

# Näköjärjestelmän toiminta

■ Simo Vanni

Valo muodostaa elinympäristöön merkittävän informaation lähteen, niin merkittävän että suurimmalle osalle eläinlajeista on lajikehityksen myötä muodostunut näköaisti. Näköinformaatio on kätkeytyä ympäristöstä heijastuneen valon säännönmukaisuuksiin. Esimerkiksi tuttu esine tai henkilö on tietyn muotoinen ja värinen sekä liikkuu tietyllä tavalla, eli muodostaa joukon opituissa suhteissa olevia valoja, varjoja, värejä ja niiden liikkeitä. Näkeminen tarkoittaa näiden säännönmukaisuuksien tunnistamista.

Näköjärjestelmämme on erittäin tehokas. Yksi katseen kiinnitys kestää yleensä 0.2–0.5 sekuntia, ja tänä aikana opitut säännönmukaisuudet kyetään useimmiten tunnistamaan oikein. Tosin vain yhden esineen kohdalla kerrallaan – sitten on aika siirtää katsetta. Tutkimus on viimeisten vuosikymmenien aikana päässyt jo melko lähelle vastausta, miten tämä kaikki tapahtuu, ja jokainen meistä tulee huomaamaan kun vastaus on löydetty. Silloin kamerat, autot ja kodinkoneet alkavat ymmärtää näkemäänsä.

## Moniulotteista näkö tietoa käsittelevät lukuisat eri aivoalueet

Silmän verkkokalvolla valon fotonit muuttuvat hermosignaaleiksi, ja verkkokalvon nerokkaan signaalinkäsittelyn ansiosta silmästä aivoihin siirtyvä signaali on erittäin tehokkaasti koodattu. Silmästä aivoihin siirtyvä viisiulotteinen signaali: kaksi paikkaulottuvuutta, aika, aallonpituus (”väri”), sekä tieto silmästä (vasen/oikea). Jokainen verkkokalvosta aivoihin siirtyvä signaali edustaa yhtäaikaa useita tiedon ulottuvuuksia. Kädellisillä eläinlajeilla (kuten apinat ja ihmiset) näkökentän keskiosa on erityisen merkittävä, ja siksi sieltä välitetään paljon enemmän tietoa kuin näkökentän ääreisosista. Keskeistä näköä käytetään erityisesti esineiden tunnistamiseen ja sen näön tarkkuus on selvästi parempi

kuin ääreisnäön tarkkuus. Ääreisnäkö sen sijaan on tärkeä omien liikkeiden ohjaamisen, tilan hahmottamisen sekä huomion siirtämisen kannalta.

Näkö tiedosta suurin osa välitetään talamus-tumakkeen kautta aivokuorelle, jossa sitä käsittelee jopa yli 30 erillistä aluetta kummallakin aivopuoliskolla, kattaen yhteensä yli neljänneksen ihmisen aivokuoren kokonaispinta-alasta. Ensimmäinen näköaivokuori on erityisasemassa siksi, että suurin osa näkö tiedosta välittyy sen kautta – jos se tai siihen saapuvat ratayhteydet tuhoutuvat esimerkiksi aivoinfarktin seurauksena, syntyy näkökenttään sokea tai erittäin heikonäköinen alue.

Ensimmäinen näköaivokuori sijaitsee isojen aivojen takaosassa, takaraivolohkossa. Siitä näkö tietoa etenee muille aivoalueille, jotka voidaan jakaa karkeasti kahteen pääjoukkoon. Selänpuoleinen joukko sisältää alueita takaraivolohkosta, päälaenlohkosta ja otsalohkon takaosasta. Se osallistuu erityisesti huomion siirtämiseen, liikkeiden ohjaamiseen näkö tiedon avulla ja tilan hahmottamiseen. Mahanpuoleinen joukko sisältää alueita takaraivolohkosta sekä ohimolohkon takaosista ja alapinnalta. Se osallistuu esineiden tunnistamiseen, joka on erityisen raskas tiedonkäsittelyprosessi.

Jos mahanpuoleinen joukko aivokuorialueita tai osia siitä tuhoutuu, seuraa kyvyttömyys tunnistaa näön avulla ennen tuttuja asioita. Voi olla vaikeaa tunnistaa tutun ihmisen kasvoja tai jopa nähdä, mihin suuntaan viiva on piirretty. Eräissä tapauksissa voi tulla toispuoleinen värinäön vaikeus tai muu toiseen näkökenttään rajoitettava heikkonäköisyys. Ihminen tulee osin tai kokonaan sokeaksi näille piirteille – ne lakkaavat olemasta ihmisen tietoisuudessa. Sen sijaan täydellistä sokeutta, kyvyttömyyttä nähdä valoa tai alkeellisia piirteitä, ei synny. Koska selänpuoleisten näköaivokuorialueiden toiminta on kunnossa, ihminen saattaa liikkua yllättävän hyvin

törmäämättä mihinkään, vaikei myönnäkkään näkevänsä mihin on menossa!

Jos vaurio osuu selänpuoleisille alueille, syntyy vaikeus hahmottaa kokonaisuuksia, ohjata omia liikkeitä, voi olla vaikeaa kääntää silmiä tai ne voivat katsoa yhteen suuntaan, voi olla vaikeus huomata asioita toisella puolella näkökentässä. Vaikka henkilö voi olla täysin kyvytön kulkemaan itsenäisesti, keskeisen näön esineen tunnistus ja näön tarkkuus voivat olla normaalit. Muun muassa tämän vuoksi ajoneuvon kuljettamisen edellytyksiä ei voida arvioida vain keskeisen näön tarkkuuden perusteella.

## **Ympäristö sisältää paljon säännönmukaisuuksia**

Aivokuori etsii säännönmukaisuuksia oppiessaan näkemään. Säännönmukaisuus tarkoittaa kah-ta tai useampaa tapahtumaa näkökentässä, jotka esiintyvät usein yhdessä. Koska luonnosta silmään saapuvassa valossa on aina tiettytyypisiä säännönmukaisuuksia – isoa pintaa, joka muuttuu hitaasti, on aina paljon enemmän kuin pieniä pintoja ja nopeita tapahtumia – kannattaa näistä toistuvista signaaleista hankkiutua eroon ennen kuin aivokuori aloittaa työnsä. Verkkokalvoon on rakentunut mekanismi, joka kykenee tehokkaasti vähentämään tätä tunnettua säännönmukai-suutta. Teknisiin termein tätä prosessia kutsutaan spektrin valkaisuksi. Fysiologian alalla se saattaa selittää, miksi silmän yhden verkkokalvon hermosolun reaktio valoon on paikallinen tumman ja vaalean alueen suhde pikemmin kuin paikallinen valoisuus suoraan. Vastaavasti yhdistelmä erilaisia soluvasteiden kestoja ja vaiheita saattaa tehokkaimmin koodata nähdyn liikkeen.

On yksinkertaisinta etsiä näkökentässä lähekkäisiä tai peräkkäisiä säännönmukaisuuksia. Tämä voisi selittää, miksi ensimmäisen näköaivokuoren solut ovat herkkiä vain pienelle alueelle näkökentässä. Ne ovat myös rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin useimpien muiden näköaivokuorien hermosolut. Ensimmäisen näköaivokuoren solut oppivat herkiksi tietylle paikalle näkökentässä, tietylle suhteelle kahden silmän signaalia, tietylle juovatiheydelle, orientaatiolle,

liikesuunnalle sekä aallonpituudelle. Nämä samat säännönmukaisuudet on löydettävissä nykyään myös matemaattisilla algoritmeilla kuvadatasta, joka vastaa verkkokalvon signaaleja. Erona verkkokalvon signaaleihin, aivokuorella kukin solu yhdistää tietoa useasta verkkokalvon hermosolusta tulevasta signaalista. Tämä antaa mahdollisuuden toisaalta etsiä monimutkaisempia säännönmukaisuuksia kuin verkkokalvolla, mutta myös edustaa selvemmin kutakin piirrettä näkökentässä. Koska piirteiden yhdistelmiä on enemmän kuin paikallisia valon ja varjon vaihteluita, kunkin yhdistelmän yksikäsitteinen esittäminen edellyttää paljon suurempaa solujoukkoa. Tämä voisi selittää, miksi ensimmäisen näköaivokuoren soluja on niin paljon enemmän kuin verkkokalvolta aivoihin viestittäviä soluja. Siinä missä silmistä aivokuorelle tietoa välittää näköhermon kautta noin pari miljoonaa hermosolun viejähaaraketta, edustaa sitä aivoissa ensimmäisellä näköaivokuorella noin 20 neliösenttimetriä (noin 2 % koko aivokuoren pinta-alasta), sisältäen noin 500 miljoonaa hermosolua. Karkeana analogiana voisi verrata myös pakattua ja pakkaamatonta kuvaa tietokoneella. Pakkaamattomasta kuvasta on paljon helpompi etsiä merkittävien piirteiden yhdistelmiä, mutta se vie paljon enemmän tilaa kovalevyiltä.

Sen lisäksi että solu on herkkä tiettytyypiselle signaalille, se on myös yhteydessä naapurisoluihin – erityisesti niihin, joilla on samankaltainen herkkyysofili. Itse asiassa yksi solu on aktiivinen nimenomaan silloin, kun siihen liittyneet solut ovat aktiivisia, ja näköärsyke voi vain liipaista koko tämän soluryhmän aktiivisuuden. Jos toisiinsa kytketty joukko aivokuoren soluja on aktiivisia, eikä näköärsyksen kuvio sovi tähän, näköärsyke voi hävitä kilpailun! Ilmiössä puhutaan kontekstin eli taustan vaikutuksesta solun toimintaan. Manipuloimalla taustaa voidaan luoda hauskoja illuusioita esi-neiden näkemiseen.

On helppoa ymmärtää, että ensimmäisen näköaivokuoren solujen toiminta ei vielä yksin voi kertoa, mitä näkökentässä on tai missä esi-neet sijaitsevat. Esineillä tarkoitetaan tässä mitä tahansa taustasta erottuvaa ja tunnistettavissa

olevaa kokonaisuutta, kuten huonekalua, kasvoja tai vaikkapa pilvää. Ensinnäkin esineen tunnistaminen ei voi olla kiinni sen paikasta näkökentästä, etäisyydestä eli koosta verkkokalvolla tai mistä suunnasta esinettä katsotaan. Kaikki nämä muutokset voivat täysin muuttaa signaalijakauman verkkokalvolla ja ensimmäisellä näköaivokuorella. Toiseksi, ensimmäisellä näköaivokuorella saavutettu tiedon taso (juovatiheys, orientaatio ym.) ei ole riittävä esineiden tunnistamiseen. Tarvitaan korkeamman tason säännönmukaisuuksien löytämistä. Vaikka nämä korkeamman tason säännönmukaisuudet ovat vielä osittain tuntemattomia, eikä yleisesti hyväksytyjä matemaattisia algoritmeja niiden laskemiseksi ole, kokeissa on voitu selvittää minkälaisille piirteille korkeamman tason aivokuorialueet ovat herkkiä.

Esineitä tunnistavilla näköaivokuorialueilla on löydetty tiedonkäsittelyn hierarkia, jossa edetään esimerkiksi juovista, liikesuunnista ja orientaatioista esimerkiksi kulmiin, pyörivään liikkeeseen ja kaariin, joista edelleen voidaan rakentaa herkkyyksiä hahmoille, ihmisen liikkeille tai hahmon osille. Nämä voidaan yhdistää tallentuneeseen, joskus aika monimutkaiseenkin, malliin. Esineen tunnistuksen hierarkian yläpäässä on esimerkiksi soluja, jotka ovat aktiivisina erityisesti kun katsotaan kasvoja. Lisäksi nämä alueet oppivat koko ajan uusia piirteitä, joten on todennäköistä, että suosikki-TV-sarjan henkilöille tai muille erityisen kiinnostuksen kohteille löytyy meiltä kaikilta omat erityisen herkät soluryhmänsä.

## Kuinka selvittää tietotulvasta

Silmiin saapuva informaation määrä on valtava. Tämä on tuttua jokaiselle joka on käsitellyt pakkaamatonta kuvatieta tietokoneella. Miten aivot voivat selviytyä niin hyvin tehtävästään? Miten on mahdollista, että sekunnin osissa kaikki kiinnostava on nähty ja katse voidaan siirtää eteenpäin? Alla luetellaan viisi aivojen toiminnan periaatetta, jotka tekevät biologisesta näöstä hämmästyttävän tehokkaan.

Ensinnäkin vain pieni osa kustakin näköärsykkeestä saavuttaa korkeammat aivokuorialu-

eet, tunnistetaan ja tulee tietoisuuden piiriin. Tästä on hyvänä esimerkkinä muutossokeusdemonstratio, joka osoittaa, että vaikka kuvittemme näkevämme kaiken koko ajan, välähdys näkökentässä voi estää havaitsemasta suuriakin muutoksia kuvassa. Valinta tapahtuu suurelta osin automaattisesti, silmiin saapuvan tiedon ja siinä tapahtuvien muutosten avulla.

Toiseksi aivokuoren tiedonkäsittely käyttää hyväksi oppittuja säännönmukaisuuksia. Jos näköärsyksen osa on ennustettavissa sitä ympäröivien näköärsyksen osien perusteella, vaimennetaan paikallista aktiivisuutta. Tämä lisää solujen toiminnan informaationsisältöä. Informaation jalostaminen tällä tavoin on todistettu melko varmasti ensimmäisellä näköaivokuorella. On vielä epäselvää, onko tämä yleinen mekanismi, joka voisi selittää näkö- tai muiden sensoristen aivokuorien toimintaa yleisemminkin.

Kolmanneksi tiedonkäsittely tapahtuu rinnakkain useilla erillisillä aivokuorialueilla. Kun tieto on saavuttanut ensimmäisen näköaivokuoren, se leviää hyvin nopeasti korkealle näköaivokuorien hierarkiassa. Sieltä se edelleen syötetään takaisin ensimmäiselle, toiselle ja muille alemman tason näköaivokuorille. Tämä tekee mahdolliseksi laajojen näkökentän osien analysoimisen ja sen tiedon hyväksikäytön hyvin varhain prosessin aikana. Toisesta näkökentästä (vasen tai oikea) tulevaa tietoa käsitellään ensin vain vastakkaisella aivopuoliskolla. Hetken päästä tieto leviää myös näkökentän puoleiselle aivopuoliskolle. Jokainen katseen kiinnitys ei aiheuta kaikkien 30 näköaivokuorialueen aktivoitumista, vaan näköärsyksen sisältö sekä tehtävä, jota ollaan tekemässä, muokkaavat prosessia. Näkö-tieto reititetään dynaamisesti eri aivokuorialueille tarpeen mukaan. Herkimmin, myös passiivisessa katselussa ja väsyneenä, aktivoituvat prosessin ensimmäiset vaiheet – yksinkertainen piirreanalyysi ensimmäisellä näköaivokuorella ja tietty runkoprosessi mukaan lukien ehkä noin 10 aivoaluetta. Monipuolisimmin aivoja aktivoi luonnollinen katselutilanne, johon sisältyy tehtäviä.

Neljänneksi tieto on hajautettuna suurelle joukolle soluja kunkin toiminnallisen alueen

sisällä. Siinä missä hierarkian alhaisilla tasoilla eri kohdat edustavat eri kohtia näkökentässä, korkeammalla hierarkiassa esimerkiksi esineiden piirteet ovat edustettuina eri kohdissa. Itse asiassa ihmisen esineentunnistuksen piirrekirjasto on jakaantuneena niin laajalle alueelle, että se voidaan nähdä karttana jo nykyisin mitausvälinein, avaamatta kalloa. Toiminnallisella magneettikuvauksella James Haxby ryhmineen onnistui vuonna 2001 selvittämään aivosignaalista, mitä ärsykeryhmää (tuolit, kasvot, eläimet, kengät ym.) koehenkilöt katsoivat. Menetelmä vaatii ensin yksilökohtaisen mittauksen aivokuoren toiminnallisesta kartasta, johon sitten koetuloksia verrattiin. Lisäksi sen edellytyksenä oli ärsykeeseen sidottu toiminta – pelkäämään kuviteltuja näköärsyksiä ei tietävästi ole magneettikuvauksen avulla kyetty aivoista lukemaan. Tämän vuoksi sitä ei voida kutsua ajatus-ten lukemiseksi.

Viidentenä, aivokuori muokkautuu. Kun tutkimme uusia asioita, opimme näkemään niitä tehokkaammin. Kuinka muuten voi selittää, että aivoista löytyy esimerkiksi luetuille sanoille herkkä alue. Muovautuvuuden, eli plastisiteetin, myötä voi syntyä suuria muutoksia iäkkäilläkin ihmisillä. Seurantatutkimuksessa kuvasimme ensimmäisen näköaivokuoren aivoinfarktin jälkeen, miten pitkäkestoinen intensiivinen harjoittelu synnytti sokean näkökentän ärsykeelle vasten väärälle eli terveelle aivopuoliskolle! Tässä tilanteessa näkö tieto siirtyy verkkokalvosta aivoihin todennäköisimmin ylemmän nelikukkulalevyn kautta, jolloin se pääsee kiertämään ensimmäisen näköaivokuoren ja sinne talamuksesta vievät ratayhteydet.

## **Aivoperäinen näköhäiriö voi olla vaikea havaita**

Aivovaurion seurauksena voi näkö vammautua. Jos vaurio on alueilla, jotka osallistuvat käsitte-lyyn heti tiedon saavuttua aivokuorelle tai niihin saapuvissa valkean aineen radoissa, syntyy molempiin silmiin samaan kohtaan näkökenttää sokea alue, skotooma. Puuttuvaa näköhavaintoa kutsutaan myös negatiiviseksi oireeksi. Kos-

ka näkö prosessoidaan monella eri alueella, voi negatiivisia oireita olla myös korkeamman tason prosesseissa. Näissä toispuoleisissa vaurioissa voi syntyä vaurion sijaintiin nähden vastakkaisen näkökentän heikkonäköisyyttä tai joissain tilanteissa spesifi puutosoire, kuten kasvojen tunnistamisen tai lukemisen vaikeus. Jos vaurio on molemminpuoleinen voi syntyä harvinaisia puutosoireita, kuten yleisempi esineiden tunnistamisen tai liikkeen näkemisen häiriö. Korkean tason prosessien puutos on vaikea todeta, koska kyse on potilaan havaintomaailmasta, ja epäilyn näön poikkeavuudesta on potilaan oman kertomuksen varassa.

Harvinaisissa sairaustiloissa (palinopsia, visuaalinen perseveraatio) näköärsyke tai vahva odotus voi liipaista toiminnan pitkäaikaiseksi tai toistuvaksi näköaistimukseksi, joka subjektiivisesti näkyy visuaalisen ympäristön osana. Monet sairaustilat voivat laukaista näköaistimuksia ilman ympäristössä esiintyvää vastaavaa ärsykettä. Tällöin puhutaan positiivisista oireista, vastakoh- tana edellämainituille negatiivisille oireille, joissa näköaistimuksesta puuttuu jotain. Tyypillistä positiivisille oireille on, että niitä joutuu aktii- visesti kysymään potilailta, sillä ne voivat olla kummallisia ja arkijärjen vastaisia, eivätkä poti- laat halua tulla leimatuiksi hulluiksi. Yksinkertai- sissa positiivisissa oireissa voi välähdellä valoja, värejä tai olla yksinkertaisia piirteitä. Klassinen esimerkki tällaisesta on migreenipotilaan aura, joka liittyy verenkierron muutoksiin näköaivo- kuorilla. Monimutkaisissa positiivisissa oireissa voi esiintyä muotoja, ihmisiä, eläimiä tai kokonaisia näkymiä, ja niitä voi syntyä esimerkiksi näkö- kentän sokeille alueille aivoinfarktin jälkeen. Jois- sain tiloissa näköärsyke voi muuttaa muotoaan, vaihtaa paikkaa tai kokoa suhteessa ympäröivään näkö tietoon. Myös eräät epilepsiatyyppit tuottavat positiivisia näköoireita. On tärkeää ymmärtää, että näkö tiedon käsittely voi epäonnistua hyvin monella tasolla näköjärjestelmässä.

## **Miten näkö voidaan tutkia?**

Koska näkö on ihmiselle varsin tärkeä aisti, on sen toimintaa myös tutkittu monella eri tieteen

ja tekniikan alalla. Silmälääketiede tutkii silmän toimintaa ja sen herkkyyttä erilaisille ärsykeille sekä tietenkin silmänsairauksia, mutta aivoissa tapahtuvan toiminta jää lähes kokonaan alan ulkopuolelle. Neurologia taas tutkii aivosairauksia, mutta ainakin akuutissa neurologiasairauden synty, diagnostiikka ja hoito ovat luonnollisesti painopisteinä ja tiedonkäsittelyprosessit toissijaisia. Kliinisistä aloista neuropsykologia pitää sisällään diagnostisia testejä, joilla voidaan karkeasti selvittää korkeamman tason näköhäiriöiden laatua ja määrää, kun taas matalamman tason näkökenttäpuutokset ovat neuro-oftalmologian alaa.

Perustutkimus on kiinnostunut sekä havaintokyvyn rajoista että havainnon fysiologisia mekanismeista. Erityisen merkittävänä näön perustutkimuksessa on ollut psykofysiikka, jolla tarkoitetaan havainnon määrällistä mittaamista. Ala on jo yli sata vuotta vanha ja sen avulla mm. selvitettiin ensimmäisenä värinäön periaatteet. Elektrofysiologia ja erityisesti kissan ja apinan silmässä ja aivoissa suoritetut yksittäisolumittaukset ovat olleet avainasemassa koko järjestelmän toiminnan ymmärtämisessä. Tähän perustaan tukeutuvat useimmat nykyaikaiset menetelmät, kuten kuvantamistutkimukset, jotka ovat saaneet viimeaikoina lisää painoarvoa. Elektroenkefalografia ja magnetoenkefalografia mittaavat vastaavasti aivojen synnyttämiä sähkö- ja magneettikenttiä. Niiden etuna on hyvä aikaerottelukyky, mutta aivotoiminnan tarkkaa paikkaa näillä menetelmillä on vaikea selvittää. Tämän vuoksi spatiaalisesti tarkempi toiminnallinen aivokuvaus (fMRI) on keskeinen näön tutkimuksessa. Se perustuu aivotoimintaan liittyvien pienten verenkiertomuutosten mittaamiseen, ja verenkiertomuutosten hitauden vuoksi menetelmällä on suhteellisen heikko aikaerotte-

lukyky. FMRI:n avulla voidaan kartoittaa elävältä ihmiseltä toiminnallisia alueita ja mitata aivotoiminnan määrää eri koetilanteissa.

## **Mikä merkitys tällä kaikella on?**

Kun näkö tiedon käsittelyn periaatteet opitaan ymmärtämään, sillä tulee olemaan suuri yhteiskunnallinen merkitys. Neurologisen kuntoutuksen ja näön neuropsykologian kehityksen lisäksi bioinspiroituneet tekniset sovellukset ovat kuumia tutkimuskohde useissa maailman yliopistoissa. Jo nyt eräissä autoissa pyritään havaitsemaan katseen suunta ja tiellä oleva este. Saksassa on käynnissä kokeilu, jossa kasvoja tunnustetaan automaattisesti metroasemilla, jolloin ihmisten kulkua aseman sisällä voidaan selvittää. Luonnollisesta videokuvasta voidaan tunnistaa liikkuvat autot tai nähdä vaikkapa sponsorin logo. Tulevaisuudessa suuri osa asioista, mitkä pitää nähdä, voidaan nähdä koneen avulla. Tästä seurannee monien ammattien muuttuminen robottien hoidettavaksi – ensin mekaanisempien, mutta myöhemmin ehkä myös enemmän älykkyyttä vaativien. Jos kerran kone tulee halvemmaksi ja on tehokkaampi, miksi tehdä työ ihmisillä? Ihmistä kone ei kuitenkaan tule korvaamaan, sillä vain ihmisellä voi olla ihmisen kehityshistoria ja siksi inhimillinen perspektiivi asioihin ja muihin ihmisiin.

**Kirjoittaja on neurofysiologian dosentti ja toimii vanhempana tutkijana Teknillisen korkeakoulun kylmälaboratorion aivotutkimusyksikössä. Kirjoittajan ryhmä tutkii näkemisen aivomekanismeja ihmisillä kuvantamisen menetelmien avulla. Artikkelin perustuu Tieteen päivien esitelmään 12.1.2007.**