Tietokone tallentajasta tulkitsijaksi: Representaatio tietojenkäsittelytieteessä

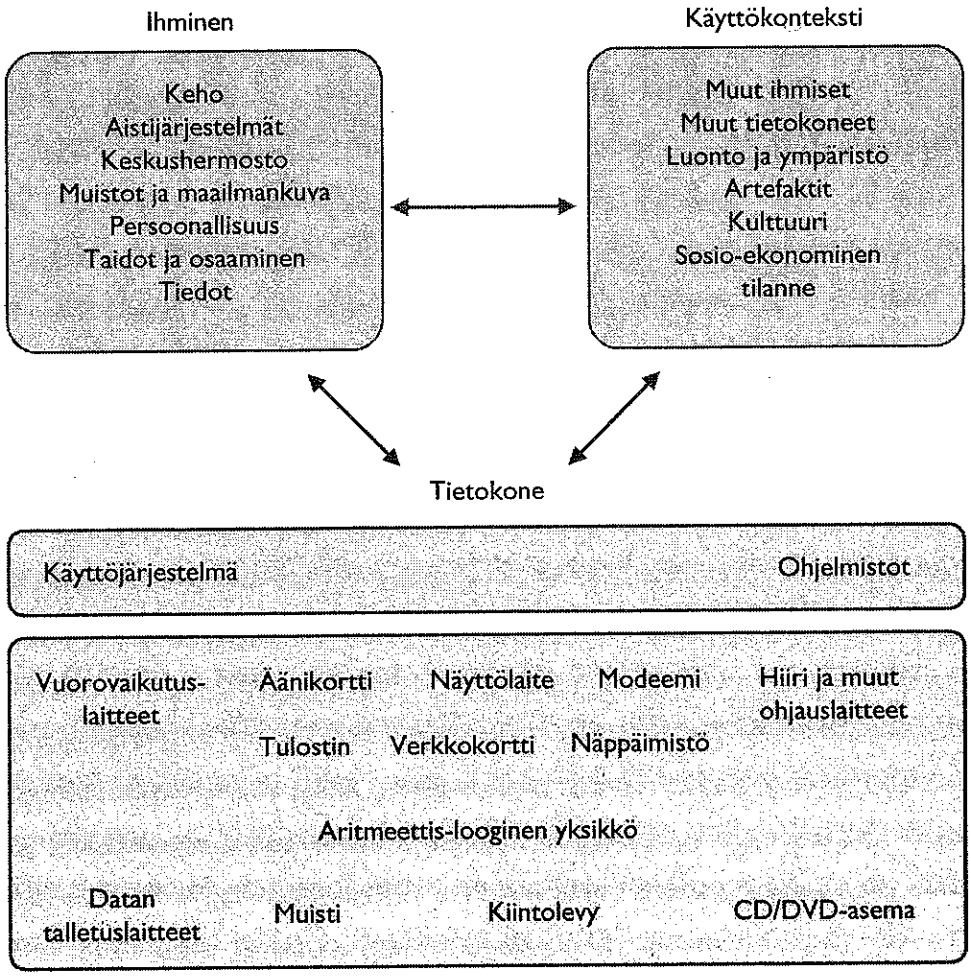
Timo Honkela

Tietokoneita käytetään erilaisten ilmiöiden ja asioiden käsittelyssä ja esittämisessä. Tietotekniset ratkaisut ovat yleensä ihmisen kehittämiä, ja niiden sisältämät representaatiot ovat ihmisen tuottamia ja tulkitsemia. Tietokone ei siis tuota tai käsittele representaatioita eikä ymmärrä niitä ihmisen tavoin. Tarkastellaan esimerkkinä tietojärjestelmää, joka on ohjelmoitu esittämään kysymys "Onko tämä talo?". Samalla ruudulla on esillä valokuva maisemasta, jonka keskellä on talo. Tietokoneella ei tällaisessa tapauksessa ole mitään omaa tietoa siitä, että sana "talo" ja talon kuva liittyvät toisiinsa. Representoimisen näkökulmasta tietokone vastaa tässä tapauksessa kynää ja paperia.

Mitä erilaisimmat asiat voivat representoida eli edustaa, esittää tai kuvata jotakin muuta. Se, mikä edustaa, ei välttämättä muistuta ollenkaan sitä, mitä edustetaan. Esimerkiksi puhuttu tai kirjoitettu sana "talo" ei muistuta fyysistä taloa. Tarvitaan siis joku tai jokin, joka yhdistää nämä kaksi toisiinsa. Tietojärjestelmissä yhdistäjänä on melkein poikkeuksetta alun perin ihminen. Suomen kieltä taitava ihminen osaa yhdistää sanan "talo" näkemäänsä. Onkin hieman kyseenalaista käyttää sanaa "tieto" tavanomaisista tietojärjestelmistä puhuttaessa, koska järjestelmä ei tiedä, millaisia suhteita representaatioilla on toisiin representaatioihin ja muuhun todellisuuteen. Sana "talo" on Charles S. Peircen semiotiikassa symboli eli konventionaalinen merkki, jonka viittaus kohteeseensa perustuu sopimukseen (Peirce 2001). Tietokoneen ruudulla näkyvä kuva on puolestaan ikoni, joka muistuttaa kohdettaan.

Tietojenkäsittelytieteessä representaation käsite tulee esille monella eri tavalla ja tasolla. Nykyaikainen digitaalinen tietojenkäsittely perustuu binääristen eli

kaksiarvoisten representaatioiden käsittelyyn. Tietokoneessa ja sen oheislaitteissa jo nämä peruselementit, ykköset ja nollat, representoidaan monin eri tavoin. Esimerkiksi nauhatalletuksessa ykköset ja nollat tallennetaan kahtena erilaisena magneettisena polarisaationa. Yksittäisten bittien tasolla (eli ykkösen ja nollan välillä) tehtyjen valintojen sekä tietojärjestelmän monimuotoisten käyttötapojen suhde on monimutkainen. Sen kokonaisvaltainen käsittely sisältää kysymyksiä monilta tieteenaloilta (ks. kuvio 1).



Kuvio 1. Tietokone, sen käyttäjä ja käyttökonteksti.

Artikkeli jakaantuu kolmeen osaan. Ensimmäiseksi tarkastelen perinteisten tietoteknisten järjestelmien tyypillisiä ominaisuuksia representoijina. Käyn läpi tietotekniikan kehityskulun tiedon esittämisestä ykkösinä ja nollina monimutkaisten, loogiseen päättelyyn kykenevien tietojärjestelmien rakentamiseen. Huolimatta monimutkaisuudestaan ja loogisen päättelyn kyvystään perinteiset tietojärjestelmät eivät pysty luomaan ja tulkitsemaan representaatioita itsenäisesti. Toiseksi tarkastelenkin menetelmiä, joilla voidaan kehittää representoimista oppivia järjestelmiä ilman, että representaatiosuhteita annettaisiin tai ohjelmoitaisiin niille valmiiksi. Kolmanneksi tarkastelen mahdollisuutta, että tietokoneiden käyttöön perustuvalle järjestelmälle voitaisiin kehittää semioottista kyvykkyyttä.

Ohjelmointi ja tietojärjestelmien kehittäminen representoimisena

Tietokoneohjelma on joukko ilmaisuja ja ohjeita, jotka toteutetaan tietokoneella tietyn tuloksen aikaansaamiseksi. Seuraavassa kuvaan lyhyesti noin 60 vuoden kehityskulkua, jonka aikana tietokoneen ohjelmointi on muuttunut laiteläheisestä työskentelystä yhä selvemmin sovellus- ja ongelmasuuntautuneeksi toiminnaksi. Keskityn aiheisiin, jotka liittyvät representoimiseen (yleisempi tietotekniikan kuvaus on esim. Kasvi 2000).

Ensimmäinen ja toinen sukupolvi: lähellä ykkösiä ja nollia

Tietokoneiden käytön alkuaikoina ohjelmat esitettiin suoraan ykkösinä ja nollina. Tällaista ensimmäisen sukupolven ohjelmointikieltä kutsutaan binäärikieleksi. Jotta ohjelmointi ei olisi ollut niin työlästä, toisen sukupolven ohjelmointikieliksi kehitettiin niin sanottuja konekieliä (*assembler*), joissa tietokoneen perusosien väliset operaatiot esitetään lyhyinä komentoina (kuvio 2). Komennot määrittelevät, miten tietoa siirretään tietokoneen keskusyksikön osien välillä ja millaisia laskentaoperaatioita tietoihin sovelletaan. Pääpaino on numeerisilla tietojenkäsittelyoperaatiolla.

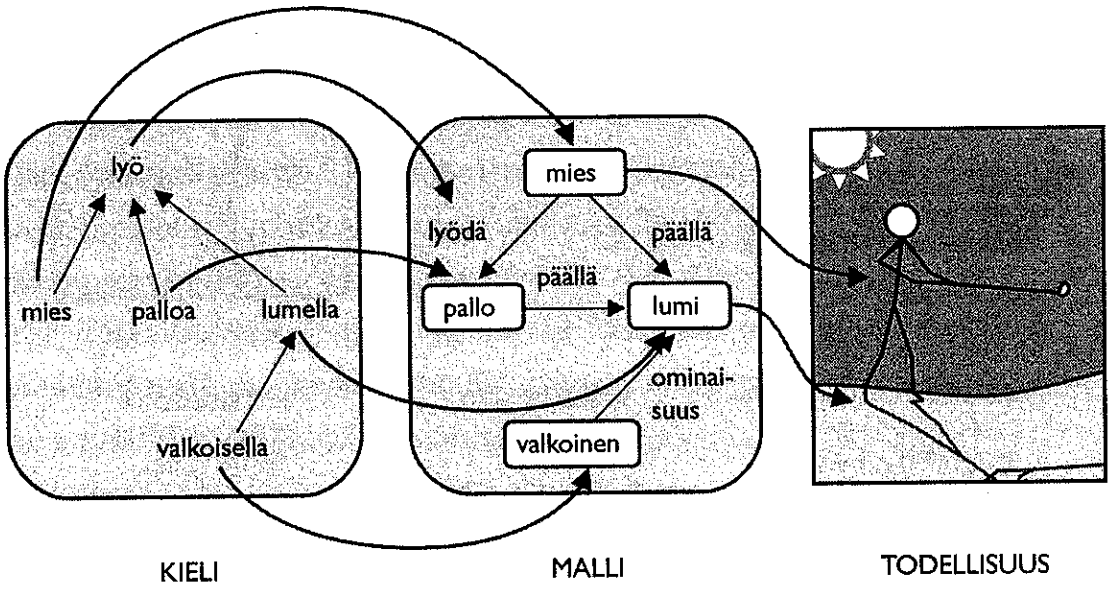
olla muun muassa eri suuntaiset viiva- tai reunahahmot kuvissa. Yksinkertaistettu esimerkki tästä on se, että kuva rakennettaisiin suuresta joukosta I-kirjaimia, tavuviivoja, kauttaviivoja ja kenoviivoja. Neuroverkkoja pitkään tutkineen akateemikko Teuvo Kohosen (2001) kehittämä ASSOM-menetelmä (*Adaptive Subspace Self-Organizing Map*) selittää, kuinka muuntuneetkin hahmot voidaan tunnistaa kuvista.

Kohti koneiden semioottista kyvykkyyttä

Viidennen sukupolven ohjelmointimenetelmiä eli symbolilaskentaa on monesti pidetty ohjelmoinnin kehityksen päätepisteenä. Filosofiassa vastaavanlaista ajattelutapaa edustaa loogis-analyyttinen koulukunta, jossa esimerkiksi korostetaan käsitteiden tarkkaa määrittelemistä ja häivytetään subjektin osuus tietoteoriassa. Kuviossa 12 havainnollistetaan perinteiselle tekoälylle ja loogis-analyyttiselle koulukunnalle ominaista tapaa suhteuttaa todellisuus, kieli ja käsitteet toisiinsa. Filosofiassa Ludwig Wittgensteinin varhainen ajattelu on tyypillinen esimerkki tällaisesta näkökulmasta (Wittgenstein 1984). Kognitiotieteessä on puolestaan tunnettu Jerry A. Fodorin ajattelun kieli -hypoteesi, jonka mukaan mielen toiminta voidaan esittää eräänlaisena loogisena kielenä (Fodor 1975; ajattelun kielestä ks. myös Rusanen ja Appelqvist tässä teoksessa). Fodor sekä kielitieteilijä Noam Chomsky (1997) ja psykologi Steven Pinker (1994) ovat lisäksi puolustaneet näkemystä siitä, että inhimillinen kyky käyttää kieltä on pitkälti synnynnäinen ja sen perusta on aivoissa sijaitseva kielenkäsittelyyn erikoistunut moduli. Suomessa tällaista näkemystä on puolustanut ehkä näkyvimmin kognitiotieteilijä Pauli Brattico (2006). Tämän koulukunnan ajattelussa on kuitenkin monenlaisia ongelmia, sillä pyrittäessä teorianmuodostuksen eheyteen monet empiiriset havainnot ohitetaan. Fodorilaisessa tutkimuksessa esimerkiksi korostetaan kielen käytön komposionaalisuutta (ks. myös Rusanen tässä teoksessa). Kompositionaalisuus tarkoittaa sitä, että perusosia systemaattisesti yhdistelemällä luodaan uusia monimutkaisia rakenteita ("kissa", "valkoinen kissa", "naukuva valkoinen kissa", "poika näki naukuvan valkoisen kissan", "pieni poika näki naukuvan valkoisen kissan"). Tämän ajatuksen mukaan tarvitaan siis rajattu määrä perusosia ja rajattu määrä sääntöjä, joiden avulla selitetään kielen keskeiset ominaisuudet. Luonnollinen kieli on kuitenkin kompositionaalista vain osittain. Pinnallisesti tarkasteltuna sanalla "punainen" on tietty

merkitys ja sanoilla "paita", "paloauto" ja "pyyhe" on omat merkityksensä. Nämä merkitykset eivät muutu, kun muodostetaan ilmaisut "punainen paita", "punainen paloauto" ja "punainen pyyhe". Näissä esimerkeissä kompositionaalisuus voikin toimia, mutta vastaesimerkeiksi voidaan ottaa ilmaisut "punainen iho", "punainen vaate" tai "punainen risti". Niissä ilmaisun merkitys ei ole yksinkertaisesti johdettavissa osien merkityksestä. Esimerkissä "punainen iho" sanan "punainen" merkitys muuttuu asiayhteyden myötä. Sanontaa "punainen vaate" käytetään usein vertauskuvallisesti. Ilmausta "punainen risti" ei useinkaan käytetä kuvaamaan ristiä, joka on punainen, vaan se on idiomi, jolla viitataan kansainväliseen organisaatioon.

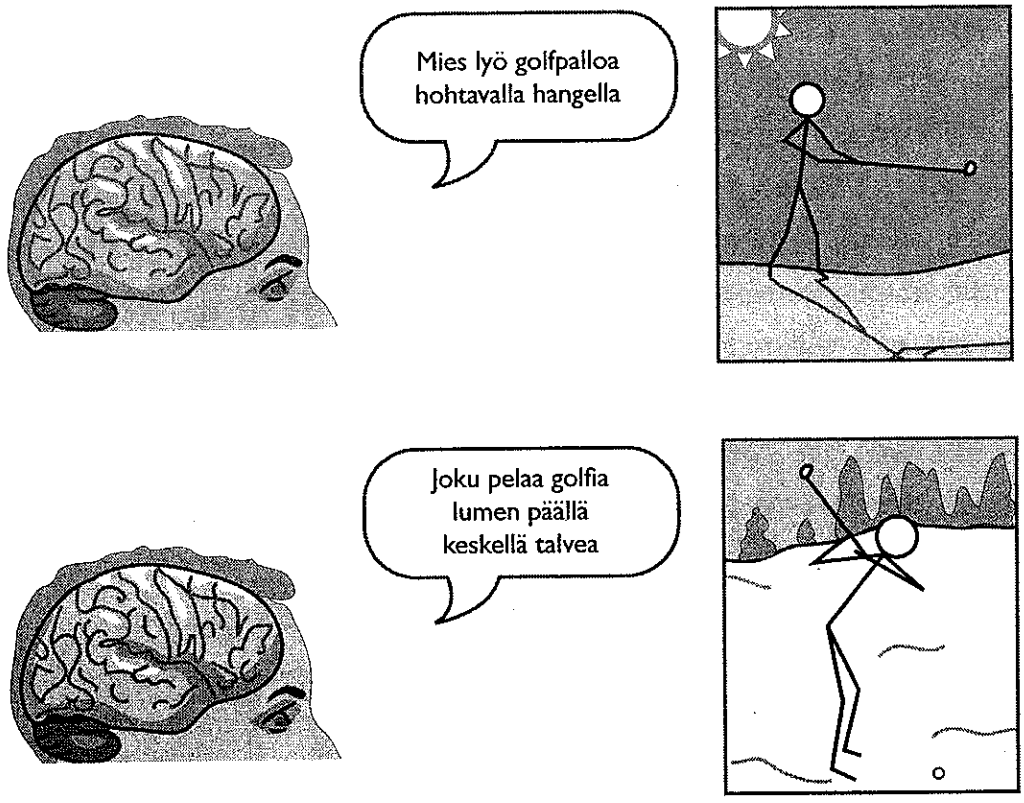
Kielen oppiminen ja tulkinta on yleisesti hyvin monimutkainen dynaaminen prosessi, jossa säännön seuraaminen, poikkeukset ja kontekstuaalisuus limittyvät toisiinsa. Pahimmillaan kielen tulkinnan formaalissa teoretisoinnissa on jätetty syrjään monitulkintaisuus. Se on kuitenkin kielen kielen keskeinen ja olennainen ominaisuus, jota on tarkastellut tarkemmin esimerkiksi kielitieteilijä Jarno Raukko (2002). Jos tekstissä esimerkiksi esiintyy sana "alusta", sen monitulkintaisuus täytyy ottaa huomioon ennen kuin sen merkitys voidaan määrittää kompositionaalisuuden perusteella. Sana voi esiintyä vaikkapa ilmaisuissa "monta alusta", "näin monta alusta", "näin monta alusta satamassa" ja "näin monta alusta satamassa alas taivaalta". Sanalla tai ilmaisulla voi siis olla monta erillistä merkitystä. Merkityksiä



Kuvio 12. Symbolilaskentaan perustuvan tietojenkäsittelyn tietoteoreettinen lähtökohta.

on kuitenkin myös mielekästä tarkastella jatkumona pikemminkin kuin erillisinä vaihtoehtoina (ks. esim. Gärdenfors 2000; Honkela 1997).

Tavanomaiset tietojärjestelmät tai symbolilaskentaan perustuvat tekoälyjärjestelmät eivät ole semioottisesti kyvykkäitä, jos semioottinen kyvykkyys määritellään kyvyksi käyttää merkkejä yhteisössä muodostuneiden käytäntöjen mukaisesti niin, että järjestelmä tuntee merkkien ja objektien väliset kytkökset ja osaa tarvittaessa ehdottaa uusia käytäntöjä (ks. kuvio 13). Vaaditaan monenlaisia kehitysaskeleita, jotta tietojärjestelmä voisi saada edes osittain inhimillisiä semioottisia kykyjä muistuttavan ominaisuuden. Seuraavassa tarkastelen näiden kykyjen muodostumista yksilöllisestä ja yhteisöllisestä näkökulmasta.



YKSILÖLLINEN TULKINTA MAAILMASTA JA SEN SUHTEESTA KIELEEN

KIELELLINEN ILMAISU

TODELLISUUS YKSILÖLLISESTI KOETTUNA

Kuvio 13. Semioottisesti kyvykäs ja oppiva järjestelmä suhteuttaa kokemuksia ja kieltä toisiinsa aktiivisesti ja yksilöllisesti.

Yksilöllinen näkökulma

Filosofi Michael Polanyi (1967) on todennut, että yksilöinä tiedämme enemmän kuin voimme kertoa. Tällainen hiljainen (*tacit*) tieto on tärkeää monenlaisissa inhimillisissä toiminnoissa polkupyörällä ajamisesta suuryritysten johtamiseen. Hiljaisen tiedon tai intuition mallintaminen yksityiskohtaisesti loogis-analyyttisillä välineillä on vaikeaa tai jopa mahdotonta. Niitä voidaan kuitenkin mallintaa neuroverkkojen kaltaisissa koneoppivissa järjestelmissä (ks. esim. Brunak & Lautrup 1990). Tietoa ja päättelyä mallinnetaan suurena joukkona keinotekoisten neuronien yhteyksiä sääntöjen tai muiden symbolisten representaatioiden sijaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yksittäiseen päätelmään tai luokitteluun voivat vaikuttaa jopa tuhannet eri tekijät niin, että yksittäisen tekijän vaikutus ei ole helposti selitettävissä. Ilmiö muistuttaa läheisesti empiirisen psykologian havaintoa siitä, että tiedostamaton (tässä intuitiivinen) päättely tuottaa monimutkaisissa ongelmanratkaisutilanteissa järjestään paremman tuloksen kuin niin sanottu rationaalinen päättely (Dijksterhuis ym. 2006).

Hahmontunnistustutkimuksen, koneoppimisen ja fenomenologian välillä on mielenkiintoinen yhteys. Filosofiassa fenomenologia tutkii sitä, miten todellisuus ilmenee ihmiselle hänen havaintokokemuksessaan (ks. esim. Husserl 1995). Perinteisen tekoälyn tapa mallintaa maailmaa jättää yksilön kokemuksen pois tarkastelusta (ks. kuvio 12). Tutkimalla koneoppimista ja hahmontunnistusta voidaan paremmin pureutua yksilöllisen tulkinnan mallintamiseen (ks. esim. Honkela 1995). Varsinkin vahvistusoppimisen ja ohjaamattoman oppimisen lähestymistavat korostavat oppivan järjestelmän yksilöllisyyttä. Ohjaamattomassa oppimisessa opitut rakenteet ovat riippuvaisia syötehistoriasta ja lähtötilanteesta, joka monissa oppivissa järjestelmissä on enemmän tai vähemmän satunnainen. Tällä tavalla oppiva järjestelmä tuottaa kohteena olevasta ilmiöstä itsenäisen mallin, joka on eräänlainen yksilöllinen näkökulma ilmiöön (ks. esim. Janasik, Honkela & Bruun 2009). Toisaalta itseorganisoivan kartan kaltainen ohjaamattoman oppimisen menetelmä mallintaa myös oppimisprosessin konstruktionistista puolta eli sitä, kuinka aiemmin opittu vaikuttaa oppimiseen (ks. esim. Honkela ym. 2000). Fenomenologiassa yksi keskeinen käsite on havainnon suuntautuneisuus. Hahmontunnistustutkimuksessa on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota suuntautuneen havainnoinnin mallintamiseen. Kehitteillä olevan järjestelmän tarkoituksena voi olla ratkaista ongelma, jonka näkökulmasta jotkin havainnot ovat oleellisempia kuin toiset. Esimerkiksi robotilla tämä suuntautuneisuus voi merkitä kameran tai

muun sensorin kääntämistä suunnasta toiseen. Käytäessä läpi suuria data-aineistoja järjestelmä voi keskittyä oppimaan asioita tietystä osasta aineistoa. Jos kohteena on esimerkiksi sähköpostiaineisto, järjestelmä voi tunnistaa roskapostin ja keskittyä mallintamaan muiden viestien sisältöjä.

Perinteisen tekoälyn suurimpia ongelmia on se, että symbolit tavallaan roikkuvat ilmassa. Jos tekoälyjärjestelmää haluttaisiin tarkastella itsenäisenä yksilönä, ongelmana olisi, että sen käyttämillä representaatioilla ei ole kytköksiä havaintokokemukseen. Kognitiotieteilijä Stevan Harnad on osoittanut tämän *symbol grounding* -ongelman tärkeyden (Harnad 1990). Tähän ongelmaan viittaa myös Searle kiinalaisen huoneen ajatuskokeellaan. Hahmontunnistusmenetelmillä voidaan rakentaa järjestelmiä, jotka juurruttavat symbolit hahmomuotoiseen havaintokokemukseen. Itsenäisesti toimivien kieltä oppivien robottien kehittämisessä tällaiset ominaisuudet ovat erityisen tärkeitä (ks. esim. Vogt 2000).

Yhteisöllinen näkökulma

Filosofi Daniel Dennett on kritisoinut fenomenologiaa siitä, ettei sen yksilön kokemusta korostava lähestymistapa sovi yhteen tieteellisen ja objektiivisen lähestymistavan kanssa (Dennett 1993). Tässä artikkelissa esitetty laskennallinen mallintaminen lähtee kuitenkin siitä, että kaikki kielen tulkinta ja käyttö on jossain määrin yksilöllistä. Tästä näkökulmasta tarkasteltuna puhdasta objektiivisuutta ei ole olemassa, koska jokaisen yksilön näkökulma symboleina kirjattuun (esim. tekstit) tietoon on erilainen. Tämä ei kuitenkaan pakota hyväksymään äärimmäistä relativismia, jossa kaikki tulkinnat tai näkökulmat olisivat yhtä hyviä tai arvokkaita. Kielellisiä representaatioita voidaankin tarkastella työkaluina, jotka on luotu jotakin tarkoitusperää varten jossakin yhteisöllisessä tilanteessa (Vygotski 1982). Sanaa "talo" voidaan käyttää "työkaluna" puhuttaessa taloista ilman, että rakennuksen pitää olla konkreettisesti läsnä. Sanalle "talo" ei välttämättä voida antaa määritelmää, jonka kaikki voisivat hyväksyä kaikissa tilanteissa. Kuitenkin yhteisössä kehkeytyy eräänlainen yhteinen sopimus siitä, mitä todellisuuden hahmoja kutsutaan taloksi ja mitä ei. Hahmojen joukko ei kuitenkaan ole tarkkarajainen vaan sen reunoilla on hahmoja, joita jotkut kutsuvat taloksi ja muut joksikin muuksi. Perinteisen loogis-analyyttisen filosofian ongelma tämän kysymyksen tarkastelussa on se, että propositionaalinen logiikka ei tarjoa sille menetelmällistä mahdollisuutta tarkastella symbolien merkitysten suhdetta havaintoihin (vrt. *symbol grounding* -ongelma). Perinteisen tekoälyn rajoja ovat tarkastelleet huolellisesti esimerkiksi

filosofi Sara Heinämaa ja tietojenkäsittelytieteilijä Ilkka Tuomi (Heinämaa & Tuomi 1989).

Jos havainnot esitetään esimerkiksi moniulotteisessa jatkuvassa avaruudessa (vrt. Gärdenfors 2000), merkitysten eroja ja samankaltaisuuksia voidaan tarkastella matemaattisina ja tilastollisina suureina (Honkela ym. 2008). Merkitysten mallintaminen jatkuvina moniulotteisina suureina mahdollistaa esimerkiksi jaettujen merkitysten kehkeytymisen ja merkitysneuvotteluiden (yhteisten tulkintojen etsimisen) laskennallisen mallintamisen (Lindh-Knuutila, Lagus & Honkela 2006). Tässä lähestymistavassa symboleita tarkastellaan erityisesti ulkoisina representaatioina, kun taas kognition sisäisten representaatioiden ei tarvitse lainkaan muistuttaa ulkoisia representaatioita, kuten sanoja tai lauseita (Knuuttila & Honkela 2005). Se on siis selkeä antiteesi mielen kieli -hypoteesille (Fodor 1975). Symbolinen tai looginen kieli ei ole mielen sisäinen rakenne vaan ulkoinen representaatio, jonka ihmiset yksilöinä ja yhteisönä ovat kehittäneet tiedon jakamista ja jalostamista varten. Kielellisen tiedon käyttö ei edellytä, että kieli olisi sellaisenaan mielen sisällä vaan että kieltä osataan käyttää. Samaan tapaan vasaran käyttö ei edellytä, että mielessä olisi vasara vaan että mielellämme ja kehollamme on kyky käyttää vasaraa. Tämän näkemyksen mukaan käsitejärjestelmät ovat dynaamisia järjestelmiä, jotka kehittyvät ajan myötä maailman ja ihmisten tarpeiden muuttuessa.

Elämä semioottisesti kyvykkäiden koneiden maailmassa

Valtaosa tietokoneohjelmista kehitetään edelleen niin, että niissä käytetyt representaatiot ovat ihmisen tulkitsemia. Hahmontunnistuksen ja koneoppimisen menetelmillä voidaan kuitenkin toteuttaa järjestelmiä, joilla on semioottista kyvykkyyttä ja itsenäisyyttä. Tällaisella kehityksellä on monenlaisia vaikutuksia eri alojen tutkimukseen. Perinteinen tekoälytutkimus on tuonut psykologiaan ja kognitiotieteeseen monia uusia käsitteitä. Samaan tapaan semioottisesti kyvykkäiden koneiden kehittäminen tarjoaa mahdollisuuden tarkastella monia perinteisiä filosofisen tietoteorian kysymyksiä uusista näkökulmista. Tietokonemallinnusta käytetään teorioiden muodostamisen ja jalostamisen apuvälineenä, ja se todennäköisesti paljolti korvaa symbolisen logiikan käytön tietoteorian menetelmällisenä perustana (tieteellisestä mallintamisesta ks. Knuuttila tässä teoksessa). On myös odotettavissa, että monet sellaiset filosofian osa-alueet, joissa ainoa teorioiden kuvaamisen väline on ollut kieli, saavat uusia mahdollisuuksia representoida teorioidensa sisältöä. Humanistisissa tieteissä lisääntyvät mahdollisuudet esittää tilannekohtaista tietoa

uusilla tavoilla, jotka kunnioittavat laadullisen tutkimuksen periaatteita (ks. esim. Janasik, Honkela & Bruun 2009).

Semioottisesti kyvykkäiden koneiden kehittämisellä lienee myös moninaisia käytännön vaikutuksia. Niitä on ennakoitu tieteiskuvitelmissa, joista monia voidaan kuitenkin pitää yliampuvina. Tulevaisuudessa "ymmärtävät koneet" ovat osa arkeamme samaan tapaan kuin esimerkiksi televisiot ja kännykät. Semioottisesti kyvykkäitä järjestelmiä käytetään varmasti myös päätöksenteon tukena. Järjestelmä tarjoaa näkökulmia tai suosituksia, jotka eivät ole ohjelmoijansa määriteltävissä, ja se voi lopulta kerätä maailmaa koskevaa tilannekohtaista kokemusta huomattavasti yksittäistä ihmistä enemmän. Jos semioottisesti kyvykkäitä koneita ja yleisemmin systeemiteorian ja tietojenkäsittelytieteen välineitä käytetään järkevästi, niistä voinee olla hyötyä monimutkaisten ja tärkeiden kysymysten kuten ympäristöongelmien ja kriisititilanteiden ratkaisemisessa (Honkela 2001; Hyötyniemi 2006; Hämäläinen & Saarinen 2008). Samalla on muistettava, että myös semioottisesti kyvykäs kone on kone, jolla ei ole ihmisen *elämän*kokemusta.

Toimittaneet Tarja Knuuttila & Aki Petteri Lehtinen

Representaatio

Tiedon kivijalasta tieteiden työkaluksi

GAUDEAMUS
HELSINKI UNIVERSITY PRESS
HELSINKI • 2010

Copyright © 2010 Kirjoittajat ja Gaudeamus Helsinki University Press

Kansi: Jukka Aalto / Armadillo Graphics

Gaudeamus Helsinki University Press
Oy Yliopistokustannus, HYY Yhtymä

www.gaudeamus.fi

KL: 11.5, 30, 70.01, K
UDK: 1, 3, 7.0

ISBN 978-952-495-137-1

Painopaikka: Tallinna Raamatutrükikoda, 2010