

Gezichtsbedrog onthult hersenwerking in driedimensionale waarneming

21 December, 1998

Raymond van Ee

Berkeley University (USA)

Helmholtz Instituut (Utrecht)

Correspondence: r.vanee@phys.uu.nl

Gezichtsbedrog biedt een venster op de werking van de hersenen omdat het onderliggende waarnemings-mechanismen kan onthullen op een manier die niet mogelijk is tijdens waarheidsgetrouwe waarneming. Hier wordt getoond hoe een klassiek voorbeeld van gezichtsbedrog inspiratie geeft voor de ontwikkeling van een hersenmodel voor driedimensionale waarneming. Zulke modellen kunnen tal van praktische toepassingen vinden in de geneeskunde, luchtvaart en robotiek.

Mensen en veel dieren hebben twee ogen. De ogen van prooidieren zijn in het algemeen zijdelings geplaatst zodat zij een breed panorama kunnen overzien. Dit is vanuit een evolutionair standpunt voordelig omdat een breed panorama hun veiligheid vergroot. Zij gebruiken informatie zoals perspectief, schaduw, textuur en relatieve afmeting van voorwerpen om de drie-dimensionale (3D) eigenschappen van hun omgeving waar te nemen. Dit wordt *monoculaire waarneming* genoemd omdat deze informatie met één oog waar te nemen is. Onder veel omstandigheden werkt dit uitstekend, ook bij de mens. Schilders zijn bijvoorbeeld in staat om deze informatie tot in de perfectie aan te wenden om diepte te suggereren in een voorstelling afgebeeld op een vlak doek.

Zowel bij roofdieren als bij de mens zijn de ogen in de loop der tijd geëvolueerd tot een frontale positie. Elk voorwerp heeft dan één afbeelding op elk netvlies. Een klein voorwerp dat dichtbij staat dan een achtergrond veroorzaakt een discontinuïteit in de verschillen tussen de twee netvlies-afbeeldingen. Analoog aan de triangulatie-methode in de sterrenkunde, waar de afstand van dichtbijstaande hemellichamen bepaald kan worden uit twee ruimtelijk gescheiden telescoop-registraties, worden deze verschillen gebruikt om de afstand van een voorwerp tot het hoofd te bepalen. 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 orientatie, of *helling*, t.o.v. het voorhoofd hebben. Figuur 1 laat zien dat een hellend vlak een gradient in de afbeeldingsverschillen veroorzaakt. Het gebruik van afbeeldingsverschillen, en de gradienten daarin, om 3D-eigenschappen waar te nemen wordt *stereoscopische waarneming* genoemd. De stereoscopische 3D-reconstructie is gedetailleerder en accurater dan de afzonderlijke 3D-reconstructies per oog, speciaal in

omstandigheden waarin monoculaire informatie arm is, zoals b.v. in een struikgewas. Probeer maar eens bramen te plukken met één oog gesloten zonder schrammen op te lopen; stereoscopische informatie is hier van groot belang.

Net zoals in een antennesysteem bevat elk van de gedetecteerde en verwerkte signalen intrinsieke ruis. In dagelijkse omstandigheden moeten conflicten in visuele signalen routinematig worden opgelost. Theorieën over waarnemingsconstructie moeten verklaren hoe deze conflicten worden opgelost. Vanuit een evolutionair standpunt is het redelijk om aan te nemen dat de hersenen het meest afgaan op signalen die nauwkeurig en eenvoudig waar te nemen zijn. In dit artikel zal een mathematisch model over waarnemingsconstructie worden gebaseerd op een gewogen middeling van signalen. Hierin krijgen de signalen die het betrouwbaarst zijn het grootste gewicht. Hoe kunnen wij (onderzoekers) de gewichtsfactoren meten? Onder dagelijkse omstandigheden is dit moeilijk. Maar hersenwerking wordt niet alleen gereflecteerd in waarheidsgetrouwe waarneming maar ook in gezichtsbedrog. Gezichtsbedrog wordt ook wel visuele illusie genoemd omdat je iets ziet wat er eigenlijk niet is. De hersenen “weten” niet dat zij een stimulus waarnemen die tot een illusie leidt. Illusies bieden daarom ideale omstandigheden om theorieën over waarneming te testen.

De diepte-contrast illusie

In de eerste helft van de 19e eeuw paste Wheatstone [1] de toenmalige inzichten over stereoscopische waarneming toe om met stereogrammen op kustmatige manier 3D-beelden op te wekken. M.b.v. een stereogram, waarin elk oog een verschillend plaatje ziet, kunnen verschillen tussen de netvliesafbeeldingen worden aangebracht die 3D-waarneming opwekken. Stereogrammen worden sinds 1838 toegepast in 3D-cartoons en in wetenschappelijk onderzoek. Tegenwoordig tracht men stereogrammen te gebruiken in brillen voor virtuele omgevingen b.v. tijdens medische operaties of in de cockpit van een vliegtuig.

Echter, in stereogrammen treedt een tot nu toe onverklaarde illusie op waarin afzonderlijke voorwerpen elkaars waargenomen diepte beïnvloeden. Waarneming is dan niet waarheidsgetrouw hetgeen tijdens een medische operatie ongeoorloofd is. Ter illustratie van de illusie: veronderstel de aanwezigheid van twee zichtbare vlakke patronen die evenwijdig zijn aan het voorhoofd en die gelijke afstand tot het hoofd hebben. Het ene patroon is de *teststrook*, het andere de *referentie*. Vervolgens krijgt de referentie een helling. Op grond van de geometrie zou men verwachten dat de waargenomen helling van de referentie en de teststrook onafhankelijk van elkaar zijn. Werner [2] gebruikte in 1937 een stereogram om te laten zien dat dit niet zo is (zie figuur 2). Hij presenteerde eerst een teststrook zonder gradient in het afbeeldingsverschil die inderdaad zonder helling waargenomen wordt (zie figuur 2a). Maar in aanwezigheid van een referentie, die wel een gradient in het afbeeldingsverschil heeft, kreeg de teststrook een helling die tegengesteld van teken was aan die van de referentie (zie figuur 2b). Werner noemde dit effect de *binoculaire diepte-contrast illusie*.

Eerst wordt nu een recente verklaring behandeld die later in dit artikel geïntegreerd zal worden in een model. Deze verklaring, is erop gebaseerd dat één globale gradient in het afbeeldingsverschil in het stereoscopische domein nauwelijks tot een waargenomen helling leidt als de monoculaire informatie niet

oeverstemt met een hellend vlak [3] [4] [5]. Echter, als er twee verschillende van deze gradienten in het visuele veld aanwezig zijn, dan blijken de hersenen heel gevoelig voor het hellingsverschil te zijn [6] [7]. Een relatieve gradient in het afbeeldingsverschil komt overeen met een hoek tussen twee vlakken (zie figuur 1b). In figuur 3 wordt geïllustreerd dat het behoud van deze hoek en het verlies van absolute helling van twee vlakken, leidt tot diepte-contrast. Elk van de gradienten in de afbeeldingsverschillen veranderen in gelijke mate maar de verschilgradient is behouden.

Diepte-contrast is nooit gedocumenteerd met echte patronen onder dagelijkse omstandigheden. Behalve door de afbeeldingsverschillen wordt de helling in werkelijkheid ook bepaald door monoculaire informatie zoals b.v. perspectief, schaduw en afmeting. Als we figuur 2b nog eens nader bekijken dan zien we dat de helling gespecificeerd door deze informatie, conflicteert met de stereoscopische informatie. De stereoscopische informatie geeft aan dat het patroon een helling terwijl de monoculaire informatie aangeeft dat het geen helling heeft.

Modulair model

Onderzoekers die geïnteresseerd waren in diepte-contrast hebben tot nu toe nagelaten om de monoculaire informatie in een stereogram in overeenstemming te brengen met de stereoscopische informatie. Algemeen werd aangenomen dat de informatie in de afbeeldingsverschillen de monoculaire informatie teniet zou doen. Recentelijk wordt in laboratoria steeds meer ondersteuning gevonden voor het idee dat de hersenen modulair werken. Voor de diepte-contrast illusie wil dat zeggen dat er een module (een groep cellen) is die hellingen bepaalt op grond van perspectief, een module die hellingen bepaalt op grond van afbeeldingsverschillen, enz. De uiteindelijk waargenomen helling is dan een gewogen gemiddelde van de uitkomsten van elk van de modules, waarbij de meest betrouwbare signalen het grootste gewicht krijgen. Hieronder wordt zo'n model gepresenteerd voor waargenomen helling, met als belangrijkste aanname dat een waarnemer veel gewicht geeft aan de relatieve gradient in het afbeeldingsverschil. De diepte-contrast illusie komt daar op een natuurlijke manier uit naar voren.

De waargenomen helling van een vlak patroon in een stereogram wordt beschreven met een lineair gewogen combinatie van de hellingen zoals aangegeven door de stereoscopische informatie (s), de monoculaire informatie (m) die gecontroleerd kan worden in een stereogram, en de resterende oncontroleerbare informatie (r). Een voorbeeld van het laatste is de samentrekking van de ooglenzen tijdens het focuseren, een andere is de helderheid van de lijnen. In een stereogram zullen deze altijd aangegeven dat de waargenomen helling nul is omdat het stereogram is afgebeeld op een vlak scherm.

De helling (H) van de referentie (R) en van het testpatroon (T), geïsoleerd van elkaar gezien, kan met de volgende vergelijkingen beschreven worden:

$$\begin{aligned} H_{R, \text{geïsoleerd}} &= W_{Rs} \cdot H_{Rs} + W_{Rm} \cdot H_{Rm} + W_{Rr} \cdot H_{Rr} \\ H_{T, \text{geïsoleerd}} &= W_{Ts} \cdot H_{Ts} + W_{Tm} \cdot H_{Tm} + W_{Tr} \cdot H_{Tr} \end{aligned} \quad (1)$$

De uitkomst van de module die de helling specificeert op grond van de stereoscopische informatie is H_s en de wegingsfactor is w_s . De bijdrage in de uiteindelijke hellingsbepaling van de modules die geassocieerd zijn met de monoculaire informatie en de resterende informatie, is respectievelijk gespecificeerd door de paren (H_m, w_m) en (H_r, w_r) . De gewichtsfactoren per vergelijking moeten optellen tot één. Merk op dat er nu eenvoudig te verklaren is waarom in stereogrammen zoals afgebeeld in figuur 2b de waargenomen helling niet in overeenstemming is met de gradient in het afbeeldingsverschil. Zowel de monoculaire als de resterende informatie indiceren namelijk een helling nul.

De waargenomen helling van elk patroon hangt af van de aanwezigheid van het andere patroon, omdat het visuele systeem een grote weegfactor toekent aan informatie gebaseerd op de relatieve gradient in het afbeeldingsverschil [8]. H_{rel} is de grootte die de relatieve helling tussen de twee vlakken representeert:

$$H_{rel} = H_{R, \text{simultaan}} - H_{T, \text{simultaan}} \quad (2)$$

De bijdrage in de uiteindelijke hellingsbepaling van de referentie is w_R en van het testpatroon is w_T . Deze worden o.a. gespecificeerd door de afmeting van de patronen maar daar wordt hier niet op ingaan. De hellingsbepaling van elk van de patronen wanneer ze simultaan worden aangeboden is:

$$\begin{aligned} H_{R, \text{simultaan}} &= w_R \cdot H_{R, \text{geïsoleerd}} + w_T \cdot (H_{T, \text{geïsoleerd}} + H_{rel}) \\ H_{T, \text{simultaan}} &= w_T \cdot H_{T, \text{geïsoleerd}} + w_R \cdot (H_{R, \text{geïsoleerd}} - H_{rel}) \end{aligned} \quad (3)$$

Merk op dat deze vergelijkingen voldoen aan (2). Natuurlijk is het arbitrair welk patroon de referentie of teststrook genoemd wordt en de vergelijkingen gelden algemeen voor elke verzameling van patronen in het visuele veld. Figuur 4(A en C) toont de voorspellingen die de vergelijkingen leveren.

Nieuwe Psychofysica

Pas recent is software ontwikkeld waarmee in een stereogram monoculaire informatie kan worden gerepresenteerd op een manier waarop ze zich voordoen in dagelijkse waarneming. In Berkeley is zulke software gebruikt om stereogrammen te construeren waarin de monoculaire informatie in overeenstemming is met de stereoscopische informatie (d.w.z. tot zo ver de monoculaire informatie gecontroleerd kan worden). In figuur 2(C) wordt gedemonstreerd dat het effect inderdaad kleiner is als de monoculaire informatie overeenstemt met de helling gespecificeerd door de gradient in het afbeeldingsverschil.

Figuur 4(B en D) toont laboratoriummetingen die zijn uitgevoerd in samenwerking met Prof. Banks (Berkeley) en Dr. Backus (Stanford). Met behulp van een projectie-TV en een groot scherm zijn stereogrammen gegenereerd waarin de eerste-orde eigenschappen van de 3D-wereld zijn nageemaakt en de informatie naar wens conflicterend kan zijn. 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 gebruik te maken van deze methode zijn de oogstanden tijdens de

metingen natuurlijk en worden de problemen die optreden bij het samensmelten van de twee netvliesbeelden zonder hulpmiddelen (zoals in figuur 2) vermeden.

Figuur 4 toont dat de modelvoorspellingen en de waargenomen hellingen goed overeenstemmen. Wanneer de monoculaire en resterende informatie conflicteert met de stereoscopische informatie wordt bijna geen helling waargenomen in de referentie (B) en heeft de teststrook een duidelijke helling (D). Bij overeenstemming is de waargenomen helling in de referentie groter (B) en het diepte-contrast kleiner (C). Maar het diepte-contrast verdwijnt niet helemaal. Dit komt omdat resterende informatie een rol speelt bij de reconstructie van 3D-waarneming. Om ook deze informatie te elimineren is onderzocht of diepte-contrast optreedt met echte vlakken. Daartoe zijn hardboardvlakken gemaakt met dezelfde afmetingen en patronen zoals die in de stereogrammen zijn gepresenteerd. Onder goed gecontroleerde laboratoriumomstandigheden hebben de proefpersonen het experiment herhaald. In overeenstemming met de voorspellingen van het model is er nu geen diepte-contrast meer.

Belang voor nieuw onderzoek

Het belang van bovenstaande theorie voert verder dan de verklaring van het gezichtsbedrog. In feite beschrijft het model hoe de hersenen de 3D-informatie uit verschillende bronnen integreert. Theorieën over de 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 3D-waarneming onthuld op een manier die normaal niet mogelijk is. Binnen en tussen verschillende modaliteiten van sensorische informatieverwerking kunnen gelijksoortige mechanismen en modulaire modellen gevonden worden waarin aan de betrouwbare signalen meer gewicht wordt toegekend dan aan onbetrouwbare signalen. Dit zal ook in andere sensorische domeinen tot inspiratie voor nieuwe modellen en experimenten leiden.

Tenslotte, tal van praktische toepassingen zijn denkbaar in de geneeskunde, luchtvaart en robotiek. Zo wordt in de geneeskunde met verschillende technieken (zoals röntgenstraling of nucleaire magnetische resonantie) diagnostische afbeeldingen gemaakt. Sinds kort worden brillen voor virtuele omgevingen ontwikkeld waarin de waarnemer in het stereoscopische domein extra informatie aangeboden krijgt die op een transparante manier gesuperponeerd wordt op het visuele veld. Een chirurg kan op die manier een orgaan van een patient 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 3D-beeld integreert kan worden aangewend om kunstmatige stereoscopische afbeeldingen te verbeteren.

Figuurbijchriften

Fig. 1. (A) Een gradient in het afbeeldingsverschil tussen de twee netvliezen ontstaat wanneer een vlak object met een helling t.o.v. het hoofd gepresenteerd wordt. De ingenomen visuele hoek van een objectelement is groter in het rechteroog dan in het linkeroog wanneer de linkerkant van het object dichterbij staat dan de rechterkant. (B) Wanneer er twee objecten in het visuele veld aanwezig zijn dan levert elk object een gradient in het afbeeldingsverschil (1,2) maar er is ook nog een relatieve gradient (3).

Fig. 2. Stereogram-demonstratie van de diepte-contrast illusie. De linkerhelft van het stereogram dient bekeken te worden met het linkeroog, de rechterhelft met het rechteroog. Het laten samensmelten van de twee beelden in een stereogram in de hersenen vereist vaak tijd en oefening. Een manier om de samensmelting snel te laten plaatsvinden zonder technische hulpmiddelen is de volgende: houd de figuur op 2 cm 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 oneindig te staren en de oogspieren te ontspannen. Vergroot vervolgens de afstand van het stereogram heel langzaam totdat de afstand ongeveer 30 cm is. Begin met het bekijken van de teststrook omdat deze het gemakkelijkst is. (A) De teststrook bevat geen gradient in het afbeeldingsverschil en wordt waargenomen zonder helling. In (B) wordt de teststrook geflankeerd door een patroon met een gradient in het afbeeldingsverschil die aangeeft dat de linkerkant dichterbij is dan de rechterkant. De figuur is zo geconstrueerd dat deze gradient een hoek van 40 graden specificeert. Maar de waargenomen helling is maar ongeveer 20 graden. De teststrook wordt nu echter waargenomen met de rechterkant dichterbij dan de linkerkant; de illusoir-waargenomen helling is ongeveer -20 graden. (C) Nu wordt de strook geflankeerd door een referentie waarin de controleerbare monoculaire aspecten van het patroon in overeenstemming zijn gebracht met de helling die gespecificeerd wordt door de stereoscopische informatie. De waargenomen helling van de referentie is nu ongeveer 35 graden en de rechterkant van de teststrook is minder dichtbij dan in (B), met een helling van ongeveer -5 graden. Het gezichtsbedrog is dus minder sterk.

Fig. 3. 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 stereoscopische helling (β , die de helling van de verzameling van alle zichtbare voorwerpen representeert). Accurate waarneming van de relatieve helling in combinatie met inaccurate waarneming van de absolute helling, leidt tot diepte-contrast [4].

Fig. 4. Modelvoorspelling en waargenomen hellingen. Wanneer de monoculaire en resterende informatie conflicteert met de stereoscopische informatie (dunne stippellijn) voorspellen de vergelijkingen dat er bijna geen helling wordt waargenomen in de referentie (A) en dat de teststrook met een duidelijke helling waargenomen wordt (C). Dit laatste is diepte-contrast want de teststrook heeft in werkelijkheid geen gradient in het

afbeeldingsverschil. De waargenomen helling in de referentie en het diepte-contrast zijn theoretisch behoorlijk veranderd wanneer de monoculaire informatie in overeenstemming is met de stereoscopische informatie (doorgetrokken lijn). Maar het gezichtsbedrog blijft aanwezig. Dit komt omdat er resterende informatie betrokken is bij de reconstructie van 3D-waarneming. Deze informatie geeft aan dat de referentie geen helling heeft. Om ook de resterende conflicterende informatie in hellingswaarneming te elimineren is onderzocht of het gezichtsbedrog optreedt met echte vlakken. Er is dan geen informatieconflict meer (brede stippellijn). Merk op dat het verschil in richtingscoëfficiënt tussen de corresponderende lijnen voor referentie en teststrook behouden is. Dit is de randvoorwaarde die gerepresenteerd werd door H_{rel} . (B) en (D) laten zien dat de experimenteel gevonden waarden goed overeenstemmen met het model. (In de vergelijkingen zijn de volgende gewichtsfactoren gesubstitueerd: $w_s = 0.04$, $w_m = 0.76$, $w_r = 0.2$, $w_R = 0.95$ en $w_T = 0.05$. Deze waarden zijn geïnspireerd door resultaten van andere experimenten [8]. De foutenbalken representeren één standaardafwijking bij middeling van de resultaten van vijf proefpersonen.)

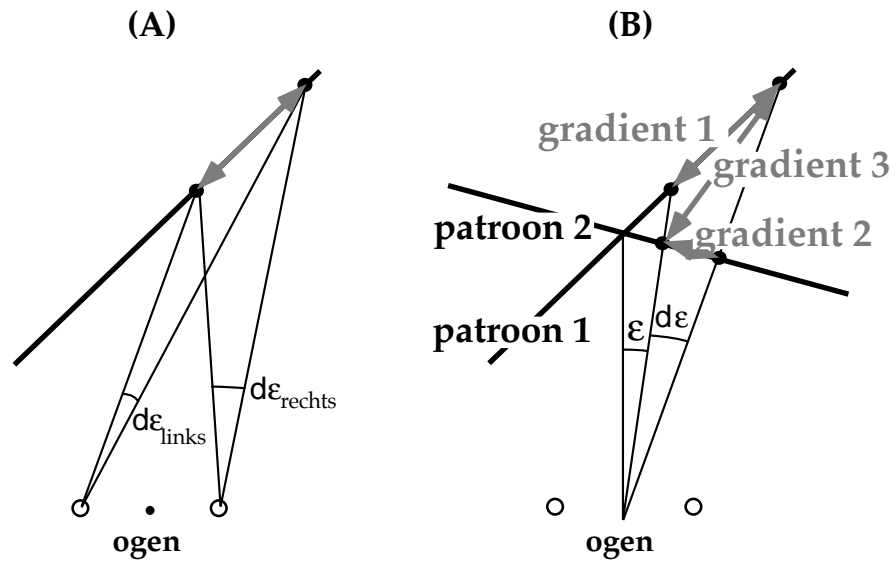
Personalia Auteur

Raymond van Ee studeerde Natuurkunde en Sterrenkunde aan de Universiteit van Utrecht. Tijdens zijn promotieonderzoek bij het Helmholtz Instituut (Universiteit Utrecht) ontwikkelde hij samen met promotor Prof. C. J. Erkelens een model voor de stabiliteit van 3D-waarneming tijdens oog- en hoofdbewegingen. Daarna verrichtte hij gedurende drie jaar onderzoek aan Berkeley University in de VS (mede met een Talent-Stipendium van NWO). Thans verricht hij onderzoek aan het MIT in Boston (VS). Onlangs is hij door de KNAW voorgedragen als Akademie-onderzoeker.

Referenties

1. C. Wheatstone, On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 18 (1838), p. 371-394.
2. H. Werner, Dynamical theory of depth perception, *Psychological Monographs* 49 (1937), p. 1-127.
3. R. van Ee, *Stability of binocular depth perception* (1995), Proefschrift Helmholtz Instituut, ISBN 90-393-0846-2.
4. R. van Ee and C. J. Erkelens, Anisotropy in Werner's binocular depth contrast effect, *Vision Research* 36 (1996), p. 2253-2262.
5. I. P. Howard and B. J. Rogers, *Binocular vision and stereopsis*. 1995, New York: Oxford.
6. B. Gillam, T. Flagg, and D. Finlay, Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing, *Perception & Psychophysics* 36 (1984), p. 559-64.
7. W. C. Gogel, Visual perception of size and distance, *Vision Research* 3 (1963), p. 101-120.
8. R. van Ee and C. J. Erkelens, Stability of binocular depth perception with moving head and eyes, *Vision Research* 36 (1996), p. 3827-3842.

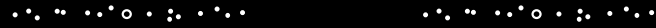
gradient in het afbeeldingsverschil



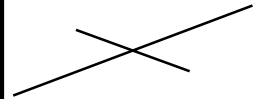
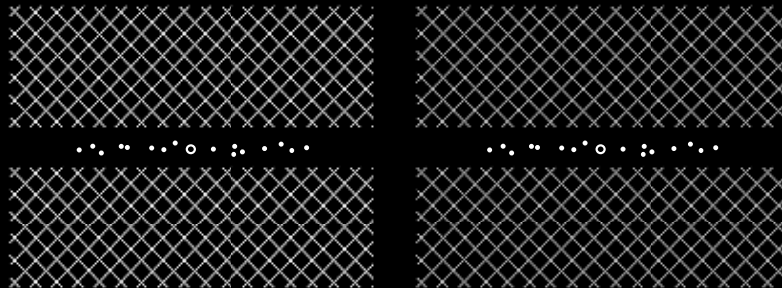
demonstratie van diepte-contrast

bovenaanzicht
van
waargenomen
hellingen

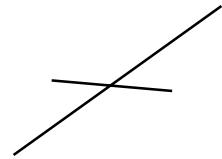
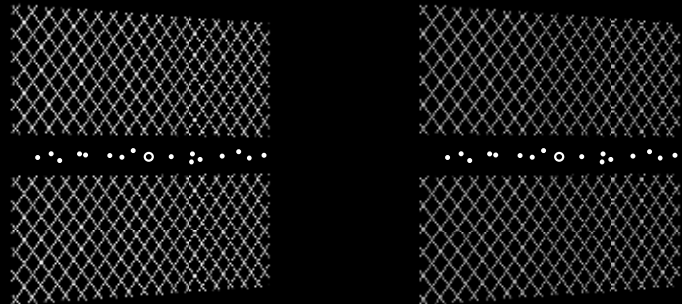
(A)
geen
referentie



(B)
inconsistent
perspectief
in
referentie



(C)
consistent
perspectief
in
referentie



Voor de opmaker van de pagina in het NTvN:
Wilt u alstublieft het zwarte gedeelte niet verkleinen tot een 1-kolom afmeting. De demonstratie werkt het best als de bovenstaande afmeting gehandhaafd blijft.

