

SYMBOLIT JA NEURONIVERKOT LUONNOLLISEN KIELEN SEMANTIIKAN MALLINNUKSESSA

Timo HONKELA

Valtion teknillinen tutkimuskeskus¹
Tietojenkäsittelytekniikan laboratorio
Lehtisaarentie 2 A
00340 Helsinki

1 JOHDANTO

Loogikot ovat kehittäneet keinotekoisia kieliä ja formalismeja pyrkien jopa korvaamaan epätäydellisen ja monitulkintaisen luonnollisen kielen eksaktimmilla versioilla. Monet ovat kuitenkin olleet valmiita lieventämään kantaansa todeten formalismien olevan teoreettinen approksimaatio luonnollisten kielten moninaisista ilmiöistä. Loogis-analyyttinen lähestymistavassa merkityksen ja kielellisten kykyjen tarkastelu on keskitetty totuuden ja viittaussuhteiden käsittelyyn. Montaguen kielioppi ollut eräs keskeisiä tutkimuksen kohteita taustana mm. Fregen, Tarskin ja Carnapin tuottamat käsitteet ja menetelmät. Merkitys nähdään täysin objektiivisena: lauseet ovat tosia tai epätosia riippumatta kenestäkään tai mistään tulkitsijasta. Kirjoituksessa tarkastellaan tämän symbolistiseksi nimitettävän tradition perustaa ja sitä kohtaan esitettyä kritiikkiä. Vaihtoehtoisena lähestymistapana tarkastellaan erityisesti ns. konnektionistista lähestymistapaa eli keinotekoisien neuroniverkkojen käyttöä.

¹Nykyisin: Teknillinen korkeakoulu, Informaatiotekniikan laboratorio, timo.honkela@hut.fi

2 SYMBOLISTINEN TRADITIO JA SEN KRITIIKKI

Ensimmäisen kertaluvun predikaattilogiikassa käytetään predikaatteja ja niiden argumentteina vakio- tai muuttujatermejä, lauseita yhdistellään konnektiiveillä ja muuttujien vaikutusala määritellään kvanttoreilla. Lauseilla on totuusarvonsa - tosi tai epätosi. Mallintamisen kohteena oleva todellisuus koostuu joukosta olioita ja niiden välisiä suhteita.

Symbolistiseen lähestymistapaan perustuvien tutkimusten ja tulosten - luonnollisen kielen semantiikan formaalien kuvausten ja symbolimanipulaatioon perustuvien tekoälyjärjestelmien - määrä ja kirjo on niin suuri, ettei niiden luettelointiin ja parhaiden tulosten luonnehdintaan pyritä tässä yhteydessä. Lisäksi ko. tulokset ovat usein yleisesti tunnettuja ja niitä on esitelty lukuisissa lähteissä. Jatkossa keskitytäänkin symbolistisen tradition ongelmakohtiin, ilmiöihin, joiden mallintamisessa saavutetut tulokset ovat olleet vähäisiä tai ne ovat "loistaneet poissaololaan".

Loogis-analyyttistä kielifilosofiaa ja symbolimanipulaatioon perustuvia kieltä tulkitsevia järjestelmiä voidaan kriittisesti arvioida tarkastellen toisaalta luonnollisen kielen ominaisuuksia ja toisaalta ontologisia perusteita, kuvaa todellisuudesta.

2.1 LUONNOLLISEN KIELEN OMINAISUUDET

Esimerkkeinä symbolistiselle lähestymistavalla vaikeasti tavoitettavista kielen ja sen tulkinnan osa-alueista tarkastellaan monitulkintaisuuksia, merkitysvivahteita ja kielen tulkinnan yhteysriippuvuutta.

2.1.1 Monitulkintaisuudet

Hakulinen (1978) on kirjoittanut seuraavasti monitulkintaisuuksista. "Jos joutuu keskustelemaan maallikkojen kanssa - tarkoitan tässä ns. lukeneistoonkin kuuluvia ei-lingvistejä - jonkin sanan monimerkityksisyydestä, havaitsee heidän tavallisesti pitävän sitä kielen heikkoutena ... polysemia on jokaisen luonnollisen kielen sanaston välttämätön ja sen tarkoituksenmukaisuutta suunnattomasti lisäävä, tekisi mieli sanoa nerokas ominaisuus. Ilman polysemiaa, siis jos jokaisella käsitteellä, mielteellä, merkitysvivahteella, ajatuksen ailahduksella täytyisi olla äänteellisestikin eriytynyt oma ilmaisimensa, kielen oppiminen olisi käytännössä ylivoimainen tehtävä ... ainoastaan polysemian olemassaolo tekee mahdolliseksi kielelle ominaisen herkän joustavan mukautumisen ihmisen sekä ajattelu- ja tiedotusvälineen että hänen henkisten saavutustensa säilyttäjän tehtäviin."

Monitulkintaisuudet ovat luonnollisen kielen itsestäänselvä ominaisuus ja ilmiö esiintyy kielen eri tasoilla: sanastossa sekä morfologian, syntaksin ja semantiikan tasolla. Meille ihmisille monitulkintaisuuksien karsinta on usein niin miellyttävän itsestäänselvä prosessi, että väärät tulkinnat jäävät helposti havaitsematta. Kehitettäessä järjestelmiä, jotka automaattisesti analysoivat kielellisiä ilmaisuja, monitulkintaisuudet tuottavat huomattaviakin vaikeuksia. Täytyy päätellä, onko tekstissä esiintyvä 'laki' "kirjasta vai vaarasta", ja onko 'hauista' muotoutunut sanasta 'hauki', 'haku' vai 'hauis'. Mikä onkaan lauseen rakenne ilmaisuissa "tapasin talon omistajan sillalla"(vrt. "kävelin talon omistajan pellolla") ?

2.1.2 Merkitysvivahteet

Kielen merkitysvivahteet tulevat korostetusti esiin käännettäessä tekstiä kieleltä toiselle. Vaikka monia ilmaisuja voidaan kääntää syntaktisin perustein, tasokas kääntäminen edellyttää merkityksien syvällistäkin ymmärtämistä. Lisäksi havaitaan, että sanojen merkitykset siirtyilevät joko sanakirjamerkitysten lähialueella tai esimerkiksi vertauskuvallisissa ilmaisuissa kauaksikin

alkuperäisestä.

Pitkäaikaisena prosessina yleisesti esiintyvä merkitysten abstrahoituminen voi esiintyä myös yksittäisessä ilmaisussa. Sanomalehtiteksti on kyseisten ilmiöiden rikas esimerkkilähde: "hallitus tekee kriisipaketteja", "hän pulppusi ideoita", "säästösuunnitelma kaatuu", "alkavatko pakotteet purra", jne. Vivahteikkaan kielen automaattinen tulkinta on vaikea haaste.

2.1.3 Yhteysriippuvuus

Monien adjektiivien tulkinta riippuu selvästikin siitä, mitä ne määrittävät. Adjektiivia 'suuri' ei voida tulkita itsenäisesti siten, että tulkittaisiin sen ekstensioksi kaikkien suurten olioiden joukko; verrattakoon keskenään ilmaisuja 'suuri maalaiskunta' ja 'suuri kaupunki'. Tulkittaessa sanaa 'suuri' ei voida määrittellä sen merkitystä ennenkuin on todettu, mitä se määrittää. Näin on, jos oletetaan, ettei tietokannassa ole erikseen luokiteltu valmiiksi kuntia. Suuruusilmausujen tulkintaa varten joudutaan määrittelemään kaikki kombinaatiot, jotka syntyvät yhdistettäessä käytetyt adjektiivit ja oliot, joita ne määrittävät. Jos tarkasteltavien adjektiivien määrä on 10 ja substantiivien määrä 100, niin tietämystä tarvitaan 1000 yhdistelmän tulkitsemiseen. Määrä kasvaa kohdealueen laajentuessa ja tulkittavien adjektiivien lisääntyessä. Lisäksi adjektiiveilla voi olla omia määreitään kuten 'erittäin', 'melko', 'suomalaisittain' jne.

2.2 KUVA TODELLISUUDESTA

Symbolistisen tradition todellisuus koostuu olioista ja niiden välisistä suhteista. Kyseenalais-tamatta objektiivisen todellisuuden olemassaoloa voimme todeta mainitun näkökulman olevan kovin kapea-alainen. Todellisuus on täynnä jatkumoa, monimutkaisia prosesseja, epälineaarisia ilmiöitä. Todellisuuden rakenteet ja rajapinnat ovat usein epämääräisiä ja fraktaaliluonteisia.

2.2.1 Todellisuuden havainnointi

Monissa teoretisoinneissa käsitteen määrittely perustuu piirteiden tai ominaisuuksien kombinointiin. Koira voitaisiin tässä leikillisen esimerkinomaisesti määrittellä nisäkkääksi, jolla on häntä ja joka haukkuu. On väitelty siitä, mitkä ovat käsitteiden muodostamisen primitiivit, minkäläisiä logiikan elementtejä tarvitaan. On vahvasti todettu, etteivät pelkät konjunktiiviset määritelmät riitä käsitteiden määrittelyssä. Ehkä harvoin kysytään määrittelyprimitiivien etsimisen mielekkyyttä. Mitä tapahtuu, kun lapsi oppii ymmärtämään sanan 'koira'? Lapsi ei tarvitse etukäteen annettuja primitiivejä - nisäkkyyttä, häntää yms. - oppiessaan tunnistamaan.

Monissa tapauksissa - varsinkin konkreettisen todellisuuden kyseessäollessa - on mielekästä muodostaa esim. malliteoreettinen malli, joka sisältää objektiivisesti olemassaoleviksi luonnehdittavia olioita ja niiden välisiä suhteita. Ei ole tarkoituksenmukaista väittää, että koiralla ei olisi häntää tai etteikö koira olisi nisäkäs. Mutta: oliomallilla tai formaalilla kielellä ei voi tavoittaa kaikkea, mitä haluamme sanoa todellisuudesta. Äärellinen joukko lauseita on vain approksimaatio asioiden tilasta. Miltei mihin tahansa yleiseen sääntöön on löydettävissä rajaton määrä poikkeuksia ja tarkennuksia. Rakennettavat mallit ovat suhteellisia, riippuvat havainnoijasta ja yhteisöjen jäsenten välisistä "sopimuksista".

Varsinkin abstraktit käsitteet ovat monesti hyvinkin subjektiivisia ja olioita ja niiden välisiä suhteita kuvaavan kiinteän mallin rakentaminen on hyvinkin mielivaltaisen tehtävä. Malliteoreettisesti lauseen 'John loves Mary' semantiikkaa tarkasteltaessa käytettäisiin predikaattia 'love'. Objektiivista vastinetta ko. predikaatille todellisuudesta ei löydy, ei ole kyseisennimistä "lankaa", joka yhdistäisi joitakuuta keskenään. Abstraktit käsitteet ovat "katsojan silmissä tai kokijan sydämessä" subjektiivisina ja tilanneriippuvina. Tässä yhteydessä totuusarvosemantiikan mielekkyys on kyseenalainen.

2.2.2 Samankaltaisuus versus samuus

Looginen samuuden käsite aiheuttaa mallintamisessa paradokseja, joita mm. Pylkkö (1989) on luonnehtinut. Onko joku tietty ihminen enää sama ihminen kuin aiemmin sen jälkeen, kun hän on saanut uuden nimen, kun häneltä on leikattu kasvain tai kun hänet on valittu presidentiksi? Voidaankin todeta, että monesti samuus on suhteellinen, sopimuksenvarainen käsite.

Eräs mahdollisuus tarkastella mielekkäästi elävien olentojen identiteettiä - yksilöllistä samuutta ajassa - on tarkastella niitä ns. autopoieettisina järjestelminä (ks. Maturana ja Varela 1980). Maturana ja Varela luonnehtivat autopoieettisia järjestelmiä mm. seuraavasti: "Autopoietic organization simply means processes interlaced in the specific form of a network that produced them constitute it as a unity. It is for this reason that we can say that every time that this organization is actually realized as a concrete system in a given space, the domain of the deformations which this system can withstand without loss of identity while maintaining constant its organization, is the domain of changes in which it exists as a unity."

3 KONNEKTIONISTISET MALLIT: HIENOVARAISET YHTEYDET JA OPPIMINEN

Konnektionististen mallien kehittämisen lähtökohtana on ollut tieto ihmisen hermojärjestelmän ominaisuuksista. Kehitetyt tietokonemallit koostuvat joukosta elementtejä, formaaleja neuroneita, joilla on kullakin oma aktivaatiotasonsa. Elementtien välillä on liitoksia - yhteyksiä, joiden kautta aktiiviset elementit voivat aktivoida tai deaktivoida toisia elementtejä. Kullakin liitoksella on oma yksilöllinen voimakkuutensa, joka määrittää, kuinka paljon elementti vaikuttaa toiseen. Muodostuva verkko on dynaaminen järjestelmä, jolle annettu syöte saa aikaan aktivaation leviämisen. Verkkorakenteen ja aktivaatioperiaatteen lisäksi kolmas tärkeä piirre on oppimisperiaate eli se, kuinka elementtien välisten liitosten voimakkuus muuttuu. (mallien yksityiskohdista ks.

esim. Hecht-Nielsen 1990, Kohonen 1988, Rumelhart ja McClelland 1986)

3.1 NEURONIVERKKOMALLIEN OMINAISUUKSISTA

Neuroniverkkomallien eräs keskeisimmistä ominaisuuksista on se, että niitä ei ohjelmoida tai niihin ei kirjoiteta tietämystä sääntöinä tms. kuvauksina vaan ne organisoituvat annetun datan (esimerkitapausten tms.) perusteella itsenäisesti määriteltyä oppimismenetelmää hyväksikäyttäen.

Verkon sisältämä tietämys ei ole eksplisiittisessä symbolisessa tai sääntömuodossa. Puhutaan alisymbolisesta tasosta: verkon elementtien välisten liitosten voimakkuus vaikuttaa lopputulokseen tavalla, jota voi olla hyvinkin vaikea ennakoida. On jopa rinnastettu neuroniverkkopäätelyä inhimilliseen intuitiiviseen päätelyyn. Ainakin kyseessä on mielenkiintoinen ja luonteva vaihtoehto ajatukselle, jonka mukaan ihmisen intuitiivinen ajattelu olisi tiedostamatonta loogista päätelyä.

On korostettava neuroniverkkomallien kykyä tehdä yleistyksiä annetuista esimerkeistä. Vertaaminen symboliseen induktiiviseen päätelyyn on monitahoinen kysymys. Kuitenkin on todettava, että neuroniverkko pystyy parhaimmillaan ylläpitämään sekä yksittäistapauksien kuvauksia että eri tasoisia yleistyksiä samanaikaisesti.

Neuroniverkkoja käytetään tyypillisesti erilaisissa hahmontunnistustehtävissä: puheentunnistuksessa tai tulkittaessa kuvia. Yleisemmin niiden käyttö on perusteltua, kun käsiteltävä tieto on stokastista ja se sisältää korkeammanasteisia riippuvuussuhteita.

On syytä korostaa, että termillä neuroniverkko viitataan joukkoon melko erilaisiakin malleja, joilla kullakin on omanlaisensa verkkorakenne, aktivaatioperiaate ja oppimisperiaate. Eräs keskeinen luokitteluperuste mallien välillä on se, onko oppiminen ohjattua vai vapaata. Ohjatussa lähestymistavassa määritellään opettamisvaiheessa sekä syöte että toivottu tulos. Vapaat oppimismenetelmät muodostavat kuvauksen syötteen ominaisuuksista ilman määriteltyjä tu-

loksiakin. Esimerkiksi Kohosen itseorganisoituva kartta kuuluu jälkimmäiseen kategoriaan (ks. Hecht-Nielsen 1990, Kohonen 1988). Hyvin laajalti käytössä oleva 'backpropagation' -menetelmä puolestaan edellyttää esimerkkien olevan syöte-tulos -pareja (ks. Rumelhart ja McClelland 1986, Hecht-Nielsen 1990).

3.2 NEURONIVERKKOJEN KÄYTTÖ KIELEN MALLINTAMISESSA

Konnektionisten mallien merkitystä ja mahdollisuuksia voidaan toistaiseksi arvioida alustavasti. Joidenkin luonnollisen kielen ominaisuuksien mallintamiseen neuroniverkoilla on jo saatu lupaavia tuloksia. Kielen oppiminen, merkityksen tulkinnan yhteysherkyys ja tulkinnan subjektiivisuus ovat aiheita, joiden suhteen konnektionististen mallien hyväksikäyttö on osoittautunut erityisen perustelluksi. Esimerkkeinä tarkastellaan lyhyesti kolmea tutkimusta, joissa neuroniverkoilla on mallinnettu luonnollisen kielen semantiikkaa ja sen tulkintaprosessia: aiheina semanttisten sijojen määrittäminen, merkityssuhteiden oppiminen ja sumeiden ilmaisujen tulkinta.

3.2.1 Sijakieliopin mukaisen jäsentämisen oppiminen

Sijakieliopin taustalla on ajatus siitä, että pelkät syntaktiset kategoriat eivät riitä lauseiden rakenteen kuvaamiseen. McClelland ja Kawamoto (1986) ovat kehittäneet konnektionistisen järjestelmän, joka oppii antamaan lauseille sijakieliopin mukaisia tulkintoja. Esimerkiksi lauseilla "The boy ate the pasta with the sauce" ja "The boy ate the pasta with the fork" on erilainen sijakieliopillinen tulkinta, vaikka niiden syntaktinen rakenne onkin sama. Tutkimuksessa on määriteltä joukko semanttisia piirteitä, joiden avulla sanasto luokitellaan. Kullekin piirteelle on määriteltä joukko mahdollisia arvoja. Opettamisvaiheessa neuroniverkolle esitettiin joukko valmiiksi luokiteltuja lauseita. Käyttövaiheessa järjestelmä pystyi jäsentämään yksinkertaisia lauseita noin 99 prosentin tarkkuudella.

3.2.2 Leksikaalisten suhteiden muodostaminen

Ritter ja Kohonen (1989) ovat tutkimuksessaan tuottaneet ns. itseorganisoituvia semanttisia karttoja. Yksittäiset symbolit (esim. luonnollisen kielen sanat tai logiikan predikaatit) eivät itsessään sisällä mitään tietoa siitä, mikä on niiden keskinäinen suhde. Tarvitaan jotain lisäinformaatiota symbolien välisten suhteiden määrittämiseen. Verkon oppimisvaiheessa voidaan esittää symbolit asianmukaisessa kontekstissa, esimerkiksi joidenkin todellisuutta kuvaavien piirrearvojen yhteydessä. Kohonen ja Ritter antoivat itseorganisoituvalle verkolle esimerkkeinä joukon vektoreita, joissa määriteltiin kutakin symbolia vastaavat piirrearvot. Tutkimuksessa käytettiin 16 eläimen nimeä ja niille määriteltiin koko (karkeasti kolmeen luokkaan jaotellen), rakenteen pääpiirteet (jalkojen määrä yms.) ja joitakin toiminnallisia ominaisuuksia (lentokyky yms.). Oppimisvaiheen tuloksena saatu "kartta"(10x10-neuronimatriisi) organisoitui tavalla, joka kuvaa topologiassaan esimerkeissä käytettyjen eläinten keskinäisiä "sukulaisuussuhteita". Lisäksi voitiin todeta, että yleisemmät käsitteet (kuten lintu) rajautuivat omalle alueelleen, joka kattaa alakäsitteensä.

Minkälaista tietoa sanojen välisistä merkityssuhteista saadaan selville pelkästään käymällä läpi esimerkkilauseita ilman mitään kuvausta todellisuudesta? Hyvin paljon on tutkittu kielen syntaksia ja kehitetty lauseenjäsentimiä. On kuitenkin todettava, että syntaktisten säännönmukaisuuksien lisäksi "sanojen yhdessäesiintymiseen" vaikuttavat semanttiset perusteet. Tarkastellaamme vaikkapa muutamaa yksikön nominatiivissa olevaa substantiivina: 'talo', 'kissa', 'poika' ja 'tyttö', sekä muutamaa verbiä, jotka ovat yksikön 3. persoonamuodossa: 'kaatui', 'syö', 'puhuu'. Syntaktisin perustein kaikki näiden väliset kombinaatiot ovat mahdollisia lausefragmentteja, myös esimerkiksi 'talo syö' tai 'kissa puhuu'. Kuitenkin todelliset luonnollisen kielen ilmaukset sisältävät useimmiten esimerkiksi pareja 'talo kaatui', 'poika kaatui', 'kissa syö', 'tyttö syö', 'poika puhuu' tai 'tyttö puhuu'.

Kohonen ja Ritter käyttivät hyväkseen sanojen yhdessäesiintymisen ja merkityssuhteiden

välistä yhteyttä antaen itseorganisoituvalle järjestelmälle esimerkkeinä joukon sana-konteksti - pareja. Järjestelmä tuotti oppimisvaiheessaan kuvauksen - "kartan", joka mielekkäällä tavalla kuvaa sanojen välisiä merkityssuhteita. Topologisesti kartalla toisiaan lähempänä olevien sanojen postuloidaan olevan merkitykseltään läheisempiä kuin kauempana toisistaan olevat sanat. Esimerkiksi sanat 'Mary' ja 'Jim' ovat lähempänä toisiaan kuin sanaa 'horse' tai 'eats'. Vastaa- vasti parien 'runs' - 'walks', 'likes' - 'hates' ja 'water' - 'beer' jäsenet ovat kartalla lähekkäin.

3.2.3 Sumeiden ilmaisujen tulkinta

Monien sanojen merkityksen tarkkarajainen kuvaaminen on vaikeaa tai mahdotonta, esimerkkinä kokoa kuvaavat adjektiivit. Sanan 'suuri' tulkintana ei voida malliteoreettisesti osoittaa oliota, jotka ovat suuria ja toisia, jotka eivät ole. Tulkinta on sumearajainen, riippuu useasta parametrasta ja on altis subjektiivisille vaihteluille.

Honkela ja Vepsäläinen (1991) pyrkivät mallintamaan sumeiden ilmaisujen tulkintaa käyttäen hyväksi Kohosen itseorganisoituvia karttoja ja assosiatiivista muistia. Koehenkilöiden annettiin luonnehtia haluamallaan adjektiivilla heille esitettyjen suorakulmioiden kokoa. Näin saatiin joukko kokoadjektiivileveys-korkeus-kolmikkoja, jotka esitettiin järjestelmälle oppimisvaiheessa. Tuloksena saatiin kartta, joka kuvaa adjektiivien välisiä suhteita. Esimerkiksi sanat 'huge' ja 'tiny' sijoittuivat kartan vastakkaisiin nurkkiin kuten myös sanat 'flat' ja 'high'.

Ns. assosiatiivisella muistilla voidaan mallintaa merkityksen yhteysriippuvuutta ja sanojen tulkinnan subjektiivisia eroja. Honkela ja Vepsäläinen (1991) tekivät kaksi yksinkertaista koetta, joista toisessa järjestelmä oppi tulkitsemaan sanoja 'some' tai 'many' sen mukaan, minkä sanan yhteydessä ne esiintyivät. Esimerkiksi 'many people' viittaa usein suurempaan määrään ihmisiä kuin 'many friends'. Toisessa kokeessa mallinnettiin kokoadjektiivien subjektiivista tulkintaa.

4 YHTEENVETO

Symbolisilla representaatioilla on pitkä perinne luonnollisen kielen semantiikan mallinnuksessa - loogis-analyttisen suuntauksen tuloksia ei kannata väheksyä. Koska (formaaleja, laskennallisia) menetelmällisiä vaihtoehtoja ei kuitenkaan juuri ole ollut käytettävissä, on logiikkakeskeinen näkökulma ehkä ylikorostunut ja tarkasteltavia luonnollisen kielen ilmiöitä on rajattu käytetyn menetelmän mukaisesti. Kirjoituksessa on pyritty tuomaan esille kielen ja sen tulkinnan niitä ominaisuuksia, joihin konnektionistinen mallintaminen on tähän mennessä soveltunut parhaiten. Lisäksi on esitelty joitakin kielen dynamiikkaan ja tulkinnan yhteysherkkyyteen liittyviä aiheita, joiden suhteen symbolististen mallien mahdollisuudet on arvioitava vähäisiksi ja joissa konnektionistinen mallintaminen vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta. On lopuksi todettava, että monet esitetyistä kielen ominaisuuksien luonnehdinnoista eivät sinänsä ole tuoreita, keskeistä on näiden ilmiöiden mallintamismahdollisuus - logiikkaan perustuvien menetelmien ominaisuuksia voidaan testata "paperilla", konnektionististen mallien ei juurikaan.

KIRJALLISUUTTA

Bechtel, W. ja Abrahamsen, A. *Connectionism and the Mind*. Basil Blackwell, Cambridge, Massachusetts, 1991, 349 s.

Churchland, P.M. *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989, 321 s.

Eco, U., Santambrogio, M. ja Violi, P. (toim.) *Meaning and Mental Representations*. Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1988, 237 s.

Hakulinen, L. *Kielen näkymiä*. Suomalaisen kirjallisuuden seura, 1978, 111 s.

Hecht-Nielsen, R. *Neurocomputing*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1990, 433 s.

Heinämaa, S. ja Tuomi, I. *Ajatuksia synnyttävät koneet*. Werner Söderström, Porvoo, 1989, 340 s.

Honkela, T. ja Vepsäläinen, A.M. *Interpreting Imprecise Expressions: Experiments with Kohonen's Self-Organizing Maps and Associative Memory*. Hyväksytty esitettäväksi: *International*

Conference on Artificial Neural Networks, Espoo, 24.-28.6.1991.

Jäppinen, H., Honkela, T., Lehtola, A. ja Valkonen, K. Hierarchical Multilevel Processing Model for Natural Language Database Interface. Proceedings of the 4th Conference on Artificial Intelligence Applications, San Diego, California, 1988, ss. 332-337.

Karlsson, F.: Kieli ja kognitio. teoksessa Hautamäki, A. (toim.): Kognitiotiede, Gaudeamus, 1988.

Kempson, R.M. (toim.) Mental Representations: The Interface between Language and Reality. Cambridge University Press, Cambridge, Englanti, 229 s.

Kohonen, T. An introduction to neural computing. Käsikirjoitus, julkaisuun Neural Networks, vol. 1, no. 1, 1988.

Maturana, H.R. ja Varela, F.J. Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1980, 141 s.

McCawley, J.D. Everything that Linguists have always Wanted to Know about Logic. Basil Blackwell, Oxford,

McClelland, J.L. ja Kawamoto, A.H. Mechanisms of Sentence Processing: Assigning Roles to Constituents. teoksessa McClelland, J.D. ja Rumelhart, D.E. (toim.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 2: Psychological and Biological Models. MIT Press, 1986, ss. 272-325.

Pylkkö, P. Naming, Individuation and Cognition: Pattern Semantics for Natural Language. Käsikirjoitus, Helsinki, 1989, 42 s.

Ritter, H. ja Kohonen, T. Self-Organizing Semantic Maps. Biological Cybernetics, 61, 1989, ss. 241-254.

Rumelhart, D.E. ja McClelland, J.L. (toim.) Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 1: Foundations. MIT Press, 1986, 547 s.