

Robotiikan historia

Jyri Huttunen

Helsinki, 26. maaliskuuta 2004
Tietojenkäsittelytieteen historia –seminaarin esitelmä
Helsingin yliopisto
Tietojenkäsittelytieteen laitos

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo.....	1
1 Johdanto.....	2
2 Robotiikan lyhyt esihistoria.....	3
3 50-luku ja sähkömekaaniset järjestelmät.....	4
4 Tietokoneavusteinen robotiikka ja tekoälyn aikakausi.....	5
5 Reaktiiviset järjestelmät.....	7
6 Älykkäät hybridimallit.....	9
7 Yhteenveto.....	11
Viitteet.....	12

1 Johdanto

Robottiikan historia on laaja aihepiiri, jonka yleisluontoinen esitys on syytä aloittaa käsitteenmäärittelyllä.

Termin *robotti* keksijänä voidaan pitää tsekkiläistä näytelmäkirjailijaa Karel Capekia, jonka näytelmässä ”RUR – Rossum’s Universal Robots” (1928) sana ensimmäistä kertaa esiintyy. Näytelmä määrittelee robotit kemiallisin keinoin tuotettuina ihmisenkaltaisina organismeina, joiden ainoa funktio oli palvella ihmiskuntaa. Capekin visio on pessimistinen kuvaus sorrosta ja eturistiriidoista: teos päättyy robottien kansannousuun.

Sittemmin sana – samoin kuin sen johdos *robotiikka* - on omaksuttu myös tieteellisen yhteisön kieleen. Robotilla ymmärretään laveasti mikä tahansa ihmisen tuottama mekaaninen konstruktio, joka on vuorovaikutussuhteessa sitä ympäröivään maailmaan. Siitä, mitä todellisuudessa tarkoitetaan puhuttaessa robotiikasta, ei kuitenkaan ole olemassa selvää konsensusta. Yksinkertaisimmillaan robotiikka ymmärretään teollisuusautomaatiota tutkivaksi insinööritieteeksi (esimerkiksi [WeF04]), toista ääripäätä taas edustaa näkemys ihmiskunnan evoluution seuraavasta askeleesta [Mor01]. On lienee syytä mainita, että optimistisimmat näkemykset muistuttavat suuressa määrin tekoälyn kehitykseen 60- ja 70-luvuilla kohdistuneita odotuksia. Erilaisten käsitysten pienimpänä yhteisenä nimittäjänä voitaneen pitää pyrkimystä tuottaa mekaanisia automaatteja, jotka kykenevät työskentelemään luotettavasti ja jossain määrin itsenäisesti ihmisille epäsuotuisissa olosuhteissa.

Huolimatta määrittelyongelmista ja näkemyseroista robotiikka on 60-luvulta lähtien pyrkinyt määrätietoisesti eriytymään omaksi tieteenalaksi. Sen juuret ovat kybernetiikassa ja tekoälytutkimuksessa, mutta nykyään kenttää määrittää ennen kaikkea poikkitieteellisyys: robotiikan tutkimuksessa limittyvät niin tietojenkäsittelytieteen, matematiikan, tilastotieteen, fysiikan, biologian, psykologian, kielitieteen kuin kognitiotieteenkin tutkimusalat.

Robottiikan historia on myös teoreettisen tekoälytutkimuksen ja tekoälyn filosofian historiaa, ja monet filosofiset ongelmat ovat keskeisiä myös robotiikan piirissä; näistä ansaitsee tässä yhteydessä tulla mainituksi ns. kehysongelma (engl. *frame problem*) [Pyl87], joka liittyy autonomisen agentin saatavilla olevan tiedon määrään ja tämän implikoimaan päättelyketjujen äärettömään pituuteen. Tässä artikkelissa rajoitutaan kuitenkin tarkastelemaan mekaanisten, fyysisessä maailmassa toimivien agenttien kehitystä 50-luvulta nykypäivään ennen kaikkea tietojenkäsittelytieteen näkökulmasta. Erityisesti seurataan autonomisen mobiilin robotin puolivuosisataista evoluutiota.

2 Robotiikan lyhyt esihistoria

Nykytieteiden historiaa käsittelevää tutkimusta on vaikea kirjoittaa sisällyttämättä tekstiin itsetietoista viittausta antiikin Kreikkaan. Helleeninen luonnontiede käsitteli aikanaan monia kysymyksiä, jotka ovat keskeisiä vielä nykyäänkin. Filosofit Heron rakensi lukuisia koneita, jotka perustuivat esimerkiksi vastapainojen, nestepaineen ja haihtumisen periaatteille. Joillakin Heronin keksinnöillä – esimerkiksi matkamittarilla, odometrilla – on sovelluksensa myös nykymaailmassa. Näiden usein yllättävänkin hienostuneiden konstruktoiden voidaan katsoa aloittavan robotiikan esihistorian.

Seuraavan kerran mekaniikka nousi ajankohtaiseksi vasta rationalismin ajalla. Aikakauden hengen ilmentymänä voidaan pitää ranskalaisen filosofi Rene Descartes'n metafysisiä mietiskelyjä [Des94]. Descartes'n keskeinen näkemys oli, että ihmisruumis – kuten liki kaikki muukin olemassa oleva – on pohjimmiltaan mekaaninen ja deterministinen rakennelma: ainoastaan ihmismieli, joka filosofin mukaan liittyi ruumiiseen ilmeisesti käpyrauhanen välityksellä, on vapaa mekanistisuuden rajoitteista. Länsimaisen filosofian piirissä tämä mielen ja ruumiin toisistaan leikkaava *kartesiolaisen dualismin* ongelma on edelleenkin ajankohtainen, ja sillä on liittymäkohtansa myös robotiikkaan ja tekoälyyn (ks. esimerkiksi [Put60]).

Varhaisista robottien edeltäjistä ansaitsee tässä yhteydessä tulla mainituksi Jacques de Vaucanson'n ankka [Tec04]. Ranskalainen Vaucanson sai vastuulleen vuonna 1741 maansa silkkiteollisuuden ajanmukaistamisen, johon ongelmaan hän tarjosi ratkaisuksi kutomisprosessin pitkälle vietyä automatisointia reikäkortein operoitavin kutomokonein

avustuksella. Uudistusehdotukset aiheuttivat kutomotyöläisten keskuudessa vastarintaa, eikä niitä koskaan pantu täytäntöön. Vaucansonin innovaatiot eivät kuitenkaan rajoittuneet teollisuuden piiriin: aikalaisdokumenttien mukaan hän esitteli hämmästyttävän luonnollisen metalliankan (*anas mechanica arcana*), joka koostui yli 400 liikkuvasta osasta ja osasi muun muassa leyhytellä siipiään ja jopa simuloida ruoansulatusta. Valistuksen aika tuotti runsaasti vastaavanlaisia mekaanisia kojeita, esimerkiksi paineilmalla toimivan huilunsoittajan, mutta ikävä kyllä tarkkoja, luotettavia dokumentteja laitteiden tekniikasta ei ole nykypäiviin asti säilynyt.

1800-luvulle saavuttaessa Euroopan teollinen vallankumous oli täydessä vauhdissa, ja monia robotiikkaa enteileviä sovelluksia oli jo otettu yleiseen käyttöön. Radioaaltojen keksiminen ja sähkövirran valjastaminen hyötykäyttöön avasi tutkijoille runsaasti uusia mahdollisuuksia. Robotiikan esihistorian voidaan katsoa päättyvän vuoteen 1898, jolloin serbialais-amerikkalainen keksijä Nikolai Tesla patentoi ja esitteli pienikokoisen, radioaaltoin ohjattavan veneen [Pbs04]. Veneen toiminta perustui operaattorin hallinnoimaan radiolähettimeen, veneeseen asennettuun vastaanottimeen ja joukkoon loogisia portteja.

3 50-luku ja sähkömekaaniset järjestelmät

Toisen maailmansodan aikana otetut teknologiset edistysaskeleet vaikuttivat suuresti myös robotiikan kehitykseen 1900-luvun puolivälin jälkeen. Tietokoneet olivat vielä harvinaisia, eikä niitä voitu esimerkiksi taloudellisten ja tilallisten rajoitusten vuoksi soveltaa robotiikassa. 50-luvun robotiikka tutki ennen kaikkia makromekaanisista osista koottujen järjestelmien toimintaa. Vuonna 1951 Grey Walter kehitti kahdeksan mekaanista kilpikonaa, joista kunkin hermokeskuksena oli kaksi tyhjöpötkä ja valoherkkä ”silmä”. Yksinkertaisesta rakenteestaan huolimatta kilpikonat kykenivät näennäisen monimutkaiseen käyttäytymiseen: ne parveilivat valaistun laturirakennelman ympärillä ja siirtyivät sen sisään, kun niiden akkukesto lähenee nollaa [Mor01][Wal53]. Konnat jäivät kuitenkin kuriositeetiksi, eikä niiden kaltaisia järjestelmiä tutkittu ennen 80-luvun behavioristis-reaktiivista vallankumousta (ks. kappale 5).

Vuonna 1955 tehtiin merkittävä matemaattinen keksintö, jonka voitaneen sanoa kuuluvan robotiikan tärkeimpiin innovaatioihin: Denavit ja Hartenberg määrittivät tavan esittää ns. *kinemaattisia ketjuja* homogeenisten matriisien avulla [Cri85-1][Den55]. Robotiikan tapauksessa kinemaattinen ketju voidaan käsittää kahden tai useamman toisiinsa liittyvän mekaanisen komponentin muodostamana hierarkkisena ketjuna, jonka osia yhdistävät liuku- tai kiertonivelet. Robottikäsi on yksinkertainen esimerkki kinemaattisen ketjun avulla mallinnettavasta kokonaisuudesta.

Kinemaattisen ketjun pääasiallisia sovelluksia robotiikassa on kaksi: suora kinematiikka ja käänteinen kinematiikka. Edellisessä lasketaan kinemaattisen ketjun jonkin osan sijainti karteesisessa avaruudessa kaikkien sitä edeltävien ketjun osien matriisimuotoisten parametriesitysten avulla; jälkimmäisessä pyritään määrittelemään toisesta päästään kiinnitetyn ketjun osien paikalliset matriisit siten, että ketjun vapaan päätepisteen sijainti vastaisi haluttua sijaintia karteesisessa avaruudessa. Suora kinematiikka perustuu laskennallisesti yksinkertaiseen 4×4 -matriisien kertolaskuun, mutta käänteinen kinematiikka on yleistapauksessa NP-kova ongelma [Hop82].

Denavit-Hartenberg –matriisit ja transistorin keksimistä seurannut automaattisen tietojenkäsittelyn mullistus sekä mahdollistivat että tekivät tarpeelliseksi tietokoneiden käytön robotiikan apuna. Vuonna 1961 George Devol ja Joe Engelberger esittelivät ensimmäisen teollisuuskäyttöön tarkoitetun robotin, *Unimaten*. Unimate toimi General Motorsin Ewingin tuotantoyksikön kokoonpanolinjalla, ja sen tehtävä oli siirtää valumuoteista tulleita kuumia autonosia jäähdytysnesteeseen ja ihmistyöntekijöiden edelleen käsiteltäväksi. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi sillä oli käytössään primitiivinen ”tietokone” ja rumpumuisti, johon mahtui noin 180 toiminta-askelta [Cri85-2].

4 Tietokoneavusteinen robotiikka ja tekoälyn aikakausi

60-luvun loppupuolella tekoäly nousi suurten lupaustensa ansiosta tietojenkäsittelytieteen tutkimuksen keskeiseksi osa-alueeksi. Tutkijat lähestyivät älykkäiden koneiden ongelmaa korkean tason kognitiivisista funktioista käsin: ohjelmien perustana oli hyvin määritelty maailmaa kuvaava malli ja symbolinen päättelymekanismi. Teoreettisesta tekoälytutkimuksesta 60-luvun lopulla irtautunut robotiikka jatkoi tekoälytutkimuksessa

esillä olleiden teorioiden kehittämistä ja soveltamista reaali maailman olosuhteissa. Tuloksena oli *sense-plan-act* –*arkkitehtuuri* (myöh. SPA).

SPA:n perusajatus oli olemassa olevan, mahdollisesti päivittyvän maailmanmallin ja robotin havaintotiedon perusteella suunnitella robotin suorittamat toiminnot sekä delegoida suunnitelmia vastaavat toimintokäskyt arkkitehtuurin alemmille osille. Kun toiminnot oli suoritettu, jatkettiin jälleen havaintovaiheesta. Havaintotietoa kerättiin robottiin asennettujen sensoreiden avulla. Sensoreina toimivat esimerkiksi kamerat, kaikuluotaimet ja törmäystä havainnoivat puskurit. Lisäksi robotit voivat arvioida omaa sijaintiaan liikkumisen yhteydessä kerätyn odometriatiedon perusteella. Sensorit olivat poikkeuksetta kalliita; lisäksi niiden tuottama tieto on aina jossain määrin epäluotettavaa siinä esiintyvän kohinan ja ympäristön aiheuttamien häiriöiden (esimerkiksi kaikujen heijastuminen) johdosta.

SPA-perustaisista toimijoista tunnetuimmat lienevät tiehen maalattuja valkoisia viivoja kameransa avulla seuraamaan kyennyt *Stanford Cart* [Mor80] ja Stanford Research Instituten *Shakey* [Cri85-3][Nil80], joka otettiin käyttöön vuonna 1966. Shakey operoi mustavalkoiseksi maalatussa huoneessa, joka sisälsi erimuotoisia esteitä. Se havainnoi ulkomaailmaa televisiokameran (resoluutio 120x120 pikseliä), etäisyysmittarin ja törmäyssensorien avulla. Lisäksi Shakey oli radio- ja videolinkin kautta yhteydessä varsinaisen prosessoinnin suorittaviin tietokoneisiin.

Shakeyn toiminta perustui loogisille malleille ja predikaattilogiikalle. Käytetty arkkitehtuuri oli malliesimerkki SPA:sta: korkean tason suunnittelukomponentit välittivät havaintojen perusteella muodostetut käskynsä välitasolle, joka käytti alimman tason liikkumis-, kääntymis- ja reittisuunnittelukomponentteja suunnitelmien toteuttamiseen. Jotkin Shakeyn suorituksista ovat vielä nykyäänkin vertaansa vailla, mutta tämä johtunee lähinnä sen toimintaympäristön huolellisesta pelkistyksestä. Shakey oli kuitenkin äärimmäisen hidaskäyttöinen (etenemisnopeus noin 2 m/h), sillä sen käsittelemät ongelmat olivat monimutkaisia ja informaation käsittely hidasta.

Algoritmanalyysiä sovellettiin 70-luvulla moniin ongelmiin, jotka ovat vielä nykyäänkin keskeisessä osassa mobiilirobotiikassa. Eräs aikakauden keskeinen tutkimusongelma oli liikesuunnittelu. Ensimmäisiä aihetta käsitelleitä julkaisuita oli Jacob Schwartzin ja Micha

Sharirin tutkimus liikesuunnittelun erikoistapauksesta, *kaksiulotteisesta pianonsiirtäjän ongelmasta* [Sch87]. Lyhyesti ilmaistuna ongelmana on löytää yhtenäinen liikerata, jota pitkin jäykkä kappale voi siirtyä mielivaltaisesti määritellystä lähtöpisteestä mielivaltaisesti määriteltyyn päätepisteeseen; erityisesti liikeradan tulee mukautua kaksiulotteisen ympäristön staattisiin geometrisiin rajoitteisiin. Ongelma on polynomisessa ajassa ratkeava, mutta Schwartzin ja Sharirin ratkaisualgoritmin aikavaatimus oli luokkaa $O(n^5)$. Myöhemmin aikavaatimuksen eksponenttia on saatu pienennettyä (ks. esimerkiksi [ODu87]), mutta ongelman yleinen kolmiulotteinen versio on PSPACE-kova [Rei87].

Edellä esitetystä käy ilmi, että tekoälylaboratorioiden idealisoituihin abstrakteihin simulaatioihin verrattuna yksinkertaisissakin fyysisissä ympäristöissä kohdattujen ongelmien laskennallinen vaativuus on korkea. Vaikka tietokoneiden laskentateho kasvoi nopeasti, oli tarkkojen maailmaa esittävien mallien laatiminen sensorihavaintojen perusteella hyvin vaikea tehtävä, ja tehokas päättely runsaan, kohinaisen informaation perusteella parhaimmillaankin epävarmaa. SPA-robottien suorituskyky jäi alhaiseksi: havainnoinnin, havaintoinformaation käsittelyn, liikesuunnittelun ja toiminnan syklin suorittamiseen saattoi kulua aikaa useita minuutteja. Lisäksi toimintaympäristöiltä edellytettiin selväpiirteisyyttä, yksinkertaisuutta ja staattisuutta, jotka harvoin ovat reaali maailman ominaisuuksia. Toisen sukupolven robottien suoritus- ja toimintakyky olivat monille pettymys.

5 Reaktiiviset järjestelmät

Vastareaktion tekoälytutkimukseen nojautuvan robotiikan ongelmille Rodney A. Brooks julkaisi vuonna 1986 artikkelin, joka esitteli täysin uudenlaisen lähestymistavan robotiikan keskeisiin ongelmiin [Bro86]. Brooks luoma *subsumptioarkkitehtuuri* oli robottiarkkitehtuuri, joka hylkäsi suoraan aiemmat oletukset siitä, että älykkäät järjestelmät tulisi mallintaa lineaarisesti kommunikoivien monimutkaisten osajärjestelmien hierarkiana – ja vähemmän suoraan oletuksen maailman eksplisiittisen mallintamisen tarpeesta.

Brooksin arkkitehtuurimalli sisälsi useita itsenäisiä, rinnakkain toimivia *kerroksia*, jotka saamansa sensorisyötteen perusteella suunnittelivat robotin toimintoja omassa kontekstissään. Nämä kerrokset kommunikoivat keskenään asynkronisesti, ja niiden

tehtävät olivat selkeästi määriteltyjä ja yksinkertaisia. Kerrosten välillä vallitsi löyhä hierarkia: vaikka kukin kerros pystyi periaatteessa päättämään robotin seuraavan toiminnon, korkean tason kerrokset voivat tarvittaessa *vaikuttaa* matalan tason kerrokseen.

Ensimmäinen subsumptiolle rakentuva robotti oli Brooks'n hyönteismäinen *Genghis* [Bro89]. Kuusijalkainen, sensorien ja neljän kahdeksanbittisen suorittimen avulla toimiva *Genghis* kykeni kävelemään epätasaisessa ympäristössä ja seuraamaan lämpöensensoreilla havaitsemiaan objekteja. Arkkitehtuuri koostui kahdeksasta kerroksesta, esimerkiksi ”kävele”-, ”seuraa”- ja ”säädä tasapainoa” -toiminnallisuuden toteuttavista moduuleista. *Genghis* oli 35 senttimetriä pitkä ja painoi noin kilon. Ero aikaisempiin monoliittisiin robotteihin oli valtava.

Subsumptioarkkitehtuuri synnytti kokonaisen uuden tutkimussuunnan, behavioristisen robotiikan, joka luotti apriorisesti määriteltyjen mallien sijaan siihen, että makrotason toiminnallisuus emergoituisi hyvin määritellystä mikrotason reaktiivisesta toiminnallisuudesta. Brooks itse luonnehti behavioristista lähestymistapaa lauseella ”maailma on itse paras mallinsa” [Bro91]. *Genghis* tarjosikin vaikuttavan esimerkin ympäristönsä kanssa reaaliaikaisessa vuorovaikutussuhteessa toimivasta autonomisesta agentista, jollaista aiempi symboliselle tekoälylle pohjautuva robotiikka oli turhaan yrittänyt luoda. Kriitikot syyttivät behavioristeja hyvin määriteltyjen ja ennustettavien formalismien puutteesta, mutta käytännön tulokset antoivat olettaa, ettei tällaisia välttämättä tarvittu.

Behavioristinen robotiikka näytti jonkin aikaa lupaavalta ratkaisulta aikaisemmin kohdattuihin ongelmiin. Rinnakkaisuus tarjosi vikasietoisuutta ja luotettavuutta, moduulien yksinkertaisuus nopeita vasteaikoja. Reaktiivis-behavioristisen mallin problemaattisuus kävi kuitenkin ilmi pian: järjestelmän puitteissa toteutetut robotit eivät kyenneet kovinkaan suunnitelmalliseen toimintaan, sillä niillä ei voida sanoa olevan esimerkiksi muistia, mistä seuraa myös oppimiskyvyn rajoittuneisuus. Karttojen ja muiden vastaavien ympäristön mallien puute vaikeutti monimutkaisten tehtävien täyttämiseen tähtäävää toimintaa laajoissa ympäristöissä ratkaisevasti.

6 Älykkäät hybridimallit

90-luvulle tultaessa kotien mikrotietokoneet olivat jo tehokkuudeltaan samaa luokkaa kuin varhaisemmat superkoneet [Mor98]. Tämä vaikutti suoraan myös robotiikan tutkimukseen, sillä monet laskennallisesti raskaat ongelmat, joiden käsittely oli ollut mahdotonta varhaisemmissa tietokonejärjestelmissä, olivat uusien resurssien avulla suoritettavissa jopa reaaliajassa. Myös esimerkiksi digitaalisen signaalinkäsittelyn ja laskennallisen geometrian tutkimus eteni harppauksin, ja vaihtoehtoiset sensoriteknologiat – kaikuluotaimet, digitaalikamerat ja laseretäisyysmittarit - halpenivat.

Edelläkuvatusta seurasi, että tehokkaat tietokonejärjestelmät pystyttiin istuttamaan suoraan robottien runkoon sen sijaan, että olisi jouduttu kommunikoimaan radioteitse ulkoisten keskusyksikköjen kanssa. Vaativiakin laskentaoperaatioita pystyttiin suorittamaan paikallisesti. Tämän uuden riippumattomuuden myötä myös robottien ja robotiikan tutkimuksen luonteessa tapahtui hienoinen muutos. Vaikka *älykkydestä* – ihmisen kognitiivisten kykyjen merkityksessä - puhuminen on robottien kohdalla jossain määrin absurdia, voidaan varauksetta sanoa, että 90-luvun aikana robottien itsenäisyyden ja toimintakyvyn asteessa tapahtui merkittävää kehitystä.

Vaikka puhtaasti reaktiiviset järjestelmät oli todettu käytännön tehtävissä riittämättömiksi, olivat behavioristien tutkimustulokset ja ajatusmallit silti hedelmällisiä lähtökohtia uusien robottiarkkitehtuurien kehitykselle. Monet esitellyistä ideoista olivatkin luonteeltaan aikaisempaa tutkimusta yhdisteleviä, merkittävimpänä näistä deliberatiivis-reaktiivinen arkkitehtuuri joka yhdisti suunnitelmallisuuden reaktiiviseen malliin. Ajatuksesta helppojen ja yksinkertaisten ratkaisuiden löytämisestä syvällisiin ongelmiin oli luovuttu, mutta monia älykkääksi luokiteltavissa olevan toiminnan osa-alueita opittiin hahmottamaan ja hallitsemaan yhä paremmin.

Behavioristisen mallin muistittomuudesta ja suunnittelukyvyttömyydestä pyrittiin eroon erilaisten kolmikerrosarkkitehtuurien avulla [Kor98]. Alin kerros oli yhä periaatteiltaan behavioristinen, mutta välikerroksella oli menneisyyteen ulottuva muisti. Välikerros valitsee, mitä behavioristisen kerroksen toimintoa tulisi kullakin ajan hetkellä painottaa

ylimmän kerroksen, suunnittelukerroksen, suunnitelmien optimaaliseksi täytäntöönpanemiseksi.

Arkkitehtuurien ohella tutkimus keskittyi erityisesti navigoinnin ja kartanluonnin ongelmiin. Ympäristöä voitiin havainnoida kehittyneiden kamera- ja etäisyysmittarijärjestelmien avulla entistä tarkemmin, ja moniin 70-luvulla esiintyneisiin ongelmiin voitiin palata uudelleen paremmalla menestyksellä. Anthony Lazanas ja Jean-Claude Latombe [Laz92] esittelivät polynomisessa ajassa toimivan menetelmän, jonka avulla liikkuva robotti pystyy luotettavasti navigoimaan tilassa, joka sisältää ennalta määriteltyjä ja tunnistettavissa olevia *maamerkkejä*. Autonomisten mobiilien robottien näkökulmasta oletus tämänkaltaisen apriorisen tiedon olemassaolosta on kuitenkin ongelmallinen.

Hans Moravec ja Alberto Elfes [Mor85] [Elf89] esittelivät vuonna 1985 kartanmuodostusmenetelmän, joka on osoittautunut sangen elinvoimaiseksi. *Varausruudukkomenetelmän* motiivina on pyrkimys vikasietoiseen kartoitukseen huomioimalla eksplisiittisesti robotin toimintaan liittyvä epävarmuus ja tuotetun sensoritiedon kohinaisuus. Moravec ja Elfes laativat robotille probabilistiset *sensori- ja sijaintimallit*, joita käytetään apuna kun sensoripyyhkäisyjen tietoa fuusioidaan olemassa olevaan karttaan. Karttapohjana toimiva varausruudukko on kaksiulotteinen Markov-satunnaiskenttä, jonka kunkin alkion arvo kertoo kyseistä alkiota vastaavan reaalimaailman osan *varaustodennäköisyyden*, todennäköisyyden sille, että kyseisessä avaruuden osassa on este. Näin muodostettu kartta antaa luotettavan, ajon aikana tarkentuvan kuvauksen robotin (staattisesta) toimintaympäristöstä; kartta on myös suuri, tyypillisesti yksi alkio kuvaa noin 10–20 neliösenttimetrin alueen reaalimaailmasta, ja siten siihen kohdistuvat laskennalliset operaatiot ovat raskaita.

Navigointitutkimuksessa ruudukkomenetelmien laskennallinen vaativuus johti myös muunlaisiin karttamalleihin. Topologiset mallit kuvaavat robotin ympäristöä solmujen muodostamana verkkona, josta puuttuu kaikenlainen metriikka; mallin etu on sen yksinkertaisuus, mutta korkea abstraktiotaso johtaa myös informaation menettämiseen ja siitä seuraaviin vaikeuksiin paikannus- ja navigointiprosessissa. Hybridikarttamallit puolestaan yhdistelevät kahden edellä mainitun mallin ominaisuuksia; hybridikarttojen rakenteesta ei tällä hetkellä vallitse yksimielisyyttä (ks. esimerkiksi [Thr96][Tom02]),

mutta niiden käyttökelpoisuutta arvioivat alustavat tutkimustulokset ovat rohkaisevia [Tom02].

7 Yhteenveto

Robottiikan historiassa on erotettavissa kolme selvästi toisistaan erottuvaa jaksoa: 50-luvun sähkömekaaninen aikakausi, 60-luvulta aina 80-luvun alkuun kestänyt symbolisen tekoälyn ja monoliittisten järjestelmien aikakausi sekä 80-luvun puolivälistä alkanut älykkäiden järjestelmien aikakausi. Vaikka Stanfordin Shakey saavutti 70-luvulla tuloksia, jotka osittain vieläkin ovat nykyjärjestelmien saavuttamattomissa, on nykyinen robotiikka kehittynyt huomattavasti varhaisia tekoälysovelluksia laajemmalle – kenties myös tukevammalle - pohjalle. Behavioristisen robotiikan aiheuttama ajatusmallien murros pakotti olemassa olevien arkkitehtuurien tarkoituksenmukaisuuden uudelleenharkintaan. Tuloksena oli hybridimalleja, jotka yhdistelevät sekä sense-plan-act –arkkitehtuurin että behavioristisen arkkitehtuurin ominaisuuksia.

Huolimatta viime vuosikymmenten edistysaskelista ovat nykyrobotit edelleenkin hyvin primitiivisen tason toimijoita verrattuna lähes mihin tahansa luonnolliseen organismiin [Mor01]. Tulevaisuudessa tutkimus tulee painottumaan edelleenkin oppivien vikasietoisten järjestelmien suuntaan ja ryhmässä toimivien robottien koordinoimiseen, mutta pidemmän aikavälin tuloksia on vaikeampi arvioida.

Viitteet

[Bro86] **Brooks, R.**, A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 1, March 1986

[Bro89] **Brooks, R.A.**, A Robot that Walks: Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, AZ, May 1989, pp. 292–296

[Bro91] **Brooks, R.**, Intelligence Without Reason, *Proceedings of 12th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Sydney, Australia, August 1991, pp. 569–595

[Cri85-1] **Critchlow, A.J.**, *Introduction to Robotics*, pp. 179-194, Macmillan, New York 1985

[Cri85-2] *ibid.*, pp. 38-39

[Cri85-2] *ibid.*, pp. 46-47

[Den55] **Denavit, J., Hartenberg, R.S.**, A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 22, pp. 215-221, 1955

[Des94] **Descartes, R.**, *Teoksia ja kirjeitä* (suomentanut ja toimittanut J.A. Hollo), WSOY, Porvoo, 1994

[Elf89] **Elfes, A.**, Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation, *IEEE Computer*, Vol. 22, No. 6, June 1989

[Hop82] **Hopcroft, J., Joseph, D., Whitesides, S.**, On the Movement of Robot Arms in 2-Dimensional Bounded Regions, *23rd Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 280-289, Chicago, Illinois, 3-5 November 1982, IEEE

- [Kor98] **Kortenkamp, D., Bonasso, R.P., Murphy, R.** (editors), *Artificial Intelligence and Mobile Robots: Case Studies of Successful Robot Systems*, pp. 200-203, MIT Press, Cambridge, MA, 1998
- [Laz92] **Lazanas, A., Latombe, J.-C.**, Landmark-Based Robot Navigation, *Proceedings of the Tenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-92)*, pp. 816-822, San Jose, California, 1992. AAAI Press
- [Mor80] **Moravec, H.**, *Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover*, doctoral dissertation, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, May, 1980
- [Mor85] **Moravec, H., Elfes, A.E.**, High Resolution Maps from Wide Angle Sonar, Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, March 1985, pp. 116-121
- [Mor98] **Moravec, H.**, When will computer hardware match the human brain?, *Journal of Evolution and Technology*, Vol. 1, March 1998
- [Mor01] **Moravec, H.**, Robots, Re-Evolving Minds at 10^7 Times Nature's Speed, *Cerebrum*, v3n2, Spring 2001, pp. 34-39,
<http://cart.frc.ri.cmu.edu/users/hpm/project.archive/robot.papers/2000/Cerebrum.html>
(25.3.2004)
- [Nil80] **Nilsson, N.**, Shakey the Robot, *Technical Report 323*, SRI International, Menlo Park, CA, 1984
- [ODu87] **Ó'Dúnlaing, C., Sharir, M., Yap, C.K.**, Retraction: A New Approach to Motion Planning, *Planning, Geometry and Complexity of Robot Motion* (toim. Schwartz, J.T., Sharir, M., Hopcroft, J.), Ablex Publishing Corporation, New Jersey, 1987
- [Pbs04] *Tesla Resources – Selected Tesla Patents*,
<http://www.pbs.org/tesla/res/613809.html> (25.3.2004)

[Put60] **Putnam, H.**, Minds and Machines, *Dimensions of Mind: A Symposium* (toim. Hook, S.), New York University Press, New York, 1960

[Pyl87] **Pylyshyn, Z.**, *The Robot's Dilemma – The Frame Problem In Artificial Intelligence*, ABLEX Publishing Corporation, New Jersey, 1987

[Rei87] **Reif, J.**, Complexity of the Generalized Mover's Problem, *Planning, Geometry and Complexity of Robot Motion* (toim. Schwartz, J.T., Sharir, M., Hopcroft, J.), Ablex Publishing Corporation, New Jersey, 1987 (alkup. artikkeli *20th Annual IEE Symposium on Foundations of Computer Science*, Puerto Rico, October 1979)

[Sch87] **Schwartz, J.T., Sharir, M.**, On the Piano Mover's Problem: I. the Case of a Two-Dimensional Rigid Polygonal Body Moving Amidst Polygonal Barriers, *Planning, Geometry and Complexity of Robot Motion* (toim. Schwartz, J.T., Sharir, M., Hopcroft, J.), Ablex Publishing Corporation, New Jersey, 1987 (alkup. artikkeli *Communications in Pure and Applied Mathematics*, 36:345-398, 1983)

[Tec04] <http://www.tecsoc.org/pubs/history/2002/nov21.htm> (26.03.2004)

[Thr96] **Thrun, S., Bücken, A.**, Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation, *Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence*, AAAI, 1996

[Tom02] **Tomatis, N., Nourbakhsh, I., Siegwart, R.**, Hybrid Simultaneous Localization and Map Building: Closing the Loop with Multi-Hypotheses Tracking, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ICRA 2002, May 2002

[Wal53] **Walter, G.**, *The Living Brain*, Duckworth 1953

[WeF04] *WSOY Web Facta*, <http://www.webfacta.com> (25.3.2004)