





Tarmo Uustalu

Sündinud 19.01.1969 Tallinnas

- 1987 Tallinna 44. Keskkool
- 1988 Georg Otsa nim Tallinna Muusikakool
- 1992 tehnikateadustemagister süsteemitehnikas ja informaatikas, Tallinna Tehnikaülikool
- 1995 Lic arvutiteaduses, Kuninglik Tehnikaülikool (Stockholm, Rootsi)
- 1998 PhD (arvutiteadus), Kuninglik Tehnikaülikool (Stockholm, Rootsi)

Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudi vanemteadur ja Minho Ülikooli (Braga, Portugal) järel doktorant

Uurimisvaldkonnad: loogika meetodid arvutiteaduses, programmikeelte teooria, programmide analüüsi ja konstrueerimise formaalsed meetodid

Avaldanud 21 teaduspublikatsiooni

Tarvitan mulle hoitud tekstimahtu selleks, et pisut kirjeldada oma eriala ainest ning mõtiskleda tema missiooni ja tuleviku üle teaduse sees, samuti ühiskonnas, mis millegipärast parasjagu arvab, et lahenduseks tema probleemidele on infotehnoloogia. Põhjus, miks nõnda valin, on lihtne. See võib kõlada võimatu, kuid arvutiteaduse kohta ei teata populaarsel tasemel praktiliselt midagi. Arvatakse jah, tõsi, kuid arvamised on tavaliselt kallutatud kas mälestusest selle kohta, mis arvutiasjandus 30 aastat tagasi oli, st peamiselt mure selle üle, kuidas suuri homo-geenseid andmemasse vähema valu ja vaevaga automaatselt töödelda, või siis eelarvamusest, nagu oleks arvutiteadus samane praegu kõva kõra tekitava infotehnoloogiaga, mis iganes siis viimane täpselt ka poleks. Füüsika on teadus tõesti ja arstiteadus on teadus, aga arvutiteadus?... Mis kasu sest on, mida sa teed? Mida sa õieti müüd?... Oo, arvutiteadlane, kui huvitav! Mul on ka kodus Internet...

Arvutiteadlasele ei ole "reaalses maailmas" mitte just lihtne seletada, millega ta tegeleb. Õige ruttu küsitakse temalt, kust head arvutit odavalt saab või kuidas üht või teist masinaga tekkinud arusaamatust lahendada. Ja arvutiteadlane jääb kergesti hätta, sest pole ehk iial ühtegi arvutit ise ostnud ega oska ka mingit mõistlikku nõu anda õnnetule, kes tekstiredaktorit, meilerit, brauserit ega operatsioonisüsteemi üksteisest eristada ei oska ja ammugi ei tea, milliseid ta kasutab. Kui siis abivajaja on vähegi enesekindel (tavaliselt on), kujundab ta arvutiteadlastest endale edasi rumala akadeemiku mulje, kes tegelikkusega üldse kursis ei ole. Ning kui ta lisaks kuuleb veel, et arvutiteadlane kõrgkoolis õpetab, aga ise on poliitik, muutub ta murelikuks sellealase koolituse taseme üle riigis ja hakkab seda reformima.

Teadusringkonnas on arvutiteadlane ka omapärasel positsioonis, sest tema eriala jääb teiste vahele. Arvutiteadlane võib olla praktiliselt matemaatik, kuid pole harv, et "pärismatemaatikud" teda oma kampa ei võta põhjendusega, et arvutiteadlase matemaatika ei ole "päris", on "infotehnoloogiline". Tehnikateadlastele on teoreetilise orientatsiooniga arvutiteadlane ka võõras, kuid vastupidisel põhjusel: arvutiteadus pole tehnika, on puhas matemaatika, rakendamatu ja raskepärane. Arvutiteadlane ise tunneb ennast enam matemaatikuna, aga õnnetu on ta siiski ka selle üle, et insenerid tema tegevusest

lugu ei pea. Sest oma meelest edendab ta teooriat, mis tarkvara-inseneridele peaks sobivaks tööriistaks olema täpselt samuti nagu teoreetiline mehaanika seda on mehaaniliste konstruktsioonide projekteerimisel.

Millega arvutiteadus siis tegeleb ja millest huvitun mina? Alustaksin väga tähtsast terminoloogilist laadi märkusest. Nimetus "arvutiteadus" on eksitav! Arvutiteadus (inglise keeles "computer science") on uurimisala, mille aineseks on peaausjalikult arvutamine, algoritmid ehk eeskirjad arvutamiseks ning programmeerimine ehk niisuguste eeskirjade esitamine keeleliste vahenditega. Arvuteid kui masinaid nende füüsilise konstruktsiooni tasemel arvutiteadus ei uuri. Sellega tegeleb arvutitehnika (inglise keeles "computer engineering"). Kuigi nimed võivad jätta mulje vastupidisest, pole arvutiteadus puhas loodusteadus ega arvutitehnika puhas tehisteadus, kummaski on nii loodusteaduse kui ka tehisteaduse elemendid. Kuid arvutiteadus on matemaatilisem, arvutitehnika füüsikalisem, nii analüüsi kui ka konstruktsiooni poole pealt.

Ajalooliselt kujunenud nimedes suurt süsteemi ei ole. Seetõttu on oluline meeles pidada, et sisuliselt õigem oleks arvutiteadust kutsuda "arvutamisteaduseks". Tegelikus keelepruugis aga on "arvutiteadus" läbi lõõnud ning vaevalt seda enam saab ja tasub muuta. Inglise keeles siiski on täpsem nimetus "computing science" üsna laialt kasutusel. Alternatiivne nimi "informaatika" on eesti keeles valdavalt, kuid mitte universaalselt kasutusel "arvutiteaduse" sünonüüm. Ta võib osutada ka kitsalt (majandusalasele) infotöötusele või väga laialt peaaegu kõigele arvutitega seonduvale, umbes nagu "infotehnoloogiaga". Seda sõna sellepärast väldin. Inglise keeles "informaatika" sõna üldiselt ei pruugita ning infotöötlus on "information processing". Sakslaste, prantslaste, itaallaste jaoks on "informaatika" arvutiteadus, kuid nt skandinaavlaste jaoks on tal jällegi üheselt "infotöötluslik" tähendus.

Et arvutiteadus on noor, siis ei ole tema sisemine ülesehitus ilmselt veel lõplikult välja kujunenud, selles on üsna mitmesugust haralisust ja ebahühtlust. Kuid teatud uurimisvaldkonnad on selgelt eristatavad: arvutiarhitektuur, võrgud ja hajusarvutamine, operatsioonisüsteemid, paralleelne arvutamine, automaatide ja grammatikate teooria, kompilaatorid,

algoritmid ja andmestruktuurid ning keerukus, programmeerimiskeelte teooria, (programmide verifitseerimise ja konstrueerimise) formaalmeetodid, tarkvaratehnika, andmebaasid ja infosüsteemid, inimene-arvuti-interaktsioon, arvutigraafika, tehisintellekt. Tehisintellekt on selles reas mõnevõrra erandlik, kuna koosneb reast kitsastest omavahel sidumata valdkondadest, mida ühendab ainult arvutiteaduse lapsepõlves ekslikult kohe-kohe realiseeritavaks hinnatud eemärk teha masinaga järgi inimene. Tehisintellekti liigituvad näiteks teadmiste esitamine ja nende üle arutlemine, masinõppimine, loomulike keelte töötlus, kujunditöötlus ja masinnägemine, robotika, närvivõrgud.

Sageli nimetatakse arvutiteaduse sees eraldi valdkonnana ka teooriat. Nimetus "teooria" on muidugi släng, sest mingisugust teooriat tehakse ju igas arvutiteaduse osas. "Teooria" sõna abil viidatakse arvutiteaduse sees paarile valdkonnale, kus oluliselt kasutatakse matemaatikat ning mille sihid on üldreeglina suunatud rohkem süstemaatilisele ja süviti arusaamisele asjadest kui mingitele rakendustes kogemata esile kerkinud probleemide lahendamisele esimesel parasjagu sobival viisil. Teooriat on laias laastus kahte sorti: teooria algoritmides, andmestruktuurides ja keerukuses ning programmeerimise teooria ehk semantika. Esimest nimetatakse vahest ka ameerika teooriaks, teist euroopa teooriaks, vastavalt sellele, kus kumba rohkem viljeldakse. Algoritmides ja andmestruktuurides on fookuses arvutuseeskirjad kui sellised, küsimused sellest, kuidas eri klasside ülesandeid kõige efektiivsemalt lahendada ja mis on õiged efektiivsuse mõõdupuud. Semantikas seevastu on sihikul probleem, kuidas etteantud arvutuseeskirju hästi üles kirjutada. Kujundlikult öeldes: algoritmides ja andmestruktuurides mõtleb arvutiteadlane sellest, kuidas tema üht või teist ülesannet lahendada, kui ta oleks arvuti. Semantikas annab arvutiteadlane endale aru, et ta tegelikult arvuti ei ole ning iga arvutuseeskirja edasiandmiseks arvutile peab ta kasutama ... keelt. Sellest räägin lähemalt, kuna minu uurimisalaks ongi nimelt teooria semantika-pool.

Miks peaks arvutit tüürima keele abil? Ega see absoluutselt vältimatu polegi, kuid nii on valitud – nn pehme ("soft") juhtimine tähendab kontrolli keele abil – ning keel on kahtlemata väga sobivat liiki vahend arvutava masina instrueerimiseks. Põhjusi on mitu: keel on inimesepärane suhtlemise vahend, keel on (potentsiaalselt) universaalne, keeled (mitte küll loomulikud keeled, aga rangemalt reglemen-

teeritud, formaalsemad keeled) alluvad hästi matemaatilisele uurimisele. Oma ideede vahendamine arvutile nt ainult jootekolvi abiga oleks kindlasti tunduvat ebaloolumikum ja võimaluste poolest piiratum kui keele kasutamine selleks. Keeltel on ka see hea omadus, et nendest saab hõlpsasti moodustada tasemete "torne": kui teatud keele tähendus on kuidagi paika pandud, siis järgmise taseme keele tähenduse fikseerimiseks piisab tõlke andmisest teisest esimesse. Sedasi tuleb konkreetse taseme keele mõistmiseks ainult tõlkeid vallata ning madalaima taseme keelt osata (see oskus võiks soovitatult olla n-ö kaasa sündinud).

Idee arvutuseeskirjade keelelisest esitamisest seob arvutiteaduse lingvistikaga, filosoofilisema poole pealt keelefilosoofia ja iseäranis tähendusteooriaga. Väga tähtis on arvutiteadusliku semantika jaoks matemaatiline loogika. Esimeseks põhjuseks on, et loogikad on programmeerimisele väga lähedane klass keeli oma formaalsuse poolest ning palju loogikas avastatud ideid (nagu keeledeisaini headuse kriteeriumid, keelte semantika esitamise võtted) on seetõttu programmeerimisele üle kantavad. Loogika oli ajalooliselt esimene koht, kus lingvistika ja matemaatika põkkusid. Ent programmeerimine on loogikaga seotud palju konkreetsemaltki: teatud loogikad on otseselt vaadeldavad programmeerimise keelena (nende puhul võib kõnelda programmeerimisest loogikas), teised jälle keelena arvutustest ja/või programmeerimisest rääkimiseks (arvutamise ja programmeerimise loogikad). Nende samastuste sedastamine on tähendanud radikaalselt uute arusaamadeni jõudmist arvutamise ja arvutuste eskirjastamise erinevate mudelite kohta ning siin on arvutiteadus veel poolel teel. Loogika ja arvutiteaduse teooria-osa on teineteise arengut väga tugevasti katalüüseinud ning see areng jätkub. Mina ootan arvutiteaduslikult loogikalt palju ning näen, et sellel alal on intensiivse arengu ruumi vähemalt paarikümneks aastaks. Miks ma nii arvan?

Põhjus on lihtne. Distsipliini sisemise arengu poole pealt on väga palju otsi veel lahtised ning jätkamise maad piisavalt. Arvutamise ja arvutuseeskirja mõisted on ju matemaatika jaoks väga uued, neid hakati tõsiselt uurima alles pärast arvutite leiutamist. Samas ei ole nad kõrvalised või triviaalsed. Vastupidi, nad on väga tsentraalsed ning sügavad mõisted, millel on sisu ka sõltumata seosest arvutite kui füüsiliste masinatega. Arvutite tekkimine ainult tõmbas nendele tähelepanu. Toon ühe näite isiklikust uurimistööst. Võiks arvata, et niisugune asi nagu termineeruvad rekursiivsed funktsioonide defineeri-

mise skeemid peaks matemaatiliselt ammu lõpuni selge olema. Kuid ei ole! Neid uuritakse tüübi- ja kategooriateooria vahenditega paljudes arvutiteaduse osakondades üle maailma ning lõpetatud teooriast on asi kaugel. Teemaderingid, mis klassikalises matemaatikas olid võib-olla nii kõrvalised, et klassifitseeriti tühjadeks nendele lähemalt mõtlemata, on osutunud sedavõrd komplitseerituiks ja sügavaiks, et pakuvad uurimisainest veel pikaks ajaks. Ning vähesellest, et nad selged pole ja seepärast teoreetilist huvi pakuvad. Küsimärgid tekitavad tegelikku tüli "reaalses elus". Võtmeotsused tegelikult kasutamiseks mõeldud programmeerimise disainis sõltuvad vastustest matemaatilistele küsimustele.

Välise poole pealt sunnib programmeerimisteooriat jätkuma hädavajadus. Nn tarkvarakriisist on tänaseks räägitud pidevalt juba kolmkümmend aastat, kuid lahendust pole leitud. Kuigi arvutite riistvara (s.o arvutisüsteemide füüsiliste komponentide) areng on olnud tohutu kiire ja ainsaks piiranguks edasisele arengule tunduvad olevat füüsika seatavad kitsendused, pole midagi sellega ligilähedaseltki võrreldavat toimunud tarkvara (programmide) osas. Situatsioonid on siin ka erinevad. Uut riistvara peavad konstrueerima õige vähesed ning nõutav hulk spetsialiste, kes sellega toime tulevad, on alati leitav. Riistvara loomine võib olla väga kallis, kuid see tasub ennast ära, kui sama riistvara kasutavad väga paljud, mis tavaliselt nõnda on. Tarkvara seevastu aga on vaja tohutult rohkem, selle loomine peab olema jõukohane massidele. Samas on sama tarkvara kasutajaskond väike, mistõttu tarkvara kirjutamine ei tohi minna ülearu kalliks. Tänapäevane seis tarkvaratööstuses on üsna masendav. Tarkvarainseneridest on puudus kõikjal maailmas ning suure osa müüdava tarkvara (ka kõige massilisema) kvaliteet on seetõttu allpool kriitikat. Muudes tööstusharudes poleks niisuguse kvaliteediga kaupa üldse võimalik müüa. Olukorda ei saa radikaalselt muuta muu kui väga head (väljendusvõimsad, kuid samas nii inimese- kui ka masinasõbralikud) programmeerimise ja väga head vahendid programmide verifitseerimiseks (st nende õigsuse kontrollimiseks). Neid programmeerimise teooria otsibki ja siin paistab valgust. Headeks näideteks on uue põlvkonna funktsionaalkeeled ning tööstusülesannetele skaleeritavad uued programmide verifitseerimise meetodid nagu mudelikontroll. Tähelepanu väärib fakt, et nii funktsionaal-programmeerimine kui ka mudelikontroll on otseselt loogikapõhised meetodid.

Matemaatika kasutamisele arvutiteaduses on muidugi ka vastaseid, kes ütlevad, et matemaatika ei saa

kuhugi viia, insenerid ei õpi seda niikuinii iialgi ära, kuid see on minu meelest väga ohtlik seisukoht, mis osutab sedalaadi õpetajate täiesti isiklikkudele hirmudele. Tarkvaratehnikasse tema standardesituses on juba sisse libistatud ebaproportsionaalne osakaal määndžeriõpetust ja muud taolist pehmet tarkust, mis on distsipliinile toonud peaaegu et soolapuhumise (kuri)kuulsuse arvutiteaduse sees. Loomulik on, et iga insenerivaldkonna õiged spetsialistid oskavad projektijuhtimise kõrval ka selle valdkonna matemaatikat. Kui tarkvarainsenerid kuidagi kergemini pääseda saaksid, oleks tarkvara konstrueerimine küll väga erandlik insenerikunst.

Mis toimub arvutiteaduses Eestis? Eesti arvutiteadus on väike ning sünnib peamiselt Tartu Ülikooli arvutiteaduse instituudis ja Tallinnas Küberneetika Instituudis, kuigivõrd ka Tallinna Tehnikaülikooli automaatika, arvutitehnika ja informaatika instituutides. Eestis tehtav arvutiteadus on ajalooliselt olnud tugevalt tehisintellektlik (teadmispõhised süsteemid, loomulike keelte töötlus), kuid temas on ka väike programmeerimise ja formaalmeetodite traditsioon, mida isiklikult loodan kasvavat, ning väga noor, kuid see-eest jõudsalt edasiliikuv suund krüptoloogias, mis liigitub algoritmidest, andmestruktuuride ja keerukuse alla. Krüptoloogia-alane uurimistöö on paigutunud Küberneetika ASI. Eesti arvutiteadusel on ka loogika algus olemas, mille kujunemisel oli määrav mõju praegusel Stanfordi Ülikooli professoril Grigori Mintsil. Teoreetikute hulk on eesti arvutiteaduses väike ning piirdub tosinkonna inimesega, kes kõik üksteist hästi tunnevad.

Kas nii väikest teadust tasub ülal pidada ja toetada? Mina arvan, et tasub absoluutselt ning on hädavajalik. Sest kui arvutiteaduslik uurimistöö ülikoolides ei toimu heal tasemel, siis ei saa ka kõrgastme spetsialistide väljaõpe seal olla hea. Ning kui see ei ole hea, siis ei saa ka kesk- ja alamastme tarkvaratehnoloogide koolitus olla hea, sest nendele ei jagu õpetajaid. Haridussüsteem on oma ehituselt püramiid, mis ei saa olla tõmp. Ei saa ehitada laia põhjaga püramiidi, millel puudub kõrgus. Meil on praegu riiklikul tasemel leitud, et keskastme infotehnoloogiaspetsialistide napib, mis kahtlemata on tõsi. Kuid arvata, nagu saaks loodav IT-Kolledž oma ülesannet hakata hästi täitma, kui arvutiteaduslik uurimistöö ja kraadiõpe ülikoolides on jäetud hooletusse, on väga-väga naiivne. Arvutiteadust tasub toetada ka seetõttu, et arvutiteaduslik uurimistöö on oma matemaatilise loomu tõttu odav – maksab võrreldamatult vähem kui näiteks geeni- või materjalitehnoloogia, või füüsika mitmesugused harud, mis Eestis on

tugevalt esindatud. Oma tähtsus on ka asjaolul, et paari viimase aasta jooksul on arvutiteaduses välismaal doktorikraadi kaitsnud rida noori, kes hea meelega asutaksid end tööle Eestisse, kui eriala perspektiiv vähegi kindlam paistaks kui hetkel. Eesti arvutiteaduse kiirest kasvamisest huvitatud noorte tuumik on praegu väga motiveeritud, paari aasta pärast võib olukord olla hoopis teistsugune.

Milline on arvutiteaduse vahekord infotehnoloogiaga? See on väga intrigeeriv küsimus, millele heameelega tahaksin kuulda vastust. "Infotehnoloogia" sõnast on saanud mantra ning mantratele on iseloomulik, et nende tähendus on teadmata või unustatud. Moesolevad sõnad hägustuvad sisu poolest alati, kuna kõik püüavad neile iseendale kasulikku tähendust omistada. Kuid "infotehnoloogia" on täiesti fenomenaalne. Isegi etimoloogia on sellel sõnal tuvastamatu. Olid infotöötlus, informaatika, arvutiteadus ning millalgi 1990. aastate keskel hakati ühtäkki rääkima infotehnoloogiast. Olen kuulnud versiooni, et "infotehnoloogia" leiutati eurokraatide poolt. Ma ei imestaks, kui see nii olnukski, kuid ei ole suutnud seda kontrollida. Ametlikult näib infotehnoloogia tähendavat "ühiskonna arvutifitseerimist" mitmesuguste suurejooneliste "progressiivsete" eesmärkide nimel. Tegelikkus on siiani olnud siiski märksa üheülbalisem. Infotehnoloogia märgatavam osa on suuresti seisnenud interneti täitmises meedia- ja meelelahutustööstuse teenustega. Miks infotehnoloogia madalalaubaline peab olema (nagu ühes intellektuaalsema kallakuga diskussioonilistis hiljuti teravalt väljenduti), on omaette kultuurifenomen, mida sotsioloogid suudavad analüüsida. Isiklikult usun, et arvu-

tite ja sidevahenditega võib teha palju rohkem kasulikku, kui suurem osa infotehnoloogia-tootjaid ja -turgu ette kujutada oskavad, ning süvitiminekut austava matemaatikuna olen mõnevõrra õnnetu, et infotehnoloogia üha enam ja enam assotsieerub pealispindse levikultuuriga.

Samas olen optimist ja loodan, et kümne aasta pärast, kui infotehnoloogia asemel on populaarses moes miski muu, saame praegusele ajale tagasi vaadata palju objektiivsemalt ning ausalt hinnata seda, mis tast pealispinna all välja arenes. Tean ju, et arvutid ei sisusta mitte ainult inimeste vaba aega, vaid täidavad ka palju kriitilisemaid ülesandeid. Populaarsel infotehnoloogial on ilmselt suured muutused ees. Mitu-mitu aastat oli väikeste nn internetifirmadega, millel igasugune materiaalne ja tegelikult ka intellektuaalne kapital puudus, võimalik minna börsile ja võita kiireid miljoneid. Need mullid on alates käesoleva aasta märtsist globaalselt hakanud lõhkema. See aeg on vist peaaegu käes, kus veebiportaalide ja e-poekestega enam igäüks rikkaks ei saa, vaja on suuremat fantaasiat.

1990. aastate alguses oli arvutiteaduse sees populaarne loosung: arvutiteadus ei ole ainult programmeerimine. Täna, aastal 2000, on sobiv see loosung ümber pöörata: arvutiteadus ei ole ka ainult programmeerimise ümber jääv, programmeerimine on arvutiteaduse jaoks tsentraalne. Mida arvutid meie heaks teha suudavad, ripub ära nende füüsisest ja sünnipärasest intelligentsist ning edasi sellest, kui häid keeli neile õpetame ning kui hästi oma soove oskame nendes väljendada.



NOORED TEADUSES

Quarite, et invenietis

Juri Tagulneste

Enn Tuglas

20. XII 2000

TALLINN 2000

NOORED TEADUSES

Jüri Engelbrecht, Ene Ergma (vastutavad toimetajad)

Helle-Liis Help (toimetamine), Siiri Jakobson (bibliograafia),
Galina Varlamova (kujundamine)

ISBN 9985-50-304-X

© EESTI TEADUSTE AKADEEMIA