

hyväksymispäivä arvosana

arvostelija

Keinotekkoisten neuroverkkojen kehitys ja kehittäjät

Olli Orajärvi

Helsinki 2.5.2006

HELSINGIN YLIOPISTO
Tietojenkäsittelytieteen laitos

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Tekijä — Författare — Author Olli Orajärvi			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Keinotekkoisten neuroverkkojen kehitys ja kehittäjät			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year 2.5.2006	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 10 sivua + 0 liitesivua
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Tässä seminaarityössä käsitellään tekoälyn historiaa yhden sen osa-alueen, neuroverkkojen, osalta. Työn painotus on tekoälyn alkuvaiheissa, mutta kehitystä käydään läpi alan uuteen virkoamiseen asti 1980- ja 1990-luvuilla. Viimeisimpiä tutkimustuloksia ei ole mukana. Seminaarityössä esitellään myös joitain alan kehitykseen vaikuttaneita henkilöitä, mutta kuten kaikkia keksintöjä, kaikkia tärkeitä henkilöitäkään ei mainita. Matemaattisuutta ja yksityiskohtaisia tekniikoiden ja teorioiden kuvauksia on pyritty välttämään.</p> <p>ACM Computing Classification System (CCS): K.2 [History of computing]</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords tietojenkäsittelyn historia, neuroverkko			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			

Sisältö

1 Johdanto	1
2 Pernasta neuroneihin, neurotieteen alkuajat	1
3 Neuronin keinotekoinen malli	1
4 Dartmouth 1956	5
5 Perceptronin nousu ja tuho	6
6 Virkoaminen	7
7 Yhteenveto	8
Lähteet	9

1 Johdanto

Neurotieteen kehitys 1800-luvulla loi pohjan sille työlle, jonka tuloksena 1940-luvun alussa syntyivät kybernetiikka ja tekoäly. Luku kaksi esittelee lyhyesti tätä kehitystä. Luvussa kolme käsitellään keinotekoisien neuroverkkojen syntyä ja sitä poikkitieteellistä pohjaa, jolle tekoäly ja kybernetiikka kasvoivat. Luvussa neljä kerrotaan pikaisesti Darthmouthin kesäkoulusta, jota voidaan pitää tekoälyn lähtölaukauksena. Luku viisi käy läpi McCulloch-Pitts neuronista kehitettyä perceptronia ja sen kuuluisaa kritiikkiä, jolla oli alan tutkimukseen voimakas negatiivinen vaikutus. Luku kuusi kertoo miten kiinnostus neuroverkkoja kohtaan lähti uuteen nousuun 80-luvulla.

2 Pernasta neuroneihin, neurotieteen alkuaikat

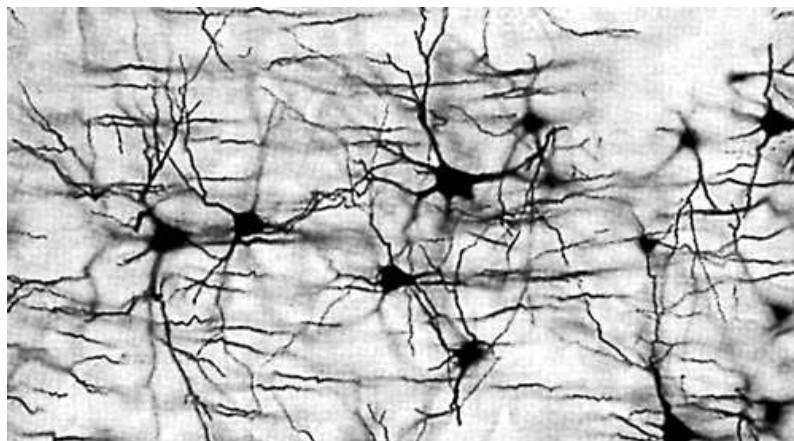
1800-luvun ihmiselle ei ollut itsestään selvää, että ajatustoiminta tapahtuisi aivoissa. Siihen mennessä potentiaalisia kandidaatteja olivat olleet mm. perna ja sydän.

Paul Broca tutki afasiaa aivovauriopotilailla ja totesi 1861, että lokalisoidut aivoalueet ovat vastuussa tietyistä kognitiivisista toiminnoista. Erityisesti puheen tuottaminen voitiin paikallistaa vasemman aivolohkon osaan, jota kutsutaan löytäjänsä mukaan Brocan alueeksi. Neuroneista oli teorisoitu jo aiemmin 1800-luvulla, mutta vasta Camillo Golgin kehittämä värjäystekniikka (kuva 1) mahdollisti yksittäisten neuronien havaitsemisen. Santiago Ramon y Cajal käytti Golgin kehittämää tekniikka hyväkseen omissa uraa uurtavissa tutkimuksissaan. Molemmat miehet palkittiin Nobel-palkinnolla vuonna 1906, mutta heidän käsityksensä aivotoimintojen ja neuronien suhteesta olivat tyystin erilaiset. Golgin mielestä aivotoiminnot tapahtuvat väliaineessa, johon neuronit ovat upotettuina, kun taas Cajal oli sitä mieltä, että nimenomaan neuronit mahdollistavat ajattelun.[RN03]

Elävän neuronin toimintaa ei pystytty havainnoimaan ennen kuin vasta 1929 jolloin Hans Berger kehitti EEG:n.

3 Neuronin keinotekoinen malli

Ensimmäinen keinotekoisia neuroneita käsittelevä tutkimus "The logical calculus of the ideas immanent in nervous activity" julkaistiin 1943 ja sitä pidetään samalla myös

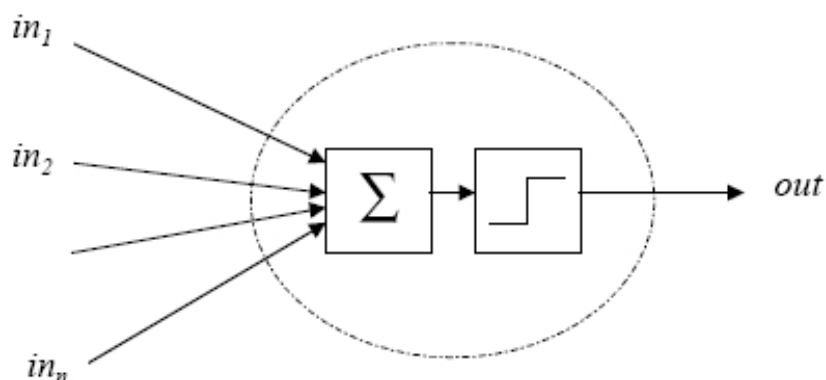


Kuva 1: Golgin tekniikalla värjättyjä neuroneita[Tur]

ensimmäisenä tekoälyn alaan kuuluvana tutkimuksena[RN03]. Tosin alalla ei vielä tuolloin ollut nimeä, vaan lähinnä voitaneen puhua eri alojen tutkijoista, jotka olivat kiinnostuneita aineen ja mielen ongelmista. Tutkimuksessaan Warren McCulloch ja Walter Pitts esittelivät sen aikaista neuronikäsitystä karkeasti muistuttavan loogisen mallin.

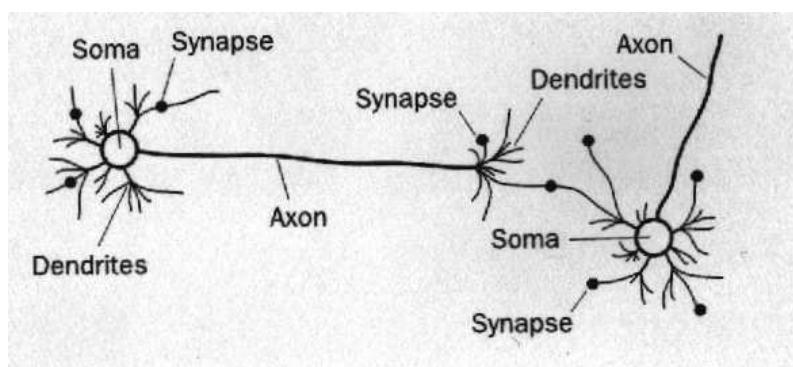
McCulloch oli neurofysiologi, joka oli jo pitkään ollut kiinnostunut aivojen rakenteesta ja organisaatiosta[McC79]. Hän tahtoi saada silloisen neurofysiologian epämääräiset teoriat ja havainnot muutettua matemaattisen täsmälliselle pohjalle. Pittsin tausta oli vähemmän tavallinen. Tekoälyn historioitsija Pamela McCorduck kertoo Pittsin olleen tuolloin vasta 18-vuotias erittäin lahjakas matemaatikko tai pikemminkin matematiikan opiskelija, koska mitään tutkintoa hänellä ei ollut. Hän oli karannut kotoaan 15-vuotiaana ja törmännyt sattumalta puistossa Bertrand Russeliin, jonka kautta hän päätyi tunnetun loogikon Rudolph Carnapin oppiin. Carnap opetti tuolloin Chicagossa. Carnapin opissa ollessaan hän joutui tekemisiin McCullochin kanssa, joka tarvitsi konsulttiapua omissa neurofysiologisissa tutkimuksissaan. Pitts auttoi McCullochia ymmärtämään miten tietyytyypiset hermojärjestelmän kytkennät voisivat muodostaa Turingin koneen[Rhe85].

McCullochin ja Pittsin esittelemä keinotekoinen neuroni(kuva 2) toimii siten, että se vastaanottaa signaaleja useista lähteistä, joiden voidaan ajatella olevan joko ulkoisia lähteitä tai toisia neuroneita. Jos sen saamien signaalien summa ylittää aktivaatiofunktion kynnysarvon, neuroni aktivoituu ja lähettää signaalin eteenpäin.



Kuva 2: McCulloch-Pitts neuroni[Bull]

Koska mallin esikuva on biologinen neuroni, siitä löytyy samat piirteet, joskin eri nimillä. Biologisessa neuronissa (kuva 3) dendriitit vastaanottavat signaaleja ja jos tulosignaalit aiheuttavat neuronin laukeamisen, lähtösignaalit välittyvät äksonin kautta. Esitelty keinotekoinen neuroni on lähinnä looginen malli biologisen neuronin toiminnasta, se ei pyri jäljittämään toimintaa orjallisesti.



Kuva 3: Biologinen neuroni[Neg01]

McCulloch ja Pitts osoittivat, että loogiset operaatiot kuten AND, OR ja NOT oli mahdollista toteuttaa yksinkertaisilla verkoilla ja että mikä tahansa laskettavissa oleva funktio voitiin laskea jollain verkkorakenteella[RN03]. He myös esittivät ajatuksen, että jos verkot määriteltäisiin sopivalla tavalla, ne voisivat kyetä oppimaan. Tutkimus julkaistiin lehdessä nimeltä "Bulletin of Mathematical Biophysics". McCul-

loch on myöhemmin todennut, että se olisi saattanut jäädä huomaamatta, ellei John von Neumann olisi löytänyt sitä[McC79]. John von Neumanniin, jolla oli suuri merkitys varhaisten tietokoneiden kehityksessä, tutkimus teki vaikutuksen ja hän hyödynsi sitä opettaessaan tietokoneiden teoriaa[HT89].

John Von Neumann ei ollut ainoa tekoälyn historiaan vaikuttanut henkilö, joka huomasi McCullochin ja Pittsin työn merkityksen. Howard Rheingoldin [Rhe85] mukaan Norbert Wiener oli isänsä omalaatuisin menetelmin kouluttama entinen lapsinero, joka oli väitellyt tohtoriksi jo 18-vuotiaana. Hän oli hankala luonne ja oli aiheuttanut mieliharmia mm. häntä opettaneelle Bertrand Russelille, joka mainitsee eräässä ystävälleen lähettämässä kirjeessä, että kyseinen 18-vuotias tohtori "luulee olevansa kaikkivaltias Jumala - meidän välillämme on jatkuva kilpailu siitä kumpi saa opettaa".

Wienerin toi McCullochin luo hänen työnsä ilmatorjunnan parissa toisen maailmansodan aikana. Kun Alan Turing, toinen tekoälyn historiaan merkittävästi vaikuttanut henkilö, ratkoi saksalaisten salakirjoituksia ja auttoi näin sukellusveneiden torjunnassa, Wiener painiskeli eri elementin parissa. Ongelma liittyi ilmapuolustukseen; miten ampua alas lentokone joka liikkuu suurella nopeudella? Tutkasta saatiin tietoa koneiden liikkeistä, mutta tietoa oli mahdotonta hyödyntää lentoradan laskemisessa. Wiener ja hänen työtoverinsa Bigelow huomasivat yhteyden ihmisen toiminnan ja ilmatorjuntaongelman välillä. Esimerkiksi käveleminen vaatii jatkuvaa lihasten hienosäätöä elimistöltä tulevien signaalien perusteella. Samaa analogiaa käyttäen tutkalta tuleva informaatiiovirta olisi saatava osaksi ilmatorjuntatykin tähtäysjärjestelmää. Wienerin tiimi lähti etsimään, olisiko joku paremmin neurofysiologiaan vihkinyt taho tutustunut vastaavaan asiaan biologisen järjestelmän lähtökohdista. Näin Wienerin tutustui McCullochiin.[Rhe85]

Edellämainittujen henkilöiden kanssakäymisen tuloksena perustettiin vuonna 1944 poikkiteellinen keskustelukerho "Teleological Society", jossa olivat mukana niin Von Neumann, Wiener, kuin McCullochkin sekä muutamia muita. Tälle pohjalle syntynyt tutkimussuunta sai myöhemmin nimen "kybernetiikka" Wienerin kirjoittaman kirjan mukaan[Rhe85]. Tekoälyn historioitsija Pamela McCorduckin mukaan kybernetiikka yhdessä Claude Shannonin samoihin aikoihin työstämän informaatioteorian kanssa merkitsi vallalla olevan selitysmallin korvautumista toisella. Newtonin mekaniikassa keskeinen käsite energia oli korvautumassa toisella, informaatiolla. Samasta syystä McCulloch-Pitts neuronin oli niin merkittävä, sillä se esitti, että "mieltä hallitsevia lakeja tulisi etsiä informaation laeista eikä energiasta tai materiaasta"[McC79].

McCulloch ja Pitts olivat esittäneet vuoden 1943 työssään mahdollisuuden, että neuroverkko voisi kyetä oppimaan. Vuonna 1949 kirjassaan "The Organization of Behavior" Donald Hebb esitti keinon jolla aivojen neuroverkot voisivat oppia. Kyseessä oli yksinkertainen sääntö jolla neuronien välisten yhteyksien vahvuuksia voitiin päivittää: Jos neuronin A signaali on toistuvasti osallisena neuronin B laukeamisessa, neuronien välinen kytkentä vahvistuu siten, että A:lta tulevan signaalin painoarvo kasvaa. Hebbin keksinnöllä on merkitystä vielä tänäkin päivänä[RN03].

Ensimmäinen keinotekoinen neuroverkko valmistui vuonna 1951[Minsky]. Asialla olivat kaksi jatko-opiskelijaa Princetonin matematiikan laitokselta, Dean Edmonds ja Marvin Minsky. Minsky vaikutti myöhemmin monellakin tapaa neuroverkkojen tutkimukseen ja myös tutkimuksen keskeytymiseen. Opiskelijoiden rakentaman laitteen nimi oli SNARC (Stochastic Neural-Analog Reinforcement Computer) ja se oli rakennettu kolmesta tuhannesta tyhjiöputkesta ja B-24 pommittajan autopilotista[RN03]. Sen 40 keinotekoista neuronia simuloivat rottaa, joka hakee tietään ulos labyrintista[AIHis].

4 Dartmouth 1956

Marvin Minskyn ja John McCarthyn organisoimaa kesäkoulua Dartmouthissa 1956 pidetään tekoälyn varsinaisena lähtölaukauksena[RN03].

Neuroverkot olivat esityslistalla mukana[MMRS55] ja osallistujissa oli aiheen parissa työskennelleitä henkilöitä kuten Marvin Minsky ja IBM:n Nathaniel Rochester. Paitsi että Minsky oli rakentanut neuroverkkokoneen, myös hänen tohtorinväitöskirjansa, "Neural nets and the brain model problem", käsitteli neuroverkkoja. Minskyn lisäksi myös Rochester oli osallistunut neuroverkkokoneiden rakentamiseen. Hän oli työskennellyt neuroverkkojen simuloinnin parissa tarkoituksenaan erityisesti käyttää tietokoneita neurofysiologian teorioiden testaamiseen.

Kesäkoulun suurin anti alasta kiinnostuneiden ihmisten toisiinsa tutustuttamisen lisäksi lienee Allen Newellin ja Herbert Simonin jo aiemmin itsenäisesti rakentama "Logic Theorist", jota he esittelivät Dartmouthissa. Logic Theorist oli edistysaskel, mutta ei neuroverkoille, koska Newellin ja Simonin työ keskittyi symboliseen tekoälyyn.

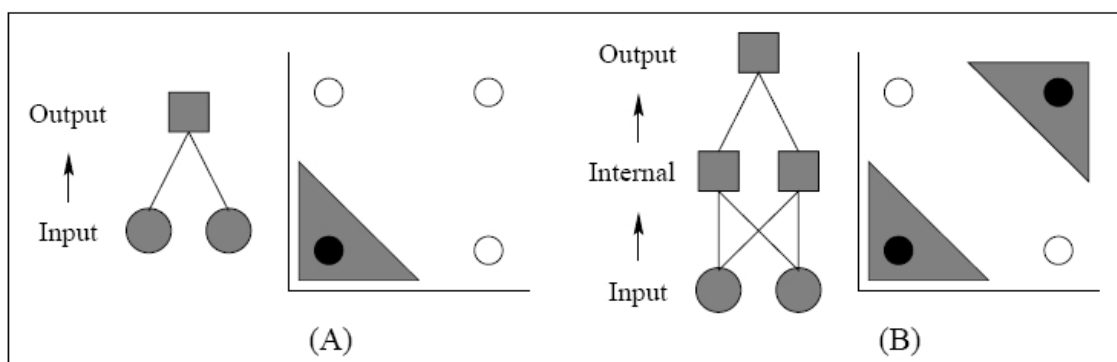
Vaikka läpimurtoja ei kesän aikana syntynytkään, kutsukirjeen otsikon sisältämä nimi alalle, "artificial intelligence", jäi elämään. Pari vuotta myöhemmin Minsky ja McCarthy perustivat kyseisen nimen alle laboratorion MIT:hin[AIHis].

5 Perceptronin nousu ja tuho

Frank Rosenblattin johtama ryhmä Cornellin yliopiston tutkijoita kehitti 1950-luvun lopulla uudentyyppisen neuronin mallin nimeltään perceptron. Kehitystyössä oli käytetty hyväksi McCulloch-Pitts neuronია ja Hebbin työtä ja se kykeni oppimaan kytkentöjen vahvuutta muuttelemalla. McCulloch-Pitts neuronissa painoarvojen käyttäminen ei ollut mahdollista, koska sekä tuleva, että lähtevä signaali oli binäärimuotoista[MS69]. Perceptron sai jonkin verran mainetta ja McCordukin mukaan ansio siitä kuuluu jossain määrin enemmän Rosenblattille itselleen kuin mallin hienoudelle. Rosenblatt uskoi suuresti perceptronin mahdollisuuksiin eikä jättänyt sitä kertomatta. Hän oli hyvin markkinamiestyylinen ja onnistuikin vakuuttamaan monia ihmisiä.

Eräs henkilö, jota Rosenblattin tyyli suuresti ärsytti oli Marvin Minsky[McC79]. Minsky oli jo aikaisemmin itse luopunut yrityksestä rakentaa älyä neuroverkkojen avulla todettuaan, että teoriassa oli puutteita ja siirtynyt symbolisen tekoälyn pariin. Aihe kuitenkin kaihersi häntä ja hän uhrasi jonkin verran aikaansa sen miettimiseen. Eräässä konferenssissa Englannissa hän tapasi toisen tutkijan, joka oli päätenyt Minskyn kanssa samantyyliisiin tuloksiin koskien perceptronin kaltaisia neurooneita. Kyseessä oli etelä-afrikkalainen Seymour Papert, jonka McCulloch myöhemmin kutsui MIT:hin ja josta tuli Minskyn työtoveri. Vuonna 1968 Minsky ja Papert julkaisivat kirjan nimeltä "Perceptrons", jossa teoriaa yritettiin saada vankemmalle matemaattiselle pohjalle[McC79]. Kirjaa kirjoitettaessa oli kuitenkin törmätty joihinkin perustavaa laatua oleviin ongelmiin. Yksi ongelmista oli, että yksinkertainen perceptron kykenee tunnistamaan vain lineaarisesti erottuvan (eng. linearly separable) funktion (kuva 4). Tämän vuoksi esimerkiksi XOR-funktiota ei pystytty tunnistamaan. Vaikka joitain yksikerroksisen perceptronin ongelmia olisi periaatteessa pystytty ratkaisemaan monikerroksisella, ei ollut olemassa menetelmää, jolla piilotetut välikerrokset olisi pystytty opettamaan.

Senaikaisten neuroverkkojen rajoituksista harmillisen tietoinen oli myös Warren McCulloch, jonka vankimmat seuraajat yrittivät edelleen rakentaa verkkojaan alkuperäistä työtä muistuttavilla yksinkertaisilla neuroneilla, vaikka vähänkin epätriviaalimman älykkyyden rakentaminen tuntui järjestelmällisesti epäonnistuvan[McC79]. Neurobiologian kehitys oli osoittanut, että McCulloch-Pitts neuroni muistutti vain vähän biologista esikuvaansa, joka oli osoittautumassa toiminnaltaan paljon luultua monimutkaisemmaksi. Seymour Papert, jonka kanssa Minsky julkaisi perceptroneja käsittelevän kirjansa, muistaakin McCullochin todenneen asiasta: "Älä pure sormeaa-



Kuva 4: A) Lineaarisesti erottuva B) Lineaarisesti erottumaton[Med98]

ni vaan katso minne osoitan".

Minskyn ja Papertin perceptroneja käsittelevän kirjan julkaisulla oli lamauttava vaikutus neuroverkkojen parissa tehtävälle työlle etenkin Yhdysvalloissa ja tätä lamaanusta kesti aina 1980-luvun alkupuolelle asti[HT89]. Kaikki alan tutkimus ei loppunut, mutta suurin osa siitä tapahtui Yhdysvaltojen ulkopuolella, kuten esim. Teuvo Kohosen työ itseorganisoiduvien karttojen parissa 1970-luvulla.

6 Virkoaminen

Neuroverkkojen pitkä kuiva kausi, johon oli vaikuttanut niin Minskyn ja Papertin kirja, kuin myös tekoälyn alkuaikojen suurten lupauksen toteutumattomuus, alkoi osoittaa loppumisen merkkejä vasta 1980-luvun alussa. Kokonaan tutkimus ei ollut loppunut, mutta suuri osa tekoälyn piirissä tehtävästä tutkimuksesta keskittyi muihin suuntauksiin kuten symboliseen tekoölyyn, joka ei yrittänyt kopioida luonnollisten aivojen rakennetta. Symbolinen suuntaus keskittyi enemmän siihen, mitä aivot tekevät, kuin siihen miten ne sen tekevät.

Eräs merkittävä asia, joka oli osaltaan nostamassa neuroverkkotutkimuksen kiinnostavuutta oli takaisinkytkentäalgoritmin(eng. back-propagation) uudelleen keksiminen. Algoritmi oli keksitty ja unohdettu aiemminkin, ainakin Paul Verbos vuonna 1974 oli julkaissut sen[AIH85]. Vastaavaa olivat ehdottaneet jo aiemmin myös Bryson ja Ho, mutta menetelmä oli senaikaisille tietokoneille liian raskas ja joutui unohdukseen. Takaisinkytkentäalgoritmi oli merkittävä siksi, että se mahdollisti monimutkai-

sempiä perceptron-verkkojen rakentamisen. Nyt vihdoin oli olemassa keino, jolla monikerroksiset verkot voitiin saada oppimaan. Algoritmista tuli erittäin suosittu ja sitä käytetään valtaosassa neuroverkkosovelluksia [Med98]. Takaisinkytkentäalgoritmeilla ei ole biologista vastinetta, ihmisäivot oppivat eri tavalla.

Lupaavia tuloksia on saatu myös muilta tieteenaloilta, kuin tietojenkäsittelytieteestä ja matematiikasta. Vuonna 1982 John Hopfield esitteli verkkomallin, joka käytti kaksisuuntaisia kytkentöjä. Erityisen mielenkiintoista mallissa oli, että se pystyi toimimaan assosiativisena muistina ja kykeni luotettavasti tallentamaan $0.138N$ harjoitusesimerkkiä, missä N on verkon yksiköiden määrä [RN03]. Hopfield oli fyysikko ja ammensi ideoita fysiikasta, hän mm. analysoi verkkonsa tallentamiskykyä tilastollisen mekaniikan keinoin ja käsitteli neuroneita ikään kuin atomeina. Myöhemmin myös esimerkiksi Amit ja Sompolinsky toivat lisävaikutteita fysiikan puolelta soveltaessaan fysiikassa vakiintuneita menetelmiä Hopfield-verkkoon [Amit85].

Nykyään neuroverkkoja käytetään hyvin monella tieteenalalla ja myös teollisuudessa. Ne soveltuvat hyvän hahmontunnistuskäytönsä vuoksi niin robotin navigointijärjestelmään, sairauksien diagnosointiin kuin tietokonepeliinkin.

Onnistuneista käytännön sovelluksista voidaan mainita mm. Dean Pomerleau'n työ vuonna 1989. Pomerleau rakensi neuroverkkoja hyödyntävän järjestelmän, joka kykeni ohjaamaan autoa. ALVINN (An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network), kuten sitä kutsuttiin, ohjasi autoa menestyksekkäästi lähes koko matkan Yhdysvaltain rannikolta toiselle. Ainoastaan 50 mailia lähes kolmesta tuhannesta jouduttiin ajamaan ihmisohjauksella [AIHis].

Kilpailevia menetelmiäkin on toki olemassa, eivätkä neuroverkot ole tilastollisena oppimismenetelmänäkään välttämättä paras vaihtoehto, neuroverkoissa on esimerkiksi helppo joutua kombinatoriseen räjähdykseen. Ne ovat myös ihmisen kannalta epäintuitiivinen malli sillä verkkoa ja kytkentöjen painoja tutkimalla on lähes mahdollon saada selkeää kuvaa mitä verkko tekee. Tietynlaisiin tarkoituksiin ne kuitenkin sopivat ja on epätodennäköistä, että niiden käytöstä lähiaikoina luovuttaisiin.

7 Yhteenveto

Keinotekoiset neuroverkot, kuten tekoäly yleensäkin, eivät ole yhden ihmisen ponnistusten tulosta, vaan seurausta monen alan tietämyksen sekoittumisesta. Vaikka neuroverkkotutkimus sai inspiraationsa ihmisäivojen toiminnasta, keinotekoiset neu-

roverkot ja ihmisaivot muistuttavat toisiaan vähemmän kuin 1940-luvulla luultiin. Toisaalta samankaltaisuutta ei enää edes tavoitella, vaan käytetään toimivia menetelmiä, vaikka ne olisikin kehitetty toisen tieteenalan tarpeisiin, ilman mitään yhteyttä aivojen toimintaan. Joidenkin mielestä toisilla aloilla vakiintuneiden menetelmien tuominen neuroverkkotutkimukseen on tuonut kaivattua uskottavuutta[RN03]. Toisten mielestä se on selkeä osoitus siitä, että vaikka keinotekoisia verkkoja ja niiden saavutuksia rinnastetaan ihmisaivoihin, ne ovat kuitenkin insinööritaidon luomus, jolla on kovin vähän yhteistä esikuvansa kanssa[RE88].

Lähteet

- Amit85 Amit, D. J., Gutfreund, H. ja Sompolinsky, H., Spin-class models of neural networks. *Physical Review A*, 32,2(1985), sivut 1007–1018.
- AIHis Artificial intelligence, history. http://www.stottlerhenke.com/ai_general/history.htm. [1.5.2006]
- Bull Introduction to neural networks. <http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/NN/12.pdf>. [1.5.2006]
- HT89 Heinämaa, S. ja Tuomi, I., *Ajatuksia synnyttävät koneet*. WSOY, Juva, 1989.
- McC79 McCorduck, P., *Machines who think*. W. H. Freeman and Company, San Fransisco, 1979.
- Med98 Medler, D. A., A brief history of connectionism. *Neural Computing Surveys*, 1,3(1998), sivut 61–101.
- Minsky Marvin minsky home page. <http://web.media.mit.edu/~minsky/>. [1.5.2006]
- MMRS55 McCarthy, J., Misky, M. L., Rochester, N. ja E., S. C., A proposal for the darthmouth summer research project on artificial intelligence. [Myös <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth.html>], 1955.
- MS69 Minsky, M. ja Papert, S., *Perceptrons, An Introduction to Computational Geometry*. The MIT Press, 1969.

- Neg01 Negnevitsky, M., *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Addison Wesley, Boston, 2001.
- Rhe85 Rheingold, H., *Tools for Thought*. Simon Schuster, 1985. [Myös <http://www.rheingold.com/texts/tft/>].
- RE88 Reeke, G. N. J. ja M., E. G., Real brains and artificial intelligence. *Daedalus*, 117,1(1988), sivut 143–173.
- RN03 Russell, s. ja Norvig, P., *Artificial intelligence a modern approach*. Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- Tur What is artificial intelligence? http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/pages/Reference%20Articles/what_is_AI/What%20is%20AI10.html. [1.5.2006]