eivät ohjelmia, joten kaikkien neuraaliverkkotekniikkojen toteuttaminen massiivisen rinnakkaisina sähköisinä piireinä on mahdollista. Maksimissaan neuraaliverkkoja on toteutettu usean kymmenentuhannen rinnakkaisen neuronin piireinä. On ymmärrettävää, että kyseiset toteutukset ylittävät nykyisten tietokoneiden laskentatehon ja siten mahdollistavat monia ennen mahdottomina pidettyjä reaaliaikatoimintoja suhteellisen halvoilla komponenteilla. Suurista piirinvalmistajista omat neuraaliverkkopiirinsä ovat suunnitelleet ainakin ATT&T, Intel, Harris, Micro Devices, Mitsubishi, NEC, IBM. Markkinoilla on myytävänä piirejä mm. Intel:ltä, Neural Semiconductor Inc:ltä, Synaptics Inc:ltä, Synaptic Solutions Inc:ltä, Micro Devices:lta. Neuraalilaskennan lisäkortteja PC ja työasemakoneisiin myyvät mm. Ford, SAIC ja HNC Inc.

7. NEURAALIVERKOT SUOMESSA

Suomessa neuraaliverkkoja tutkitaan lähinnä Helsingin, Lappeenrannan ja Tampereen teknillisissä korkeakouluissa. Vuonna 1990 Suomessa panostettiin neuraaliverkkotutkimukseen n. 5 miljoonan markan edestä, kun koko maailmassa panos on n. 2 miljardia markkaa. Seuraavassa suppeassa listassa on lueteltu Suomen tunnetuimmat neuraaliverkkokeskukset:

7.1 Helsinki

Helsingissä keskeinen vaikuttaja on professori Teuvo Kohonen, joka kuuluu alan pioneereihin. Helsingin TKK on keskittynyt algoritmitutkimukseen ja monet kuuluisat neuraaliverkkotekniikat ovat sieltä lähtöisin. TKK:n lisäksi Helsingin yliopistossa on kaksi neuraaliverkkoja tutkivaa ryhmää, joista toinen on keskittynyt konnektionistisiin systeemeihin ja toinen, Rolf Nevanlinna intituutissa toimiva, on perehtynyt neuraaliverkkojen matemaattiseen puoleen sekä piirteidenirroitus ongelmaan liittyviin sovellutuksiin ESPRIT Basic Research projektin puitteissa.

7.2 Lappeenranta

Professori Erkki Ojan johdolla toimivan tietojenkäsittelytekniikan laboratorion keskeisiä tutkimuskohteita ovat neuraalitietokoneet ja neuraaliverkkomallit, joita tutkitaan kahdessa projektissa: TEKES:in Finsoft III tutkimusohjelmassa sekä yhteiseurooppalaisessa ESPRIT Basic Research projektissa. LTKK:ssa tehtävä tutkimus keskittyy neuraaliverkkojen kehitysympäristön suunnitteluun ja toteutukseen sekä konenäköongelmaa tukevien neuraaliverkkomallien kehitykseen.

7.3 Tampere

Tampereella on tutkittu neuraaliverkkoja kahdessa ryhmässä TEKES:in Finsoft III tutkimusohjelman puitteissa. Professori Kimmo Kasken ryhmän keskeinen tehtävä on neuraalisten mikropiiritekniikkojen tuominen Suomeen, mutta myös kuvankäsittelyä on tutkittu. Toinen TTKK:n tutkimusryhmä pyrkii selvittämään neuraaliverkkotekniikkojen sovellutusmahdollisuuksia säätötekniikkaan.

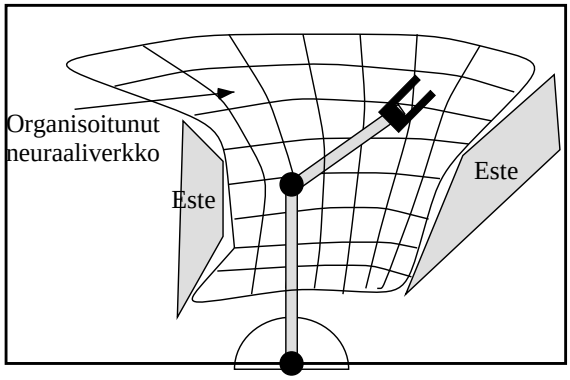
Kirjallisuutta

Anderson, J.A., Rosenfeld, E., Eds., (1988). *Neurocomputing: Foundations of Research*, Cambridge, MA and London: MIT Press.

Kohonen, T.,(1988). *Self-Organization and Associative Memory*, (2nd ed.), Berlin Heidelberg:Springer-Verlag.

McClelland,J.L., Rumelhart,D. E. and the PDP Research Group (1986). *Parallel Distributed Processing* (vol. 1-2). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Minsky, M. (1986). *The Society of Mind.* New York: Simon and Schuster.



Kuva 6. Itseorganisoituvan neuraaliverkon avulla robotti oppii muodostamaan esityksen ympäristöstään.

kana ei esitystä ympäristöstä ole muodostunut.

5. NEURAALIVERKKOJEN SOVELLUTUKSIA

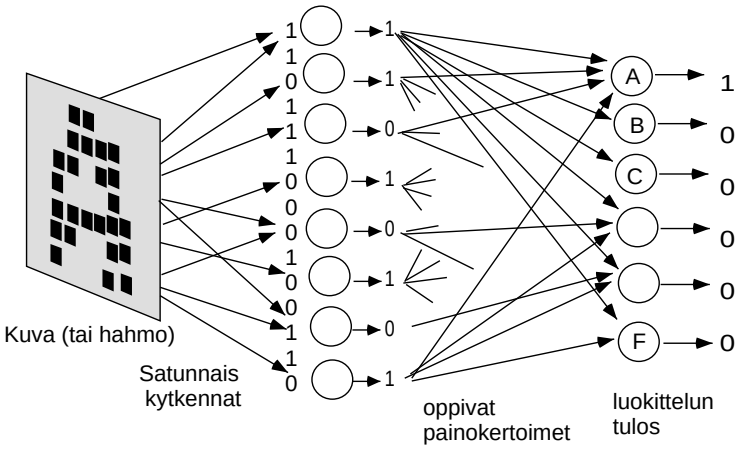
Neuraaliverkkojen teollinen potentiaali on sovellutuksissa. Neuraaliverkot ovat edelleen tutkimuksen kohde mutta lisääntyvissä määrin myös teollinen sovellutus. Neuraalikoneet soveltuvat käytännössä kaikkiin tietoteknisiin järjestelmiin sulautettuina osina. Seuraavassa listassa on lueteltu eräitä neuraaliverkkoihin perustuvia sovellutuksia.

1. MITTAUS JA SENSORIT YM.
   - tekstin ja merkkien tunnistus
   - puheen tunnistus
   - hahmontunnistus
2. MITTAUS JA SÄÄTÖ
   - robotin navigointi
   - teollisuusprosessien ohjaus
3. TIETÄMYSTEKNIIKAT
   - informaation kerääminen laajoista tietokannoista
   - konnektionistiset asiantuntijajärjestelmät
   - lääketieteelliset sovellutukset (EEG, mittausten analysointi ym.)
   - taloudelliset sovellutukset
     - lainapäätökset asiakaspalvelussa
     - myynti-osto sovellutukset
   - käänteinen (inversi) säätö
4. HALLINTO JA KAUPPA
   - reititysongelmat
   - työ-organisaation vuorotusjärjestelmä
5. LAADUNVALVONTA
   - liukuhihnatuotteiden luokittelu
   - lentokenttien turvallisuustarkastimet
   - vika-analyysi

6. ELEKTRONISET NEURAALIKONEET

Merkittävä osuus neuraaliverkkojen tulemisesta perustuu laiteteknisiin ratkaisuihin. Määritelmänsä mukaan neuraaliverkot ovat nimenomaan arkkitehtuurisia ratkaisuja,

kuvaa esitettäessä vektorin sensorien ulostuloista syötteekseen. Jokaisen syötteen kanssa samanaikaisesti verkolle esitetään toivottua vastausta, mikä on vektori jossa ainoastaan oikeaa luokittelutulosta vastaavan neuronin tila on 1, muiden ollessa nollia. Verkko oppii antamaan oikeita vastauksia annettuihin esimerkkeihin ja lisäksi yleistämään oppimaansa siten, että muutkin kuin opetukseen sisältyneet B:n näköiset kirjaimet saavat vastaavan neuronin ulostulon ykköseksi, muiden ollessa nollia.

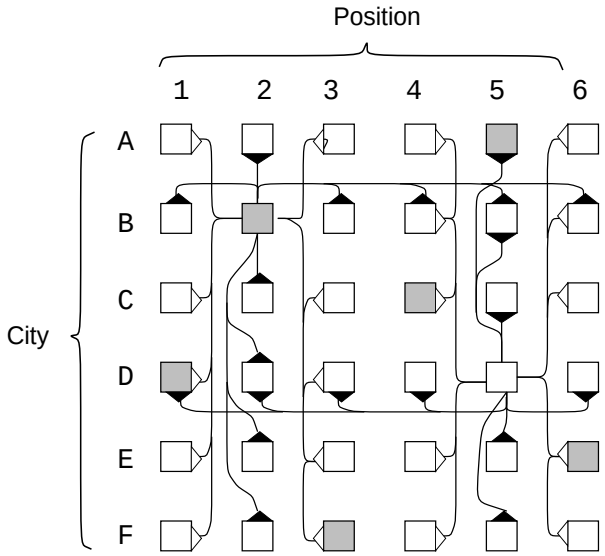


Kuva 5. Esimerkki Perceptron-tyyppisen neuraaliverkon käytöstä hahmontunnistustehtäviin.

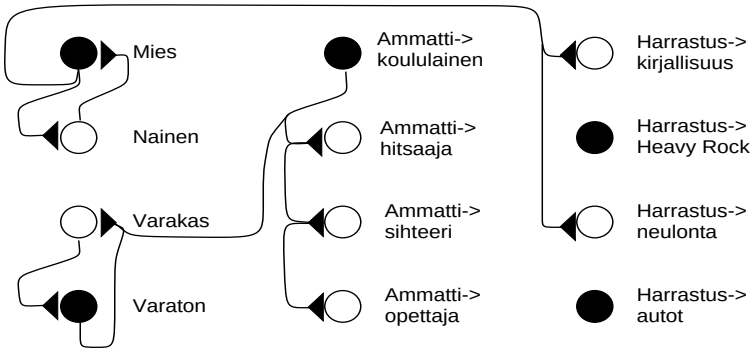
4.3 Itsejärjestäytyvät neuraaliverkot

Itseoppivat ja itsejärjestäytyvät neuraaliverkot ovat oppimisen laji, missä ei ole mahdollista tai ei ole tarpeen osoittaa suoraan minkä vastauksen verkko antaa määrättyyn syötevektoriin. Itsejärjestymisen tavoitteena on tuoda esille hyödyllistä informaatiota datasta, jota neuraaliverkko saa syötteenään. Itsejärjestäytyviä systeemejä on tutkittu melko paljon, koska niiden tiedetään olevan merkittävässä asemassa ihmisen biologisissa informaationkäsittelymekanismeissa. Esimerkiksi motorisia toimintoja ja näkösysteemin alempia kerroksia aivojen kuorikerroksessa hallitsevat nk. motoriset ja somatosensoriset kartat, joiden tiedetään muodostuvan vasta syntymän jälkeen itseorganisaatioprosessin tuloksena.

Eräs kaikkein tunnetuimmista itseorganisaatioon perustuvista neuraaliverkoista on suomalaisen tutkijan Teuvo Kohosen kehittämä itseorganisoituva piirrekartta. Itseorganisoituvalla piirrekartalla on kaksi tärkeää ominaisuutta: vektori-kvantisointi ja jatkuva "topologinen" kuvaus kahden avaruuden välillä. Tämä tarkoittaa, että neuronit pyrkivät muuttamaan painokertoimiaan kohti tilaa, jossa jokainen neuroni on keskimääräisesti yhtä usein aktiivinen ja aktiivisuudet ovat jakautuneet mahdollisimman tasaisesti erilaisten syötteiden joukkoon. Lisäksi neuronit, jotka ovat verkossa lähellä toisiaan reagoivat samantyyppisiin syötteisiin, kun taas verkossa kauempana olevat neuronit reagoivat erityyppisiin syötteisiin. Topologista itseorganisaatioverkkoa voidaan soveltaa moniin tehtäviin, joissa datan klusterointi, ryhmittely, korrelaatioiden etsiminen ym. ovat tärkeitä. Kuvassa 6 on esimerkkinä yksinkertaistettu robottisäätöongelma. Itseorganisoituvan neuraaliverkon avulla kahden nivelen robotti oppii määräämään mitkä nivelten kulmat (α, β) vastaavat mitäkin (x, y) koordinaatteja niissä paikoissa, joihin robotin käsi voi esteettä liikkua. Opetus tapahtuu liikuttamalla robotin kättä satunnaisesti vapaassa tilassa. Tässä tapauksessa robotti ymmärtää ympäröivää maailmaa aivan kuten ihminenkin, ainoastaan kokemansa perusteella. Esteiden ta-



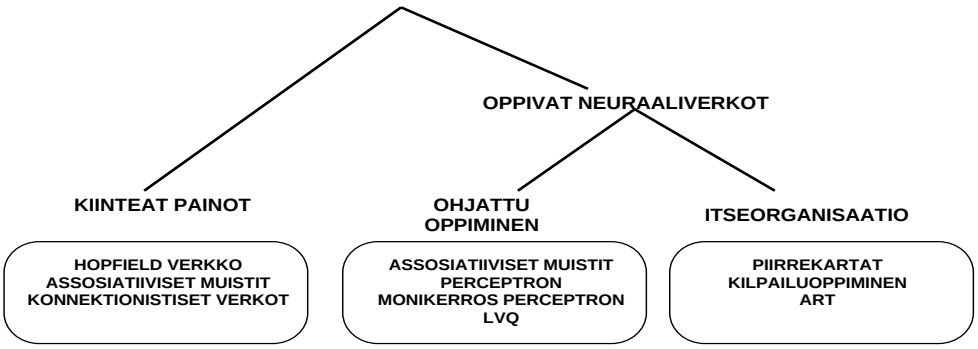
Kuva 3. Kaupparatsuongelman koodaus neuraaliverkolle. Vaakarivin neuronin aktiivisuus osoittaa kaupungin ja pystyrivit kaupunkien läpikäyntijärjestyksen. Kuvassa on havainnollistettu kahden neuronin negatiiviset kytkennät muihin neuroneihin: valkoiset kytkennät minimoivat reittiä ja mustat vastaavat siitä, että samassa kaupungissa käydään vain kerran.



Kuva 4. Esimerkki konnektionistisesta neuraaliverkosta. Jokaisen neuronin aktiivisuus kuvaa henkilön ominaisuutta. Kuvassa on esitetty osa negatiivisista kytkennöistä; esimerkiksi ammatti koululainen on kytketty negatiivisesti kaikkiin muihin ammattehin koska henkilöllä voi olla vain yksi ammatti. Vastaavasti henkilö ei voi olla samanaikaisesti mies ja nainen. Päättely tehdään asettamalla neuronit alkutilaan, joka on mahdollisesti ristiriitainen, ja tulkitsemalla ominaisuudet lopputilasta.

pystyy paitsi oppimaan oikean vastauksen, (palauttamaan vektorin y_i syötteen ollessa x_i), myös yleistämään vastauksen siten, että ennalta tuntematon syöte antaa opetusaineiston kannalta järkevän vastauksen. On osoitettu, että tietyntyyppinen monikerroksinen neuraaliverkko pystyy muodostamaan mielivaltaisia päätöspintoja syöteavaruuteen eli muuntamaan minkä tahansa syötevektorin miksi tahansa vastaukseksi.

Kuvassa 5 on esimerkkinä Perceptron-tyyppinen neuraaliverkko, joka on opetettu ratkaisemaan hahmontunnistukseen liittyvää tehtävää. Opetus on suoritettu esittämällä 10×7 sensorin hilalle käsinpiirrettyjä kirjaimia. Sensorit on kytketty satunnaisin kytkennöin neuraaliverkkoon, joka saa



Kuva 2. Eräs tapa luokitella neuraaliverkkoja.

4.1 Kiinteiden painojen verkot

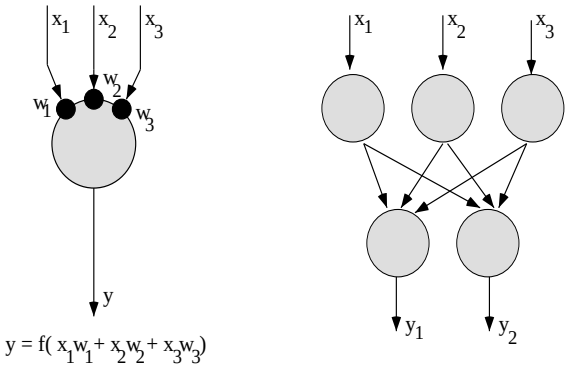
Kiinteiden painojen verkoissa määrätään neuronien väliset kytkennät ja kytkentöjen väliset vahvuudet siten, että verkko minimoi annetun tehtävän. Tehtävä koodataan siten, että jokaisen neuronin ulostulolla on jokin merkitys tuloksen kannalta.

Tunnettu esimerkki on kaupparatsuongelman ratkaisu. Kaupparatsuongelmassa kauppiaan on kuljettava kaikkien annettujen kaupunkien kautta käymättä kertaakaan samassa kaupungissa siten, että kuljettava matka kartalla minimoituu. Käytännössä tehtävää ei voida perinteisillä hakumenetelmillä ratkaista yli 30 kaupungin tapauksissa, sillä mahdollisten reittien määrä kasvaa räjähdyksenomaisesti kaupunkien lukumäärän suhteen. Neuraaliverkolle tehtävä voidaan koodata esimerkiksi siten, että otetaan käyttöön kaupunkien määrään nähden neliöllinen määrä neuroneita hilaan, jossa vaakarivi osoittaa kaupungin ja pystyrivi kaupungin järjestysnumeron lopullisessa reitissä (kuva 3). Jokaisen neuronin ulostulo kynnystetään joko 0:ksi tai 1:ksi. Lopullisessa tilassaan tulee verkossa olla ainoastaan yksi neuroni pysty ja vaakarivillä, mikä saadaan aikaan neuronien välisillä negatiivisilla kytkennöillä. Muilla kytkennöillä on vahvistus, joka määrätään kaupunkien välisen etäisyyden perusteella. On osoitettu, että tämän tyyppinen verkko voidaan määrätä ratkaisemaan ongelma sub-optimaalisesti lähtien satunnaisesta alkutilasta kelvolliseen reittiin huomattavasti tehokkaammin kuin monet perinteiset algoritmit.

Vastaavalla tavalla voidaan koodata muitakin tehtäviä; erityisen suosittuja ovat päättelytehtävät, joissa selvitetään mitkä asiat ovat samanaikaisesti voimassa. Verkolla voi esimerkiksi tutkia kohdehenkilön ominaisuuksia tai käyttäytymistä eri tilanteissa. Verkon koodaus tehdään sen pohjalta miten erityyppiset tiedot joko vahvistavat tai heikentävät toisiaan. Erilaisten henkilöiden tietojen alkutila annettuna verkolle johtaa tulkinnan kannalta järkevään lopputilaan, josta muut ominaisuudet voidaan päätellä (kuva 4).

4.2 Ohjatun oppmisen neuraaliverkot

Ohjatun oppimisen neuraaliverkot ovat suosituin neuraalilaskennan paradigma. Verkkoja käytetään mm. säätötehtäviin, luokitteluun, hahmontunnistukseen, päättelytehtäviin ym. Ohjatun oppimisen neuraaliverkoissa verkon painokertoimet määrätään opettamalla verkkoa esimerkkien avulla. Käytännössä tehtävä koodataan joukkoon opetusvektoripareja ($X = [x_1, x_2, \ldots, x_n], Y = [y_1, y_2, \ldots, y_n]$), missä X on syötevektorien joukko ja Y toivottujen vastausten joukko. Verkko



Kuva 1a) Tyypillinen neuronin malli. Ulostulo määräytyy funktion $y = f(\sum_i x_i w_i)$ mukaisesti.
Kuva 1b) Yksinkertaisen neuraaliverkon rakenne.

3. NEURAALIMALLIEN HIERARKIASTA

Keinotekoisia neuraaliverkkoja tutkitaan hyvin monista lähtökohdista. Neuraaliverkkotutkimuksen kaksi selvästi toisistaan poikkeavaa tavoitetta ovat ymmärtää aivojen toimintaa keinotekoisten mallien pohjalta ja tuottaa uusia mekanismeja informaationkäsittelyyn. Vaikka kummallakin tavoitteella on oma vankka kannatuksensa tutkijoiden keskuudessa niin itse mallit ovat yleensä samoja. Eroja löydetään vasta tarkastelemalla mallien hierarkiaa. Seuraava hierarkia perustuu tutkijaprofessori Teuvo Kohosen on kirjassaan (1988) esittämään luokitteluun:

Neuronitason mallit Näissä malleissa pyritään mallintamaan aivojen hermosoluja mahdollisimman hyvin tunnettujen biologisten, sähkökemiallisten, ominaisuuksien pohjalta.

Verkkotason mallit Tässä kaikkein suosituimmassa tasossa käsitellään verkkoa, joka koostuu yhteenkytketyistä, yksinkertaistetuista, neuroneista, jotka toimivat saman "algoritmin" puitteissa.

Systeemitason mallit Systeemitasolla tarkoitetaan useista verkkotason malleista koostuvaa systeemiä, jossa eri verkot ovat erikoistuneet tehtäviinsä. Käytännössä systeemitason malleja tarvitaan aina sovellettaessa neuraaliverkkoja käytännön tehtäviin kuten tietokonenäköön.

Älyllisen toimintatason mallit Vastaavat usein perinteisen, symbolisen, tekoälyn malleja. Pyrkimyksenä on toimia käsitteiden ja toimintojen tasolla. Nämä mallit pohjautuvat usein psykologisiin havaintoihin.

4. YLEISIMMÄT NEURAALIVERKKOTYYPIT

Neuraaliverkot eroavat toisistaan sekä rakenteeltaan, että opetustavaltaan. Yksinkertaisimmillaan verkon painokertoimet voidaan määrätä jonkin matemaattisen optimointitehtävän suorittamiseksi, jolloin varsinaista oppimista ei tarvita. Oppivat verkot ovat joko ns. itseorganisaatioon tai ohjattuun oppimiseen perustuvia. Ohjatussa oppimisessa verkkoa opetetaan esittämällä syöte ja haluttu ulostulo eli kysymys ja vastaus, vektorimuodossa. Itseorganisaatio on ohjaamatonta oppimista, missä verkko organisoituu pelkästään annetun syötteen pohjalta halutun ulostulon ollessa määräämätön.

Keinotekoisia *neuraaliverkkoja* informaation käsittelytehtävissä on suunniteltu ja tutkittu yhtä kauan kuin tietokoneitakin. Nykyaikainen tietotekniikka on itseasiassa kehittynyt yhdestä neuraaliverkkotutkimuksen haarasta, kynnysverkkopiireistä, ja niiden erikoistapauksesta, kaksiarvoisista porttipiireistä. Nimi "neuraaliverkko" viittaa aivojen soluun *neuroniin*, joita ihmisellä on eräiden arvioiden mukaan kymmenestätuhannestamiljoonasta sataantuhanteenmiljoonaan ($10^{10} - 10^{11}$). Jokainen neuroni lisäksi kytkeytyy keskimäärin kymmeneentuhanteen toiseen neuroniin. Monet neuraaliverkkotekniikat ovatkin saaneet vaikutteita aivojen ja aivosolujen, neuronien, rakenteesta. Ominaista on, että verkko koostuu suuresta määrästä samanlaisia, rinnakkaisia yksiköitä. Simulaatioissa on osoitettu, että nämä massiivisen rinnakkaiset verkot kykenevät ratkaisemaan vaikeita informaationkäsittelytehtäviä reaaliajassa, ongelma mikä monesti on mahdotonta toteuttaa perinteisen tekoälyn keinoin. Toinen hyödyllinen piirre neuraaliverkoissa on adaptiivisuus eli oppiminen, missä verkko voidaan esimerkkien avulla opettaa toimimaan halutussa tehtävässä ja ympäristössä.

Neuraaliverkkojen tutkimus ja sovellutukset jäivät pitkäksi aikaa muun tietotekniikan kehityksen jalkoihin. Todellinen neuraaliverkkojen "vallankumous" katsotaan alkaneeksi vuoden 1986 paikkeilla, jolloin mm. osoitettiin perättömäksi väitteet neuraaliverkkojen kyvyttömyydestä ratkaista eräitä käytännön kannalta merkittävinä pidettyjä ongelmia. Menetelmien helppokäyttöisyys, kyky oppia tehtävien ratkaisu sekä nopeus ovat syitä alan räjähdysmäiselle kasvulle. Monet perinteiset tekniikat mm. ennustusten laatimisessa, säädössä, luokittelussa ja signaalinkäsittelyssä ovat osoittautuneet tehottomiksi ja vaikeakäyttöisiksi verrattuna vastaaviin toteutuksiin neuraaliverkkojen avulla. Lisäksi neuraaliverkkojen avulla on mahdollista ratkaista tehtäviä huomattavasti vähäisemmillä perustiedoilla, kuin mitä perinteisten tekniikkojen käyttämiseen yleensä vaaditaan.

2. NEURAALIVERKKOJEN ÄLY ON KYTKENNÖISSÄ

Neuraaliverkko koostuu suuresta määrästä samanlaisia, rinnakkaisia yksiköitä, joita kutsutaan neuroneiksi. Tarkasteltaessa neuroniverkkoa sähköisenä piirinä voidaan havaita, että jokainen neuroni on kytketty useaan muuhun neuroniin "johdinten" välityksellä ja jokaisella neuronilla on yksi ulostulo, joka haarautuu vastaaviin kytkentöihin muihin neuroneihin. Tässä suhteessa neuroni ei eroa tavallisista porttipiireistä. Ero on siinä miten neuronin ulostulo määräytyy muista neuroneista tuleviin signaaleihin nähden. Tavallisen porttipiirin ulostulo on joko 1 tai 0 riippuen portin tyypin määräämästä Boolen funktiosta. Neuraaliverkoissa ei sovelleta Boolen algebraa, vaan jatkuva-arvoisia funktioita, joiden arvo määräytyy ns. kytkentävahvuuksien ja sisääntulosignaalien arvojen pohjalta. Kytkentäarvo on jatkuva-arvoinen reaaliluku, jolla yleensä painotetaan (kerrotaan) neuronin sisääntulosignaalin arvot. Jokaisella signaalilla on oma painonsa ja painotetut arvot lasketaan yleensä yhteen mahdollisesti kynnystäen digitaalisiksi 0-1 arvoiksi. Kuvassa 1a on tyypillinen neuronin malli ja kuvassa 1b yksinkertainen neuraaliverkko, jossa on viisi neuronia.

Neuraalilaskennan keskeinen tehtävä on määrätä neuronien väliset kytkennät siten, että massiivisen rinnakkainen verkko toimii halutulla tavalla. Käytännössä verkon painokertoimia ei voida määrätä explisiittisesti mistä seuraa, että neuraaliverkkoja ei ohjelmoida tavallisen tietokoneen tavoin. Huomattava osa neuraaliverkkotutkimuksesta ja julkaisuista käsitteleekin algoritmeja, joiden avulla verkko opetetaan esimerkkien avulla ratkaisemaan annettuja tehtäviä eli verkko muuttaa itse painokertoimiaan siten, että annetut tehtävät saadaan ratkaistua. Verrattaessa neuraaliverkkoja perinteisiin tietokoneohjelmiin havaitaan, että neuraaliverkoissa ei voida tehdä eroa ohjelman ja datan välille, ne molemmat ovat hajautuneet hologrammin tavoin koko systeemin painoihin. Hologrammisuudesta muistuttaa toinenkin piirre, vikasietoisuus. Poistettaessa opetetusta neuraaliverkosta kytkentöjä tai jopa neuroneita ei systeemin kokonaistoiminta juurikaan muutu.

NEURAALINEN TIETOJENKÄSITTELY

Pasi Koikkalainen
Lappeenrannan Teknillinen Korkeakuolu

JOHDANTO

Neuraaliverkoista on kehittymässä merkittävä tietotekniikan osa. Kiinnostus näihin tekniikkoihin ilmenee monin tavoin: alalle on vuoden 1987 - 1990 välisenä aikana perustettu 6 kansainvälistä lehteä, noin 300 yritystä tekee neuraaliverkkotuotteita, satoja yliopistoja osallistuu neuraaliverkkotutkimukseen, organisaatiot kuten DARPA, EEC ja MITI ovat sijoittaneet 1-2 miljardia suomen markkaa vuodessa neuraaliverkkotutkimukseen. Useiden lähteiden mukaan markkinoiden kasvuennuste on vuoden 1989 tasoon verrattuna 10 kertainen vuoteen 1995 mennessä ja 30 kertainen vuoteen 1998 mennessä. Tämän esityksen tarkoituksena on selvittää mitä mystiseltä sointuvat neuraalikoneet ovat sekä miksi neuraaliverkkoihin panostetaan. Lisäksi tarkoituksena on antaa kuva neuraaliverkkojen sovellutusmahdollisuuksista.

1. NEURAALIKONEEN HISTORIA

Ensimmäisten kaupallisten tietokoneiden tullessa markkinoille 1950 luvun puolivälissä tietotekniikalla pystyttiin lähinnä automatisoimaan rutiininomaisia laskutoimituksia. Nykyistä neljännen ja puolen sukupolven teknikkaa sovelletaan jo lähes kaikilla tekniikan ja yhteiskunnan aloilla. Osa tärkeistä sovellutuksista on kuitenkin osoittautunut mahdottomaksi toteuttaa tunnetun tietotekniikan keinon ja monet muut tehtävät ratkaistaan epäedullisella tai muuten luonnottomalla tavalla. Eräänä mahdollisena ratkaisuna ongelmiin pidetään keinotekoisia neuraaliverkkoja.

Verrattaessa nykyisiä tietokoneita ihmisen aivoihin havaitaan, että monet ihmiselle yksinkertaiset tehtävät ovat täysin ylivoimaisia toteuttaa tietokoneella, ja päinvastoin. Aivojen ja tietokoneen infomaationkäsittelymekanismit siis poikkevat toisistaan. Tämä poikkeavuus on osoittautunut hyödylliseksi mutta ei vastaa niihin tavoitteisiin mitä tietokoneille alunperin asetettiin. Tietoteknisissä sovellutuksissa esiintyvä informaatio on analogisessa, numeerisessa tai symbolisessa muodossa. Analoginen informaatio on lähinnä reaalimaailmasta saatua mittaustietoa, joka voidaan esimerkiksi signaalienkäsittelyn keinoin muuttaa numeroiksi tai symboleiksi tietokoneella tapahtuvaa käsittelyä varten. *Signaalienkäsittelyssä* siis yhdistetään reaalimaailma tietokoneiden numeeriseen maailmaan. *Numeerinen* tietojenkäsittely on matemaattista laskentaa, joka pohjimmiltaan perustuu luonnonlakien soveltamineen. Esimerkkejä ovat mm. lujuuslaskenta, sääennusteet ja säätö. *Symbolinen* tietojenkäsittely pyrkii käsittelemään informaatiota, joka pohjimmiltaan perustuun ihmisen kielioppiin, symboleihin, nimiin ja muuhun rakenteiseen informaatioon. Tarkoituksena on käsitellä informatiota ihmisen ymmärtämässä muodossa tietorakenteiden avulla. Esimerkkejä ovat tietokannat, tekstinkäsittely, taulukkolaskenta, osin grafiikka, ym. Huolimatta symbolisesta liitännästä koneen ja ihmisen välillä, poikkeaa mekanismi, jolla informaationkäsittely aivoissa tehdään, monin tavoin tietokoneella tehtävästä symbolisesta tietojenkäsittelystä. Tämä saattaa olla syynä vaikeuksiin tuottaa eräitä ihmisen kykyihin verrattavia toimintoja kuten puheen tunnistusta tai robottinäköä. Jopa itse symbolien olemassaolosta aivojen informaation esityksissä, representaatioissa, kiistellään tutkijoiden keskuudessa. Keinotekoisten neuraaliverkkojen avulla pyritään ratkaisemaan eräitä symbolisen tietojenkäsittelyn ongelmia numeerisen tietojenkäsittelyn keinoin.