

MATINEn systeemianalyysijaosto¹

Björn Wahlström, Timo Järvi

Operaatiotutkimuksen alueella Suomessa on aktiivisesti toiminut Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINE) systeemianalyysijaosto. MATINE perustettiin 1961 toimimaan yhdyssiteenä maanpuolustuksen ja tieteellisen tutkimuksen välillä ja sen systeemianalyysijaosto aloitti toimintansa 1971. MATINEn ja myös systeemianalyysijaoston toiminta on koostunut kolmesta pääalueesta

- tutkimusprojektien rahoitus,
- seminaarien järjestäminen,
- kontaktitoimintaa kokousten ja tutustumiskäyntien muodossa.

Periaatteena MATINEn tutkimusten rahoittamisessa on ollut se, että jotain on kehitetty määrättyyn pisteeseen tutkimusmaailmassa ja sitten on katsottu asioiden maanpuolustuksellista merkitystä erillisessä projektissa. Tällä tavalla suhteellisen pienellä rahoituksella on usein pystytty saamaan paljonkin aikaan. On myös esiintynyt tutkimusprojekteja, jotka ovat johtaneet pitkäaikaiseen kehitystyöhön, jolloin asiat ovat siirtyneet pois MATINEn rahoituksesta Puolustusvoimien suoraan rahoitukseen.

MATINEssa operaatioanalyysin tutkimus alkoi jo 1966 perustetussa Turun paikallisjaostossa. Siellä professori Olavi Hellmanin johdolla toimi lähinnä Merivoimien operaatioanalyttisiin tehtäviin keskittynyt ryhmä. Yli kolmen vuosikymmenen takaisia ongelmia olivat mm.

- Neuvostoliitosta ostettujen saattajien ilmatorjunnan parantaminen
- Herätemiinojen raivausongelma
- Satamien miinoituslentojen havainnointi ja rekonstruointi miinojen sukellusraivauksen mahdollistamiseksi
- Etsintäteoria sovelluksineen

Sittenmin operaatioanalyysi siirtyi uuden systeemianalyysijaoston alaisuuteen ja laajeni muidenkin puolustushaarojen alueille.

Vuosien varrella monta tutkimuskentältä tunnettua henkilöä on ollut mukana jaoston toiminnassa, kuten professorit Olavi Hellman, Olli Lokki, Arto Salomaa, Martti Tienari, Olli Aumala, Seppo Salo, Markku Kallio, Raimo Hämäläinen, Anita Lukka, Aimo Törn, Ulla Pursiheimo ja Seppo Linnainmaa. Teollisuudella on myös ollut omat edustajansa jaostossa, kuten Pentti Koponen Nokialta ja Esa Einola Instrumentointi Oystä. Puolustusvoimien edustajat ovat vaihdelleet sen mukaan, miten on katsottu löytyvän sopivaa kontaktipintaa tutkimuksen tarvitsijoille. Jaoston monivuotisina sihteereinä ovat toimineet FM Pentti Sarvilinna, FK Jussi Metteri ja KtT, kom Ilkka Haapalinna.

Systeemianalyysijaoston käynnistämät ja seuraamat tutkimukset ovat kattaneet laajaa aluetta. Voidaan jopa sanoa että alussa kaikki matematiikkaan viittaavaa ohjattiin systeemianalyysi-alueelle. Seuraava poiminta tutkimusten joukosta on enemmän tarkoitettu antamaan tuntumaa eri aiheista kuin olemaan mikään seikkaperäinen luettelo:

¹ Esitelmä pidetty Suomen Operaatiotutkimusseuran 30-vuotisjuhlaseminaarissa, 13.11.2003.

- Merisotapeli, prof. Timo Järvi, Turun yliopiston Matemaattisten tieteiden laitos, n. 1978
- Kansantalouden kriisiajan päätöksentekomalli, tstopääll. K H Pentti, Puolustustaloudellinen suunnittelukunta, 1979,
- Yhtymän automaattinen viestiyhteysjärjestelmä, prof. Kauko Rahko, TKK Puhelintekniikan laborat, 1982,
- Etsintätoimen matemaattiset menetelmät, prof. Olavi Hellman Turun yliopisto Sovelletun matematiikan laitos, 1985,
- Matemaattiset taisteluteoriat, prof. Olavi Hellman, Turun yliopiston matematiikan laitos, 1986,
- Turvallisuusanalyysin käyttö kriisien ja onnettomuuksien hallinnassa, prof. Jouko Suokas, VTT/Työslutekn I, 1987,
- Hajautettujen vikasietoisten tietokonejärjestelmien ongelmien mallintamisesta ja tutkimisesta verkko teoriaa käyttäen, DI Tapio Halkola, PESähköt-os, 1989,
- Funktionaaliset kryptosysteemit, akateemikko Arto Salomaa, Turun yliopisto, Mat. tieteiden laitos, 1990,
- Uhkatilanteen päätöksentekoa tukeva työasema, prof. Björn Wahlström VTT/Sähkötekniikan laboratorio, 1992,
- Lennon dynamiikka ja strategia, prof. Raimo P Hämäläinen, TKK/Systeemianalyysin laboratorio, 1992,
- Sovellusten turvaprotokollat ja –menetelmät, erikoistutkija Unto Pulkkinen, VTT/Graafinen laboratorio, 1993,
- Koulutussimulaattorien visuaalijärjestelmät, DI Esa Einola Instrumentointi Oy, 1993,
- Sota-/kriisiajan joukkojen ja varusteiden kuljetusten suunnittelu ja ohjaus, prof. Anita Lukka Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1994,
- Liikkuvan merivalvonnan optimoitu käyttö (erityisesti VA-valvonnassa), dosentti Eero Tamminen VTT/Sähkö- ja automaatiotekn lab, 1994,
- Eri alusratkaisujen soveltuvuus tyyppitehtäviin saaristossa ja sen läheisyydessä, prof. Timo Järvi, Turun yliopisto Matem tiet laitos, 1997,
- Huoltologistiikka, prof. Anita Lukka LTKK/Tuotantotalouden osasto, 1997,
- Vahva todennus ja pääsynvalvonta hajautetussa heterogeenisessä ympäristössä, prof. Arto Karila TKK/Tietotekniikan osasto, 1998,
- Sumeaan logiikkaan perustuva seuranta-algoritmi ilmatilannekuvan muodostamiseen, prof. Jukka Saarinen, TTKK Signaalinkäsittely, 1998,
- Päätöksenteon apuvälineet järjestelmänhankinnassa, prof. Ulla Pursiheimo Turun yliopisto Matem. tieteiden laitos, 2000,
- Mallien ja menetelmien kehittäminen komentaja- ja esikuntakoulutussimulaattoreille, prof. Markku Lukka, LTKK Tietotekniikan osasto, 2001,
- Sensorifuusio anturisignaalien käsittelyssä ja päätöksentekoalgoritmit, Tkt Mikko Lehtokangas TTKK/Signaalinkäsittelyn laitos, 2001,
- Kenttähuollon materiaalitoimintojen optimointi, tutkija Arto Nokelainen VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, 2002,
- Ämyke - älykäs maavoimien joukkojen ja asejärjestelmien tehokkuuden arviointidokumentti-pohja, prof. Seppo Linnainmaa VTT Tietotekniikka, 2003.

Jos näistä tutkimuksista haluaa poimia jotain, mikä on johtanut pitkäaikaiseen yhteistyöhön tutkimusmaailman ja puolustusvoimien välillä, niin ehkä tärkein alue on se, joka kehittyi yllä olevasta projektista Lennon dynamiikka ja strategia. Projektin tavoitteeksi oli kirjattu "Hävittäjäkaluston optimaalisen käytön edistäminen lentotoiminnassa yleensä, koelento-

toiminnassa sekä operatiivisissa tehtävissä ja erityisesti hävittäjätorjunnassa. Optimiratkaisuihin pyritään toisaalta kokonaiskustannuksissa ja toisaalta operatiivisen lentotoiminnan tuloksissa".

Tutkimuksen loppuraportin tiivistelmästä pääsee paremmin kiinni siihen, mitä tutkimuksessa tehtiin. Katsottiin lentoratojen optimointia, joka oli vakiintunut osaksi lento- ja avaruus-tekniikkaa. Useissa alan ongelmissa on kustannus tai muista syistä tärkeää löytää sellainen lentorata, jota seuraamalla yksittäinen lentokone, raketti tai ohjus lentää halutussa mielessä optimaalisesti tavoitteeseensa. Optimirata voi minimoida lentoajan tai polttoainekulutuksen. Ongelmakenttään liittyy myös tilanteita, joita voidaan matemaattisesti kuvata dynaamisilla peleillä. Näissä tilanteissa osapuolten on suoraviivaisen optimoinnin sijaan otettava huomioon toisten pelaajien tavoitteet ja mahdollisuudet vaikuttaa lopputulokseen.

Työ oli esitutkimus, jossa kuvattiin ongelmakenttää ja alan silloista tilaa. Siinä selvitettiin, miten dynaamisen optimoinnin ja differentiaalipelien teoriaa voidaan soveltaa erilaisten lentolaitteiden optimointiin. Työssä painotettiin dynaamista optimointitehtävää ja sen ratkaisemiseen soveltuvia numeerisia menetelmiä. Perinteisten pelimallien lisäksi perehdyttiin erilaisiin kahden lentokoneen välisten pelitilanteiden malleihin.

Dynaamisen optimoinnin tai differentiaalipelin teoria määrittelee tehtävän ratkaisun luonteen. Varsinainen ratkaisu on, yksinkertaisimpia tehtäviä lukuun ottamatta, määrättävä numeerisesti joko ratkaisemalla moniulotteinen differentiaaliyhtälöistä muodostuva kahden pisteen reuna-arvot tehtävä tai käyttämällä iteratiivisia menetelmiä. Olemassa olevilla numeerisilla ratkaisumenetelmillä voidaan hakea optimiohjaus hankalillekin dynaamisille optimointitehtäville.

Työssä ratkaistiin esimerikinomaisesti erilaisia lentoajan minimoivia lentoratoja. Näitä tehtiin sekä kiinteään että liikkuvaan loppupisteeseen. Näin saatiin kokemusta käytännön ratkaisemisesta ja tarvittavista laskenta-ajoista. Lentokoneen mallina käytettiin kirjallisuudessa usein esitetyn tilayhtälömallin yksinkertaistettua versiota, jossa kuitenkin oleelliset asiat, kuten ilmanvastus, oli mallitettu mahdollisimman hyvin. Kun tavoitteena oli lentää minimiajassa liikkuvaan maaliin, optimiradan käyttö säästi käytetyllä mallilla aikaa n. 15 % verrattuna lentorataan, joka syntyy, kun lentokonetta ohjattiin jatkuvasti kohti maalia. Menetelmällä saatiin tarkkoja ratkaisuja, mutta laskenta kesti silloisilla tietokoneilla alkuarvauksesta riippuen kymmenistä sekunneista useisiin minuutteihin, joten menetelmää ei sellaisenaan voitu käyttää reaaliaikaiseen tehtävän ratkaisemiseen.

Ensimmäistä tutkimusta seurasi monta muuta. Tiivistelmä vuodelta 1996 kertoo jatko-tutkimuksesta, jossa tutkittiin lennon dynamiikka ja strategia. Hankkeen tarkoituksena oli nyt kehittää yksityiskohtainen ilmataistelun simulointiympäristö, joka mahdollistaa lentoratojen optimoinnin, taistelutilanteen simuloinnin sekä lopputulokseen vaikuttavien parametrien ja päätöksentekomallien tutkimisen. Samalla tavalla kun edeltävässä hankkeessa etsittiin lennon optimointitehtävissä parasta lentorataa siten, että tehtävän ohjaus- ja tilamuuttujille asetetut rajoitukset olivat voimassa.

Työssä toteutettiin PC-Windows-ympäristössä toimiva vuorovaikutteinen lennon optimointitehtävien ratkaisuohjelmisto. Ohjelmisto koostui käyttöliittymästä ja itsenäisistä optimointiohjelmista. Ohjelmistolla voitiin ratkaista kaksiulotteisia minimiaikanousu- ja minimiaikalentotehtäviä kiinteään tai liikkuvaan maaliin sekä kolmiulotteisia minimiaikalentotehtäviä kiinteään maaliin. Lentokoneiden mallit kuvattiin tiedostossa olevilla parametreilla. Mallitiedostoon tallennettiin lentokoneen vastuskertoimien ja maksimityöntövoiman arvoja diskreeteissä pisteissä, joista ohjelmistolla muodostettiin parametreja approksimoivia jatkuvia funktioita. Diskretoimalla saatiin staattinen epälineaarinen optimointitehtävä, joka ratkaistiin

toistetulla kvadraattisella optimoinnilla. Optimaaliset ratkaisut esitettiin joko kaksi- tai kolmiulotteisena kuvina ja datana.

Tutkimustyön toisessa osassa selvitettiin, minkälaisia menetelmiä voitiin käyttää lentokoneen käänteissimulointiongelman ratkaisemiseksi. Käänteissimulointi on menetelmä, jonka avulla voidaan laskea, miten dynaamista systeemiä, tässä tapauksessa lentokonetta, on ohjattava, jotta se suorittaisi ennalta määrätyn lentokuvion. Tärkeä käänteissimuloinnin sovellus on yksinkertaistetulla lentokoneen mallilla laskettujen optimiratojen toteuttamiseen tarvittavien ohjausten laskeminen. Optimointimallin muodostamisessa tehtyjen yksinkertaistuksien takia ei voida tietää, ovatko saadut optimiradat mahdollista toteuttaa. Käyttämällä käänteissimuloinnissa tarkempaa mallia voidaan tarvittavat ohjaukset laskea ja niiden perusteella arvioida, voidaanko rata lentää todellisuudessa.

Työn kolmannessa osassa kuvattiin laskennallista menetelmää takaa-ajopeleille. Menetelmä sallii diskretoinnin ja epälineaarisen optimoinnin käytön myös silloin, kun pelillä ei ole avoimen ohjauksen satulapisteratkaisua. Menetelmää voidaan soveltaa peleissä, joissa pelaajien ohjaukset eivät esiinny samoissa tilayhtälöissä. Menetelmässä peli hajautetaan sarjaksi vuorottaisia optimointitehtäviä, joita voidaan diskretoida ja ratkaista epälineaarisen optimoinnin menetelmillä. Työssä osoitettiin, että iteroinnissa tarvittava minimointitehtävän arvofunktion gradientti saadaan ratkaistua analyttisesti ja että iteroinnin tuloksena saatava ratkaisu toteuttaa takaisinkytketyn ohjauksen satulapisteen avoimen ohjauksen esityksen välttämättömät ehdot. Menetelmällä ratkaistiin kaksi klassista takaa-ajopeliä, sekä tarkasteltiin kahden lentokoneen välistä kiinniottotilannetta vaakatasossa.

Tutkimuksesta valmistui monta raporttia, joista seuraava poiminta antaa kuvan tutkimuksen laajuudesta:

- Lennon dynamiikka ja strategia - Lentokoneen dynamiikan yksinkertaistaminen pystytasossa - gradienttimenetelmän käyttö alkuvarausten tuottamisessa (18 s.),
- Lennon dynamiikka ja strategia - Suurin mahdollinen poikkeama ennustettaessa lentokoneen rataa. (20 s.),
- Katsaus ilmataistelun simulointiin (41 s.),
- Integrointimenetelmien ja liikeyhtälöiden testaus (37 s.),
- Menetelmä eräiden ohjausliikkeiden simuloimiseksi (68 s.),
- Vuorovaikutteinen lentoratojen optimointi (79 s.),
- Lentokoneen ohjaus käänteissimulaattorin avulla (35 s.),

Tiivistelmä vuodelta 1997 kertoo tutkimuksesta, joka oli löyhästi liitettyä edellisiin ja käsitteli päätösmalleja lentosimulaattoreissa. Tässä tutkimuksessa selvitettiin mahdollisuuksia käyttää päätösanalyttisiä lähestymistapoja ilmataistelun päätöksenteon analysoinnissa ja tukemisessa. Ilmataistelun päätöstilanteen mallintamiseen käytettiin hyötyteoriaa, päätöspuita ja vaikutuskaavioita. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta lähestymistapaa lentäjän päätöstilanteen mallintamiseen. Ensimmäisessä lentäjän yksittäinen päätöstilanne mallinnettiin vaikutuskaavion ja hyötyfunktion avulla. Tämän mallin avulla epävarmuutta sisältävän päätöstilanteen päätösvaihtoehdot voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen siten, että myös päätöksentekijän subjektiivinen riskiasenne otetaan huomioon. Toisessa lähestymistavassa kehitettiin matriisipeleihin ja pelipuhun perustuva malli, joka tuottaa hyviä pitkän aikavälin päätösketjuja. Mallissa oletetaan myös vastustajan toimivan rationaalisesti kullakin päätöksentekohetkellä. Tutkimuksen loppuraportissa vertailtiin yksinkertaisen simulointiesimerkin avulla erilaisten päätösmallien tuottamien strategioiden eroavaisuuksia.

Hankkeita jatkettiin ja vuodelta 1999 olevasta tiivistelmästä voidaan lukea miten tutkimuksia jatkettiin lennon dynamiikan ja strategian alueella. Työn tavoitteena oli edelleen optimointi- ja

peliratkaisujen tuottamisen lisäksi tukea ilmataistelun simulointia tuottamalla lisäinformaatiota päätöksentekoon. Tällä kertaa tutkittiin lentokoneen ja suhteellisesti navigoivan ohjuksen takaa-ajotilannetta, jossa lentokone pyrki maksimoimaan ohitusetäisyytensä ohjuksen. Lentokoneen optimaaliset väistöstrategiat ovat tilanteesta muodostetun dynaamisen optimointitehtävän ratkaisuja. Todettiin että lentokoneen optimaalinen väistöliike tapahtuu lähinnä xy-tasossa. Tämä yhtyy aikaisemmin julkaistuihin tuloksiin, joiden mukaan lentokoneen täytyessä valita joko horisontaalisen tai vertikaalisen väistöliikkeen väliltä, sen kannattaa väistää horisontaalisesti.

Edellä olevat tutkimusprojektit johtivat myös puolustusteollisuuden mukaantuloon, mikä voidaan lukea tiivistelmästä vuodelta 2000. Siinä käsiteltiin maalinvalinta-algoritmeja kaksisuuntaisessa tietovuossa ja Patria Finavitec Oy tuli mukaan Teknillinen korkeakoulun systeemianalyysin laboratorion kanssa tutkimukseen, jonka tavoitteena oli määrittellä algoritmit kaksisuuntaisessa tietovuossa välitettävien maalien valinnalle. TKKn tehtävä oli kehittää tietovuojärjestelmässä lähetettävien viestien valintamenetelmiä ja arvioida näiden käyttökelpoisuutta maalien priorisoinnissa. Vastaavasti Patria Finavitec Oy kehitti tietovuo-tiedonsiirtojärjestelmää, joka mahdollistaa tiedon siirtämisen maasta lentokoneeseen sekä lentokoneesta maahan ja toiseen lentokoneeseen. Tietovuojärjestelmän keskeisin operatiivinen tehtävä on riittävän hyvän ja luotettavan ilmatilannekuvan välittäminen lentokoneen ohjaajalle. Kun viestiä lähettävä kone ja maalit asetetaan muiden oman osaston koneiden kannalta tärkeysjärjestykseen, voidaan valita ja lähettää vain oleellinen tieto. Tällöin säästynyt lähetysaika voidaan käyttää tiedonsiirron varmistamiseen häiriöisissä olosuhteissa.

Edelliset esimerkit on tarkoitettuja antamaan kuvan siitä, miten MATINE ja systeemianalyysijaosto toimivat. Tutkimushankkeiden vuosittainen rahoitus koko MATINEssa on viime vuosina ollut noin 1 M€ Hakemusaika tavallisesti päättyy syyskuun lopussa ja hakuohjeita voidaan löytää MATINEn verkkosivuilla, jotka puolestaan löytyvät Puolustusministeriön sivujen www.defmin.fi/ alta. Viime aikoina MATINEn tutkimuksen rahoituksessa on määrätietoisesti pyritty käynnistämään suurempia monivuotisia hankkeita.

Systeemianalyysijaoston tehtävä

Systeemianalyysillä tarkoitetaan tieteellisten menetelmien – lähinnä sovelletun matematiikan, operaatioanalyysin ja mallien – käyttämistä kvantitatiivisten perusteiden tuottamista päätöksenteolle.

Jaoston tehtävänä on antaa asiantuntija-apua puolustusvoimille sen systeemianalyttisten menetelmien käyttöä koskevista kysymyksistä. Lisäksi jaosto pyrkii lisäämään maamme systeemianalyysin asiantuntijoiden tietämystä puolustusvoimien ongelmakentästä ja rohkaisemaan heidän käyttöönsä siinä, jotta systeemianalyttistä tutkimustoimintaa voidaan edistää.

Painopistealueena ovat tilastotieteiden, operaatioanalyysin ja mallintamisen maanpuolustukselliset sovellukset erilaisissa päätöksentekotilanteissa, kuten operatiivisessa johtamisessa, merkittävässä hankintatilanteissa sekä toiminnan optimoimisessa. Sovellettaviin malleihin pyritään laaja-alaisesti sisällyttämään kaikki järjestelmille asetettavat tavoitteet kuten toimivuus, joustavuus, ylläpidettävyyden, elinikä ja hinta. Erityisesti riskianalyysin sovellukset ovat myös jaoston keskeisintä aluetta.

Systeemianalyysijaoston kokoonpano 2002-2006

Prof. Björn Wahlström (pj), VTT/TUO

Prof. Christer Carlsson, ÅA

FM Sami Helle, PvTT

Prof. Timo Järvi, TurY

TkL Ilkka Karanta, VTT/TTE

Komdri Timo Kaukoranta, MpKK

Prof. Markku Lukka, LTY

Prof. Ahti Salo, TKK

Prof. Jukka Saarinen, TTY

Prof. Jukka Sarvas, Rolf Nevanlinna
Instituutti, TKK

Prof. Ilkka Virtanen, VaaY

DI Esa Lappi, PvTT

FK Jussi Metteri (siht), MpKK