodig om de ogen te laten fixeren, omdat vestibulaire reflexen de oogrotaties ondersteunen. Uit de literatuur zijn twee mechanismen bekend waarmee voor rotaties compenserende oogbewegingen reflexmatig worden ondersteund; de Opto Kinetische Reflex (OKR), en de Vestibulo Oculomotor Reflex (VOR). In een fixed-base rijnsimulator is vestibulaire informatie over voertuigrotaties afwezig en kan de VOR niet optreden. Door actief volgen van een fixatiepunt wordt de OKR ondersteund en worden de voertuigrotaties over een groter frequentiegebied gecompenseerd. Het gevolg is dat de parallaxbeweging minder wordt verstoord door optic flow die door voertuigrotaties wordt gegenereerd, wat leidt tot een betere stuurprestatie. Op grond van deze uit de literatuur bekende gegevens wordt gesuggereerd dat in een fixed-base rijnsimulator de rotatiefrequentie van het gesimuleerde voertuig beperkt zou kunnen worden tot de frequenties die nog door de OKR kunnen worden gecompenseerd (b.v. maximaal 1 Hz). Hierdoor wordt het gebrek aan vestibulaire stimulatie in een fixed-base rijnsimulator ondervangen, en zal de rijprestatie verbeteren.

De effecten van manipulaties van de wegbelijning op het rijgedrag bleken in grote lijnen in overeenstemming met de hypothese die op basis van de theoretische analyse in de inleiding werd geformuleerd. Het blijkt dat de laterale positie uit de horizontale positie van de wegbelijning vlak voor het voertuig wordt waargenomen. De laterale translatie van het voertuig is onafhankelijk van de afstand in de parallaxbewegingen van de wegbelijning waarneembaar, waarbij er in het distale deel van de omgeving relatief veel parallaxinformatie kan worden waargenomen. De rotatie van het voertuig is vooral bij de horizon goed waarneembaar, maar wordt niet gebruikt bij het besturen van het voertuig op een rechte weg.

6 AANBEVELINGEN

De resultaten van het onderzoek laten zien dat onervaren bestuurders, vergeleken met ervaren bestuurders, relatief meer gebruik maken van de visuele effecten van de rotatiebewegingen van het voertuig. Daardoor hadden onervaren bestuurders relatief veel baat bij een fixatiepunt, waardoor voor de rotatie wordt gecompenseerd en de bewegingsparallax als gevolg van laterale translaties beter kan worden waargenomen. Daarnaast bleken onervaren bestuurders minder goed in staat hun laterale positie en laterale snelheid waar te nemen in het proximale gedeelte van de wegbelijning.

Hieruit blijkt dat onervaren bestuurders het beste kunnen worden getraind in het rijden op een rechte weg met een CGI waarin de nadruk ligt op de bewegingsparallax van de belijning

vlak voor het voertuig. Dit kan bijvoorbeeld worden getraind in een omgeving met alleen wegbelijning vlak voor het voertuig en een fixatiepunt op het kruispunt van weg en horizon, of een wat complexere database met een voorligger (met doorzichtige ruiten) en een fixatiepunt.

REFERENTIES

- Bouma, H. & Andriessen, J.J. (1968). Perceived orientation of isolated line segments. *Vision Research*, 8, 493-507.
- Carpenter, R.H.S. (1977). *Movements of the eyes*. London: Pion Limited.
- Grind, W.A. van de, Koenderink, J.J. & Doorn, A.J. van (1992). Viewing distance invariance of motion detection. *Experimental Brain Research*, 91, 135-150.
- Gibson, J.J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Horst, A.R.A. van der, Janssen, W.H. & Hoekstra, W. (1991). Nieuwe simulatietechnieken voor verkeersonderzoek. *Verkeerskunde*, 42 (12), 30-34.
- Johnston, I.R., White, G.R. & Cumming, R.W. (1973). The role of optical expansion patterns in locomotor control. *American Journal of Psychology*, 86, 311-324.
- Koenderink, J.J. (1986). Optic Flow. *Vision Research*, 26 (1), 161-180.
- Llewellyn, K.R. (1971). Visual guidance of locomotion. *Journal of Experimental Psychology*, 91, 245-261.
- Longuet-Higgins, H.C. & Prazdny, K. (1980). The interpretation of a moving retinal image. *Proceedings of the Royal Society of London*, B 208, 385-397.
- Mourant, R.R. & Rockwell, T.H. (1972). Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers. *Human Factors*, 14 (4), 325-335.
- Riemersma, J.B.J. (1972). *Bepaling en handhaving van een rechte koers; een veldexperiment*. Rapport IZF 1972-C12, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Riemersma, J.B.J. (1979a). *The perception of course and speed during locomotion; a review of some theoretical formulations*. Rapport IZF 1979-C4, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Riemersma, J.B.J. (1979b). *The perception of deviations from a straight course*. Rapport IZF 1979-C6, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Riemersma, J.B.J. (1982). *Perception and control of deviations from a straight course; a field experiment*. Rapport IZF 1982 C-20, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Riemersma, J.B.J. (1983). *The effects of stroboscopic occlusion on maintaining course on a straight road*. Rapport IZF 1983 C-20, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Riemersma, J.B.J. (1987). *Visual cues in straight road driving*. Proefschrift, Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Wagenaar, W.A. (1969). Note on the construction of digram balanced latin squares. *Psychological Bulletin*, 72 (6), 384-386.
- Warren, R. (1976). The perception of egomotion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2, 448-456.
- Warren, W.H. (1988). Perception of Translational Heading From Optic Flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14 (4), 646-660.
- Warren, W.H. (1990). Eye movements and optic flow. *Journal of the Optical Society of America A*, 7 (1), 160-169.
- Warren, W.H. (1991). Perception of Circular Heading From Optic Flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 17, No 1, 28-43.

Soesterberg, 10 oktober 1995



Drs. B. Kappé

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD 95-1128	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TNO-TM 1995 A-56
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 788.1	5. CONTRACT NUMBER A92/KL/307	6. REPORT DATE 10 October 1995
7. NUMBER OF PAGES 44	8. NUMBER OF REFERENCES 21	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Interim
10. TITLE AND SUBTITLE Visuele informatie in rijssimulatoren: koershouden op een rechte weg (Visual information in vehicle simulators: lateral control on a straight road)		
11. AUTHOR(S) B. Kappé and J.E. Korteling		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Human Factors Research Institute Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Director of Army Research and Development Van der Burchlaan 31 2597 PC DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) The Royal Netherlands Army has an increasing need for advice concerning the visual information needed by a driver in a driving simulator in order to perform perceptual-motor parts of the driving task. This knowledge can be used to formulate the CGI-requirements in such a way that the cost-benefit ratio can be improved. In this connection the research project 'Visual information in vehicle simulators' is carried out. The current explorative study investigates the visual information the driver uses while driving on a straight road. First, a theoretical analysis describes the driver's perception of the static (position, orientation) and dynamic (translation, rotation) state of his vehicle from the visual information in the simulator's CGI. Then, in an experiment the information on the lateral position, lateral translation and rotation of the vehicle was manipulated and the effect on the driving behaviour of experienced and inexperienced drivers was measured. The manipulations consisted of the partial removal of the edge lines, intermitting the edge lines, or the addition of a great number of objects in the environment. In order to force inexperienced drivers to employ an 'experienced' viewing strategy, the effect of a fixation mark on the road's vanishing point at the horizon was investigated. The results show that the visual information the drivers use to control their vehicle is motion parallax generated by lateral translations. The visual effects of the rotation of the vehicle are likely to be compensated by an eye rotation in the opposite direction. Inexperienced drivers can be forced to compensate the visual effects of a vehicle rotation by the fixation mark at the vanishing point of the road. In normal driving situations, vestibular information generates reflexive eye rotations that compensate for the vehicle rotations. In a fixed-base driving simulator the vestibular information on vehicle rotation is absent and no compensatory reflexes are generated. By active fixation on the vanishing point of the road the driver is able to reduce the lack of vestibular information in a fixed-base driving simulator. Compared with experienced drivers, the inexperienced drivers are less able to perceive their lateral position and lateral speed in the proximal part of the edge lines. Several visual environments are mentioned to train inexperienced drivers to use this proximal information specifically.		
16. DESCRIPTORS Driving Motion Perception Simulators Vehicle Driving		IDENTIFIERS Heading Perception Optic Flow Visual Information
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)