

Ons brein en het waarnemen van diepte: nieuwe inzichten door een oude illusie

Raymond van Ee* en Frans A.J. Verstraten**

Een lichtbron, bijvoorbeeld de zon, verlicht objecten in onze omgeving. Deze objecten weerkaatsen een deel van dit licht en de daardoor ontstane lichtverdeling wordt via onze ogen ter verwerking aan onze hersenen aangeboden. Soms kunnen, gewild of ongewild, inconsistenties in deze lichtverdeling zitten. De hersenen proberen per definitie een oplossing aan te dragen, en niet zelden ontstaan er dan illusies (gezichtsbedrog). Je ziet iets wat er eigenlijk niet is, maar voor de hersenen is het kennelijk toch een acceptabele oplossing. Net zoals versprekingen iets zeggen over de opbouw van spraak, zeggen visuele illusies wellicht iets over hoe een visuele waar-

neming wordt opgebouwd. In dit artikel bespreken wij hoe een klassieke illusie in het domein van de driedimensionale waarneming inspiratie geeft voor de ontwikkeling van een hersenmodel voor dieptezien. We zullen laten zien hoe de informatie die wordt aangeleverd door verschillende visuele bronnen, wordt geïntegreerd tot waarheidsgetrouwe dieptewaarneming. Inzicht in de wijze waarop ieder van deze bronnen bijdraagt aan dieptewaarneming, is van essentieel belang voor praktische toepassingen. Denk daarbij aan applicaties in de geneeskunde, de luchtvaart, robotica en in 'virtual reality'-technologie.

Inleiding

De meeste dieren, waaronder de mens, hebben twee ogen. De manier waarop deze ogen in het hoofd zijn geplaatst, verschilt nogal tussen soorten. Bij sommige dieren zijn de ogen zijdelings geplaatst, bij andere frontaal.

Deze plaatsing is niet willekeurig. Een voorbeeld van dieren met zijdelings geplaatste ogen zijn prooidieren. Zijdelings geplaatste ogen hebben als voordeel dat het prooidier een breed panorama kan overzien; dat heeft uiteraard overlevingswaarde. Een hongerig gevaar kan immers van alle kanten naderen. Om een indruk te krijgen van diepte in hun omgeving, gebruiken deze dieren informatiebronnen zoals perspectief, schaduw, textuur en relatieve afmeting van voorwerpen. Bij de mens (en bijv. roofdieren) zijn de ogen naar een frontale positie geëvolueerd. We kunnen daardoor niet zo'n groot panorama overzien, maar het biedt een ander groot voordeel. We kunnen namelijk diepte zien, op basis van binoculariteit (bi = twee, oculus = oog). Hoe werkt dat? Als een waarnemer naar een landschap kijkt, staan de meeste voorwerpen afgebeeld op het netvlies van *beide* ogen. Deze afbeeldingen staan echter niet op dezelfde plaats in ieder oog; er zijn verschillen (zie figuur 1).

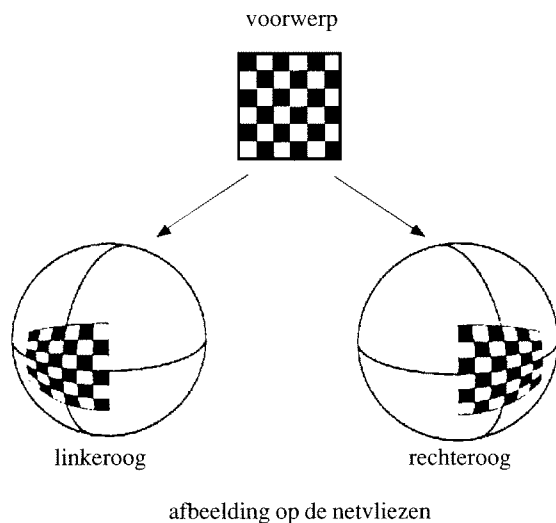
* Onderzoeks-fellow van de Koninklijke Akademie voor Wetenschappen aan het Helmholtz Instituut, vakgroep Fysica van de Mens, Universiteit Utrecht. Verbonden aan de Brain & Cognitive Sciences Group van het MIT in Boston.

** Onderzoeks-fellow van de Koninklijke Akademie voor Wetenschappen aan het Helmholtz Instituut, vakgroep Vergelijkende Fysiologie, Universiteit Utrecht.

Correspondentieadres: Dr. Raymond van Ee, Massachusetts Institute of Technology, Department of Brain & Cognitive Sciences, 79 Amherst Street (E10-120), Cambridge, MA 02139, USA.

E-mail: raymond@psyche.mit.edu

Met dank aan dr. Benjamin T. Backus (Stanford) en prof. dr. Martin S. Banks (Berkeley) voor inspirerende discussies en de samenwerking bij het uitvoeren van de experimenten.



Figuur 1. Een voorwerp in de buitenwereld wordt op verschillende coördinaten in de twee retinae geprojecteerd. Het projectieverschil tussen twee corresponderende punten (bijv. de linkerbovenhoek van het schaakbord) in de verschillende ogen wordt dispariteit genoemd.

Dispariteiten

De projectieverschillen tussen corresponderende punten van de twee netvliesafbeeldingen worden dispariteiten genoemd. Zij worden door de hersenen gebruikt om de afstand van een voorwerp tot de waarnemer te bepalen. De afstandsbeoordeling is te vergelijken met een manier waarop de afstand van dichtbij staande hemellichamen kan worden berekend. In plaats van twee ogen gebruikt een sterrenkundige twee ruimtelijk gescheiden telescopen, om vervolgens via de zogenaamde triangulatiemethode de afstand te berekenen. In tegenstelling tot de sterrenkunde, waar puntbronnen worden afgebeeld, hebben de hersenen te maken met relatief grote voorwerpen of vlakken in het visuele veld, die vaak een oriëntatie of helling ten opzichte van het voorhoofd hebben. Figuur 2 laat zien hoe een hellend vlak een zogenaamde dispariteitsgradiënt veroorzaakt.

Het gebruik van dispariteiten door de hersenen om een dieptebeeld op te bouwen, wordt stereoscopische waarneming genoemd. De stereoscopische driedimensionale reconstructie is gedetailleerder en accurater dan de afzonderlijke monoculaire driedimensionale reconstructies, vooral in omstandigheden waarin de monoculaire informatie over diepteverhoudingen arm is, zoals in struikgewas. Probeer maar eens bramen te plukken met een oog dicht, zonder schrammen op te lopen.

Ruis en signaal

Geen enkel signaalverwerkend systeem, of het nu een antennesysteem of het visuele systeem betreft, is vrij van ruis. De gedetecteerde en verwerkte monoculaire en stereoscopische signalen bevatten intrinsieke ruis. Met ruis bedoelen we signalen die niet bijdragen aan de oplossing van een relevante taak.

In dagelijkse omstandigheden moeten conflicten in visuele signalen routinematig opgelost worden. Modellen over waarnemingsconstructie moeten verklaren hoe dit gebeurt. Vanuit een evolutionair perspectief is het redelijk om te veronderstellen dat de hersenen zich laten leiden door die signalen die nauwkeurig en eenvoudig te meten zijn. In deze bijdrage presenteren wij een model waarin het waarnemingsproduct diepte gebaseerd is op een gewogen gemiddelde van een aantal signalen. In deze weging krijgen de signalen die het meest betrouwbaar zijn, het grootste gewicht.

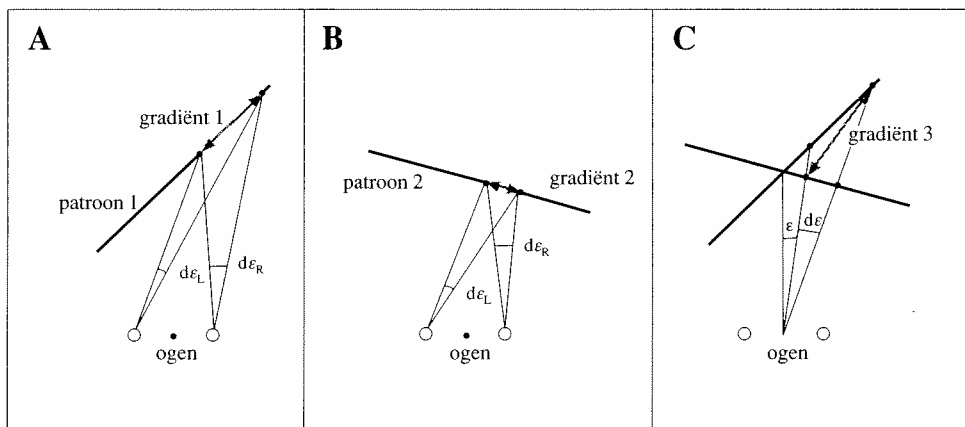
Illusies

De vraag is uiteraard hoe deze gewichtsfactoren te bepalen of meten zijn. Onder dagelijkse omstandigheden is dit moeilijk, maar er is een oplossing. De werking van onze hersenen wordt namelijk niet alleen gereflecteerd in waarheidsgetrouwe waarneming maar ook in visuele illusies. Voor ons brein is een stimulus een routineprikkeling. Het 'weet' in de meeste gevallen immers niet dat een stimulus gepresenteerd is, die tot een illusie leidt. Illusies kunnen daardoor ideale omstandigheden vormen om modellen over waarnemingsconstructie te toetsen.

De dieptecontrast-illusie

Er wordt reeds lang over stereoscopische waarneming nagedacht (zie voor een historisch overzicht Wade, 1998). In de eerste helft van de negentiende eeuw paste Wheatstone (1838) de toenmalige inzichten toe door met stereogrammen op een kunstmatige manier driedimensionale beelden op te wekken. Bij een stereogram (zie figuur 3) krijgt elk oog een verschillend plaatje aangeboden. Je moet het plaatje zien als een combinatie van twee foto's. De ene foto is gemaakt met de camera voor het linkeroog; de andere met de camera voor het rechteroog. Als deze twee foto's gefuseerd worden, leiden de dispariteiten tussen de netvliesafbeeldingen tot een driedimensionaal beeld.

Stereogrammen worden sinds de tijd van Wheatstone toegepast in 3D-cartoons en in wetenschappelijk onderzoek. Tegenwoordig tracht men stereogrammen te ge-



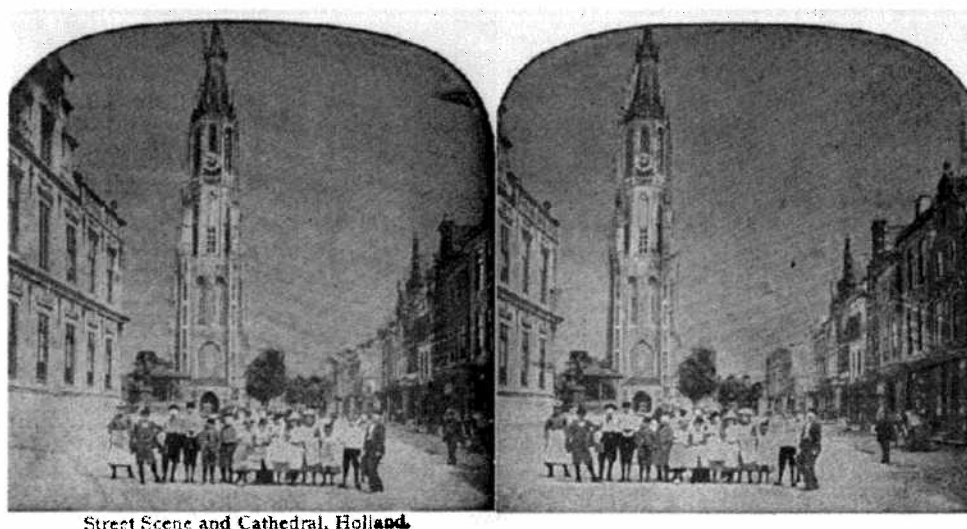
Figuur 2. Een dispariteitsgradiënt ontstaat wanneer een vlak object met een helling ten opzichte van het hoofd gepresenteerd wordt. De opgespannen visuele hoek van een objectelement is groter in het rechteroog ($d\epsilon_R$) dan in het linkeroog ($d\epsilon_L$) wanneer de linkerkant van het object dichterbij staat dan de rechterkant (a). Hetzelfde geldt voor een patroon onder een andere hellingshoek (b). Wanneer deze twee objecten (zoals beschreven in de panelen a en b) in het visuele veld aanwezig zijn, levert elk object een dispariteitsgradiënt op (gradiënten 1 en 2). Er is ook nog een relatieve dispariteitsgradiënt (gradiënt 3) (c).

bruiken in virtual reality-brillen: dat zijn brillen waarvan de glazen vervangen zijn door kleine monitoren die ieder een beeld aan het corresponderende oog aanbieden, zodanig dat de dispariteiten leiden tot diepte. Potentiële toepassingsgebieden voor deze technieken zijn medische operaties of in de cockpit van een vliegtuig, ware het niet dat er een tot voor kort onverklaarde illusie optreedt.

Het probleem is als volgt: als meer voorwerpen in diep-

te worden waargenomen, beïnvloeden deze voorwerpen elkaars waargenomen diepte. Met andere woorden, de waargenomen diepte van het ene voorwerp is afhankelijk van de waargenomen diepte van een ander voorwerp (vgl. Werner, 1937). De waarneming is dan niet waarheidsgetrouw en het behoeft geen betoog dat dit bijvoorbeeld tijdens een medische operatie volstrekt onacceptabel is.

Ter illustratie van de illusie: veronderstel twee zichtba-



Street Scene and Cathedral, Holland.

Figuur 3. Een voorbeeld van een stereofoto van een Nederlandse omgeving. U zult diepte zien wanneer u de twee plaatjes fuseert. De linkerhelft van het stereogram dient daartoe bekeken te worden met het linkeroog, de rechterhelft met het rechteroog. Het fuseren van een stereogram vereist vaak tijd en oefening. Een manier om snel te fuseren, zonder technische hulpmiddelen is de volgende: houd de figuur op twee centimeter van de ogen, zodat het linkerdeel van de figuur gepositioneerd is voor het linkeroog, en het rechterdeel voor het rechteroog. Houd de figuur daar en probeer op ongeduldig te staren en de oogspieren te ontspannen. Vergroot vervolgens de afstand van het stereogram heel langzaam tot de afstand ongeveer dertig centimeter is. Hetzelfde principe voor het genereren van diepte wordt gebruikt in het bekende View-Master-systeem.

re vlakke patronen die evenwijdig staan aan het voorhoofd en die gelijke afstand tot het hoofd hebben. Het ene patroon noemen we de teststrip, het andere de referentiestrip. In figuur 4 staat de conditie waarin alleen de referentiestrip is aangeboden. A1 geeft het frontale aanzicht weer, A2 een bovenaanzicht. In B1 is de teststrip toegevoegd en tegelijkertijd krijgt de referentiestrip een helling. Op grond van de geometrie zou men verwachten dat de waargenomen helling van de referentiestrip en de teststrip onafhankelijk van elkaar zijn; dus dat alleen de referentiestrip met een helling waargenomen zou dienen te worden (zie B2 voor het verwachte 'bovenaanzicht'). Dat is echter niet het geval. Zodra de referentiestrip een dispariteitsgradiënt (helling) heeft, krijgt de teststrip ook een helling. De richting van de helling is tegengesteld aan de richting van de referentiestrip (zie B3 voor een bovenaanzicht van de waargenomen hellingen). Werner (1937) was de eerste die dit fenomeen beschreef en noemde het de binoculaire-dieptecontrast-illusie. Zoals gezegd, een verklaring voor dit fenomeen was er tot voor kort niet.

Op zoek naar een verklaring

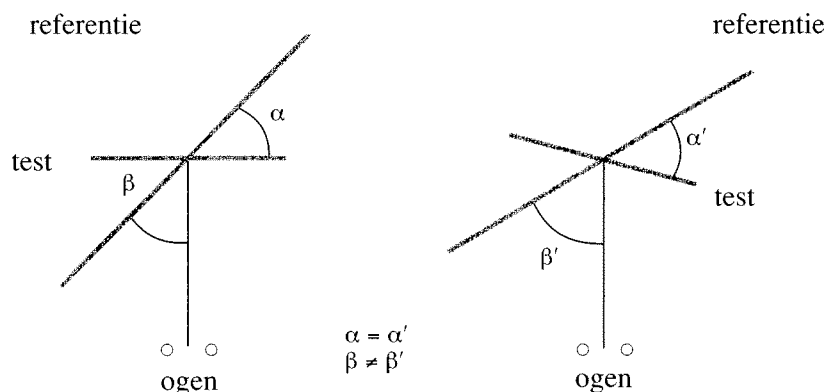
We behandelen nu een verklaring, die later in dit artikel geïntegreerd zal worden in een model. De verklaring is

gebaseerd op de vinding dat een globale dispariteitsgradiënt in het stereoscopische domein nauwelijks tot een waargenomen helling leidt als de monoculaire informatie niet overeenstemt met een hellend vlak (bijv. Howard & Rogers, 1995; Van Ee & Erkelens, 1996). Als er twee verschillende dispariteitsgradiënten in het visuele veld aanwezig zijn, blijken de hersenen heel gevoelig voor het hellingsverschil te zijn (Gillam e.a., 1984). Belangrijk is hier de relatieve dispariteitsgradiënt. Een relatieve dispariteitsgradiënt komt overeen met de hoek tussen twee vlakken (zie figuur 2, c). In figuur 5 is geïllustreerd hoe het behoud van deze hoek en het verlies van absolute helling van twee vlakken leiden tot dieptecontrast (Van Ee & Erkelens, 1996). Elk van de dispariteitsgradiënten verandert in gelijke mate, maar de verschilgradiënt - en daarmee de hoek - blijft behouden.

Het fenomeen dieptecontrast is nooit onderzocht met patronen onder alledaagse omstandigheden. In de wetenschap gebruikte men vrijwel uitsluitend stereogrammen. Zoals vermeld, is er onder dagelijkse omstandigheden niet alleen de retinale dispariteit die specificeert of (en hoeveel) de helling van een patroon bedraagt, maar zijn er ook belangrijke monoculaire informatiebronnen (bijv. perspectief, schaduw, afmeting). Deze bronnen dragen ook informatie over de helling. Als we figuur 4 (B) nader bekijken, zien we dat de informatie

	I	2	3
A geen referentie		bovenaanzicht van individuele patroonhellingen —	bovenaanzicht van waargenomen hellingen —
B inconsistent perspectief in referentie			
C consistent perspectief in referentie			

Figuur 4. Stereogramdemonstratie van de dieptecontrastillusie. In de omschrijving bij figuur 3 wordt uitgelegd hoe u een dieptewaarneming kunt opwekken. Begin met het bekijken van de teststrip, want deze is het gemakkelijkst te fuseren. (a) De teststrip heeft geen dispariteitsgradiënt en wordt waargenomen zonder helling. In (b) wordt de teststrip geflankeerd door een patroon met een dispariteitsgradiënt dat specificeert dat de linkerkant dichterbij is dan de rechterkant. De figuur is zo geconstrueerd dat deze gradiënt een hoek van 40 graden specificeert voor een patroon dat zichtbaar is op een afstand van drie meter (dus ver achter het papier). Maar de waargenomen helling is slechts circa 20 graden. De teststrip wordt nu waargenomen met de rechterkant dichterbij dan de linkerkant; de waargenomen helling is ongeveer -20 graden. Dit is een illusie, omdat de teststrip geen dispariteitsgradiënt heeft. (c) Nu wordt de strip geflankeerd door een referentiestrip waarin de controleerbare monoculaire aspecten van de stimulus in overeenstemming zijn gebracht met de helling die gespecificeerd wordt door de stereoscopische informatie. De waargenomen helling van de referentiestrip is nu ongeveer 35 graden en de rechterkant van de teststrip is minder dichtbij dan in (b) met een helling van ongeveer -5 graden. De magnitude van de illusie is dus kleiner. Merk op dat de verschilhelling tussen de referentiestrip en de teststrip 40 graden is, en dat deze hoek gelijk is aan de helling die gespecificeerd wordt door de dispariteitsgradiënt in de referentiestrip.



Figuur 5. Het stereoscopische deel van het visuele systeem is primair ontwikkeld om relatieve helling (α) accuraat waar te nemen. Het visuele systeem is niet accuraat in het representeren van de globale helling (β , die de helling van de verzameling van alle zichtbare voorwerpen representeert). Behoud van relatieve helling en verlies van accurate waarneming van de absolute helling van twee vlakken, leiden tot dieptecontrast (Van Ee & Erkelens, 1996).

over de helling uit de monoculaire informatiebronnen conflicteert met de informatie uit de stereoscopische informatiebron. De stereoscopische informatie geeft aan dat het patroon een helling heeft, maar de monoculaire informatie geeft aan dat het patroon geen helling heeft. Hoe kan dit conflict nu opgelost worden?

Modulariteit

Onderzoekers die geïnteresseerd zijn in dieptecontrast, hebben nagelaten om de monoculaire informatie in een stereogram in overeenstemming te brengen met de stereoscopische informatie (ook doordat het technisch moeilijk is, zie hieronder); daar zit het grote probleem. Algemeen aangenomen werd dat dispariteitsinformatie de monoculaire informatie teniet zou doen, maar dat blijkt onjuist te zijn. Hoewel modulariteit niets nieuws is in de psychologische literatuur (bijv. Fodor, 1983), wordt meer en meer ondersteuning gevonden voor de idee dat ook bepaalde visuele verwerkingsprocessen modulair werken (bijv. Landy e.a., 1995). Een module kan men zien als een groep neuronen met een specifieke functie. Voor de dieptecontrastillusie betekent dit dat er een module bestaat die hellingen bepaalt op basis van dispariteitsinformatie, een module die hellingen bepaalt op grond van perspectief, enzovoort. De helling zoals die waargenomen wordt door de proefpersoon, is vervolgens een gewogen gemiddelde van de uitkomsten van elk van de modules. De meest betrouwbare signalen krijgen daarbij uiteraard het grootste gewicht. In het navolgende wordt zo'n model ontwikkeld voor waargenomen helling. De belangrijkste randvoorwaarde is dat het visuele systeem veel gewicht toekent aan re-

latieve dispariteitsgradiënten; dieptecontrast is dan een simpel gevolg.

Een model

De waargenomen helling van een vlak patroon in een stereogram is een lineair gewogen combinatie van de hellingen zoals aangegeven door:

- stereoscopische informatie;
- monoculaire informatie die gecontroleerd kan worden in een stereogram;
- residuele monoculaire informatie die niet gecontroleerd kan worden.

Een voorbeeld van een residuele informatiebron is de samentrekking van de ooglenzen tijdens het scherp stellen (focussen); andere voorbeelden zijn de helderheid en scherpheid van de lijnen. In een stereogram zullen deze altijd aangeven dat de waargenomen helling nul is, omdat het stereogram is afgebeeld op een vlak scherm.

De helling (H) van de referentiestrip (R), waargenomen in isolatie (d.w.z. zonder dat het testpatroon aanwezig is), kan met de volgende vergelijking beschreven worden:

$$HR, \text{ geïsoleerd} = WRS \cdot HRS + WRM \cdot HRM + WRF \cdot HRF \quad (1a)$$

Ofwel: de helling van de referentiestrip, gezien in isolatie, is gelijk aan een wegingsfactor vermenigvuldigd met de hellingsinformatie op basis van stereoscopische signalen ($WRS \cdot HRS$), daarbij opgeteld een andere wegingsfactor vermenigvuldigd met de hellingsinformatie

op basis van voorspelbare monoculaire signalen ($w_m \cdot HR_m$), plus een derde wegingsfactor vermenigvuldigd met de hellingsinformatie op basis van oncontroleerbare monoculaire signalen, het residu ($w_r \cdot HR_r$).

Voor het testpatroon (T) in isolatie kan op dezelfde manier de vergelijking worden geschreven:

$$HT, \text{ geïsoleerd} = WTS \cdot HTS + WTM \cdot HTM + WTR \cdot HTR \quad (1b)$$

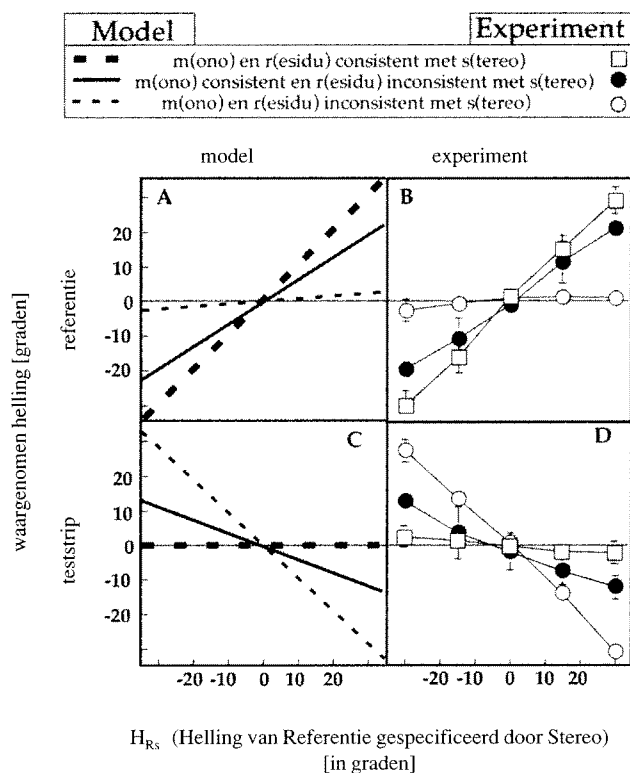
De gewichtsfactoren per vergelijking moeten optellen tot 1. Dus $WRS + WRM + WTR = 1$ en zo ook voor de gewichtsfactoren van WT. Merk op dat nu eenvoudig te verklaren is, waarom in stereogrammen (zie figuur 4, B) de waargenomen helling niet in overeenstemming is met de dispariteitsgradiënt. De monoculaire informatie en

de residuele informatie geven namelijk een helling aan die nul is.

Zoals we nu weten, hangt het dieptecontrast van de waargenomen helling van een patroon af van de aanwezigheid van het andere patroon. Dit komt doordat het visuele systeem de informatie die gebaseerd is op de relatieve dispariteitsgradiënt zwaar laat mee wegen (Van Ee & Erkelens, 1996). Deze H_{rel} is de grootte die de relatieve helling tussen de twee vlakken representeert. In een formule:

$$H_{rel} = HR, \text{ simultaan} - HT, \text{ simultaan} \quad (2)$$

Met andere woorden, de relatieve helling is gelijk aan de helling van het referentiepatroon gegeven de aanwezig-



Figuur 6. Modelvoorspelling en experimentele resultaten. Wanneer de monoculaire en residuele informatiebronnen conflicteren met de stereoscopische informatiebronnen (dunne stippellijn) dan voorspellen de vergelijkingen dat er bijna geen helling wordt waargenomen in de referentiestrip (a) en dat de teststrip met een duidelijke helling waargenomen wordt (c). Dit laatste is dieptecontrast, want objectief heeft de teststrip geen dispariteitsgradiënt. De waargenomen helling in de referentiestrip en het dieptecontrast zijn theoretisch behoorlijk veranderd wanneer de monoculaire informatiebronnen in overeenstemming zijn met de stereoscopische informatiebronnen (doorgetrokken lijn). Maar het dieptecontrast is niet weg. Dit komt doordat er residuele informatiebronnen betrokken zijn bij de reconstructie van de driedimensionale waarneming. Deze bronnen indiceren dat de referentiestrip geen helling heeft. Om ook de residuele conflicterende informatiebronnen in de hellingwaarneming te elimineren, is onderzocht of dieptecontrast optreedt met echte vlakken. Er is dan geen informatieconflict meer (brede stippellijn). Merk op dat het verschil in richtingscoëfficiënt tussen de corresponderende lijnen voor referentiestrip en teststrip behouden is. Dit is de randvoorwaarde die gerepresenteerd werd door H_{rel} . Dat de experimenteel gevonden waarden goed overeenstemmen met het model, laten (b) en (d) zien. In de vergelijkingen zijn de volgende gewichtsfactoren gesubstitueerd: $w_s = 0,05$, $w_m = 0,55$, $w_r = 0,40$, $w_R = 0,95$ en $w_T = 0,05$. Deze waarden zijn gebaseerd op resultaten van andere experimenten (Van Ee e.a., 1998). De foutenbalken representeren een standaardafwijking bij middeling van de resultaten van vijf proefpersonen.

heid van het testpatroon (H_R , simultaan), minus de helling van het testpatroon gegeven de aanwezigheid van het referentiepatroon (H_T , simultaan).

De bijdrage in de uiteindelijke hellingsbepaling van de referentiestrip noemen we w_R en de bijdrage van het testpatroon is w_T .¹ De hellingsbepaling van elk van de patronen wanneer ze simultaan worden aangeboden, is dan:

$$H_R, \text{ simultaan} = w_R \cdot H_R, \text{ geïsoleerd} + w_T \cdot (H_T, \text{ geïsoleerd} + H_{\text{rel}})$$

$$H_T, \text{ simultaan} = w_T \cdot H_T, \text{ geïsoleerd} + w_R \cdot (H_R, \text{ geïsoleerd} - H_{\text{rel}}). \quad (3)$$

Uiteraard is het arbitrair welk patroon de referentiestrip of teststrip genoemd wordt, en de vergelijkingen gelden algemeen voor elke verzameling van patronen in het visuele veld. Door nu de vergelijkingen op te lossen met experimenteel afgeleide waarden voor de wegingsfactoren (Van Ee e.a., 1998), krijgen we de voorspelde resultaten als weergegeven in figuur 6 (zie a en c).

Toetsen van het model: psychofysica

Pas recentelijk is software ontwikkeld waarmee monoculaire informatie zodanig in een stereogram kan worden gemanipuleerd, dat de gepresenteerde informatie de dagelijkse (veridicale) omstandigheden benadert. Deze software (OpenGL bibliotheken in een MATLAB-omgeving) werd door ons gebruikt om stereogrammen te construeren waarin de monoculaire informatie in overeenstemming is met de stereoscopische informatie, althans voor zover de monoculaire informatie gecontroleerd kan worden (we hebben immers het oncontroleerbare residu). In figuur 4 (zie c) wordt gedemonstreerd dat het illusie-effect inderdaad kleiner is als de monoculaire informatie overeenstemt met de helling zoals die wordt gespecificeerd door de dispariteitsgradiënt.

Met behulp van een projectie-tv en een groot projectiescherm werden de stereogrammen gepresenteerd. Stereo- en monoculaire informatiebronnen konden naar wens met elkaar in conflict worden gebracht. Wij genereerden de afzonderlijke beelden van het stereogram in rood en groen licht en gebruikten rode en groene transmissiefilters in de vorm van brillenglazen om de beelden gescheiden aan het linker- en rechteroog aan te bieden. Door deze methode zijn de oogstanden tijdens de metingen natuurgetrouw en worden problemen die optreden bij het fuseren zonder hulpmiddelen (zoals in figuur 3)

vermeden.

Figuur 4 toont een schematisch voorbeeld van de stimulus. De afmeting van de referentie en van de teststrip was respectievelijk $37,3 \times 12,0$ en $37,3 \times 2,0$ graden. De afstand tussen de diagonalen in de referentie bedroeg 3,5 graden. De teststrip bestond uit ongeveer 20 stippen (diameter 8,6 boogminuut). De afstand van het scherm tot de waarnemer was 100 cm. De gesimuleerde afstand van de vlakken was 570 cm. De presentatietijd bedroeg 1,5 seconde. De helling van de referentie zoals gespecificeerd door de dispariteitsgradiënt was $-30, -15, 0, 15$ of 30 graden. Vijf waarnemers met normale stereoperceptie namen deel aan het experiment. Met een psychofysisch onderzoeksparadigma werd de driedimensionale waarneming van de stimulus gemeten. We vroegen de proefpersonen om de waargenomen helling in de teststrip te 'nullen'. Met andere woorden, de horizontale dispariteitsgradiënt zo in te stellen dat het lijkt alsof de teststrip evenwijdig aan het voorhoofd staat. De helling van de referentie werd gemeten met een matching-paradigma waarin de waargenomen hoek gelijkgesteld moest worden aan de hoek tussen twee lijnen.

Figuur 6 (b en d) toont de resultaten van de experimenten. De modelvoorspellingen en de waargenomen hellingen komen goed overeen (bij figuur 6 worden de wegingsfactoren gegeven). Wanneer de monoculaire en residuele informatiebronnen conflicteren met de stereoscopische informatiebronnen, wordt er bijna geen helling waargenomen in de referentiestrip (b) en de teststrip heeft een duidelijke helling (d). Wanneer de monoculaire informatiebronnen in overeenstemming zijn met de stereoscopische informatiebronnen, is de waargenomen helling in de referentiestrip groter (b) en het dieptecontrast kleiner (c). Echter, het dieptecontrast gaat niet helemaal weg. Dit komt doordat de reeds genoemde residuele informatiebronnen een rol spelen bij de reconstructie van de driedimensionale waarneming.

Om ook de informatie uit deze bronnen te elimineren, is onderzocht of dieptecontrast optreedt met echte vlakken. Daarvoor werden vlakken uit hardboard gezaagd die dezelfde karakteristieken (afmetingen, patronen) hadden als de stereogrammen in het hierboven beschreven experiment. Toen deze onder goed gecontroleerde laboratoriumomstandigheden werden gepresenteerd, bleek er, in overeenstemming met de voorspellingen van het model, geen dieptecontrast meer op te treden.

Tot besluit

Het belang van bovenstaand model voert verder dan het verklaren van een illusie. In feite beschrijft het model

1. Deze worden onder andere gespecificeerd door de afmeting van de patronen, maar het voert te ver om hier in detail op in te gaan.

hoe de hersenen de driedimensionale informatie uit verschillende informatiebronnen integreren. Modellen over constructie van waarneming moeten verklaren hoe signaalconflicten in dagelijkse waarneming worden opgelost. Door gebruikmaking van de ongewenste illusoire waarnemingen in stereogrammen, is van de nood een deugd gemaakt en zijn mechanismen die altijd werkzaam zijn in driedimensionale waarneming blootgelegd. Binnen en tussen verschillende modaliteiten van sensorische informatieverwerking kunnen gelijksoortige mechanismen en modulaire modellen gevonden worden, waarin aan betrouwbare signalen meer gewicht wordt toegekend dan aan onbetrouwbare signalen. Dit kan ook in andere sensorische domeinen tot inspiratie voor nieuwe modellen en experimenten leiden.

Tal van praktische toepassingen zijn denkbaar in de geneeskunde, luchtvaart en robotica. Zo worden in de geneeskunde met verschillende technieken (bijv. röntgenstraling of nucleaire magnetische resonantie) afbeeldingen ten behoeve van de diagnostiek gemaakt. Er worden nu virtual reality-brillen ontwikkeld waarin de waarnemer in het stereoscopische domein extra informatie aangeboden krijgt die op een transparante manier op het visuele veld wordt gesuperponeerd. Een chirurg kan op die manier een orgaan van een patiënt vergelijken met een modelorgaan of een piloot ziet controlemeters gesuperponeerd op het luchtruim. Kennis over onderliggende biologische mechanismen waarmee de mens twee netvliesbeelden tot een driedimensionaal beeld integreert, kan worden aangewend om kunstmatige stereoscopische afbeeldingen te verbeteren.

Er moesten reality-stimuli gemaakt worden (de hardboardvlakken) om de residuele monoculaire informatie te verwijderen. Het resultaat was waarheidsgetrouwe waarneming. Waarheidsgetrouwe waarneming is technisch erg moeilijk te bereiken in een virtual reality-omgeving doordat het residuele deel aanwezig is. Toch zijn ook hier oplossingen voor gevonden, maar het zou te ver voeren om deze in detail te bespreken. We hebben hier getoond hoe de meest storende factor, het contrast/diepte-effect, werkt en waar het vandaan komt, en hebben daarmee meer inzicht verkregen in de manier waarop

ons brein poogt om de waarneming een zo goed mogelijke afspiegeling te laten zijn van de buitenwereld.

LITERATUUR

- Ee, R. van, Banks, M.S., & Backus, B.T. (1998). Optimal slant estimation and binocular depth contrast. *Perception*, 27, 107.
- Ee, R. van, & Erkelens, C.J. (1996). Anisotropy in Werner's binocular depth contrast effect. *Vision Research*, 36, 2253-2262.
- Fodor, J.A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gillam, B., Flagg, T., & Finlay, D. (1984). Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing. *Perception & Psychophysics*, 36, 559-64.
- Howard, I.P., & Rogers, B.J. (1995). *Binocular vision and stereopsis*. New York: Oxford University Press.
- Landy, M.S., Maloney, L.T., Johnston, E.B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, 35, 389-412.
- Wade, N.J. (1998). *A natural history of vision*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Werner, H. (1937). Dynamical theory of depth perception. *Psychological Monographs*, 49, 1-127.
- Wheatstone, C. (1838). On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 128, 371-394.

Ontvangen: 6 januari 1999; geaccepteerd: 18 mei 1999.

Van Ee, R., & Verstraten, F.A.J. (1999). Our brain and the perception of depth: New insights by an old illusion. Nederlands Tijdschrift voor Psychologie, 54, 159-166.

Light sources, like the sun, illuminate objects in our environment. These objects subsequently reflect parts of this light. However, the light distribution may contain little inconsistencies. As a rule, our brain will generate a solution and under certain conditions this process will result in the perception of an illusion. In this paper we will discuss a classic depth illusion known as binocular depth contrast. It refers to the observation that the perceived depth of one object is dependent on the perceived depth of another object that is present at the same time. We present a model in which several sources of depth information are integrated in order to generate veridical depth perception. In this integrative model, the most reliable sources contribute most to the solution. Solving the binocular depth contrast illusion opens up new perspectives for several applications in medical research, aviation, robotics and virtual reality technology.
