Tampereen yliopisto

Vilma Kuusisto

IHMISSILMÄN TOIMINTA JA SYVYYSNÄKÖ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Mikko Huttunen
Kesäkuu 2025

TIIVISTELMÄ

Vilma Kuusisto: Ihmissilmän toiminta ja syvyysnäkö
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknis-luonnontieteellinen
Kesäkuu 2025

Valon nopeus muuttuu sen kulkiessa ilmaa optisesti tiheämmän aineen läpi. Nopeuden muuttuminen eli valon taittuminen tapahtuu aineiden rajapinnalla. Valon taittuminen linssissä perustuu tähän ilmiöön. Ihmisen silmässä on kaksi linssiä: sarveiskalvo ja mykiö, eli ihmissilmä on kahden linssin systeemi. Sarveiskalvon ja mykiön läpi kulkiessa valo taittuu yhteensä neljä kertaa. Suurin osa taittumisesta tapahtuu ilman ja sarveiskalvon välisellä rajapinnalla. Mykiö pystyy mukautumaan valon mukaan, mikä mahdollistaa eri etäisyyksillä sijaitseviin kohteisiin tarkentamisen. Sarveiskalvo ja mykiö yhdessä kohdistavat valonsäteet silmän verkkokalvolla sijaitsevaan tarkan näkemisen alueeseen eli foveaan.

Syvyysnäkö on tärkeä osa ihmisen näkökykyä. Sillä tarkoitetaan kykyä arvioida syvyyttä ja kohteiden etäisyyksiä. Syvyyden arvioimiseen voidaan käyttää sekä monokulaarisia että binokulaarisia syvyysvihjeitä. Monokulaarisilla syvyysvihjeillä tarkoitetaan yhdellä silmällä tehtäviä havaintoja. Niitä ovat esimerkiksi atmosfäärinen etäisyys ja kauempana olevan kohteen peittyminen lähempänä olevalla kohteella. Binokulaaristen syvyysvihjeiden havaitsemiseen tarvitaan kaksi silmää. Tämän työn kannalta merkittävimmät binokulaariset syvyysvihjeet ovat stereonäkö ja konvergenssi. Konvergenssilla tarkoitetaan silmien liikettä toisiaan kohti, jotta lähellä oleva kohde kuvantuisi molempien silmien foveoihin. Silmämunien asennon avulla ihminen pystyy arvioimaan kohteen etäisyyden. Stereonäkö puolestaan syntyy pienistä eroista kahden silmän havainnoissa.

Syvyysnäköä pystytään harhauttamaan erilaisilla optisilla illuusioilla. Tässä työssä mallinnettiin kuusi erilaista autostereogrammia, jotka ovat eräänlaisia optisia illuusioita ja ne tunnetaan “Magic Eye”-kuvina. Näistä autostereogrammeista kaksi on anaglyfisia. Toisin kuin normaaleja satunnaispiste-stereogrammeja, autostereogrammeja voidaan tarkastella ilman keinotekoisia apuvälineitä. Tavallisten satunnaispisteistä koostuvien autostereogrammien näkeminen onnistuu epätavallisen konvergenssikulman avulla. Anaglyfisten autostereogrammien tarkasteluun tarvitaan punasinilasit.

Työn tarkoituksena oli tutkia, milloin autostereogrammi on helpoin nähdä ja mitkä tekijät vaikuttavat siihen. Tutkimuksessa todettiin, että muokattavien parametrien lisäksi autostereogrammien näkemiseen vaikuttaa myös merkittävästi koehenkilön kyky muodostaa epätavallinen konvergenssikulma. Tulokseksi saatiin, että anaglyfinen autostereogrammi, on yleisesti ottaen helpoin nähdä. Tämä johtuu siitä, että anaglyfisten autostereogrammien tarkasteluun ei tarvita epätavallista konvergenssikulmaa. Tutkimuksessa huomattiin myös, että hajataitolla on todennäköisesti vaikutusta autostereogrammien näkemiseen. Tämä on merkittävä tulos, sillä sen avulla pystytään selittämään, miksi osa ihmisistä ei kykene näkemään autostereogrammeja ollenkaan.

Avainsanat: monokulaarinen syvyysvihje, binokulaarinen syvyysvihje, konvergenssi, stereonäkö, autostereogrammi, anaglyfi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Vilma Kuusisto: The Function of the Human Eye and Depth Perception
Bachelor's thesis
Tampere University
Engineering and Natural Sciences
June 2025

The speed of light changes as it passes through a substance that is optically denser than air. This change in speed, known as refraction, occurs at the boundary between two materials. Refraction in a lens is based on this phenomenon. The human eye contains two lenses: the cornea and the crystalline lens. Therefore, the human eye is a two-lens system. The light is refracted a total of four times as it passes through the cornea and the crystalline lens. Most of the refraction takes place at the interface between the air and the cornea. The crystalline lens can adjust according to the light, which enables precise focusing. Together, the cornea and the lens focus the light rays onto the area of sharpest vision on the retina, known as the fovea.

Depth perception is an important part of human vision. It refers to the ability to estimate depth and the distance of objects. Both monocular and binocular depth cues can be used to assess depth. Monocular depth cues refer to observations made with one eye. Examples of those cues include atmospheric perspective and occlusion, where a closer object blocks the view of a more distant one. Perceiving binocular depth cues requires the use of both eyes. The most relevant binocular depth cues for this thesis are stereopsis and convergence. Convergence refers to the inward movement of the eyes so that a nearby object is projected onto the fovea of both eyes. By sensing the position of the eyeballs, a person can estimate the distance to an object. Stereopsis arises from slight differences between the images perceived by the two eyes.

Depth perception can be deceived by using different types of optical illusions. Six different autostereograms were modeled in this thesis. Autostereograms are a type of optical illusion commonly known as "Magic Eye"images. Two of these autostereograms are anaglyphic. Unlike regular random dot stereograms, autostereograms can be viewed without artificial aids. Viewing standard random dot autostereograms requires an unusual angle of convergence. Anaglyphic autostereograms, on the other hand, require red-cyan glasses for viewing.

The goal of this thesis was to investigate when an autostereogram is easiest to perceive and what factors influence this. The study finds that in addition to adjustable parameters, a test subject's ability to produce an unusual convergence angle significantly affects the perceptibility of autostereograms. The results show that an anaglyphic autostereogram is the easiest to perceive. This is because viewing anaglyphic autostereograms does not require an unusual angle of convergence. The study also found that astigmatism is likely to affect the ability to perceive autostereograms. This is a significant finding, as it helps explain why some people are unable to see autostereograms at all.

Keywords: monocular depth cue, binocular depth cue, convergence, stereopsis, autostereogram, anaglyph

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ TÄSSÄ TYÖSSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Sovellus	Versio
ChatGPT	4o

Tekoälyn käyttötarkoitus

Olen käyttänyt apuna tekoälyä MATLAB-koodien generoimiseen. Olen kysynyt tekoälyltä, miten eri komennot vaikuttavat koodiini tai millä komennolla saan koodini toimimaan paremmin. Myös kuvien piirtämiseen olen kysynyt tekoälyltä apua. Olen piirtänyt osan kuvista InkScapella, joten olen kysynyt tekoälyltä apua joihinkin kyseisen sovelluksen toimintojen käyttämiseen. Osa kuvista on piirretty tikz-kuvina, joiden muodostamiseen olen pyytänyt tekoälyltä apua ja muokannut sitten itse tekoälyn antamaa koodia haluamani mukaan. Olen käyttänyt tekoälyä apuna myös englanninkielisten tekstien kääntämisessä suomeksi.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty

Tekoälyä on käytetty osassa teoriaosion kuvissa apuna. Tämän lisäksi tekoälyä on käytetty apuna liitteinä olevien MATLAB-koodien generoimiseen. Lisäksi tekoälyä on käytetty teoriaosiossa lähteiden tekstien suomeksi kääntämiseen.

Riskien tiedostaminen

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joiden tuottamisessa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista tästä seuranneista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Kulunut kevät on ollut raskas tämän työn ja oikeiden töiden parissa, mutta olen iloinen, että olen saanut tehdä opinnäytetyön aiheesta, joka minua oikeasti kiinnostaa, vaikka kyseinen aihe ei välttämättä ole kovin perinteinen fysiikan kandidaatintyölle. Haluan kiittää ohjaajaani Mikko Huttusta hyvin sujuneesta yhteistyöstä sekä kaikesta rakentavasta palautteesta. Haluan myös kiittää kaikkia läheisiäni, jotka ovat minua tukeneet kuluneiden vuosien ja etenkin tämän kevään aikana. Ilman kaikkea saamaani apua ja tukea ei tämä työ olisi valmistunut.

Tampereella, 30. kesäkuuta 2025

Vilma Kuusisto

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto 1
2. Teoreettinen tausta 2
2.1 Linssin toiminta 2
2.1.1 Kahden linssin systeemi 4
2.1.2 Ihmissilmän toiminta kahden linssin systeeminä 4
2.2 Syvyysnäkö ja syvyysvihjeet 7
2.2.1 Monokulaariset syvyysvihjeet 7
2.2.2 Binokulaariset syvyysvihjeet. 9
2.3 Syvyysnäön harhauttaminen optisilla illuusioilla 12
2.3.1 Autostereogrammit ja stereonäkö. 12
3. Optisten illuusioiden mallintaminen 14
3.1 Autostereogrammin mallintaminen 14
3.2 Anaglyfisen autostereogrammin mallintaminen 16
4. Tulosten analyysi. 19
5. Yhteenveto 21
Liite A: makeabSIRD-funktio 23
Liite B: Alkuperäinen autostereogrammin muodostamiseen käytettävä koodi 25
Liite C: Paranneltu autostereogrammin muodostava koodi 26
Liite D: Funktio anaglyfisen autostereogrammin muodostamiseen 28
Liite E: Anaglyfisen autostereogrammin muodostava koodi 30

1. JOHDANTO

Ihmissilmä on optisesti mielenkiintoinen elin. Siinä on kaksi linssiä, mykiö ja sarveiskalvo, mikä tekee silmästä kahden linssin systeemin. Sarveiskalvo ja mykiö yhdessä säätelevät valon kulkua silmässä niin, että valonsäteet osuvat verkkokalvon tarkan näkemisen alueeseen eli makulaan. Mykiö koostuu monikerroksisesta sidekudosmassasta ja sen muotoa säätelee sädelihaksen rentoutuminen ja supistuminen., Tämä mahdollistaa silmän tarkentamisen eri etäisyyksillä sijaitseviin kohteisiin.

Syvyysnäöllä tarkoitetaan kykyä havaita syvyyttä ja etäisyyksiä. Syvyysnäkö mahdollistaa esineiden suhteellisen etäisyyden arvioimisen. Syvyyttä voidaan arvioida erilaisten syvyysvihjeiden avulla, joita on sekä monokulaarisia että binokulaarisia. Monokulaarisia syvyysvihjeitä voidaan käyttää syvyyden arvioimiseen hyödyntäen ainoastaan yhden silmän avulla tapahtuvia näköaistihavaintoja. Binokulaaristen syvyysvihjeiden muodostamiseen puolestaan tarvitaan kahden silmän näköaistihavaintoja. Tämän työn kannalta merkittävimmät binokulaariset syvyysvihjeet ovat stereonäkö ja konvergenssi, joita käsitellään lisää tämän työn teoriaosiossa.

Syvyysnäköä pystytään harhauttamaan erilaisilla optisilla illuusioilla. Tämän työn tutkimuksen tavoitteena on harhauttaa syvyysnäköä satunnaispiste autostereogrammeilla sekä anaglyfisilla autostereogrammeilla. Autostereogrammit tulivat tunnetuiksi “Magic Eye”-kuvina ja niillä tarkoitetaan satunnaispisteistä koostuvaa kuviota, joka on mahdollista nähdä kolmiulotteisena, kun niitä tarkastellaan oikeanlaisella tekniikalla. Tässä työssä mallinnetaan kuusi erilaista autostereogrammia ja tutkitaan, millä parametreilla autostereogrammi on helpoiten nähtävissä.

Työ alkaa luvussa 2 esiteltävällä teorialla, joka sisältää linssin toiminnan perusperiaatteet, ihmissilmän rakenteen sekä monokulaariset ja binokulaariset syvyysvihjeet. Luvun loppuosassa käydään läpi teoria autostereogrammien toiminnasta. Luvussa 3 mallinnetaan tutkimuksessa käytettävät autostereogrammit, minkä jälkeen luvussa 4 esitellään tutkimuksen hypoteesi ja saadut tulokset.

2. TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä luvussa perehdytään linssin toimintaan optisena komponenttina sekä ihmissilmän syvyysnäköön. Lisäksi esitellään, miten ihmisen kokemaan havaintoon kohteen etäisyydestä pystytään vaikuttamaan. Toisin sanoen esitellään, kuinka voidaan muodostaa geometrista optiikkaa hyödyntäen optisia illuusioita, joissa ihmisen näköaistia johdetaan harhaan. Tarkastelu perustuu siis geometriseen optiikkaan, jossa valon etenemistä tarkastellaan valonsäteinä.

2.1 Linssin toiminta

Valo on sähkömagneettista säteilyä, joka koostuu toisiaan vasten kohtisuorasti värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Nämä kentät vuorovaikuttavat aineen hiukkasten kanssa, jolloin valon nopeus muuttuu. [1, s. 535] Valon nopeutta eri aineissa kuvataan aineen taitekertoimella

$$n = \frac{c}{v}, \tag{2.1}$$

jossa c on valon nopeus tyhjiössä ja v on valon nopeus tarkasteltavassa aineessa [2, s. 43].

Valon taittuminen linssissä perustuu tähän ilmiöön. Lasi on optisesti tiheämpää kuin ilma, joten valon nopeus muuttuu sen siirtyessä lasista ilmaan ja toisinpäin. Valon kulkiessa lasisen linssin läpi se taittuu kahdesti. Ensimmäisen kerran valo taittuu sen läpäistessä ilman ja lasin välisen rajapinnan ja toisen kerran valon läpäistessä lasin ja ilman välisen rajapinnan.

On olemassa kuperia ja koveria linssejä. Kuten kuvasta 2.1 nähdään, kupera linssi on keskeltä paksumpi kuin reunoilta, minkä vuoksi linssin läpi kulkevat valonsäteet taittuvat kohti linssin takana sijaitsevaa polttopistettä [1, s. 36]. Kovera linssi puolestaan on keskeltä ohuempi kuin reunoilta, minkä vuoksi linssin läpi kulkevat valonsäteet hajaantuvat [1, s. 36].

Valon kulkiessa kahden optisesti erilaisen aineen välisen rajapinnan läpi, se taittuu. Tätä taittumista voidaan kuvata Snellin lain avulla [3, s. 114]

$$n_1 sin(\theta_1) = n_2 sin(\theta_2), \tag{2.2}$$

jossa n_1 ja n_2 ovat taitekertoimet ensimmäisessä ja toisessa aineessa [4, s. 41]. Valonsäteen tulokulma on θ_1 ja taitekulma on θ_2. Snellin laki on yksi geometrisen optiikan perusperiaatteista.

Snellin laista (2.2) johtamalla, saadaan paksun linssin yhtälö eli linssintekijän yhtälö

$$\frac{n_1}{s_{o1}} + \frac{n_1}{s_{i2}} = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) + \frac{n_2 D}{(s_{i1} - D)s_{i1}}, \tag{2.3}$$

jossa D on linssin paksuus, s_o on kohteen etäisyys linssistä ja s_i on kuvan etäisyys linssistä. R_1 on linssin ensimmäisen pinnan kaarevuussäde ja R_2 on linssin toisen pinnan kaarevuussäde. [3, 4, s. 167, 52]

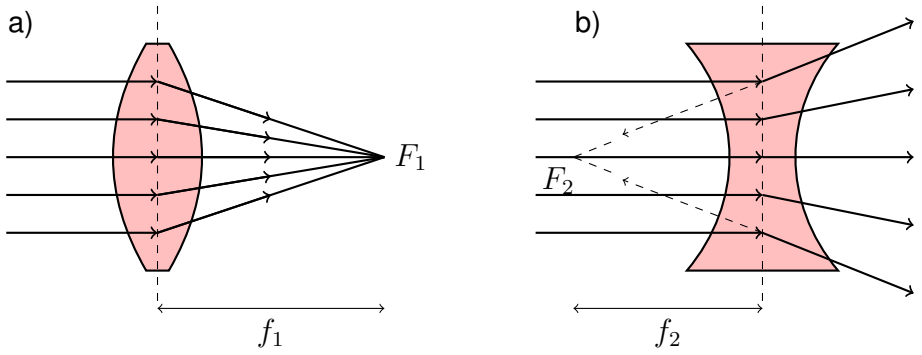
Kun linssi tarpeeksi ohut eli $D \to 0$ ja linssiä ympäröi ilma, jonka taitekerroin on $n_1 = 1$, yhtälöstä (2.3) saadaan

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_2 - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right). \tag{2.4}$$

Linssin polttoväli f kuvaa linssin kykyä koota ja hajottaa valoa. Kuperille linsseille polttoväli on positiivinen ja koverille negatiivinen. Yhdistämällä yhtälö (2.4) ja polttoväli saadaan Gaussin linssiyhtälö

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}, \tag{2.5}$$

joka ilmaisee yksinkertaisen ohuen linssin toimintaa. [3, 1, s. 167, 36].



Kuva 2.1. *Kuperan linssin tapauksessa (a-kohta) valonsäteet taittuvat linssin edessä sijaitsevaa polttopistettä F_1 kohti. Koveran linssin polttopiste F_2 puolestaan sijaitsee linssin edessä (b-kohta). Kuvassa ajatellaan valon taittumisen tapahtuvan vain linssin päätasolla eli keskellä linssiä. Todellisuudessa se taittuu molemmilla rajapinnoilla ja etenee suoraan linssin sisällä.*

Yhdensuuntaiset valonsäteet risteävät polttopisteessä F taituttuaan linssissä. Koveran linssin läpi kulkevat valonsäteet hajaantuvat, ja ne näyttävät tulevan polttopisteestä F_2. Valonsäteet eivät todellisuudessa kuitenkaan risteä kyseisessä kohdassa, minkä myötä kuperan linssin polttopisteeseen muodostuu valekuva [3, s. 162]. Kuten kuvasta 2.1

huomataan, positiivisen polttovälin omaavan linssin etupolttopiste sijaitsee linssin takana. Negatiivisen polttovälin omaavan linssin etupolttopiste puolestaan sijaitsee linssin edessä.

Linssin suurennuskerroin M määrittää, kuinka paljon kuva suurenee tai pienenee suhteessa kohteeseen. Tätä voidaan ilmaista yhtälöllä

$$M = \frac{h_i}{h_o}, \tag{2.6}$$

jossa h_i on kuvan korkeus ja h_o on kohteen korkeus. [1, s. 30] Linssin läpikulkevien valonsäteiden geometriasta saadaan etäisyyksien ja korkeuksien suhteelle yhtälö [1, s. 37]

$$\frac{h_o}{s_o} = \frac{h_i}{s_i}. \tag{2.7}$$

Ratkaistaan yhtälöstä (2.7) suurennuskerroin M, jolloin saadaan yhtälö

$$M = -\frac{s_i}{s_o}. \tag{2.8}$$

Koveran linssin muodostama todellinen kuva on ylösalaisin, minkä vuoksi yhtälössä (2.8) on miinusmerkki [1, s. 37]. Jos $|M| > 1$, kuva on ssuurennettu, ja jos $|M| < 1$, kuva on pienennetty.

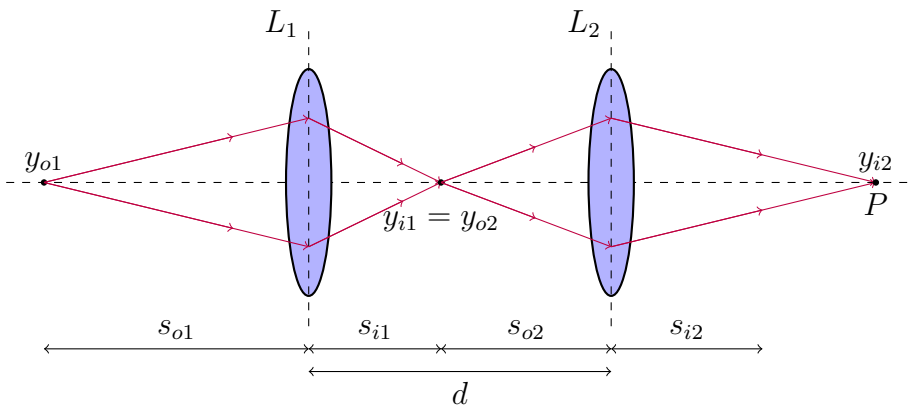
2.1.1 Kahden linssin systeemi

Kahden linssin systeemi koostuu nimensä mukaisesti kahdesta linssistä, jotka ovat välimatkan d päässä toisistaan. Tässä työssä tarkastellaan ihmissilmän toimintaa, joka vastaa optisesti kahden kuperan linssin systeemiä, jossa linssien välimatka on pienempi kuin kummankaan polttoväli [3, s. 178].

Kahden linssin systeemin tarkastelu täytyy aina toteuttaa yksi linssi kerrallaan. Kuvan 2.2 mukaisessa tilanteessa jokainen linssi taittaa valoa sen kulkiessa linssin läpi. Linssi L_1 siis taittaa valoa ja muodostaa kuvan y_{i1}, joka toimii kohteena y_{o2} linssille L_2. Tämän jälkeen valo taittuu linssissä L_2 vielä lisää niin, että se osuu polttopisteeseen P muodostaen kuvan y_{i2}. Kuva kohteesta y_{o1} muodostuu siis pisteeseen P. Kuvan 2.2 mukaisesta toisen linssin muodostaman kuvan etäisyys linssistä on $s_{o2} = d - s_{i1}$. Koska $d < s_{i1}$, niin kohde linssille L_2 on valekuva [3, s. 179].

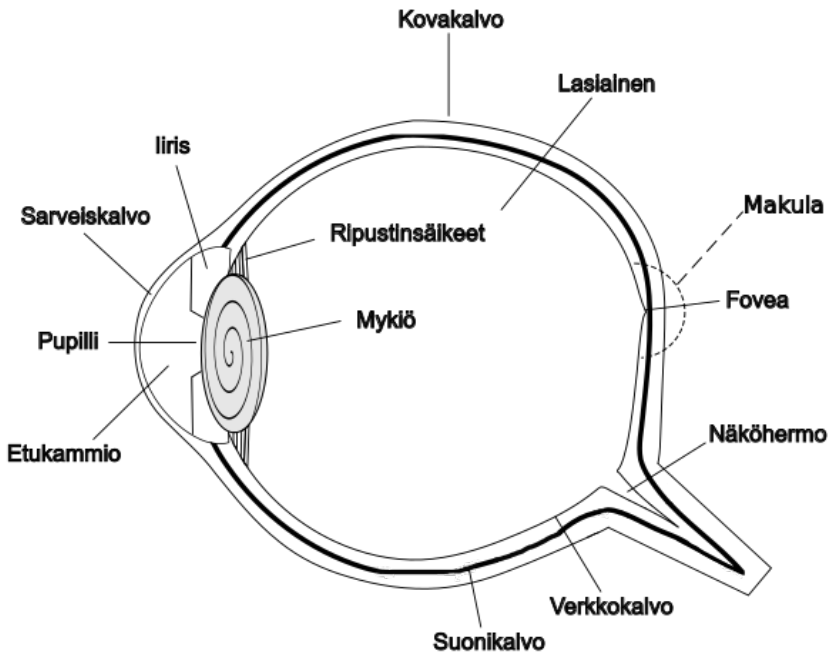
2.1.2 Ihmissilmän toiminta kahden linssin systeeminä

Ihmissilmää ympäröi ja suojaa valkoinen kovakalvo. Silmän etuosaa suojaa ohut ja läpinäkyvä sarveiskalvo, jonka läpi silmään osunut valo kulkee. Sarveiskalvo on ilman ja aineen välinen rajapinta, mikä sen kuperan muodon vuoksi toimii kuperan linssin kaltai-



Kuva 2.2. *Valon kulkiessa kahden linssin systeemin läpi se taittuu kummassakin linssissä. Tarkastelu tulee kuitenkin toteuttaa yksi linssi kerrallaan. Ensimmäisen linssin muodostama kuva toimii toisen linssin kohteena, eli* $y_{i1} = y_{o2}$*. Tämän kuvan tapauksessa tarkastellaan kahta kuperaa linssiä.*

sesti. Kuvan 2.3 mukaisesti seuraavana silmässä on nestettä sisältävä etukammio, joka pitää sisällään iiriksen eli värikalvon. [3, s. 216] Värikalvo koostuu kuroja- ja laajentajalihaksista, jotka säätelevät mustuaisaukon eli pupillin kokoa [5, s. 14]. Pupillin koko vaikuttaa valon määrään, joka osallistuu kuvanmuodostukseen. Kirkkaissa olosuhteissa pupilli supistuu pieneksi, kun taas hämärässä se laajenee.

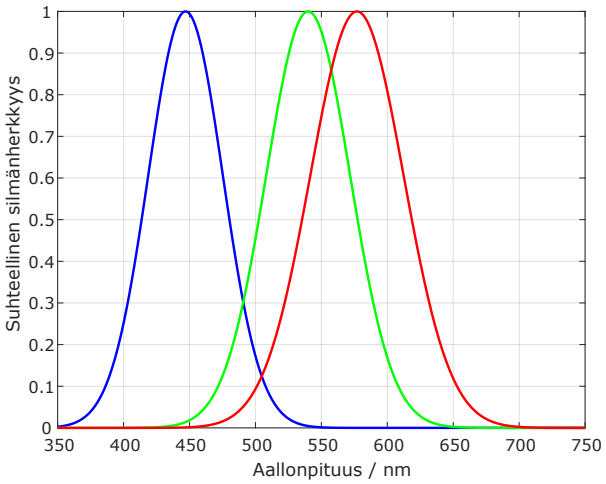


Kuva 2.3. *Ihmissilmän linsseinä toimivat sarveiskalvo ja mykiö. Nämä yhdessä ohjaavat kohteesta tulevan valon verkkokalvolla sijaitsevaan foveaan, jolloin ihminen näkee kohteen tarkasti.*

Mykiö on silmän toinen läpinäkyvä kupera linssi, joka sijaitsee värikalvon takana [6, s. 631].

Se koostuu monikerroksisesta sidekudosmassasta, jota ympäröi joustava kalvo [3, s. 216]. Mykiö on kiinnittynyt sädelihakseen ripustinsäikeillä, joiden kautta sädelihaksen supistuminen ja rentoutuminen välittyy mykiölle [5, s. 14]. Näiden ominaisuuksien myötä mykiön muoto vaihtelee silmän tarkentamisen mukaan.

Mykiön jälkeen valo siirtyy kuvan 2.3 mukaisesti silmän takakammioon, joka on täynnä läpinäkyvää geelimäistä nestettä nimeltä lasiainen. Valon kuljettua lasiaisen läpi se osuu silmän takaosassa olevaan verkkokalvoon. Verkkokalvo koostuu tappi- ja sauvasoluista [3, s. 217]. Tappisoluja on kolmea erilaista, joista jokainen havaitsee valon eri aallonpituuksia eli värejä. Tappisolut pystyvät havaitsemaan sinistä, vihreää ja punaista valoa.



Kuva 2.4. *Silmän kolmen eri tappisolun herkkyyskäyrän kuvaaja aallonpituuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa lyhyille aallonpituuksille herkkiä, eli sinistä valoa aistivia, tappisoluja. Vihreä käyrä kuvaa keskipitkille aallonpituuksille herkkiä, eli vihreää valoa aistivia, tappisoluja. Punainen puolestaan kuvaa pitkille aallonpituuksille herkkiä, eli punaista valoa aistivia, tappisoluja. Kuvaaja on mukailtu lähteestä [7].*

Sauvasolut puolestaan aistivat valon intensiteettiä, joten ne eivät osallistu värien näkemiseen. [6, s. 634] Sen sijaan sauvasolut mahdollistavat hämärässä näkemisen [3, s. 217]. Tappi- ja sauvasolujen havaitsema informaatio siirtyy näköhermon kautta aivoihin, jossa tapahtuu lopullinen kuvankäsittely ja näköaistimuksen muodostuminen[5, s. 271].

Tappisolut ovat jakautuneet koko verkkokalvon alueelle, mutta eniten niitä on verkkokalvon keskiosassa sijaitsevassa makulassa, jossa on kaksi kertaa enemmän tappisoluja kuin sauvasoluja. Makulan keskellä on noin 0,3 mm halkaisijaltaan oleva alue nimeltä fovea, jossa on pelkästään tappisoluja [3, s. 218]. Koska fovea mahdollistaa terävimmän ja yksityiskohtaisimman informaation, silmä liikkuu jatkuvasti siten, että tarkennetusta objektista tuleva valo osuu juuri makulaan ja erityisesti foveaan. Kyseisiä silmän liikkeitä kutsutaan sakkadeiksi ja ne voivat tapahtua erittäin nopeasti ilman, että ihminen tiedostaa prosessia. [8]

Ihmissilmän toiminta voidaan siis ymmärtää kahden linssin systeeminä, jossa ensimmäi-

senä linssinä toimii ilman ja sarveiskalvon välinen rajapinta ja toisena linssinä toimii mykiö. Mykiö on sarveiskalvoa huomattavasti paksumpi, mutta sen toimintaa voidaan vielä hyvin tarkastella ohuen linssin tavoin. [6, s. 631] Suurin taitekertoimien ero on ensimmäisessä ilman ja sarveiskalvon välisessä rajapinnassa, joten isoin osa valon taittumisesta tapahtuu siinä [4]. Silmän sisäosien materiaalien optiset tiheydet ovat lähestulkoon samoja. Näin ollen mykiö vain hienosäätää säteiden etenemistä ja kuvanmuodostumista. [3, s. 216]

Mykiö on toinen valon etenemiseen merkittävästi vaikuttava silmän osa. Oleellista ihmissilmän toiminnan kannalta on, että sädelihasten supistumiset vaikuttavat mykiön muotoon ja täten myös sen toimintaan linssinä. Mykiön muodon muuttumisen myötä myös sen polttoväli on säädeltävissä. Tämä mahdollistaa kuvantamiseen tarvittavan hienosäädön. [6, s. 631] Mykiö pyrkii tarkentamaan silmään tulevan valon siten, että kohteesta muodostuva kuva kuvaantuu foveaan [3, s. 218]. Mykiön toimintaa voidaan kuvata paksun linssin yhtälöllä (2.3) [3, s. 167]. Sädelihasten rentoutuessa mykiön paksuus kasvaa, jolloin myös polttoväli f pitenee. Puolestaan sädelihasten supistuessa mykiön paksuus pienenee, jolloin polttoväli f lyhenee.

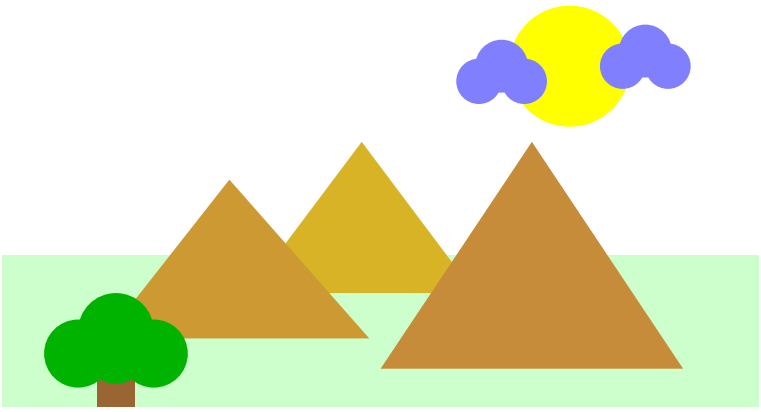
2.2 Syvyysnäkö ja syvyysvihjeet

Syvyysnäkö tarkoittaa kykyä havaita etäisyyksiä ja syvyyttä. Sen ansiosta on mahdollista arvioida esineiden suhteellista etäisyyttä havaitsijaan nähden. Tässä työssä arvioidaan etäisyyttä pitkittäissuunnassa. Syvyysnäkö perustuu aivojen kykyyn rakentaa verkkokalvolle muodostuvien kaksiulotteisten kuvien avulla kuvaus kolmiulotteisesta tilavuudesta [9].

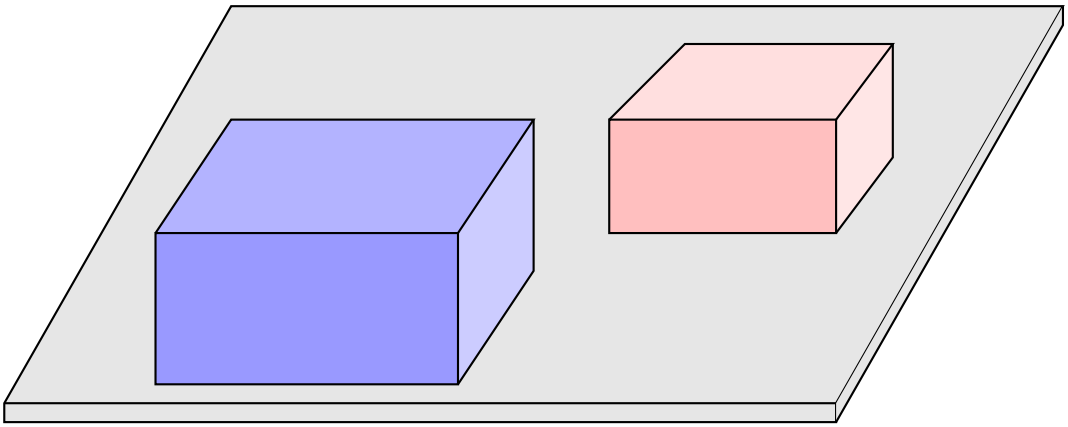
2.2.1 Monokulaariset syvyysvihjeet

Monokulaariset syvyysvihjeet ovat vihjeitä, joita voidaan käyttää syvyyden arvioimiseen hyödyntäen vain yhden silmän avulla tapahtuvia näköaistihavaintoja [10]. Kahden kohteen ollessa eri etäisyyksillä katsojasta, lähempänä oleva kohde voi peittää toisen kohteen osittain kuvan 2.5 mukaisesti. Tämä antaa tietoa syvyyssuunnassa olevasta järjestyksestä, mutta ei kuitenkaan suhteellisesta tai absoluuttisesta etäisyydestä. [11, s. 157] Suhteellista ja absoluuttista syvyyttä voidaan arvioida, kun esimerkiksi kuvan 2.5 pyramidien koko tunnetaan. Tällöin pystytään arvioimaan, kuinka suuri etäisyys pyramidien välillä on. Tarkasteltaessa kahta samankokoista kohdetta, kauempana oleva näyttää pienemmältä. [12, s. 97]

Sijoitetaan kohteet kuvan 2.7 mukaisesti samalle horisontaaliselle tasolle siten, että toinen kohteista on korkeammalla. Tällöin korkeammalle sijoittunut kohde näyttää olevan kauempana katsojasta. [9, s. 89] Mitä lähemmäksi alareunaa kohde sijoitetaan, sitä lä-

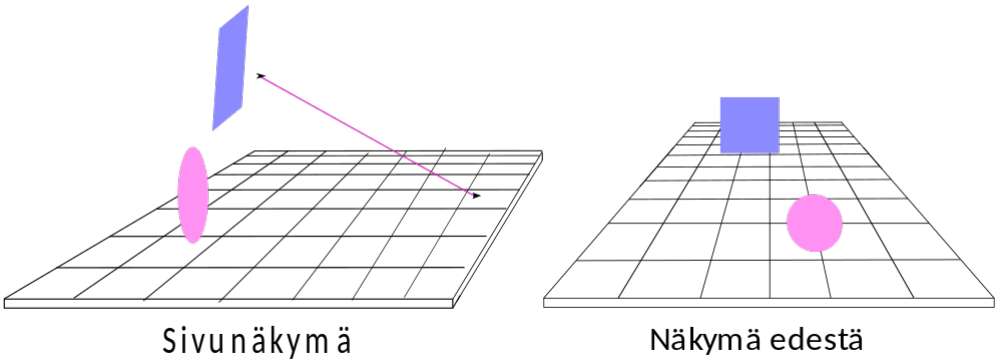


Kuva 2.5. *Kappaleen peittäessä toisen kappaleen, aivot tulkitsevat peitetyn kappaleen olevan kauempana. Voidaan huomata esimerkiksi pilvien olevan lähempänää katsojaa kuin auringon. Pyramideissa huomataan sama ilmiö. Mitä kauempana pyramidi kuvassa on, sitä haaleampi sen väri on. Tätä ilmiötä kutsutaan atmosfääriseksi etäisyydeksi.*



Kuva 2.6. *Kahden samankokoisen kohteen ollessa eri etäisyyksillä katsojasta, näyttää lähempänä oleva kohde isommalta kuin kauempana oleva.*

hempänä katsojaa se näyttää olevan.



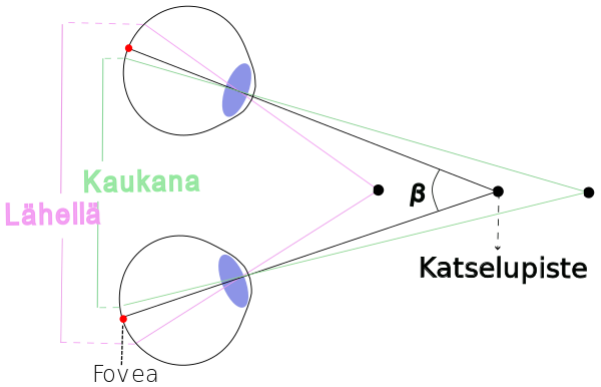
Kuva 2.7. *Kohteet on sijoitettu samalle horisontaaliselle tasolle. Neliö näyttää kuitenkin olevan kauempana, kun kohteita katsotaan edestäpäin. Tämä johtuu siitä, että neliö on korkeammalla kuin ympyrä.*

Kohteen etäisyyden kasvaessa myös tekstuurin tiheys kasvaa, jolloin kohde saattaa näyttää suuremmalta, mutta kuitenkin kaukaisemmalta. Esimerkiksi lähellä olevat kivet näkyvät yksittäisinä, mutta kauempana ne sulautuvat yhteen. Tällöin kauempana olevat kivet näyttävät suuremmilta kuin lähellä olevat kivet. Tämän myötä isokin kohde voi näyttää kaukaiselta, jos tekstuurin tiheys on riittävän suuri. [9, s. 89]

Atmosfäärinen etäisyys tarkoittaa ilmiötä, jossa kauempana olevat kohteet sinertävät usein enemmän tai näkyvät haaleampina kuin lähempänä olevat, kuten kuvassa 2.5. Tämä johtuu ilmakehän vaikutuksista valoon.[12, s. 98] Ilmakehässä oleva ilma ja hiukkaset hajottavat auringonvaloa, erityisesti sinistä valoa, minkä vuoksi kaukaiset kohteet näyttävät sinertäviltä [9, s. 99]. Ilma ja sen sisältämät epäpuhtaudet myös absorboivat osan valosta, jolloin kaukaiset kohteet näyttävät haaleammilta ja vähemmän kontrastisilta.

2.2.2 Binokulaariset syvyysvihjeet

Binokulaaristen syvyysvihjeiden muodostamiseen tarvitaan kaksi silmää. Silmien välisen vaakasuoran etäisyyden myötä kumpikin silmä muodostaa erilaisen näkymän verkkokalvolle [13]. Näin ollen binokulaarinen näkökenttä on laajempi kuin kumpikaan monokulaarisista näkökentistä yksinään [10].



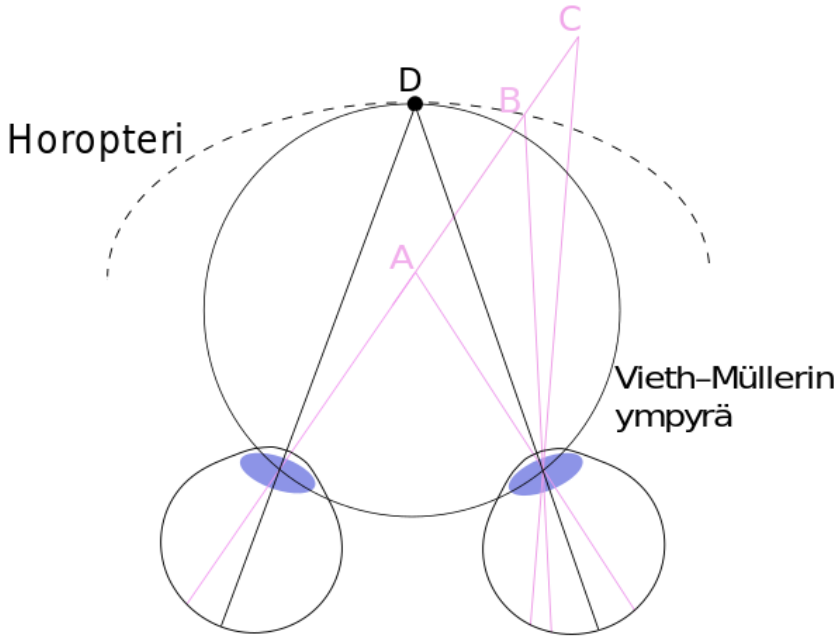
Kuva 2.8. *Silmien tarkentamaa kohtaa kutsutaan katselupisteeksi. Katselupisteeseen muodostuu kulma β, jonka terävyyden avulla ihminen pystyy arvioimaan kohteen etäisyyden. Katselupistettä kauempana ja lähempänä olevat kohteet kuvaantuvat silmien verkkokalvoille vastinkuvapisteisiin eli samaan kohtaan molempien silmien verkkokalvolla. Kyseiset kohteet eivät kuitenkaan osu foveaan, minkä vuoksi ne näkyvät sumeana.*

Yksi binokulaarisista syvyysvihjeistä on konvergenssi. Silmät liikkuvat erisuuntiin, jotta lähellä oleva kohde kuvantuisi molempien silmien verkkokalvojen vastaaviin pisteisiin, useimmiten foveoihin. [12, s. 95]

Silmien näköakselit muodostavat kuvassa 2.8 kulman β, jonka suuruus vaihtelee kohteen etäisyyden mukaan. Näköakselilla tarkoitetaan suuntaa, johon silmä katsoo. Se on kuvitteellinen viiva, joka kulkee foveasta pisteeseen, johon silmä on kohdistunut. Kulman

β suuruutta kutsutaan binokulaariseksi konvergenssiksi. Silmämunia liikuttavien lihasten asennon avulla ihminen pystyy arvioimaan kappaleen etäisyyttä. [12, s. 95] Esimerkiksi sormea tuodessa lähelle kasvoja silmät menevät kieroon, jolloin kiintopisteeseen muodostuva kulma suurenee eli binokulaarinen konvergenssi kasvaa. Kulmien muuttuessa myös kuvapisteet siirtyvät silmien verkkokalvoilla. Silmät toimivat yhteistyössä, joten vastinkuvapisteet siirtyvät vaakatasossa. Vastinkuvapisteet siirtyvät etäämmäksi toisistaan katselupisteen lähentyessä ailmiä, kuten kuvasta 2.8 voidaan huomata. [14] Tätä kuvapisteiden siirtymistä sanotaan vaakaparallaksiksi.

Ihmisen silmät ovat noin 6,5 senttimetrin päässä toisistaan horisontaalisella tasolla, minkä vuoksi ne näkevät asiat eri näkökulmista [9, s. 100]. Tämä aiheuttaa binokulaarista eroavaisuutta, joka on stereonäön merkittävä tekijä. Stereonäöllä tarkoitetaan kykyä hahmottaa kolmiulotteinen syvyys.[12, s. 94] Binokulaarisella eroavaisuudella tarkoitetaan kahden silmän kuvien vastaavien pisteiden sijainnin eroa. Se voidaan luokitella joko risteävään tai ei-risteävään, suhteessa pisteeseen, jossa silmät konvergoivat. [10, s. 141] Binokulaarisen eroavaisuuden ollessa risteävä, katseviivat risteävät ennen kuin ne saavuttavat kuvassa 2.9 näkyvän horopterin [12, s. 100].

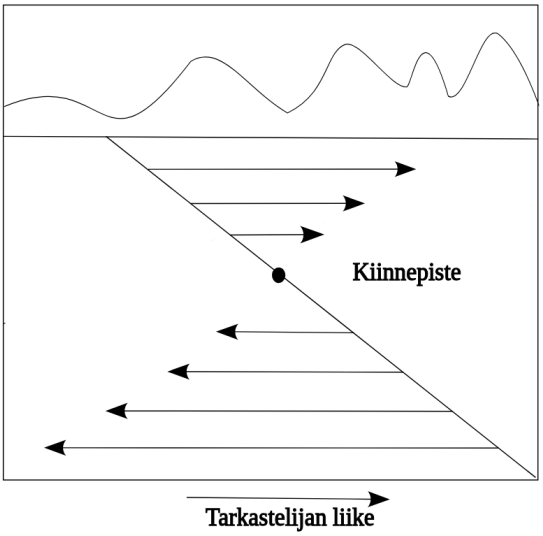


Kuva 2.9. *Horopterilla sijaitsevat kohteet, kuten piste B, ovat samalla etäisyydellä kuin katselupiste D. Teoriassa kyseessä on Vieth–Müllerin ympyrä. Binokulaarisen eroavaisuuden ollessa katseviivat risteävät pisteessä A. Puolestaan binokulaarisen eroavaisuuden ollessa ei-risteävä katseviivat risteävät pisteessä C.*

Horopteri on pinta, joka koostuu pisteitä, jotka ovat samalla etäisyydellä silmästä kuin katselupiste D. Horopterilla sijaitsevat kohteet siis kuvantuvat vastaaviin kohtiin molemmilla verkkokalvoilla. [10, s. 141] Teoriassa kyseessä on ympyrä, jota kutsutaan Vieth–Müllerin ympyräksi. Se kulkee katselupisteestä silmien solmupisteisiin. [12, s. 100] Käytettäessä

Vieth–Müllerin ympyrää oletetaan silmien olevan täysin symmetriset ja katselun tapahtuvan ideaaliolosuhteissa. Käytännössä tämä ei kuitenkaan onnistu, joten horopteri on tasaisempi, kuten kuvasta 2.9 voidaan huomata. Silmät ja aivot siis optimoivat horopterin niin, että syntyy mahdollisimman vakaa ja hyödyllinen kolmiulotteinen havaintokenttä. [15, s. 58]

Kohteen ollessa kauempana katselupisteestä binokulaarinen eroavaisuus on ei-risteävä. Eroavaisuuden suuruus ilmaisee, kuinka lähellä tai kaukana kohde on tiettyyn katseluetäisyyteen nähden. [12, s. 100] Sen ollessa liian suuri, kohteet voivat näkyä kaksoiskuvina. Panumin alue määrittää eroavaisuuden ylärajan, joka voi tuottaa yksittäisen näkymän. [10, s. 140] Panumin alue on pieni alue kummankin silmän verkkokalvolla, jossa kahdesta eri kohtaan osuvasta kuvasta voidaan vielä muodostaa yksi yhtenäinen kuva aivoissa[15, s. 315]. Pienet erot kahden silmän havainnoissa synnyttävät stereonäön [10, s. 140]. Stereonäkö siis ilmenee, kun syvyydessä näkyvät muodot eivät ole näkyvissä molempien silmien kuvissa.



Kuva 2.10. *Tarkastelija liikkuu oikealla ja tarkentaa katseensa kiinnepisteeseen. Kaukana olevat kohteet näyttävät liikkuvan oikealle ja lähellä olevat kohteet vasemmalle. Tätä ilmiötä kutsutaan liikeparallaksiksi.*

Kun tarkastelija liikkuu kuvan 2.10 mukaisesti sivusuunnassa oikealle ja kiinnittää katseensa keskimatkan päässä olevaan kohteeseen, lähempänä oleva kohde näyttää liikkuvan vasemmalle ja kauempana oleva kohde oikealle. Mitä kauempana kohde on katseen kiinnepisteestä, sitä nopeammin se näyttää liikkuvan. Tätä ilmiötä kutsutaan liikeparallaksiksi ja se on tärkeä syvyysvihje silloin, jos konvergenssi ja stereonäkö eivät toimi. [12, s. 95] Liikeparallaksin voi havaita katsoessaan ulos liikkuvan auton sivuikkunasta.

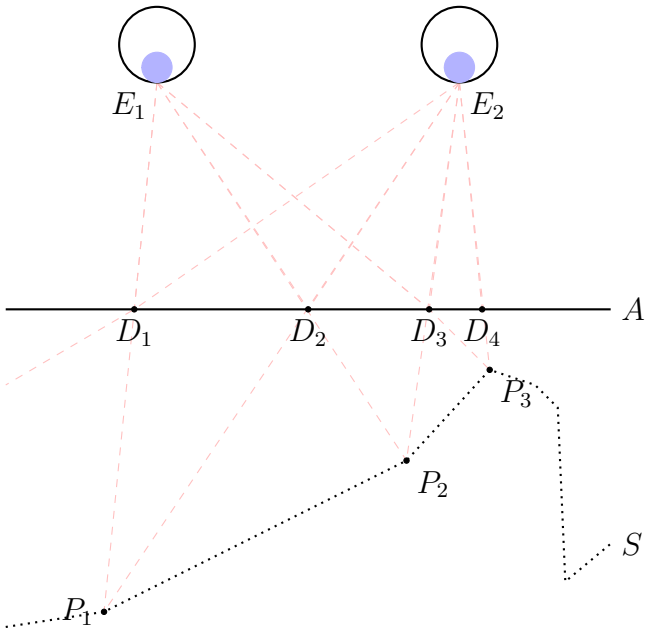
2.3 Syvyysnäön harhauttaminen optisilla illuusioilla

Syvyysnäköä voidaan harhauttaa erilaisilla optisilla illuusioilla. Yksi tapa tähän on erilaiset stereogrammit, kuten satunnaispiste-stereogrammi (Random Dot Stereogram), joka koostuu satunnaisesti sijoitetuista pisteistä [12, s. 101]. Tässä työssä syvennytään autostereogrammeihin, jotka ovat eräänlaisia satunnaispiste-stereogrammeja.

2.3.1 Autostereogrammit ja stereonäkö

Autostereogrammit ovat kuvioita, jotka voivat luoda illuusion esineistä, joilla on monimutkaisia syvyysprofiileja. Ne kehitettiin 1980-luvun loppupuolella, jolloin ne tulivat tunnetuksi “Magic Eye”-kuvina. [16]

Satunnaispiste-stereogrammit koostuvat kahdesta kuvasta ja niiden tarkasteluun tarvitaan usein keinotekoisia apuvälineitä, kuten stereoskooppia, binokulaarisen yhdistymisen saavuttamiseksi [12, s. 102]. Autostereogrammeja puolestaan voidaan tarkastella paljain silmin ilman stereoskooppia, jolloin syntyy stereoskooppinen, kolmiulotteinen (3D) syvyysvaikutelma [17]. Kuva 2.11 havainnollistaa satunnaispiste-autostereogrammin toimintaperiaatetta kolmiulotteisen pinnan luomisessa. Tavoitteena on muodostaa kuvio autostereogrammin pinnalle A, joka havaitsijan silmien sijainnista katsottuna on yhdenmukainen vastaavan kuvion kanssa kolmiulotteisella pinnalla S.



Kuva 2.11. *Molempien silmien katsoessa tasolla S sijaitsevaa pistettä P_1, oikea silmä näkee tasolla A sijaitsevan pisteen D_1 ja vasen silmä pisteen D_2. Jotta autostereogrammi on mahdollista muodostaa, kyseisten pisteiden tulee olla samanvärisiä.*

Sijoitetaan satunnaisen värinen piste satunnaiseen paikkaan D_1 pinnalla A. Vasen silmä E_1 näkee tämän pisteen suunnassa, joka vastaa samanväristä pistettä P_1 pinnalla

S. Oikea silmä E_2 puolestaan näkee pisteen P_1 eri sijainnissa, pisteessä D_2, pinnalla A. Jotta kuvio olisi johdonmukainen, tulee pisteen D_2 olla samanvärinen kuin piste D_1. Näin ollen tulee pisteen D_2 lisäämisen myötä lisätä samanvärinen piste D_3. Tämä taas johtaa tarpeeseen lisätä piste D_4, ja näin prosessi jatkuu. Tämä toistuva prosessi luo autostereogrammin kuvion, jossa silmät näkevät pisteiden sijainnit siten, että ne luovat kolmiulotteisen vaikutelman pinnasta S.

Kuvan 2.11 pinnalle S muodostuva kuvio voidaan nähdä silmien epätavallisella konvergenssikulmalla. Tarkasteltaessa autostereogrammia silmien normaalilla konvergenssilla, se näyttää vain litteältä toistuvalta kuviolta. [17] Kun silmät konvergoituvat kuviotoiston etäisyydellä, vierekkäisten kuviosyklien pienet erot luovat binokulaarisia eroja ja nämä tulkitaan katsojan toimesta syvyysvaihteluina. Jotta kolmiulotteinen autostereogrammin kuva pinnalla S tulisi näkyviin, katsojan pitää tarkentaa silmät uudestaan tasolle A sen jälkeen, kun konvergenssi on saavutettu. [17]

Koska autostereogrammien tarkasteluun ei käytetä apuvälineitä, se voi olla haastavaa. Niiden katsomiseen tarvitaan tietynlainen tekniikka, joka on osalle ihmisistä helpompaa kuin toisille. Näin ollen kaikkien ei ole mahdollista nähdä autostereogrammien kolmiulotteisia kuvioita.

Tässä työssä mallinnetaan myös anaglyfisia autostereogrammeja. Anaglyfeissa toinen kuva esitetään punaisena ja toinen sinivihreänä. Kumpikin väri suunnataan erikseen punasinilasien avulla toinen vasempaan ja toinen oikeaan silmään. Binokulaarista eroavaisuutta pystytään säätelemään siirtämällä punaista ja sinivihreää kuvaa horisontaalisella tasolla toisiinsa nähden. [18] Kolmiulotteisen kuvan vahvuus siis muuttuu tämän myötä. Anaglyfien näkemiseen ei tarvita epänormaalia konvergenssikulmaa, joten anaglyfin pystyy yleisesti ottaen kaikki näkemään punasinilasien avulla.

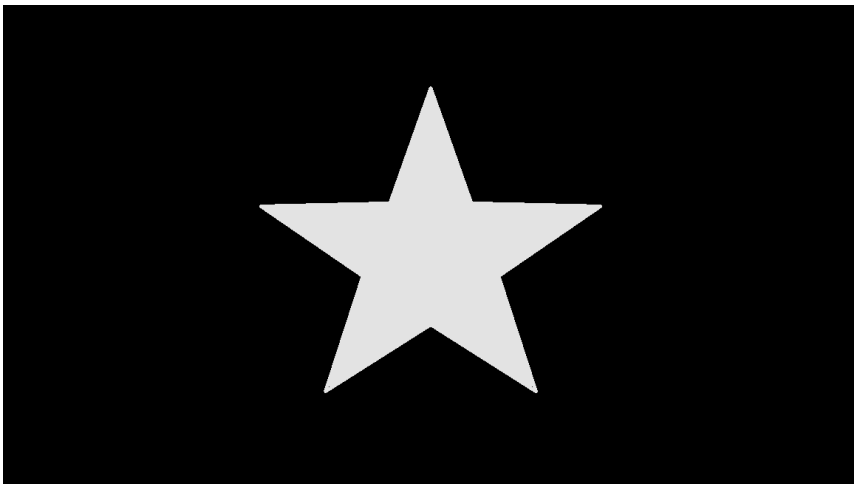
3. OPTISTEN ILLUUSIOIDEN MALLINTAMINEN

Tässä työssä mallinnettavina optisina illuusioina toimii satunnaispiste autostreogrammi sekä anaglyfinen autostereogrammi. Molempien pohjana toimii kuva, jossa tausta on musta ja kuvio on hyvin vaalean harmaa.

3.1 Autostereogrammin mallintaminen

Autostereogrammit mallinnetaan liitteenä A olevalla funktiolla, joka tulkitsee siihen syötetyn kuvan syvyyskarttana ja muuttaa sen satunnaispistestereogrammiksi. Funktiossa käytetty algoritmi on abSIRD, jonka on julkaissut Lewey Geselowitz vuonna 2004 [19]. Kyseistä funktiota ja sen kutsumiseen käytettävää koodia muokkaamalla pystytään vaikuttamaan autostereogrammin näkymiseen.

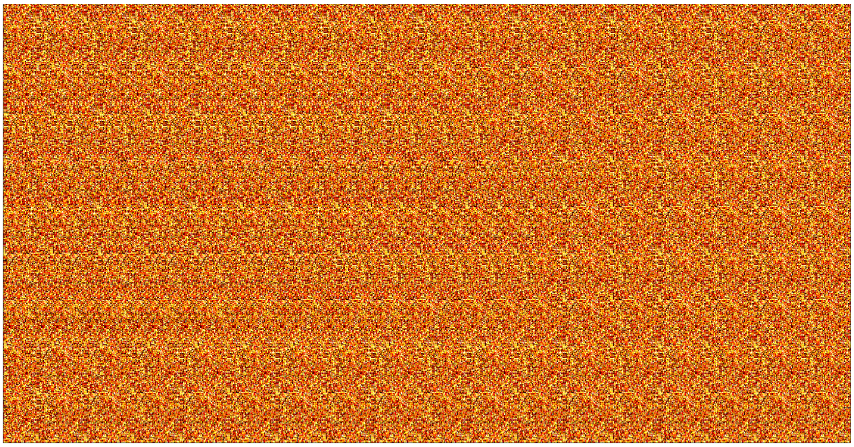
Käytetään satunnaispisteistä koostuvan autostereogrammin sekä anaglyfisen autostereogrammin pohjana kuvaa 3.1, jossa on mustalla pohjalla vaalean harmaa tähti. Kun kyseisestä kuvasta muodostetaan autostereogrammi, tähti näyttää tulevan ulos taustasta.



Kuva 3.1. *Autostereogrammin pohjana toimiva mustavalkoinen kuva. Harmaasta tähdestä muodostuu kolmiulotteinen autostereogrammin toimiessa.*

Liitteenä B olevalla alkuperäisellä koodilla saadaan kuvan 3.2 mukainen autostereogrammi. Alkuperäinen koodi pelkästään lukee annetun datan eli syvyyskartan ja muodostaa siitä autostereogrammin makeAbsird-funktion perusteella. Alkuperäisessä koodissa käytetty makeAbsird-funktio on liitteen A mukainen, mutta autostereogrammin luomiseen käyte-

tään 32x32-kokoista matriisia. Tämän lisäksi alkuperäisessä funktiossa ei ole Gaussista suodinta, joka parantaisi stereogrammin laatua.



Kuva 3.2. *Alkuperäisellä makeAbsird-funktiolla muodostettu autostereogrammi. Kyseisessä kuvassa on käytetty 32x32 kokoista matriisia, joka on liian pieni selkeän autostereogrammin muodostamiseen.*

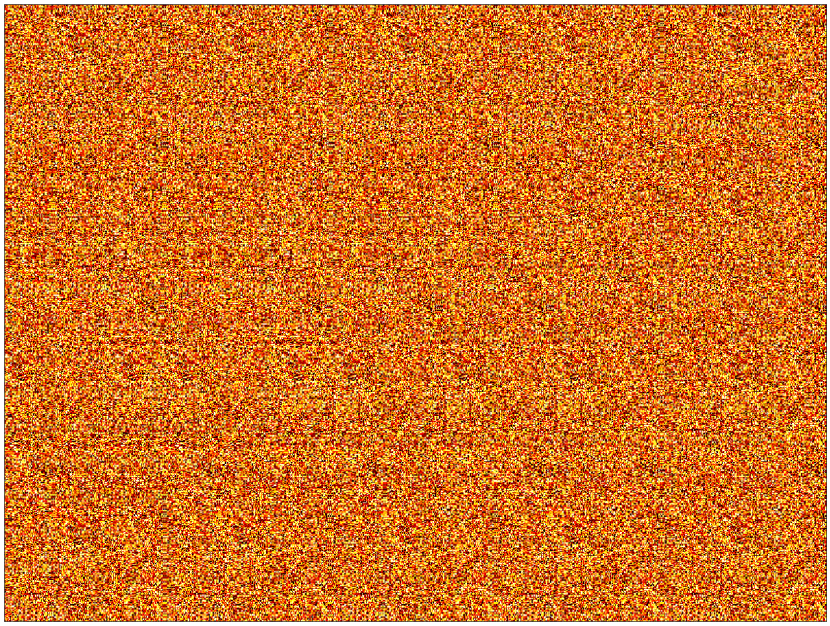
Muokataan alkuperäistä funktiota siten, että se on liitteen A mukainen. Tehdään autostereogrammin luomiseen käytettävästä matriisista 1000x1000-kokoinen eli lisätään autostereogrammin resoluutiota. Lisätään myös Gaussinen suodin. Käytetään tätä funktiota seuraavien autostereogrammien muodostamiseen.

Muodostetaan kuvan 3.3 autostereogrammi, jossa tähti näyttää tulevan taustasta ulos kolmiulotteisesti. Tätä varten käytetään liitteenäC olevaa koodia. Kyseiseen koodiin on lisätty komentoja, jotka parantavat autostereogrammin näkyvyyttä verrattuna liitteenä B olevaan alkuperäiseen koodiin. Kontrastin lisääminen syvyyskarttaan tehostaa syvyysvaikutelmaa tekemällä 3D-muodot helpommin havaittaviksi. Jos syvyysvaihtelu puolestaan on liian suuri, se voi vääristää kuvaa ja tämän myötä kuvasta tulee vaikeasti katsottava. Datan skaalaus välille [0,1] tasapainottaa syvyyden, mikä estää vääristymiä sekä yli- tai alikorostusta.

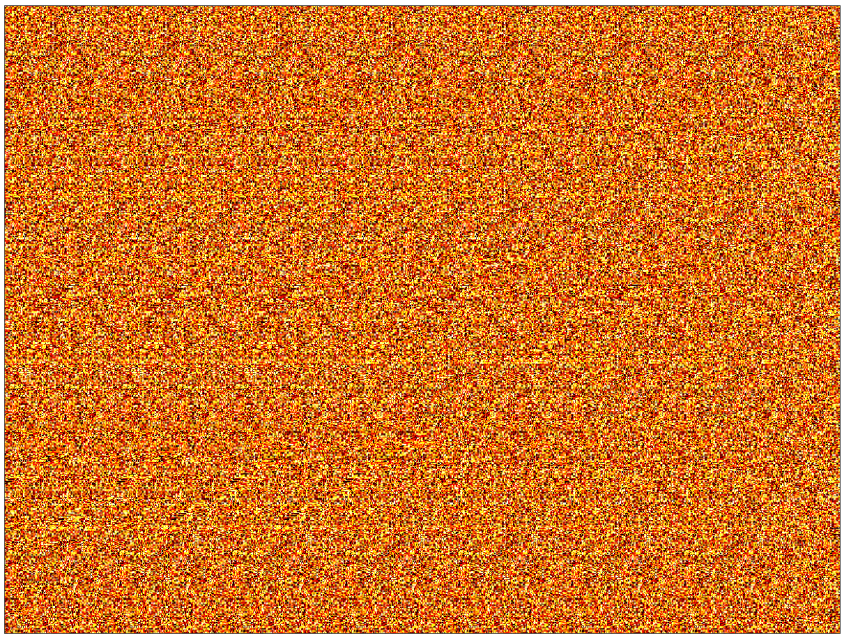
Väärän kokoinen stereogrammi voi vääristää mittasuhteita tai estää efektin näkymisen, minkä vuoksi stereogrammin mittojen määrittäminen on tärkeää. Syvyyskartan rajauksella tai täytöllä varmistetaan, että syvyyskartta vastaa stereogrammin kokoa. Lopuksi vielä skaalataan syvyysarvot stereogrammin algoritmia varten eli määritetään vaakasiirtymien suuruus. Suurempi arvo lisää syvyyttä, mutta voi myös vaikeuttaa tarkentamista.

Muodostetaan kuvan 3.4 mukainen autostereogrammi, jossa tähti näyttää olevan kolmiulotteisesti taustan takana. Toisin sanoen käännetään syvyyden suunta.

Koska satunnaispisteiden värillä ei ole vaikutusta autostereogrammin näkemiseen, se toimii myös mustavalkoisena. Näin ollen värisokeatkin ihmiset pystyvät näkemään autostereogrammeja. Muokataan liitteenä A olevaa funktiota siten, että autostereogrammista tulee mustavalkoinen. Tämä onnistuu vaihtamalla rivin 47 parametri *hot* parametriin



Kuva 3.3. *Autostereogrammi on muodostettu käyttäen 1000x1000 matriisia. Katsottaessa kuvaa oikealla konvergenssikulmalla, tähti näyttää tulevan kohti katsojaa.*

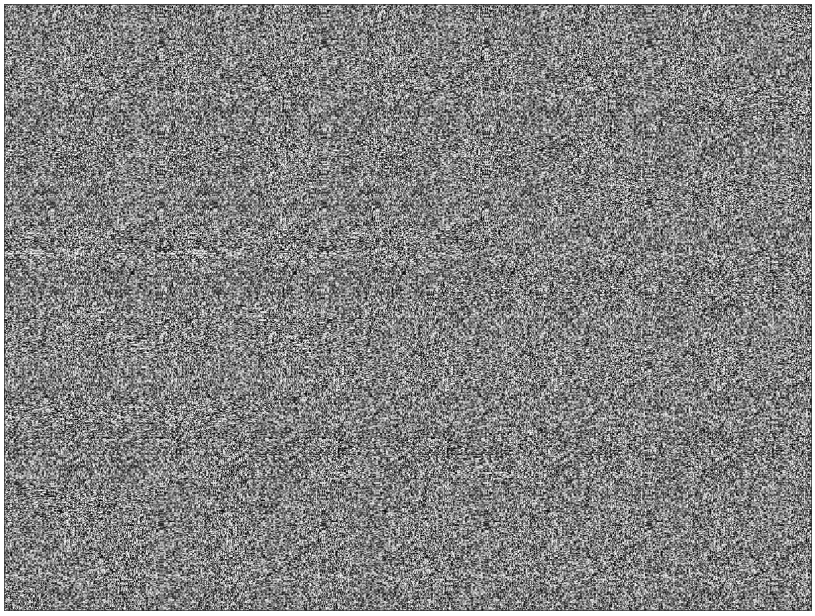


Kuva 3.4. *Autostereogrammin syvyyden suunta on käännetty. Tämän ansiosta autostereogrammi näyttää esiintyvän taustan takana.*

gray. Näin saadaan kuvan 3.5 mukainen mustavalkoinen autostereogrammi, kun kutsutaan funktiota liitteenä C olevalla koodilla.

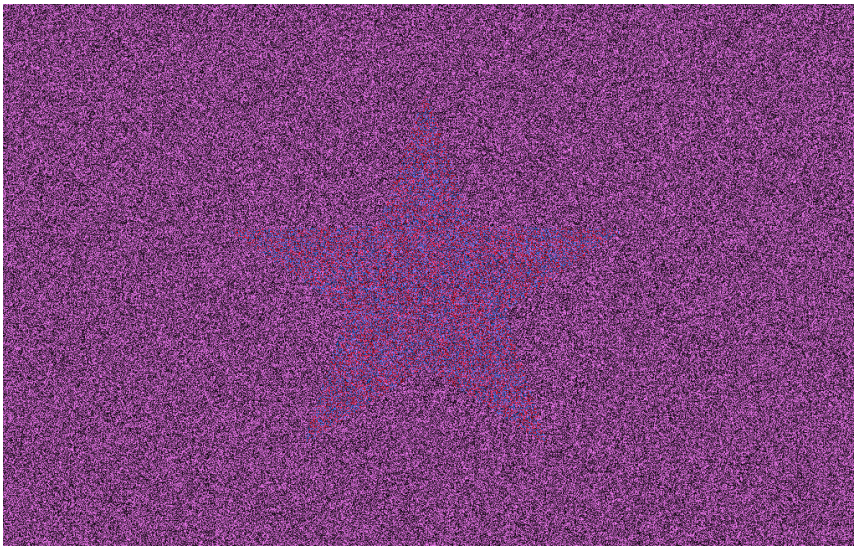
3.2 Anaglyfisen autostereogrammin mallintaminen

Anaglyfisella autostereogrammilla tarkoitetaan stereogrammia, jonka näkee kolmiulotteisena ainoastaan kuvan katsomiseen tarkoitetuilla punasinilaseilla. Tämän työn anaglyfis-



Kuva 3.5. *Satunnaispisteiden värillä ei ole vaikutusta autostereogrammiin. Tämän ansiosta myös värisokeat ihmiset pystyvät näkemään autostereogrammeja.*

ten autostereogrammien katsomiseen käytetään tarkemmin sanottuna punasyaanilaseja, sillä ne toimivat paremmin tässä työssä mallinnetun autostereogrammin kanssa. Kyseisissä laseissa vasen linssi on punainen ja oikea linssi syaanin värinen. Tässä työssä mallinnetaan kaksi anaglyfista autostereogrammia, joista toisen katsomiseen tarvitaan vielä hyvin pieni epätavallinen konvergenssikulma. Toinen anaglyfinen autostereogrammi on nähtävissä silmien normaalilla konvergenssikulmalla.

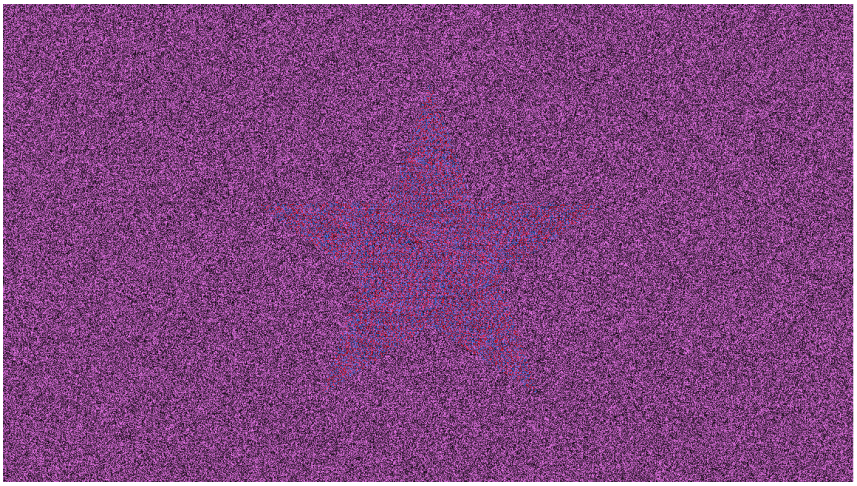


Kuva 3.6. *Anaglyfisen autostereogrammin katsomiseen tarvitaan siihen tarkoitetut lasit, joiden toinen linssi on punainen ja toinen sinivihreä. Komiulotteisen efektin näkemiseen tarvitaan kuitenkin edelleen erittäin pieni silmien epätavallinen konvergenssikulma.*

Muodostetaan kuvan 3.6 mukainen anaglyfinen autostereogrammi kutsumalla liitteen D

funktiota liitteen E koodilla. Liitteen D funktio noudattaa makeAbsird-funktion periaatetta, mutta siinä määritellään vasemman ja oikean kuvan siirtymä ja luodaan anaglyfinen kuva punaisilla ja sinivihreillä satunnaispisteillä. Punaisten ja sinivihreiden satunnaispisteiden binokulaariset eroavaisuudet muodostavat kolmiulotteisen kuvan.

Kuvassa 3.6 tähti näyttää tulevan ulos taustasta, sillä punainen kanava tulee vasempaan silmään ja sinivihreä oikeaan. Jos kanavat vaihdetaan toisinpäin, punainen menee oikeaan silmään ja sinivihreä vasempaan. Tällöin syvyyssuunta kääntyy väärinpäin, jolloin kuva näyttää kääntyvän sisäänpäin tai voi aiheutua katseluhäiriöitä.



Kuva 3.7. *Pikselien vaakasuuntainen siirtymä on huomattavasti pienempi kuin edellisissä autostereogrammeissa. Tämän vuoksi kolmiulotteisen efektin näkeminen on mahdollista pelkästään punasinilaseilla ja silmien normaalilla konvergenssikulmalla.*

Vähennetään autostereogrammin pikselien vaakasuuntaista siirtymää eli parallaksia. Tällöin silmien epätavallista konvergenssikulmaa ei tarvita enää ollenkaan kolmiulotteisen efektin näkymiseen. Kun tämä muutos tehdään, saadaan kuvan 3.7 mukainen anaglyfinen autostereogrammi. Pikselien siirtymän vähentäminen toisaalta myös heikentää kolmiulotteista syvyysvaikutelmaa, minkä vuoksi tähti näyttää menevän taustan taakse.

4. TULOSTEN ANALYYSI

Tutkitaan, kumpi on helpompi nähdä: anaglyfinen autostereogrammi vai normaali satunnaispiste autostereogrammi. Tutkimus suoritetaan pyytämällä kolmea eri henkilöä katsomaan edellisessä kappaleessa esitettyjä autostereogrammeja ja kertomaan mitä eroja he niissä havaitsevat. Tämän myötä pääsemme tulokseen siitä, minkälainen autostereogrammi on helpoin nähdä ja miten eri parametrien muuttaminen vaikuttaa siihen. Yksi henkilöistä käyttää silmälaseja ja hänellä on hajataittoa. Kahdella muulla henkilöllä on normaali näkö.

Hypoteesina tälle tutkimukselle on, että anaglyfinen autostereogrammi on helpompi nähdä kuin normaali autostereogrammi. Anaglyfinen autostereogrammi, jonka pikselien vaakasuuntainen siirtymä on pieni, on todennäköisesti kaikista helpoin nähdä. Liitteenä B olevalla koodilla muodostettu autostereogrammi on todennäköisesti kaikista vaikein nähdä.

Alkuperäisellä koodilla tehty kuvan 3.2 autostereogrammi osoittautui kaikille koehenkilöille vaikeimmin havaittavaksi. Vain yksi koehenkilöistä pystyi näkemään kuvassa vähän kolmiulotteisia muotoja, mutta ei kuitenkaan selkeää kuviota. Syynä tähän on autostereogrammin matala kontrasti, pieni matriisin koko eli resoluutio ja puuttuva Gaussinen suodin. Näiden puuttumisen myötä autostereogrammi on epätarkka ja vaikeasti hahmotettava.

Kuvien 3.3 ja 3.4 autostereogrammien luomiseen käytettiin suurempaa resoluutiota ja Gaussista suodinta, jolloin autostereogrammin kolmiulotteisuus parani merkittävästi. Kontrastin lisääminen ja syvyysdatan skaalaus saivat esiin selkeämmän muodon. Tähti näkyi selkeästi joko "ulos tulevana"tai "taustaan menevänä", ja koehenkilöt pystyivät näkemään kolmiulotteisen kuvion paremmin kuin alkuperäisessä versiossa. Koehenkilöt kuitenkin kokivat, että kuvan 3.3 kolmiulotteinen kuvio oli helpompi nähdä kuin kuvan 3.4. Kahdella koehenkilöllä kesti jonkin aikaa silmien tarkennuksessa ennen kuin 3D-efekti näkyi. Etenkin silmälasit omaavalla koehenkilöllä oli vaikeuksia saada kolmiulotteinen kuvio näkyviin. Tämä johtuu luultavimmin hajataitosta, sillä normaalisti silmälaseilla ei pitäisi olla vaikutusta autostereogrammin näkemiseen. Hajataiton myötä valo ei taitu silmässä tarkasti yhteen pisteeseen, minkä vuoksi hajataiton omaavalla henkilöllä on vaikeuksia havaita kontrastiltaan heikkoja tai yksivärisiä kuvioita. Tämän vuoksi hajataiton omaavalla henkilöllä voi olla muita koehenkilöitä enemmän vaikeuksia nähdä autostereogrammeja.

Mustavalkoinen versio ei tuottanut eroa kolmiulotteisen kuvion havaitsemisessa. Tämä tukee hypoteesia, että väri ei ole oleellinen 3D-efektin näkemisen kannalta. Tämä havainto tukee teoriaa, että värisokeiden henkilöiden on myös mahdollista nähdä autostereogrammeja.

Kaikki koehenkilöt havaitsivat kuvan 3.6 anaglyfisen autostereogrammin kolmiulotteisuuden selkeämmin ja nopeammin kuin normaalin autostereogrammin. Tämä johtuu siitä, että kyseisen stereogrammin 3D-efektin näkemiseen tarvitaan vain hyvin pieni epänormaali konvergenssikulma. Punasinilasien avulla kuvan syvyys hahmottui lähes välittömästi. Tämä tukee hypoteesia, että anaglyfinen esitystapa on käyttäjäystävällisempi erityisesti kokemattomille autostereogrammin katsojille. Hajataiton omaavalla henkilölle 3D-efekti ei kuitenkaan näkynyt yhtä vahvasti kuin muille koehenkilöille.

Kuvassa 3.7 vaakasiirtymän suuruutta pienennettiin, jolloin silmien konvergenssitarve katosi. Koehenkilöiden mielestä 3D-efekti oli tällöin kaikista helpoin havaita. Kuitenkin samalla syvyysvaikutelma heikkeni, minkä vuoksi tähti näytti vähemmän kolmiulotteiselta. Tämä kertoo, että parallaksin säätö on niin sanottu kompromissi, sillä näkemisen helpottamisen myötä syvyyden voimakkuus heikkenee.

Saadut tulokset tukevat asetettua hypoteesia eli anaglyfinen autostereogrammi on helpompi nähdä kuin normaali satunnaispiste autostereogrammi. Lisäksi todettiin, että pienempi vaakasuuntainen siirtymä anaglyfisessa kuvassa tekee efektin näkemisestä vieläkin helpompaa. Normaalin autostereogrammin havaittavuutta voi parantaa huomattavasti lisäämällä resoluutiota ja kontrastia sekä käyttämällä Gaussista suodinta.

Näiden tulosten perusteella voidaan päätellä, että anaglyfinen esitystapa on käyttäjäystävällisempi etenkin ihmisille, joilla ei ole kokemusta autostereogrammien katsomisesta. Jos tavoitteena on maksimoida kolmiulotteisuus, voidaan käyttää suurempaa parallaksia, mutta käyttömukavuuden kannalta pienempi parallaksi tarjoaa parhaan kompromissin. Tutkimuksessa myös havaittiin, että hajataitolla voi olla vaikutusta kykyyn nähdä autostereogrammeja.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin ihmisen syvyysnäköön vaikuttavia tekijöitä ja optisia illuusioita. Teoriaosiossa käsiteltiin valon kulkua linsseissä ja erityisesti silmän linsseissä eli mykiössä ja sarveiskalvossa. Lisäksi käytiin läpi erilaisia syvyysvihjeitä, joista työn kannalta tärkeimmiksi osoittautui konvergenssi sekä stereonäkö. Lopuksi esiteltiin vielä teoria autostereogrammeista.

Työssä mallinnettiin kuusi erilaista autostereogrammia, joista kolme oli tavallisia satunnaispisteistä koostuvia autostereogrammeja, yksi oli mustavalkoinen ja kaksi oli anaglyfisia autostereogrammeja. Tutkimus suoritettiin kolmen henkilön kohderyhmällä, joista yhdellä oli silmälasit ja hajataittoa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mikä näistä autostereogrammeista on helpoin nähdä kolmiulotteisena ja mitkä tekijät vaikuttavat autostereogrammien näkemiseen.

Hypoteesina tutkimukselle oli, että koehenkilöiden olisi helpoin nähdä anaglyfinen autostereogrammi, jonka pikselien vaakasuuntainen siirtymä on pieni. Lisäksi arvioitiin, että alkuperäisellä koodilla muodostettu autostereogrammi olisi vaikein nähdä. Saadut tulokset olivat hypoteesin mukaiset.

Yksi merkittävistä havainnoista tutkimuksessa oli, että hajataitolla voi olla vaikutusta autostereogrammien näkemiseen. Tutkimuksessa oli kuitenkin vain yksi hajataiton omaava henkilö mukana, joten ei ole varmaa johtuiko näkövaikeudet hajataitosta vai jostain muusta. Jotta voitaisiin varmistua hajataiton vaikutuksesta, tulisi tutkimus suorittaa isommalla otannalla hajataiton omaavia ihmisiä.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että anaglyfinen autostereogrammi on käyttäjäystävällisempi kuin normaali satunnaispisteistä koostuva autostereogrammi. Lisäksi huomattiin, että autostereogrammin näkyvyyteen pystytään vaikuttamaan lisäämällä resoluutiota ja kontrastia sekä käyttämällä Gaussista suodinta. Tämän työn tulokset ovat kuitenkin vain pienellä koeryhmällä saatuja, minkä vuoksi ne eivät välttämättä ole täysin luotettavia. Tarkempien tuloksien aikaansaamiseksi tulisi tutkimus suorittaa isommalla kohderyhmällä. Tässä työssä saadut tulokset toimivat kuitenkin hyvänä alkuna lisätutkimuksille liittyen autostereogrammeihin.

LÄHTEET

[1] Frank L. Pedrotti, Leno M. Pedrotti ja Leno S. Pedrotti. *Introduction to Optics*. Pearson Education, 2006.

[2] Justin Peatross ja Michael Ware. *Physics of Light and Optics*. Brigham Young University, 2025.

[3] Eugene Hecht. *Optics, Global Edition*. Pearson Education, 2016.

[4] Frank. Trager. *Springer handbook of lasers and optics*. 2nd ed. Springer handbook. Springer, 2012.

[5] John V. Forrester ym. *The Eye: Basic Sciences in Practice*. Saunders Ltd, 2002.

[6] Irving P. Herman. *Physics of the human body*. Biological and medical physics, biomedical engineering. Berlin: Springer, 2007.

[7] Tapio Kallasjoki. ”Kohti ihmiskeskeistä valaistusta”. *Valo* (2019).

[8] Riikka Niinikuru, Ilpo Kojo ja Häkkinen Jukka. ”Mikrosakkaddien merkitys havaintokokemuksen muodostumisessa”. *Psykologia* (2006).

[9] Steven Yantis. *Stevens' handbook of experimental psychology*. John Wiley Sons, 2002.

[10] Jacques. McCoun ja Lucien. Reeves. *Binocular vision : development, depth perception, and disorders*. 1st ed. Eye and Vision Research Developments. Nova Science Publishers, 2010.

[11] Vicki Bruce, Patrick R. Green ja Mark A. Georgeson. *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*. Psychology Press, 1996.

[12] Nigel Daw. *How Vision Works: The Physiological Machanisms Behind What We See*. Oxford University Press, 2012.

[13] Andrew J. Parker. ”Binocular depth perception and the cerebral cortex”. *Reviews* (2007).

[14] Henrik Haggrén. ”Stereoskopia”. *Fotogrammetrian perusteet* (2002).

[15] Ian P. Howard ja Brian J. Rogers. *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford University Press, 1995.

[16] Sean Leavey ym. ”Autostereogram resonators”. *Optics communications* (2012), s. 3971–3975.

[17] Christopher Tyler. ”Autostereogram”. *Scholarpedia journal* (2014), s. 9229–.

[18] Frank L. Kooi ym. ”Real 3D increases perceived depth over anaglyphs but does not cancel stereo-anomaly”. *Displays* (2010), s. 132–138.

[19] Danie Armyr. ”abSIRD for Matlab”. *MathWorks* (2010).

LIITE A: MAKEABSIRD-FUNKTIO

```
function [ imageData ] = makeAbsird( imageData, randSize )


if ( nargin < 2 )
    randSize = 1000;
end

%Tarkastetaan syötetyn datan ominaisuuksia
assert ( ndims(imageData) == 2 );
assert ( isreal(imageData) );

%Poistetaan kaikki NAN- ja INF-arvot, sillä ne häiritsevät
    algoritmia
imageData(isnan(imageData)) = 0;
imageData(isinf(imageData)) = 0;

%Skaalataan data ja vähennetään syvyyttä
imageData = imgaussfilt(imageData, 2); %Gaussian suodatus parantaa
    stereogrammin laatua
imageData = imageData - min(imageData (:));
imageData = round(imageData/max(imageData(:))*randSize/3);

%Luodaan satunnaispiste, jonka pohjalta kuva rakennetaan.
RandData = round(rand(randSize)*256);

%Lasketaan algoritmille tärkeitä kokoja.
ScrW = size(imageData,2);
RandW = size(RandData,2);
RandH = size(RandData,1);

%Käydään kaikki rivit läpi
for y = 1:size(imageData,1)
    for x = ScrW:-1:ScrW-RandW
        index = mod(x-imageData(y,x), RandW-1)+1;
        imageData(y,x) = RandData( mod(y,RandH-1)+1, index );
    end

    %Lasketaan kaikki jäljellä olevat pikselit rivillä
    for x=ScrW-RandW-1:-1:1
```

```
        index = x+RandW-imageData(y,x)+1;
        imageData(y,x) = imageData(y,index);
    end
end

%Jos ulostuloargumenttia ei ole, näytetään kuvaaja, jossa jokainen piste vastaa näytön pikseliä.
if ( nargout < 1 )
    h = imagesc ( imageData );
    colormap ( hot ); %Vaihtamalla parametri "hot" parametriin "gray" saadaan autostereogrammista mustavalkoinen.
    grid ( 'off' );

    g = get( h, 'Parent');
    set ( g, 'Units', 'Pixels' );
    set( g, 'Position', [5 5 size(imageData,2) size(imageData,1)] );

    f = get( g, 'Parent' );
    set ( f, 'Units', 'Pixels' );
    set( f, 'Position', [100 100 size(imageData,2)+10 size(imageData,1)+10] );

end

end
```

LIITE B: ALKUPERÄINEN AUTOSTEREOGRAMMIN MUODOSTAMISEEN KÄYTETTÄVÄ KOODI

```

ScrData = imread('tähti.2.png');
makeAbsird( mean(ScrData,3), 64 );

%Luodaan autostereogrammi
type ( 'makeAbsird.m' );
```

LIITE C: PARANNELTU AUTOSTEREOGRAMMIN MUODOSTAVA KOODI

```
%Ladataan syvyyskartta ja muunnetaan se harmaasävyiseksi
ScrData = imread(['tähti.2.png']);
GrayData = mean(ScrData, 3);
%Lisätään kontrastia syvyyskarttaan
GrayData = imadjust(GrayData, stretchlim(GrayData), []);

%Skaalataan syvyyskartta pienemmälle syvyysalueelle
depthScaleFactor = 0.8; % Vähentää syvyysvaihtelua 80%

GrayData = GrayData * depthScaleFactor;

%Normalisoidaan syvyyskartta
GrayData = GrayData - min(GrayData(:));
GrayData = GrayData / max(GrayData(:));

%Kun halutaan kääntää syvyys ns. taustan taakse meneväksi,
%lisätään komento: GrayData = 1 - GrayData.


%Määritetään stereogrammin koko
stereoWidth = 800;  % Haluttu leveys
stereoHeight = 600; % Haluttu korkeus

%Syvyyskartan koosta riippuen joko rajataan tai täytetään se.
[depthHeight, depthWidth] = size(GrayData);

if depthHeight > stereoHeight || depthWidth > stereoWidth
    %Rajataan syvyyskartta
    startY = max(1, floor((depthHeight - stereoHeight) / 2) + 1);
    startX = max(1, floor((depthWidth - stereoWidth) / 2) + 1);
    endY = min(depthHeight, startY + stereoHeight - 1);
    endX = min(depthWidth, startX + stereoWidth - 1);
    GrayData = GrayData(startY:endY, startX:endX);
elseif depthHeight < stereoHeight || depthWidth < stereoWidth
    %Lisätään täyttöä, jos syvyyskartta on pienempi
    centeredGrayData = zeros(stereoHeight, stereoWidth);
```

```
    offsetY = floor((stereoHeight - depthHeight) / 2) + 1;
    offsetX = floor((stereoWidth - depthWidth) / 2) + 1;
    centeredGrayData(offsetY:offsetY+depthHeight-1, offsetX:offsetX
        +depthWidth-1) = GrayData;
    GrayData = centeredGrayData;
end

%Skaalataan syvyyskartta makeAbsird-funktion vaatimaan kokoon
GrayData = round(GrayData * (160 / 3)); %Skaalataan arvot välille
    [0, 160/3]

%Luodaan stereogrammi kutsumalla funktiota
makeAbsird(GrayData, 160);
```

LIITE D: FUNKTIO ANAGLYFISEN AUTOSTEREOGRAMMIN MUODOSTAMISEEN

```
1
2  function [ anaglyphImage ] = makeAnaglyph( imageData, shiftAmount )
3  %makeAnaglyph-funktio muuntaa syvyyskartan anaglyfiseksi
       autostereogrammiksi
4  %Tämän funktion tuottama kuva on optimoitu puna-syaani laseille.
5  if ( nargin < 2 )
6      shiftAmount = 10; %Määrittää kuinka paljon siirretään oikeaa ja
           vasenta kuvaa
7  end
8
9  assert ( ismatrix(imageData) );
10 assert ( isreal(imageData) );
11
12 imageData(isnan(imageData)) = 0;
13 imageData(isinf(imageData)) = 0;
14
15 %Normalisoidaan syvyystiedot
16 imageData = imageData - min(imageData(:));
17 imageData = imageData / max(imageData(:));
18
19 %Määritetään vasemman ja oikean kuvan siirtymät
20 leftShift = round(imageData * shiftAmount);
21 rightShift = round(imageData * -shiftAmount);
22
23 [rows, cols] = size(imageData);
24 leftImage = zeros(rows, cols, 'uint8');
25 rightImage = zeros(rows, cols, 'uint8');
26
27 %Luodaan peruskuva (musta ja valkoinen satunnaiskuvio)
28 basePattern = randi([0, 255], rows, cols, 'uint8');
29
30 %Luodaan anaglyfikuva siirtämällä satunnaiskuvion osia
31 for y = 1:rows
32     for x = 1:cols
33         newX\_L = max(1, min(cols, x + leftShift(y, x)));
34         newX\_R = max(1, min(cols, x + rightShift(y, x)));
35         leftImage(y, x) = basePattern(y, newX\_L);
```

```
        rightImage(y, x) = basePattern(y, newX\_R);
    end
end

%Luodaan lopullinen anaglyfikuva
anaglyphImage = cat(3, leftImage, rightImage * 0.5, rightImage);
anaglyphImage = uint8(anaglyphImage);

%Näytetään kuva, jos se ei palauta dataa
if ( nargout < 1 )
    figure;
    imshow(anaglyphImage);
end
end
```

LIITE E: ANAGLYFISEN AUTOSTEREOGRAMMIN MUODOSTAVA KOODI

```
%Ladataan syvyyskartta
ScrData = imread('tähti.2.png');
GrayData = mean(ScrData, 3);

%Normalisoidaan syvyyskartta
depthScaleFactor = 0.1; %Vähentää syvyysvaihtelua 10%
GrayData = GrayData * depthScaleFactor;
GrayData = GrayData - min(GrayData(:));
GrayData = GrayData / max(GrayData(:)); % Skaalataan 0  1   alueelle

%Muutetaan tähtikuvion syvyysasentoa**
depthOffset = 0.8;  %siirretään tähtiä syvyyssuunnassa (pienempi
    taakse ja isompi eteen)
GrayData = GrayData + depthOffset;

%Estetään yli- ja alivuoto
GrayData(GrayData > 1) = 1;
GrayData(GrayData < 0) = 0;

%Luodaan anaglyfinen autostereogrammi kutsumalla makeAnaglyph
    funktiota:
makeAnaglyph(GrayData, 20); %Kun muutetaan arvo 20 arvoksi 5,
    saadaan 3D efekti helpommin näkyviin
```