

# PROAKTIIVSED TEHNOLOOGIAD MEIL JA MUJAL

Leo Mõtus

Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinna Tehnikaülikooli automaatika instituut

Merik Meriste

Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituut

## KOKKUVÕTE

Meie igapäevane elu muutub üha enam sõltuvaks nn tarkvaramahukatest (ingl *software-intensive*) tehissüsteemidest, mis on ehitatud taaskasutatavate komponentide (dünaamiliselt muutuva) võrguna, toimivad tihedas koostöös nii neid ümbritseva keskkonna kui ka tegelike kasutajatega (st meie endiga). Suur osa selliste süsteemide funktsionaalsusest on paindlikult muudetav, kuna ta on defineeritud tarkvaraliselt. Paljude taoliste süsteemide käitumist mõjutavad oluliselt neisse (või nende komponentidesse) sisse projekteeritud ning ehitatud sihifunktsioonid ja nn “eetilised printsiibid”. Selliseid tehissüsteeme nimetatakse proaktiivseteks. Proaktiivsete tehissüsteemide projekteerimiseks luuakse uusi ja täiendatakse mitmeid traditsioonilisi teooriaid. Nende realiseerimiseks kasutatakse kiiresti laienevat gruppi tehnoloogiaid, mille koondnimetuseks võiks olla proaktiivsed tehnoloogiaid ehk lühemalt proaktiivtehnoloogiaid.

## SISSEJUHATUS

Tarkvaramahukate süsteemide ja proaktiivtehnoloogiate arengu on esile kutsunud tehissüsteemide keerukuse ja neile esitatavate töökindluse, turvalisuse ning hinna nõuete ranguse kasv, aga samuti bioloogilise elu ja looduslike süsteemide toime mehhanismide kohta saadud uued teadmised. Väga lihtsustatult võib ju väita, et ka bioloogiline elu põhineb proaktiivsete tarkvaramahukate seadmete koostööl, kus tarkvara toimimise aluseks on DNAs olev informatsioon.

Tänaseks on maailmas tekkinud järjekordne isekorralduvate tehissüsteemide (ingl *self-organising systems*) uurimise ja rakendamise laine. Võrreldes

Uute teooriate ja proaktiivtehnoloogiate eesmärgiks on võimaldada paremini hallata süsteemide kiirelt kasvavat keerukust, vähendada nende potentsiaalset ohtlikkust ühiskonnale ja langetada hinda, tagades:

- süsteemis kasutatavate komponentide autonoomsuse kasvu,
- komponendi võime iseseisvalt jälgida oma lähikeskkonda (vastavalt vajadusele),
- komponendi võime muuta oma käitumist vastavalt keskkonnas toimuvale (reaalselt võimalikes piirides),
- komponentide süsteemiks integreerimise lihtsustamise ja
- valmis süsteemi hooldamise ning modifitseerimise lihtsustamise.

Käesolev artikkel tutvustab proaktiivtehnoloogiate alase tegevuse mõningaid aspekte Eestis ja mujal maailmas.

eelmise lainega (1960ndatel aastatel) on inimkonna tehnoloogiline ja teoreetiline baas oluliselt paranenud, mistõttu uued tehissüsteemid mõjutavad märgatavalt meie igapäevast elu. Reeglina on taolised tehissüsteemid ehitatud komponentide (dünaamiliselt muutuva) võrguna ning toimivad tihedas koostöös nii neid ümbritseva keskkonna kui ka tegelike kasutajatega. Neid tehissüsteeme iseloomustab tarkvaramahukus – st suur osa nende funktsionaalsusest on defineeritud tarkvaraliselt – ja nende ehitamiseks on väljatöötamisel grupp tehnoloogiaid, mida võib nimetada proaktiivtehnoloogiateks. Loomisel on teooriad taoliste süsteemide omaduste verifitseerimiseks.

Proaktiivtehnoloogiate kasutamise näiteid võib leida paljudelt elualadelt. Üks nende rakendamise esimesi valdkondi hõlmas autosid ja lennukeid. Kaasaegsed lennukid on reeglina vahetult arvutite poolt juhitavad. Piloodid töötavad tegelikult arvutioperaatoritena (kuigi paljud neist ise nii ei arva). Kui tavaautomaatikas on kasutatud lennukites juba aastakümneid, siis nn vahetu lennuki juhtimine arvuti poolt (ingl *fly-by-wire technology*) leidis laiemat kasutust alles alates 1990ndatest aastatest. Sellisel režiimil lennates puudub piloodil (hüdro-mehaaniline) otseühendus lennuki juhtorganitega – lennuki juhtimine toimub vaid läbi arvuti.

Lennukites kasutatavate protsessorite arvu kasvust annab ettekujutuse Boeing 747 ja 777 sardsüsteemides olevate protsessorite hulga võrdlus. Vanemas mudelis on umbes 100 erinevate funktsioonidega protsessorit, uuemas mudelis on protsessorid üle 1000. Igal pikemal lennul on protsessorite probleemide tõttu vaja lennuki arvutikonfiguratsiooni ja funktsioonide jaotust dünaamiliselt muuta. Muutused toimuvad reeglina ilma inimese sekkumiseta.

Autodes ei ole arvuti poolt auto vahetu juhtimise (ingl *drive-by-wire*) tehnoloogia – st tehnoloogia, kus autojuht rooliratta keeramisega juhib arvutit, mitte ei muuda hüdro-mehaaniliste seadmete abil rataste pöördenurka, veel igapäevasesse praktikas jõudnud. Sellegipoolest on igas kaasaegses autos (sõltuvalt hinnaklassist) 2–40 protsessorit. Arvutite hooleks küttesegu segamine, selle mootorisse sissepüstitamine, sisse- ja väljalaskeklappide õigeaegne avamine ja sulgemine, pidurite juhtimine, rataste koormusjaotuse dünaamiline juhtimine, autopiloodid, parkimisabisüsteemid, navigeerimise abistamise süsteem, mis kasutab ka GPS (*Global Positioning System*) ja muid abivahendeid.

Mobiiltelefonid, digi-TV, Skype, IP telefon ja pangautomaadid on tarkvaramahukad rakendused, mis ei vaja tutvustamist. Iseküsimus, kui palju on neisse seadmetesse sisse ehitatud proaktiivseid omadusi. Eestis veel suhteliselt vähetuntud on arupuru (ingl *intelligent dust, motes, etc.*) ja RFID

siltide (raadiosagedust peegeldavad passiivsed märgised, mis toimivad unikaalsete identifikaatoritena) kasutamine turvasüsteemides, keskkonnanseires, logistikas ja protsessijuhtimises. Sedalaadi vahendite ja nendega tihedalt seotud arvutite spon-taanvõrkude uurimine on Eestis alles algusjärgus.

Uute tehnoloogiate ühisjooneks on üha suurenev vajadus realiseerida tehissüsteemide funktsioone tarkvaras ning arvutite vahetu interaktsiooni möödapääsmatus arvutite ja arvutivälises keskkonnas toimuvate füüsikaliste protsesside vahel (lisaks liidesele inimesega). Enamikul juhtudel on tegemist nn peidetud (e märkamatu) arvutitega ja nähtamatute, kuid (ajas) püsivalt toimivate situatsioonitundlike arvutustega (ingl *ubiquitous, pervasive or invisible computing*), mida tavakodanik ei pruugi üldse märgata.

Selliste süsteemide komponendid on sageli omakorda küllaltki keerulised süsteemid, st sisuliselt on tegemist süsteemide süsteemiga (ingl *system of systems*), mida töökindlana toimima saada on äärmiselt raske ülesanne. Süsteemide süsteem on suhteliselt uus mõiste, mis tähistab laiahaardelise interdistsiplinaarse probleemi lahendamiseks loodud kompleksset vahendit – tüüpiliselt mitme heterogeense, hajussardsüsteemi tihedat koostööd eeldav ja tihti ka inimorganisatsioone sisaldav ühendus.

Süsteemide süsteemi iga komponent (ja ka kompleks tervikuna) on mõjutatud teda ümbritsevast keskkonnast. Kuna keskkonna kohta saada olev informatsioon on põhimõtteliselt mittetäielik, siis ei saa ka komponentide sisesed ja välised interaktsioonid olla rangelt põhjuslikud (nagu seda on konventsionaalse arvutiteaduse algoritmide ja programmide vahelised ühendused). Seetõttu tekib süsteemide süsteemis ja tema komponentides nn ILMNEV KÄITUMINE (ingl *emergent behaviour*). Ilmnev käitumine ei ole ennustatav üksikute komponentide käitumiste põhjal, mis raskendab süsteemide süsteemi töökindlusele ja käitumisele esitatud piirangute garanteeritud rahuldamist. Nime-tatud probleemi lahendusi otsitakse kompleksi eesmärgipärase isekorraldumise võime – PROAK-

TIIVSUSE – loomises ning isekorraldumise protsessi juhtimise võimaluste (näiteks adaptiivsuse, struktuuri ja funktsionaalsuse dünaamilise rekonfiguratsiooni, iseõppimise) uurimises.

Proaktiivsuse realiseerimise eeltingimus on süsteemi osade autonoomsus, mis omakorda eeldab komponendipõhiseid süsteeme, kus komponendid käituvad eesmärgipäraselt (vastavalt dünaamiliselt tekkivale situatsioonile) ja autonoomselt. Selliseid komponente nimetatakse sageli agentideks. Agendid realiseerivad süsteemile vajalikke töid ehk teenuseid. Teenustepõhise töökorralduse puhul kasutavad agendid oma eesmärkide saavutamiseks

## PÕHIMÕISTED – AUTONOOMIA, ILMNEV KÄITUMINE, PROAKTIIVSUS, SITUATSIOONITUNDLIKKUS

Enamus formaalseid teooriaid on tegelikus maailmas eksisteerivate nähtuste ja protsesside ligikaudsed kirjeldused. Ainsaks erandiks võiks lugeda matemaatika, mis uurib iseennast ja iseenda sees tekkivaid seoseid. Teooria muutmine võetakse ette siis, kui teooria kirjeldab tegelikkust liiga ligikaudselt. Väidet illustreerivad konventsionaalsel algoritmiteoorial põhineva arvutiteaduse laiendamise katsed, mis algasid 1970ndate keskel ja koguvad üha enam populaarsust. Muutmise vajaduse tingis olemasoleva teooria puudulik võime selgitada ja analüüsida uutele arvutirakendustele olulisi omadusi ning toetada vajalike omaduste teadlikku ning sihipärast saavutamist süsteemide arendamise käigus.

Nii näiteks selleks, et tõsisemalt arutada süsteemi-osadele autonoomia võimaldamist, oli vaja liikuda algoritmikesksel mõtlemisel põhinevast ja täielikult teadaolevatel põhjuslikel seostel ülesehitatud mõnusast, kuigi pisut stagneerunud ja piiratud võimalustega maailmast interaktsioonikesksel mõtlemisel põhinevasse maailma. AUTONOOMIA on esimene oluline eeldus võitluseks kiiresti kasvava keskse juhtimise keerukusega. Selleks, et jõuda bioloogilistes süsteemides laialdaselt kasutatava iseorganiseerumise paradigma rakendamiseni tehissüsteemides, peame süsteemi komponentidele tagama mõõduka autonoomia.

vastavalt situatsioonile ja vajadusele teiste agentide teenuseid. Süsteemi kui tervikut käsitatakse füüsilises keskkonnas paikneva agendiperena ehk agentsüsteemina (ingl *multi-agent system*).

Edasises käsitleme lühidalt põhimõisteid, tutvustame proaktiivsete tehnoloogiate ja proaktiivse modelleerimise pilootrakendusi Eestis, anname lühilevaate proaktiivsete tehnoloogiate uurimise ja arenduse suundadest maailmas ja Eestis. Kokkuvõtte asemel, nähes tõsist ja põhjendatud vajadust proaktiivsete tehnoloogiate alase uurimis- ja arendustöö intensiivistamiseks ja sihipäraseks suunamiseks Eestis, esitame mõned soovitusel.

Kuna enamik tegevusi on võimalik läbi viia mitme erineva algoritmi põhjal, muutub süsteemi projekteerimise algetapil konkreetse algoritmi valikust märksa tähtsamaks see, kuidas me tegevuse tulemuse teistele asjast huvitatud osapooltele teatavaks teeme. Teiste sõnadega, interaktiivses süsteemis pole primaarne mitte konkreetsete algoritmide vaheline põhjuslik seos, vaid otstarbeka ja õigeaegse interaktsiooni korraldamine kahe algoritmi klassi vahel, mis sisaldavad kõikvõimalikke vajalike tööde tegemiseks sobilikke algoritme. See annab meile mõningase autonoomia konkreetsete algoritmide valimiseks igas konkreetsetes situatsioonis ja muudab primaarseks INTERAKTSIOONI korraldamise kahe algoritmi vahel.

Interaktsioonikesksete süsteemide näiteks on sard-süsteemid, arvutivõrgud ja eriti spontaansed arvutivõrgud (ingl *mobile, ad hoc networks*), autonoomsed robotid ning muud eespool kirjeldatud arvutirakendused, mis koosnevad selgelt eristatavatest komponentidest ja on vahetus interaktsioonis neid ümbritseva keskkonnaga. Niipea kui komponentidele lubada piiratud autonoomiat, muutub süsteemi kui terviku käitumine keerulisemaks. Terviku käitumist ei ole enam võimalik tuletada tema osade käitumisest, tekib nn ILMNEV KÄITUMINE (ingl *emergent behaviour*), mis lisaks komponentide omadustele sõltub ka komponentide

omavaheliste interaktsioonide dünaamikast ning komponentide interaktsioonidest keskkonnaga, mille kohta on olemas vaid osaline informatsioon. Ilmnevat käitumist saab vältida, kui süsteemi realiseerimisel pidada rangelt kinni algoritmiteooria eeldustest, kuid paljudel juhtudel ei rahulda selline süsteem tegelikke vajadusi.

Autonoomsete komponentide korral tekib võimalus sihipäraselt valida ja/või muuta komponentide reaktsioone ning neis toimuvat arutluskäiku. Selleks fikseeritakse tavaliselt igale komponendile eesmärk, mis on määratud tema sihifunktsiooniga. Kui komponent teeb enamuse oma otsuseid ja valikuid nii, et optimeerida oma sihifunktsiooni väärtust, on selline komponent proaktiivne.

PROAKTIIVSE SÜSTEEMI looja peaks oskama valida süsteemi komponente ja nende sihifunktsioone nii, et komponentide interaktsioonide tulemusena süsteem tervikuna optimeeriks oma sihifunktsiooni. Tingituna ilmneva käitumise olemasolust ja selle mõjust süsteemi kui terviku käitumisele ei ole see lihtne ülesanne ja hetkel puuduvad teoree-

tilised vahendid sellise ülesande üldjuhu lahendamiseks.

Proaktiivsete süsteemide ja komponentide korral on oluline koht ka situatsiooni mõistel ja komponendi/süsteemi situatsiooniteadlikkusel. Paljude muude parameetrite kokkulangemise korral võib SITUATSIOONITEADLIK PROAKTIIVNE SÜSTEEM [Liu, Tsui, 2006] sõltuvalt situatsioonist käituda täiesti erinevalt. Näiteks võib sama otsus ühes konkreetses situatsioonis olla tõene, teises aga väär. Situatsiooni iseloomustavate muutujate valik on vahetult seotud sihifunktsiooni argumentidega, komponendi ja/või süsteemi käitumisele seatud kitsendustega ja ka keskkonnale oluliste omadustega. Välisest dünaamiliselt muutuvatest faktoritest (st situatsioonist) sõltuva arvutusprotsessi formaalse kirjeldamise uurimine on maailmas alles algusjärgus.

Tänase päeva seisuga ei ole olemas vahendeid proaktiivse situatsioonitundliku süsteemi projekteerimiseks nii, et süsteem garanteeritult rahuldaks oma sihifunktsiooni ja samal ajal tema ilmnev käitumine jääks lubatud piiridesse.

## MÕNEDE PROAKTIIVTEHNOLOOGIATE PILOOTRAKENDUSTE NÄITEID EESTIS

Kaks esimest näidet on seotud interaktiivsete (geograafiliste) digitaalkaartide dünaamilise töötlemise agentsüsteemiga [Meriste jt, 2005; Preden, 2006]. Digitaalkaardi (digikaardi) rakendused põhinevad geneerilisel agentsüsteemide arenduskeskkonnal KRATT, mis on realiseeritud Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis ja on praktiliselt kasutatav tehnoloogiline lahendus. Kolmas näide viitab töödele, mis käsitlevad agenttehnoloogia rakendusvõimalusi molekulaarbioloogia nähtuste ja inimorganisatsioonide kirjeldamisel ning analüüsil ja keskendub esialgu pigem modelleerimise metodoloogiale ning mudeli analüüsi meetoditele kui mudeli sünteesile.

Interaktiivse digikaardi koostamise ja töötlemisega tegelevasse agentsüsteemi kuuluvad aluskaardi osi otsivad ja edastavad agendid, täiendavaid vektorikte edastavad agendid, kaardiobjektidega seotud lisainfot haldavad agendid, mobiilseid objekte jälgivad agendid ja teenistuslikud agendid. Pro-

aktiivne agendipere loob situatsioonile vastavate infokihtidega kaardi, ajakohastab regulaarselt sellel esitatud täiendavat informatsiooni ja mobiilsete objektide liikumist ning võimaldab kasutajal kaardile lisada täiendavat infot.

### MOBIILSETE OBJEKTIDE SEIRE (GPSga)

Firma on huvitatud oma autode liikumise jälgimisest. Iga üksiku auto jälgimiseks piisaks laialt levinud GPS-põhisest tarkvarast. Mitme auto jälgimisel on mõistlik, kui iga auto teavitab regulaarselt oma asukohast interaktiivset kaardisüsteemi. Interaktiivne kaardisüsteem kogub ja esitab saadud andmed ühisel kaardil. Selline pidevalt muutuv interaktiivne kaart peab arvutivõrgus olema tavapäraste vahenditega kättesaadav mitmele kasutajale samaaegselt. Iga kasutaja saaks interaktiivsel kaardil valida oma seirepiirkonna ja/või autode koosluse, mille kohta ta hetkel infot vajab. Sellise süsteemi prototüüpi arendab TÜ tehnoloogiainstituut koostöös firmaga Autoseir OÜ. Näitefrag-

ment Võrumaa interaktiivsest kaardist ja n-ö auto-infost on toodud joonisel 1.

#### MOBIILSETE OBJEKTIDE LOKALISEERIMINE JA SEIRE (ilma GPSta)

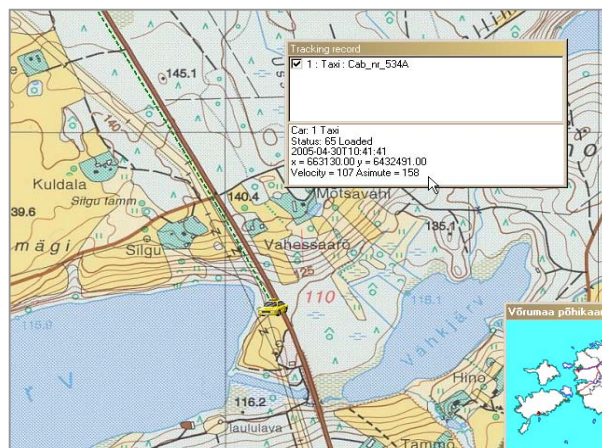
Paljudes kohtades ei ole GPS kasutatav – näiteks hoonetes, allmaarajatistes, suurlinnades ja muudes kohtades, kus GPS signaalilevi on raskendatud. Sellisel juhul tuleb eelnevalt tekitada teadaolevate koordinaatidega “majakatest” koordinaatvõrk, mille alusel saab määrata teiste objektide asukohta ja/või liikumist. Selline ülesanne tekib andmete kogumisel spontaanses andurite võrgust, nende andmete töötlemisel ja interpreteerimisel. Spontaanne andurite võrk (ingl *ad hoc sensor network*) moodustub laialipuistatud arupurust (ingl *intelligent dust, motes, etc.*). Situatsioonitundlikus rakenduses on kogutud info ühilduvuse hindamiseks oluline teada iga võrgu sõlme asukoht.

Sellises rakenduses on kasutatav sama Kaardikrati tarkvara, mis eelmises näites. Ainult aluskaardiks kasutatakse geograafilise kaardi asemel rajatise plaani või lihtsalt majakatest moodustatud koordinaatvõrku. Kirjeldatud probleemide uurimiseks on Tallinna Tehnikaülikoolis alustatud asukohtade dünaamiliseks määramiseks kasutatavate meetodite teoreetilist uurimist ja ehitatud ka eksperimentideks sobiv katsepolügoon [Preden, 2006].

Robotautol paiknev mobiilne spontaanvõrgu sõlm määrab kindlate koordinaatidega majakatega “vesteldes” oma asukoha koordinaatide hinnangud. Kui enda asukoht on teada, leitakse ruumis paiknevate statsionaarsete andurite asukohtade hinnangud (foto 1). Spontaanvõrgu sõlmede asukohad registreeritakse püsiühendusega arvutivõrgus paiknevas kaardiserveris koostataval interaktiivsel kaardil. Spontaanvõrgu sõlmede asukoha hinnangud kaardil paranevad järk-järgult ja alusplaani algsel puudumisel tekib pikapeale ka ligikaudne rajatise plaan. Tekkiv kaart on allalaaditav piisava arvutivõimsusega mobiilsele või paiksele spontaanvõrgu sõlmele (joonised 2, 3).

Samal katsepolügoonil realiseeritakse ka ITEA (*Information Technology for European Advancement*) projekti nr 05018 “Gene-Auto: Automatic

*Code Generation for Real-time Embedded Systems*” katseülesanne, mille eesmärgiks on katsetada automaatset koodigeneraatorit spontaanvõrgu sõlmede reaalaja tarkvara genereerimiseks.



Joonis 1. Interaktiivne kaart TÜ TI tarkvaras Kaardikratt.

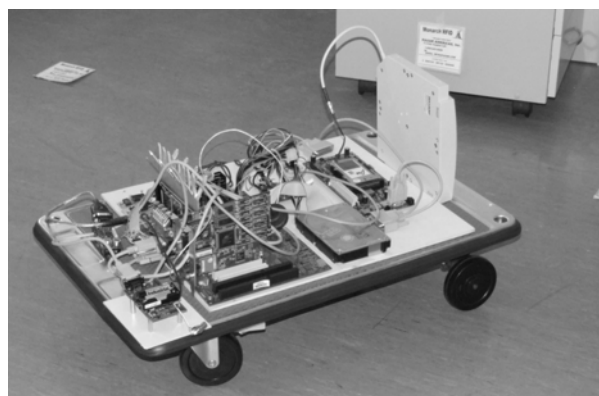
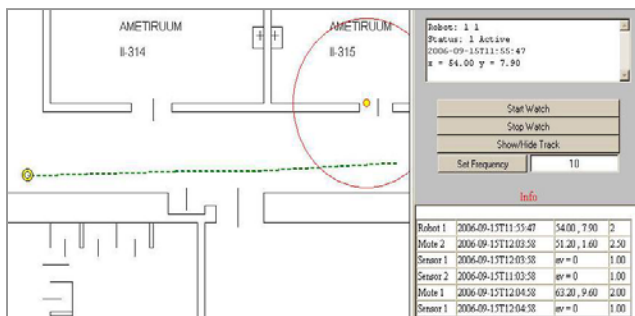
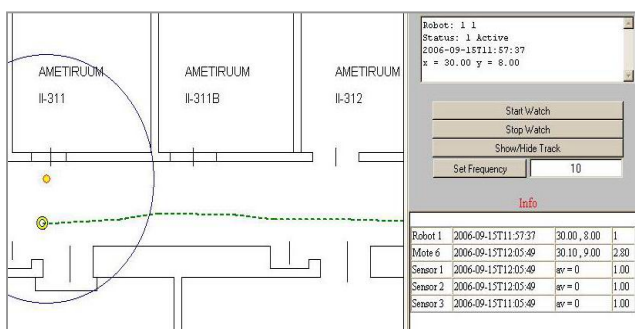


Foto 1. Robotautol asetsev juhtimisseade ja spontaanvõrgu sõlm, põrandal ja kapil on näha RFID silte.



Joonis 2.  
Spontaanvõrgu kaart hetkel 11:55:47.



Joonis 3.  
Spontaanvõrgu kaart hetkel 11:57:37.

## PROAKTIIVSE MODELLEERIMISE NÄITED

### RAKU METABOLISMI MODELLEERIMINE [Lints, 2005]

Üherakulise bakteri elutegevust on ligikaudselt modelleeritud agentsüsteemina. Esimeses lähenduses on agentsüsteemis neli ülimalt lihtsustatud kirjeldusel põhinevat ja üksteist mõjutavat agent –

## PROAKTIIVTEHNOLOOGIATE ARENDAMINE JA SELLEGA SEOTUD UURIMISTÖÖ

Proaktiivsete süsteemide ja tehnoloogiate arendamine on maailmas kiirelt uuenev tegevusvaldkond. Proaktiivsed tehissüsteemid on peaaegu eranditult tarkvaramahukad, mistõttu tänast otsingutestadiumi iseloomustab uute arvutuslike kontseptsioonide ja tõlgenduste paljus – *situation-aware, service-based, ubiquitous, pervasive, autonomous,*

tinglike nimedega Keskkond, Bakter, DnaA\_vabrik ja DNA. Keskkond on iseloomustatud bakterile sobiva toidu kogusega. Bakter haldab bakterisiseseid agente (DnaA\_vabrik ja DNA) ning pooldub, kui bakteri DNA dubleerimine on lõppenud. DnaA\_vabrik toodab DnaA valku sõltuvalt keskkonna tingimustest ja rakus olevatest aktiivsetest promootoritest ning DNA käivitab vajalike eeltingimuste korral DNA dubleerimise. DNA dubleerimise protsessi modelleerimine on esialgselt mudelist välja jäetud. Sellelgi poolest vastab neljast agendist koosneva süsteemi ilmnev käitumine kvalitatiivselt üsna täpselt katsetulemustele ning mõningase parameetrite sobitamise korral vastab mudel katsetulemustele ka kvantitatiivselt.

### ILMNEVA KÄITUMISE MODELLEERIMINE ORGANISATSIOONIDES [Savimaa, 2005]

Tegemist on dünaamiliselt muutuv keskkonnas opereeriva multifunktsionaalse keskkonnaga, mille tegevusele on reeglina seatud ranged ajakitsendused (näiteks politsei, päästeamet jne). Seni maailmas kasutusel olevad organisatsioonimudelid ei ole võimelised tekkinud ilmnevat käitumist piisava täpsusega analüüsima. R. Savimaa näitab [Savimaa, 2005], et uut tüüpi mudel, mis kombineerib traditsiooniliste organisatsioonimodelite head omadused ajatundlike arvutuste analüüsi ja proaktiivsete osade agentmudelitega, annab tegeliku käitumisega märgatavalt paremini ühilduva tulemuse. See võimaldab uut tüüpi mudelit kasutada organisatsiooni restruktureerimise plaanide analüüsil ja nii vältida väheefektiivseid (või isegi kahjulikke) ümberkorraldusi.

*agent-based* ja muud mittetraditsioonilised arvutuslikud kontseptsioonid. Proaktiivtehnoloogiate arendamise probleemidele lahenduste otsimine peegeldub erinevates uurimisvaldkondades erinevalt. Arvutiteaduses (*computer science*) on aktuaalseks arvutatavuse mõiste laiendamine – näiteks interaktiivse arvutuse mudelid ja situatsioonitundliku in-

teraktiivse arvutuse mudelid, mis märgatavalt laiendavad Church-Turingi "mõttes" arvutatavate funktsioonide klassi. Tarkvaratehnikas (*software engineering*) otsitakse uusi lahendusi süsteemide ehitamisel autonoomsetest ja proaktiivsetest komponentidest, jättes sealjuures komponentide adaptiivsusest ja õppimisest tekkivate spetsiifiliste nähtuste uurimise teistele erialadele, kuid üritades siiski tegelda ilmneva käitumise põhjuste väljaselgitamise ja mõjutamisega. Arvutiteadus ja tarkvaratehnika on kaks peamist võtmevaldkonda proaktiivtehnoloogiate väljatöötamisel ja edukal realiseerimisel.

Proaktiivtehnoloogiate arengut toetavad oluliselt ka agendisüsteemide, spontaanvõrkude, autonoomsete robotite, arukate seadmete ja materjalide (näiteks arupuru, ingl *intelligent dust*) ning viimastel aastatel taas esile kerkinud kompleksüsteemide (*complex adaptive systems*) uurimisvaldkonnad. Ilmekaks näiteks on nn bio-inspireeritud arvutused (ingl *nature-inspired computing* [Liu, Tsui, 2006]). Autonoomsete proaktiivsete komponentide rakendamine huvitab tarkvaratööstust nii uute rakendusalaade hõlmamise, tarkvaratootmise efektiivsuse parandamise kui ka toodete elujõulisuse (*viability*) tõstmise seisukohalt.

## MUJAL

Alates käesoleva sajandi algusest tegutsevad suured firmad sihipäraselt proaktiivsete tehnoloogiate arendamisel. Vaatame näiteks IBM *autonomic computing*, Microsofti initsiatiivi *universal plug and play* ja Inteli *proactive computing* uurimisprogramme [Want jt, 2003]. Need näited on otseselt seotud kõikjale tungiva arvutuse (*ubiquitous computing*) trendiga. Enamus loetletud initsiatiividest põhineb proaktiivsetel süsteemidel ja tehnoloogiatel, mis koos agendiparadigma (*agent-based computing*) süstemaatilise rakendamise [Luck jt, 2005] moodustavad toimuva läbimurde kontseptuaalse ja tehnoloogilise aluse. Eeltoodud olid puhta arvutimaailma näited, lisanäideteks muudelt aladelt võiksid olla arukad majad (*intelligent buildings*), turvasüsteemid, len-

nukitööstus, autotööstus, materjalitehnika (uute materjalide projekteerimine ja tootmine).

## EESTIS

Proaktiivsete komponentide ja süsteemide sihipärase uurimise ja katselise rakendamisega alustati Eestis möödunud sajandivahetusel. Tallinna Tehnikaülikooli reaalajasüsteemide grupi ja Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi agendilabori koostööst on välja kasvanud interdistsiplinaarne proaktiivtehnoloogiate uurimisrühm üksikisikutest koosneva koostöövõrgustikuga (Lüübecki, Kuopio, Toulous'e, Browni ja Connecticuti ülikoolid). See uurimisrühm osaleb mitmes rahusvahelises võrgustikus (näiteks ESF COST Action 295, ERANET projektis Complexity-NET). Sidemeid praktikaga toetab lepinguline koostöö mitme firmaga (Airbus, AlcatelAlenia Space, EADS Astrium, Siemens Automotive VDO, Microsoft Research, Plenware, Cril Technologies, IB Krates, Webmedia, Autoseire OÜ, OÜ Eesti Veeprojekt, OÜ Maatark, Eli OÜ) erinevate rakendusuringute vormis.

Eesti uurimisrühm käsitleb proaktiivset süsteemi kui interaktiivsete, autonoomsete, proaktiivsete komponentide (agentide) muutuva topoloogiaga võrku dünaamiliselt muutuvast keskkonnast. AGENT on süsteemi teatud kindla ülesandega komponent, millele on antud õigus ja võime seada oma volituste piires eesmärged ja mis võib käituda proaktiivselt nende eesmärkide saavutamiseks. Adegvaatseks käitumiseks süsteemi koosseisus peab autonoomne agent, sõltuvalt oma rollist süsteemis ja konkreetsest situatsioonist, oskama sobitada oma ontoloogia süsteemi teiste komponentide ja ka süsteemi kui terviku ontoloogiaga. Süsteemi komponentide interaktsiooniskeemid (ehk osalevate agentide ontoloogiatega kooskõlas olev infovahetus) ja situatsiooniteadlikkus vajavad samalaadset interaktiivselt kohanevat käsitlust.

Uurimishüpoteesi kohaselt moodustavad agentide situatsioonikäsitlused (teadmine ajast, kohast ja süsteemi olekust), interaktsiooniskeemid ja interaktsioonialalugu taustsüsteemi, mis võimaldab

seada kitsendusi agentide käitumisele ning reegleid ja tingimusi agentide ja süsteemi käitumise verifitseerimiseks. Rõhuasetus on seejuures hajustehisintellektile omasest üksikagendi intellekti kujundamise kesksusest nihutatud agentide grupi interaktiivsusele ja selle grupi situatsioonimõistmise käsitlemisele ning agentsüsteemi kui terviku organisatsioonile.

Süsteemi ja tema komponentide verifitseerimise formaalseks aluseks on situatsiooniteadlik interaktiivne arvutusmodell. Vastava mudeli väljatöötamine, uurimine ja arendamine on käimasolevate alusuuringute põhieesmärk. Hüpotees, mille kohaselt agendisüsteemi kui terviku ontoloogiat ja süsteemis osalevate autonoomsete agentide ontoloogiaid ühendavaks aluseks on agentide terviklikud situatsioonikäsitlused, on Eestis tekkinud ja senises uurimistöös kinnitust leidnud. Teisisõnu, vajatakse sellist interaktiivse arvutuse mudelit, mis kirjeldaks ka situatsiooniteadlike autonoomsete agentide ilmnevat käitumist. Meenutame, et ilmnevat käitumist on süsteemi käitumise osa, mida ei ole võimalik algoritmiliselt tuletada süsteemi ja tema komponentide staatilistest kirjeldustest.

Rakendusuuringud on suunatud tehnoloogiaplatvormi prototüübi arendamisele, tuginedes situatsiooniteadmisega interaktiivse arvutuse paradigmale ja realiseerides proaktiivseid pilootsüsteeme. Tehnoloogiaplatvormi prototüüp on realiseeritud agentsüsteemide ARENDUSKESKKONNANA KRATT, mis sätestab üksiku agendi ja/või agendisüsteemi arhitektuuri ning pakub vahendeid geneeriliste tarkvaraagentide programmeerimiseks ja häälestamiseks.

Arvutiteaduse traditsiooniline aparatuur on osutunud interaktiivse arvutuse kirjeldamisel sobimatuks. Algoritmilise arvutuse kontseptsiooni kohaselt ei tohi keskkonnas toimuvad sündmused mõjutada arvutust selle toimumise ajal (algoritmilise arvutuse mudelis eeldatakse, et kogu arvutustes kasutatav info on programmil teada juba enne arvutuste algust). Situatsiooniteadliku interaktiivse arvutuse uurimiseks vajaliku kontseptuaalse aluse moodustavad interaktiivse arvutuse

senituntud mudelid: Turingi c-machine (Turing, 1936), CCS (Milner, 1980), Q-mudel (Mõtus, 1983), CSP (Hoare, 1985),  $\pi$ -arvutus (Milner, 1992), atribuutautomaat (Meriste, Penjam, 1992), interaktsioonimasin (Wegner, 1995), püsiv Turingi masin (Goldin, 2004), jne. On tähelepanuväärne, et enamuse nimetatud mudeleid ei käsitle situatsioonitundlikku arvutust [Motus jt, 2005], vaid tavapäraselt interaktiivset arvutust. Erandiks on reaalarvutussüsteemide modelleerimisest välja kasvanud multivoo interaktsioonimasinat esitav Q-mudel ja kontekstitundlikku järjestikust interaktsioonimasinat esitav atribuutautomaat.

Situatsiooniteadliku interaktiivse arvutuse modelleerimise lähtekohaks on situatsiooniinfot esitavate täiendavate atribuutide lisamine autonoomse arvutusagendi lõpliku, aga fikseerimata pikkusega interaktsioonivoogude kirjeldustesse. See võimaldab sisse tuua situatsiooniatribuutide väärtustest sõltuvad verifitseerimisreeglid ja agendi valikuid piiravad kitsendused. Hetkel on selles töösuunas käsil ajateadmise interaktiivse arvutuse mudeli koostamine püsiva Turingi masina baasil, seda koostöös Lüübecki ülikooli (prof W. Dosch), Browni ülikooli (prof P. Wegner) ja Connecticuti ülikooliga (prof D. Goldin).

Uue mudeli keskseks osaks on SITUATSIOONITEADLIKE AGENTIDE INTERAKTIIVSE ONTOLOOGIA defineerimine. Sellise ontoloogia alusel on omakorda võimalik kirjeldada agendi (ja agentide koosluse) käitumise verifitseerimise meetodeid ning uurida agendi (ja agentide koosluse) dünaamilist reageerimist situatsioonidele. Tulemusena peaks tekkima võimalus moodustada situatsiooniteadlikest autonoomsetest agentidest avatud süsteem, mis realiseeriks eelnevalt spetsifitseeritud käitumise, tagaks ilmneva käitumise püsimise etteantud piirides ja garanteeriks nõutava töövoime.

Eksperimentaalne töösuund on käesoleva uurimistöö lahutamatu osa, mitte ainult abivahend teooria järelduste kontrollimiseks (nagu sageli arvutiteaduses). Arenduskeskkonnas Kratt realiseeritud eksperimente kasutatakse käesolevas uurimistöös

nii pilootsüsteemide tegemiseks erinevates valdkondades kui ka teoreetilise arvutusmudeli võimaluste ning tegelike proaktiivsete, interaktiivsete arvutussüsteemide vajaduste vastavuse kontrollimiseks. Arenduskeskkonnana on Kratil veel tublisti kasvuruumi, eelkõige seoses situatsiooniteadliku agendi ontoloogia, agendisüsteemi organisatsiooni kujunemise ning interaktiivse arvutuse omaduste uurimisega ja selleks vajalike analüüsimetoditega. Enamus seni Kratil realiseeritud agentsüsteemide näiteid on seotud erinevate digitaal kaartide rakendustega. Kuid see ei ole põhimõtteline ja on põhjustatud vaid olemasolevast tööjõust ning olemasolevate lepingute sisust. Digi-

## SOOVITUS

Arvestades proaktiivtehnoloogiate alal maailmas toimuvaid protsesse ning Eesti hetkepositsiooni nendes protsessides, tundub olema otstarbekas pöörata rohkem tähelepanu proaktiivtehnoloogiate alase uurimis- ja arendustöö sihipärasele edendamisele Eestis. See võiks anda Eestile ainulaadse võimaluse olla jätkuvalt uute kõrgtehnoloogiliste toodete ning nende valmistamise oskusteabe loomise ja väljaarendamise liidrite hulgas. Arvestades optimistlik-realistlikult meile iseloomulikku väga pikka reageerimisaega ja minimeeritud investeringumahte, suudaksime ehk mõneks ajaks jääda tipust mitte väga kaugemale. Igal juhul annaks proak-

## VIITED

Lints, T. 2005. Bakteri rakus toimuvate protsesside esitamine multiagentsüsteemina DnaA tiitrimise mudelil põhineva agentmudeli näitel, TTÜ automaatika instituut, magistritöö.

Liu, J., Tsui, K. C. 2006. Toward nature-inspired Computing. *Communications of the ACM*, 49, 10, 59-64.

Luck, M., McBurney, P., Shehory, O., Willmott, S. (eds.). 2005. *Agent Technology Roadmap*, Agentlink III.

Meriste, M., Motus, L., Kelder, T., Helekivi, J., Marandi, A., Preden, J. 2005. Location awareness

taalkaartide rakenduste tegemiseks on Krati osadest tehtud tööriist (Kaardikratt), mis on samal ajal geneeriline agentsüsteem ja ka spetsialiseeritud arenduskeskkond. Senised Kaardikrati abil realiseeritud rakendused on näiteks mobiilse aruka tolmu jälgimissüsteemi prototüüp, Tartu linna tehnovõrku infosüsteem, Eesti puurkaevude kaardiagentuuri prototüüp. Loetletud rakenduste põhjal uurime situatsiooniteadlike agentide ja nende dünaamiliste koosluste omadusi ning nende käitumist erinevates stsenaariumides. Kaardiagentide tehnoloogiaplatvormi arendamine on kujunenud omaette töösuunaks, kus vastavat agendiperet ja selle oskusi arendatakse mahukate rakendusuringute raames.

tiivsete tehnoloogiate arendamine ja (lähitulevikus) kasutuselevõtt Eesti teadusmahukale ja IT tööstusele pikemas perspektiivis märgatava konkurentsieelise.

Senine proaktiivtehnoloogiate alane tegevus Eestis on vaadeldav üksikute entusiastide hobina, mida on osaliselt toetanud mitmesugused finantseerimiskogud. Avaldame tunnustust sihtfinantseerimisteemade 0142509s03, 0182565s03 ja ETF grantide nr 6182, 4860 rahastamisotsuste tegijatele, Eesti Töökindlate Arvutisüsteemide Tippkeskusele, EITSA-le ja EAS-le käesolevas artiklis kirjeldatud tegevuste osalise rahastamise eest.

of information agents. *Advances in Databases and Information Systems*, Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science, 3631, 199-208.

Motus, L., Meriste, M., Dosch, W. 2005. Time awareness and proactivity in models of interactive computation. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 141, 69-95.

Preden, J. 2006. Communication area based positioning. *Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*. Proc. 3rd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 336-347.

Savimaa, R. 2005. Modelling Emergent Behaviour of Organisations. PhD thesis on Informatics and Systems Engineering, Tallinn University of Technology, TTÜ kirjastus, 212 pp.

Want, R., Pering, T., Tennenhouse, D. 2003. Comparing autonomic and proactive computing. IBM Systems Journal, 42, 1, 129-135.