

ARVUTITE JA REAALSE MAAILMA KOOSMÕJU UURIMISEST EESTIS

Leo Mõtus

Tallinna Tehnikaülikooli automaatikainstituut

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPI ARENG JA TEGEVUS (1984 – 2002)

RESÜMEE

Reaalajasüsteemide grupp koosneb TTÜ automaatika instituudi reaalajasüsteemide õppetooli inimestest ja IB Krates OÜ töötajatest. Algselt oli grupi huvi keskendunud reaalaja tarkvarale (st rakendustele, kus arvuti ja välismaailm suhtlevad ilma inimese vahenduseta) omaste nähtuste teoreetilisele analüüsile. Seoses arvutikasutuse valdkonna arenguga ja grupis omandatud uute teadmiste kasvuga on huvi laienenud ka agenttarkvara omapäradele ning kogu vaadeldava tarkvaraklassi teoreetiliseks aluseks olevale interaktiivsele arvutusele. Selles valdkonnas on alates 2001. aastast tekkinud koostöö TÜ Tehnoloogia instituudi infotehnoloogia osakonnaga. Artikkel annab ülevaate reaalajasüsteemide grupi arengust ja tegevusest, võimalust mööda võrdluses maailmas toimunuga. Teoreetilised tööd on tehtud peamiselt reaalajasüsteemide õppetoolis, praktilised realisatsioonid ja rakendused (näiteks AS Tallinna Vesi pumplate võrgu kaugseire, diagnostika ja juhtimine) aga IB Krates'es. Mitmed grupis väljatöötatud ideed on mõne aja pärast leidnud kasutamist OMG¹ poolt, näiteks:

1. teadaolevatel andmetel on Q-mudel teine interaktsioonikeskne ja esimene ajatundlik interaktsioonikeskne arvutusmudel maailmas;
2. meie grupp demonstreeris 1986. aastal, et interaktsioonikeskse arvutusmudeli esitamiseks loogikas on vaja kõrgemat kui esimest järku predikaatarvutust, oluliselt teist teed mööda jõudis sama väiteni P. Wegner (Browni ülikool, USA) 10 aastat hiljem;

¹ OMG (Object Management Group) on rohkem kui 800 tarkvara ja tarkvaratehnika tööriistu väljatöötava, tootva, ja/või kasutava firma konsortsium, mis koordineerib objekt-orienteeritud tarkvaratehnika arengut maailmas, standardiseerib toodete spetsifikatsioone ja nende liideid.

3. Q-mudeli tarbeks loodud ajamudeli põhiprintsiibid võeti 10 aastat hiljem kasutusele OMG toodete (CORBA², RT UML³) ajateenuseid pakkuva osa ajamudeli alusena;
4. meie grupis väljatöötatud ja katsetatud ajatundlike objektide idee leidis neli aastat hiljem pisut lihtsustatud kujul rakendust OMG poolt tellitud RT UML profiilis;
5. LIMITS⁴ ja OMT⁵ integreerimisel väljatöötatud ja katsetatud meetod (klassimudeli teisen-damine formaalseks verifitseerimiseks sobivaks mudeliks, verifitseerimine sellel mudelil ja korrigeeritud mudeli tagasiteisendus klassimudelis-se) on neli aastat hiljem leidnud rakendust RT UML profiilis ja on aluseks MDA⁶ ideoloogia väljatöötamisel OMG poolt.

² CORBA (Common Object Request Broker Architecture) on hajussüsteemide vahekihi spetsifikatsioon, mis võimaldab erinevates keeltes programme koostöö geograafiliselt hajutatud arvutisüsteemis (OMG toode).

³ RT UML (tegelikult UML Profile for Performance, Scheduling, and Time) on väljatöötatav UML (Unified Modelling Language) profiil, mis sobib ajatundliku tarkvara projekteerimiseks (OMG toode).

⁴ LIMITS – Reaalajasüsteemide grupis väljatöötatud tarkvaratehnika tööriist süsteemi ajalise korrektsuse analüüsiks, baseerub Q-mudeli teorial, on kasutatud õppe- ja uurimistööks mitmes ülikoolis.

⁵ OMT (Object Modelling Technique) oli üks peamisi UML tegemisel kasutatud eeskujusid.

⁶ MDA (Model Driven Architecture) on OMG uus tarkvaratehnoloogia projekt, mille kohasel tarkvara arendatakse algmudelist (spetsifikatsioon UML-s) lõppmudeli (objektkoodini) poolautomaatsete teisenduste abil infrastruktuurist sõltumatul platvormil.

MIS TOIMUB ARVUTITE JA TARKVARA MAAILMAS?

Arvutirakenduste mitmekesisuse ja neile esitatavate nõuete (näiteks, töö- ja veakindlus, muutuste sisseviimise lihtsus, vahetu side väliskeskkonnaga ja/või täielik kokkusulamine väliskeskkonnaga) ranguse kiire kasv on tekitanud vastuolu traditsioonilise arvutiteaduse poolt pakutava ja sisuliselt vajaliku ning seadusandlikult eeldatava (näiteks tarkvara sertifitseerimisel) analüüsivõimsuse vahel. Selle tulemuseks on tekkinud olukord, kus tarkvara praktilise loomise meetodid on arenenud kiiremini kui nende meetodite kasutamisel esinevaid nähtuseid selgitav teooria.

Arvutiteadust ja reaalselt maailma ühendab tehnoloogiline uurimisvaldkond nimega tarkvaratehnika (software engineering). Ülalnimetatud mittevastavus arvutiteaduse suhteliselt piiratud analüüsivõimsuse ja programmisüsteemidele vajalike omaduste töestamiseks vajaliku kirjeldus- ja analüüsivõimsuse vahel muutus 1970ndatel tarkvaratehnikas sedavõrd häirivaks, et tehti esimesed, osaliselt empiirilised, katsed loobuda arvutiteadusele omasest algoritmikesksest paradigmast ja keskenduda algoritmide interaktsioonile. Interaktsioonikeskse käsitluse näiteks on objekt-orienteeritud programmeerimise ja projekteerimise meetodid, aga ka märksa teoreetilised (kuid mitte algoritmikesksed) *Calculus for Communicating Systems* [1,2] ja Q-mudel [3,4]). Uudse lähenemise filosoofiliseks aluseks võib pidada H. Simoni poolt esiletoodud loodusteaduste ja tehismailma teaduste põhimõttelist erinevust [5].

Interaktsioonikesksuse idee on osutunud äärmiselt viljakaks ja suur osa kaasajal tegelikult kasutatavast arvutisüsteemide loomise tehnoloogiast põhineb sisuliselt interaktsioonikesksel mõttemallil. Kahjuks on üldjuhule sobiv interaktsioonikeskne arvutusmudel esialgu ikka veel empiirilisel matemaatilisel baasil, või siis kirjeldab üksikuid probleeme käsitlevaid erijuhtumeid. Esialgu puudub lihtne, kompaktne, piisavalt võimas ja formaalselt korrektne algoritmitooriat asendav üldistus, mis sobiks interaktsioonikesksete arvutusmudelite baasiks.

Rakenduste keerukuse kasv ja dünaamiliselt genereeruv (süsteemi osade sisemise mälu tõttu algoritmiliselt mittekirjeldatav) käitumine (inglise keeles *emergent behaviour*) on põhimõtteliselt uuritav interaktsioonikesksel arvutusmudelil. Lisaks öeldule

toob arvuti ning väliskeskkonna vahetu interaktsioon ja/või arvuti ja väliskeskkonna ühtesulamine (inglise keeles *ubiquitous computing*) kaasa vajaduse arvestada väliskeskkonnas esinevaid mittetäielikult teadaolevaid põhjuslikke seoseid, aga ka ajakitsenduste seadmise vajaduse mitmetele arvutisüsteemi funktsioonidele ning interaktsioonidele. Algoritmikeskne arvutiteadus ei ole võimeline käsitlema mittetäieliku informatsiooniga nähtusi ja eitab mitte-triviaalse aja vajadust. Seega on arvutirakenduste mitmekesisuse suurenemine ja nende tööülesannete muutus viinud olukorrani, kus traditsioonilise arvutiteaduse aluste mõningane muutmine on vältimatu.

Viimased kaksikümmend aastat on reaalarajasüsteemide grupp üritanud edendada interaktsioonikesksete arvutusmudelite kasutamist – alguses toimus see alateaduslikult, baseerudes peamiselt meie praktiliste kogemuste ja nende allikaks olevate nähtuste olemuse teoreetiliste selgituste mittevastavusele. Viimasel seitsmel aastal on meie liikumine toimunud üsna teadlikult, siin on vaieldamatult abiks olnud interaktsioonikesksete arvutusmudelite pooldajate arvu kasv maailmas ja ka agenttehnoloogia kasutamise levik tarkvaratehnikas eriti, aga ka süsteemide ehitamises üldse. Märkimisväärset mõju avaldasid P. Wegneri uurimisgrupi teoreetilised tööd (näiteks [6, 7]), OMG poolt arendatav praktikale orienteeritud arendustegevus, ja koostöö Merik Meriste grupiga Tartu Ülikooli Tehnoloogia Instituudist.

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPP EELMISEL SAJANDIL

EELLUGU (1984–1991)

Mitteformaalne moodustis tekkis 1984 (DESEG, *Distributed Embedded Software Engineering Group*), Küberneetika instituudi rakendusliku osa (EKTA) juurde. Selle perioodi peamised tulemused olid Q-mudeli matemaatiline formuleerimine, seos matemaatilise loogikaga, Q-mudelis kirjeldatud rakenduse analüüsi meetodid, ajalise korrektsuse uurimise tööriista prototüüp CONRAD.

Grupp korraldas 7 aastat regulaarseid suvekoole Eestis, millest neli olid rahvusvahelised (koos soomlaste ja rootslastega). Lühiajalised loengukursused Calcuttas, Tampere, Swansea's. Eellugu lõppes seoses enamuse DESEG-i liikmete üleminekuga EKTA-st TTÜ-sse (osaliselt tingituna Eestis alanud teaduskorralduse reformist).

KOOSTÖO WALESI ÜLIKOOLIGA (1987–1995)

Koostöö Walesi ülikooli Swansea kolledžiga algas juba 1980ndate aastate teisel poolel ja toimus British Council'i finantstoetusel. CONRAD-i rakenduste baasil kaitses Swansea's 6 doktorit, kellest üks töötab praegu TTÜ-s (Rein Paluoja). Lühiajalised kutsutud loengukursused Singapuri Nanyangi ülikoolis, Hong Kongi ülikoolis, Lawrence Livermore National Laboratory's on selle perioodi märkimisväärne tulemus. Koostöö Walesi ülikooliga lõppes, kuna Eesti teaduspoliitikud tegid British Council'ile ettepaneku lõpetada tehnikateaduste alase koostöö finantseerimine ja keskenduda Eestile olulisematele asjadele (majandus- ning humanitaarteaduste alasele koostööle).

TEGEVUS TTÜ-s 20-nda SAJANDI LÕPUNI (1995–2000)

CONRAD-is katsetatud ideede edasiarendamine jätkus EL Copernicuse programmi raames projektiga LIMITS. Tõnu Näksi ettepanek laiendada objekt-orienteeritud arenduskeskkonda IDE/OMT ajatundlike objektidega realiseeriti LIMITS-i ja OMT integreerimisega. Kuna reaalarjasüsteemide grupi liikmete arv oli selleks ajaks vähenenud kriitilise tasemeni (õppetoolis oli kaks inimest), langes tegevuse põhi-

raskus sellel perioodil õppetööle. Reaalarjasüsteemide tarkvara-alase õppetöö kaasajastamine ei leidnud TTÜ poolt erilist toetust (aga õnneks ei keelatud ka). TTÜ-sse tarkvaratehnika labori loomisel osteti (UML-il baseeruv) Artisan RT Studio tarkvaratehnika keskkond ETF grandid rahade eest ja kolm aastat maksti samast allikast ka 20 töökoha litsentsitasu.

Et säilitada väheseid allesjäänud grupi liikmeid ja siduda andekamaid tudengeid õppetooli temaatikaga pikemaks ajaks, asutati osaiühing IB Krates OÜ – peamiselt dünaamilise tööjõu liikumise haldamiseks, mis on eeltingimuseks europrojektide täitmisel (LIMITS, BRIDGE, MINICON) ja mis tol ajal käis TTÜ raamatupidamisele üle jõu. IB Krates on seotud ka muude rakendusliku iseloomuga tööde tegevusega ning võimaldab tudengitel kasutada õpitut tegelike probleemide lahendamisel.

Lisaks tavalistele konverentsi ettekannetele väärrib sellel perioodil esiletõstmist kutsutud ettekanne IEE Londoni peakorteris (Savoy Place), kutsutud ettekanne Dagstuhli seminaril High Integrity Programmable Electronic Systems, ja töötamine eksperdina Wrighti materjalitehnika labori (USA) teadusteema evalveerimisel.

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPP 21. SAJANDI ALGUSES

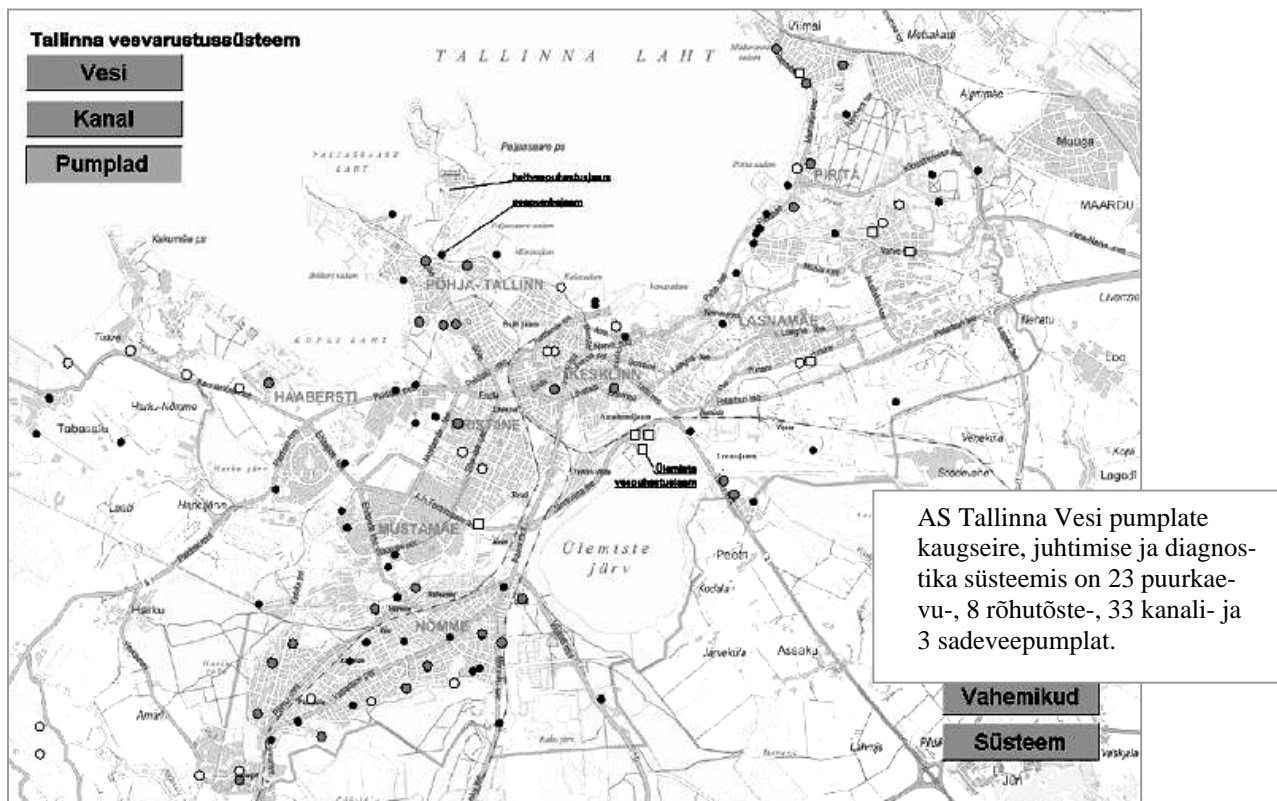
Põhimõtteliselt on jätkunud eelmisel sajandil alustatud tegevussuunad. TTÜ õppetöös kasutatud tasuta tarkvaratehnika keskkond õnnestus asendada tasuta kasutatava *Rational Rose* keskkonnaga – tänu kontaktidele *Rational Software Inc* saime lepingu tarkvaratehnikast huvitatud Eesti ülikoolide liitumiseks programmiga SEED (*Software Engineering Education Development*), mis tagab nimetatud tarkvara tasuta kasutamise õppe- ning uurimistöös. Seni on Eesti poolt huvi avaldanud Tallinna Tehnikaülikooli automaatika instituut ja Infotehnoloogia Kolledž.

Rahvusvaheline koostöö RT UML väljatöötamise alal on laienenud – lisaks OMG-le on seda hakanud toetama ka IFAC (*International Federation of Automatic Control*), mille üks tehniline komitee (*TC on Real-time Computing Systems*) on moodustanud töörühma (*WG on Real-time Software Engineering*). Töörühma esimeheks aastateks 2002–2005 valiti L. Mõtus, kes on endiselt reaalarjasüsteemide grupi

esindaja kolme rahvusvahelise kirjastuse (Elsevier, Kluwer, ja IOS Press) teadusajakirjade toimetustes ning Eesti TA tehnikatoimetiste toimetuskolleegiumi liige. Uurimisprogrammi loomuliku evolutsiooni tulemusena on 21. sajandi märksõnad agenttehnoloogia, keneetiline süsteemi projekteerimine, ontoloogia ja interaktsioon. On tekkinud stabiilne koostöö TÜ tehnoloogia instituudiga ja tekkimas on koostöö TTÜ mehhatroonikainstituudiga.

IB KRATES OÜ TEGEVUSE NÄITEID

Lisaks tarkvaraarenduskeskkonna LIMITS-PC arendusele ja hooldusele (vt ülalpool, mis on senini TTÜ õppetöös kasutusel) on tegeldud otsesest uurimistööst näiliselt kaugemate teemadega, keskendudes peamiselt kahele suunale. Jätkuvalt on uuritud erinevate tarkvaraarenduskeskkondade kasutamise efektiivsust ja arendatud uusi töövahendeid – näiteks *Rational Rose Real-time* keskkonna kasutami-



ne ajastamise uurimisel (AS Tallinna Vesi näitel, Kristjan Sillmann), osalus andmebaaside arendusvahendi AFRA täiendamises (T. Näks, Maria Jürimaa), RJG keskkond võrgurakenduste kasutajaliideste tegemiseks (Viljar Vahter). Viimane nimetatud keskkondadest on katse kasutada agentarhitektuuri võrgupõhise kasutajaliidese realiseerimiseks.

Teine ja oluliselt kandvam suund on PLC-põhiste juhtimis- ja jälgimissüsteemide realiseerimine. Üks suuremaid rakendusi on AS Tallinna Vesi kanalisatsiooni- ja veevõrgu kaugvalvesüsteem, mille realiseerimisel on kasutatud mitmeid unikaalseid komponente ja meetodeid. See süsteem on võimaldanud katsetada ka teooriate toimimist praktikas, näiteks kontrollerite kellade sünkroniseerimine, Rose-RT vahendite kasutamist modemsidega andmehõivesüsteemi modelleerimisel, tööstuslike andmesideprotokollide kasutamist PSTN ja GSM võrgus (Toomas Tommingas).

Mitmeid selle valdkonna praktilisi probleeme kasutatakse näiteülesannetena õppetöös – tööstusliku andmeside ja arvutivõrkude laborites.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Milner, R.A. Processes: A mathematical model of computing agents. Rose, H.E., Sheperdson, J.C. (eds.). Logic Colloquium'73, North-Holland, 1975.
2. Milner R.A. A calculus of communicating systems. LNCS, 1980, 92, Springer Verlag, 171 pp.
3. Quirk, W., Gilbert, R. The formal specification of the requirements of complex real-time systems, AERE, Harwell, 1977, rep. no. 8602.
4. Motus, L., Kaaramees, K. A model-based design of distributed control system software. Distributed Computer Control Systems, Proc. 4th IFAC Workshop, Pergamon, 1983, 93-101.

5. Simon, H. The science of the artificial. MIT Press, 1969, 231 pp. (revised publications, 1981, 1996).
6. Wegner, P. Interaction as the basis for empirical computer science. ACM Computing Surveys, 1995, 27, 5, 80-91.
7. Wegner, P., Goldin, D. Co-inductive models of finite computing agents. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 1999, 19, www.elsevier-bl/locate/entcs.

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPI OSALUSEL
21. SAJANDIL KIRJUTATUD ARTIKLITE
NÄIDISEID:

Meriste, M., Motus, L. On models for time-sensitive interactive computing. International Conference on Computational Science, LNCS, Springer Verlag, 2002, 2329, 156-165.

Motus, L., Meriste, M. Towards time-awareness of self-organising systems. Proc. International Conference in Infrastructure for Electronic Business, Science and Education on the Internet, L'Aquila, 2001, 6 p., CD.

Motus, L., Meriste, M. Towards self-organising time sensitive control system's software. Proc. IFAC Conference on New Technologies in Computer Control, Hong Kong, 2001, 236-241.

Motus, L., Meriste, M., Kelder, T., Helekivi, J. An architecture for multi-agent system test-bed. Proc. IFAC Congress, July 2002 (to be published).

Motus, L., Meriste, M. Some remarks on time modelling in interactive computing systems. International Conference on Advances in Infrastructure for Electronic Business, Science, Education and Medicine on the Internet, July-August 2002, L'Aquila, 7 p., CD.

Motus, L., Naks, T. Time models as used in Q-model and suggested for RT UML. Proc. 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics, and Informatics, Orlando, 2001, XI, 467-472.

Naks, T., Motus, L. Real-time behaviour verification, animation and monitoring starting from DCCS specification. Proc. IFAC Symposium on Distributed Computer Control Systems, Elsevier Science Ltd, 2000, 85-92.

Naks, T., Motus, L. Handling timing in a time-critical reasoning system – a case study. Annual Reviews in Control, 2001, 25, 157-168.

Savimaa, R. On modelling emerging behaviour of multifunctional non-profit organisations. 11th International Conference on Information Systems Development, September 2002, 12 p. (to be published).

Selic, B., Motus, L. Modelling of real-time software. 25 p. (to be published).