

Ampumataulukoiden laatimisen automatisointi

Filosofian lisensiaatti L. Fontell, filosofian maisteri A. Laakso,
filosofian maisteri J. Lehtonen ja professori M. Tienari

Eräs klassillinen sotilaallinen sovellutusalue matematiikalle ja fysiikalle on ulkoballistiikka. Matemaattisten mallien avulla pystytään fysiikaalisen heitteen lentorata kuvaamaan melko tyydyttävällä tarkkuudella. Nämä mallit muodostavat ampumataulukoiden laatimiselle teoreettisen perustan. Käytännön tykistötoiminta taas perustuu oleellisesti ampumataulukoiden käyttämiseen.

Yksinkertaisin ulkoballistinen malli heitteen lentoradalle on **tyhjiö-rata**. Tämä malli ottaa huomioon vain ammuksen lähtönopeuden sekä maan vetovoiman vaikutukset. Kehittyneempi malli on **normaalirata**, jossa vaikuttavina tekijöinä ovat lisäksi ilmanvastus sekä maan vetovoiman pieneneminen lentokorkeuden lisääntyessä. Pois jäävät tällöin vielä mm. maan pallomuodon ja pyörimisliikkeen samoinkuin heitteen oman pyörimisliikkeen aiheuttamat efektit, joiden vaikutukset heitteen liikkeeseen normaaliratoja käytettäessä otetaan huomioon erillisten häiriölaskelmien avulla.

Verrattaessa normaaliratoja tyhjiöratoihin toteamme lähinnä ilmanvastuksen tulevan lisätekijänä mukaan matemaattiseen malliin. Ero mallin realismisuudessa ja samalla monimutkaisuudessa on kuitenkin varsin huomattava. Ilmanvastuksen matemaattisena mallina normaaliradoissa käytetään ns. Garnierin ilmanvastuslakia [2], joka aikoinaan on

määritetty laajojen tutkimusammuntojen perusteella. Tämän mallin mukaan ilmanvastuksen suuruus riippuu ilman tiheydestä, Machin luvusta (heitteen nopeuden ja äänen nopeuden suhteesta) sekä heitteen vastusominaisuuksia kuvaavasta vastuskertoimesta. Epäsuorasti tulevat näin mukaan ammuksen massasta ja muodosta riippuvat vastusominaisuudet sekä ilmakehän paikallisen kimmoisuuden ja tiheyden määräävinä suureina ilman paine ja lämpötila. Ilmakehän vaikutuksen täsmenämiseksi on kehitetty meteorologian alaan kuuluva matemaattinen malli ns. **taulukkoilmakehä**.

Kaiken kaikkiaan tulee **normaaliratamenetelmän** nimellä kulkevaan ulkoballistiseen malliin kinemaattisten suureiden, ratakoordinaattien ja lentoajan, lisäksi melko runsaasti parametrejä, suomalaisessa ballistiikassa normaalisti 8 kpl. Tämä lukumäärä on liian suuri, jotta mallia voitaisiin suoraan käsitellä matemaattisin tai taulukkoketnillisin keinoin. Siksi on ollut tarkoituksenmukaista luokitella mallin parametrit vaikutuksensa voimakkuuden mukaan kahteen luokkaan: varsinaisiin parametreihin ja häiriötekijöihin. Normaaliradan varsinaisia parametreja ovat: lähtönopeus, lähtökulma ja heitteen vastuskerroin. Näiden tekijöiden vaikutus heitteen sijaintipaikan koordinaatteihin ajan funktiona on niin voimakas, että erilaisia interpolointi- ja extrapolointitapoja soveltava häiriölaskentatekniikka ei riitä niiden käsittelyyn. Sensijaan olosuhdeparametrit: ilmakehän lämpötila ja paine sekä tuulen kolme komponenttia voidaan käsitellä häiriölaskennan menetelmin. Lähtökohtana on tällöin normaali taulukkoilmakehä, joka on tyyni ja jossa maan pinnalla lämpötila on 0°C ja ilmanpaine 750 torria. Olosuhdeparametrien poikkeamat taulukkoilmakehästä otetaan huomioon erilaisissa normaaliratamallin soveltamistilanteissa häiriöinä ja käsitellään yksinkertaisin likimääräiskaavoin. Myös normaaliradan varsinaisten parametrien sekä kinemaattisten suureiden pieniä muutoslaskuja varten on kehitetty omat häiriölaskentamenetelmänsä, jotka perustuvat käyttötarkoituksesta riippuvalla tavalla määritelyihin derivaattoihin tai poikkeamiin. Näitä tarvitaan mm. koeammuntojen yhteydessä esiintyvissä mittausteknillisissä reduktiolaskuissa, erilaisissa virhetarkasteiluissa sekä ampumataulukoiden käytännöllisessä soveltamisessa. Suomalaisesta normaalirataballistiikasta on kirjoitettu yksityiskohtaisia

esityksiä (Laakso [3], Liikkanen [4]), joissa normaaliratajärjestelmässä ja sen soveltamisessa tarvittavaa käsitteistöä sekä matemaattiset kaavat on esitetty yhtenäisenä teoriana.

Siirryttäessä kuvaamaan heitteen liikettä normaaliratomallilla tullaan erääseen matemaattiseen vaikeuteen, joka ei ole lainkaan esillä tyhjiöratamallia käytettäessä. Heitteen rata kuvataan nimittäin käyttäen Newtonin liikeyhtälöitä, jotka matemaattisesti muodostavat ryhmän differentiaaliyhtälöitä. Tällä yhtälöryhmällä on ratkaisuna parametrien arvojen määräämä normaalirata, joka yhtyy melko hyvin vastaavan ammuksen todelliseen lentorataan. Radan numeerinen laskeminen ei kuitenkaan ole mahdollista suljetussa muodossa s.o. sitä ei voida ilmaista yksinkertaisen matemaattisen kaavan muodossa. Ratkaisu voidaan muodostaa soveltaen tunnettuja menetelmiä differentiaaliyhtälöiden numeeriseksi integroimiseksi. Tämä merkitsee käytännössä sitä, että kun kolmen varsinaisen parametrin arvolla on määrätty, mistä radasta on kysymys, ahkeralta laskijalta kuluu 2...20 päivää radan koordinaattien ja muiden rata-arvojen numeeriseen taulukoimiseen. Toisaalta yksinkertaisten ratkaisukaavojen puuttuminen vie siihen, että normaaliratojen soveltamisen ampumataulukoiden laatimiseen on tapahduttava ratojen taulukkoesityksen eikä kaavamuotoisen esityksen pohjalta.

Normaaliradan liikeyhtälöiden numeerinen integrointi on käytännössä suuritöisyytensä vuoksi muodostanut oleellisesti rajoittavan tekijän normaaliratomallin soveltamiselle. Tällaisen matemaattisen mallin käyttö koeammuntatulosten analysoinnissa on kuitenkin välttämätöntä, mikäli kunnollisen ampumataulukon laatimiseen tarvittava laukausmäärä halutaan pitää siedettävissä rajoissa. Jotta koeammuntojen jälkeen ampumataulukot voisivat valmistua nopeasti normaaliratojen numeerisen integrointityön hitaudesta huolimatta, on ollut pakko ryhtyä taulukoimaan normaaliratoja mallin tärkeimpiä parametrejä lähtönopeutta, lähtökulmaa ja vastuskertoimen arvoa systemaattisesti vaihtelemalla. Tarkoituksena on ollut muodostaa **normaalirataverkko**, josta voitaisiin saada interpoloimalla minkä tahansa koeammunnan tulosten käsittelyssä tarvittavat normaaliradat.

Normaalirataverkkoa ryhdyttiin Suomen puolustusvoimissa laatimaan eräänä osana kenraali Nenosen johdolla tapahtuneessa tykistön

kehittämistyössä itsenäisyytemme ensimmäisinä vuosikymmeninä. Tässä työssä jouduttiin Suomessa tekemään paljon omaperäistäkin kehitystyötä, sillä normaaliratajärjestelmään johtanut ilmanvastusteorian perustutkimus oli tapahtunut mm. ranskalaisen tykistömiehen Garnierin toimesta vasta 1900-luvun alussa. Se matematiikan haara, numeerinen analyysi, joka tutkii matemaattisesti mutta ei suljetussa muodossa määriteltujen ratkaisujen numeerista muodostamista oli myös tuohon aikaan vielä varsin kehittymättömässä tilassa. Näin työmäärältään mahdollisimman edullisen numeerisen integrointimenetelmän löytäminen normaaliradoille muodosti tykistön kehittämisen kannalta tärkeän tehtävän.

Normaalirataverkkoa laskettiin 1920- ja 1930-luvuilla käyttäen ratojen integrointiin ns. G.H.M.-menetelmää, jonka nimi muodostuu kehittäjiensä Garnier, Haag ja Marcus alkukirjaimista. Työssä käytettiin kymmenen varusmiehen muodostamaa laskuryhmää. Kaikkiaan saatiin näiden kahdenkymmenen vuoden aikana lasketuksi noin 1300 normaali-rataa. Työ edistyi kuitenkin liian hitaasti ja radoissa ilmeni epätarkkuuksia. Prof. Rolf Nevanlinna ryhtyi sitten kenraali Nenosen pyynnöstä kehittämään uutta radanlaskumenetelmää [5], joka otettiin käyttöön 1940-luvun alussa. Tämä menetelmä oli käytössä 1940—50-luvut ja sillä laskettiin kaikkiaan noin 1400 rataa. Työvoiman rataverkon laskentatyössä muodosti edelleen varusmiehistä koottu työryhmä. Vaikka parannusta G.H.M.-menetelmään verrattuna olikin tapahtunut, laskutyö käsityönä Nevanlinnan menetelmällä oli edelleen hidasta ja virhealtista.

Tietojenkäsittelyalan kehitys 1940—50-luvuilla teki mahdolliseksi viedä normaaliratamenetelmän kehitystä voimakkaasti eteenpäin. Suomeen tuli ensimmäinen nykyaikainen tietokone 1958 Postisäästöpankille. Silloisen Ballistisen toimiston matemaatikko maisteri Pulkkinen laati tietokoneohjelman Nevanlinnan menetelmän pohjalta v. 1958—60 tälle IBM 650 tietokoneelle. Yhden normaaliradan laskeminen kesti silloin 5 min.—1 t. Normaalirataverkko olisi varmaan valmistunut hyvinkin nopeasti, jos tarvittavat määrärahat koneajan ostoon olisivat olleet käytettävissä. Normaalirataverkon lopullinen laskeminen siirtyi kuitenkin 1960-luvulla maahamme asennetuille huomattavasti nopeammille ja

tehokkaammille tietokoneille. Tätä esitystä kirjoitettaessa normaali-rataverkko on jo valmiiksi laskettuna.

Tietokoneiden käyttöönotto merkitsi huomattavaa muutosta normaali-ratamenetelmän soveltamiselle. Normaaliratojen integrointi jäi ballistikon kannalta toissijaiseksi tehtäväksi, jonka tietokone pystyi nopeasti ja varmasti suorittamaan. Normaaliratamallin soveltaminen ampumataulukoiden laatimiseen palasi jälleen ensisijaiseksi kehitystehtäväksi. Koeampumatoiminnan tulosten käsittely kokonaisuutena tuli myös entistä vahvemmin esille. Jatkokehityksen päälinjana oli kehittää normaali-ratamallin soveltuvuutta niiltä osin, joista integroinnin työläys oli pakottanut aikaisemmin luopumaan. Näin otettiin ensimmäiseksi lisäkehitysvaiheeksi täydellisen poikkeama- ja häiriökertoimiston laskeminen normaalirataverkon täydennykseksi. Tämä tavoite, joka on moninkertaistanut yhtä normaalirataa kohti tarvittavan laskentatyön määrän, oli siirretty aikaisemmin tiheästä normaalirataverkosta suoritettavan interpoloinnin varaan. Aikaisemmat normaalirataballistiikan laskumenetelmät käyttivät myös hyväkseen normaaliratamallin erikoispiirteitä tavalla, joka vaikeutti mallin vapaata kehittämistä.

Edellä esitetyt näkökohdat normaalirataballistiikan kehittämismahdollisuuksista otettiin huomioon, kun ratalasku vuosina 1961—62 ohjelmoitiin Suomen Kaapelitehtaan tietokoneosaston Siemens 2002 tietokoneelle [7]. Normaaliratojen integroimiseen käytettiin tällöin tietokoneille erityisen sopivaa Runge-Kutta-Gill menetelmää [6]. Myöhemmin 1964 maisteri Sarmanto muutti Siemens-tietokoneen ohjelman hiukan parannettuna puolustusvoimien tietokonekeskuksen IBM 1410 tietokoneelle. Kun Valtion tietokonekeskukseen hankittiin matemaattisia tehtäviä varten uusi nopea Elliott 503 tietokone, siirsi maisteri Lehtonen ohjelman 1965 tälle koneelle. Elliott 503 tietokoneella kestää yhden normaaliradan integroiminen 10...100 sekuntia, joka tietokoneen käyttökustannuksiksi muutettuna vastaa 1...10 markkaa. Tietokoneen käyttö integrointityössä on siis oleellisesti jopa varusmiestyövoimaa halvempaa, työtarkkuudesta ja luotettavuudesta puhumattakaan! Normaalirataverkon laskeminen toteutettiin lopullisesti v. 1965 alkuperäistä suunnitelmaa harvempana, mutta häiriölaskelmien suhteen täydellisessä muodossa. Rataverkko on nykyisin käytettävissä sekä ratakirjoina koe-

ampumalaitoksen esikunnassa että magneettinauhoille taktioituna Puolustusvoimien tietokonekeskuksessa.

Alkuperäinen normaalirataverkko, johon oltiin pyrkimässä vuosina 1920—60 tehdyn työn tuloksena, olisi täydellisenä ollut varsin laaja ja mittava n. 100 000 radan kokoelma. Tietokoneiden käyttö normaaliratojen laskemiseen muutti kuitenkin tilannetta sikäli, että laskemiseen kuluva aika ei enää pakottanut valtavan rata-arkiston ylläpitoon. Lähinnä kriisitilanteen tarpeita ajatellen ja koeammuntojen suunnittelua varten päädyttiin aikaisempiin suunnitelmiin verrattuna huomattavasti harvempaan mutta täydellisin häiriökertoimistoin varustettuun n. 3 500 rataa käsittävään rataverkkoon. Tämä rataverkko vie vieläkin useita hyllymetrejä arkistotilaa!

Normaaleja taulukkoammuntoja varten kulloinkin tarvittavat radat tilaa koeampulaitoksen esikunta tietokoneosastolta laskettavaksi ja saane noin kahden päivän toimitusajalla. Työtä on sitäpaitsi edelleen automatisoitu jäljempänä tarkemmin kuvatulla tavalla niin, että kaikkia laskettavia normaaliratoja ei tarvitse listata näkyviin, vaan tietokone laatii suoraan niiden perusteella ampumataulukot.

Koeampumatoiminnan tulosten käsittelypulmia ei normaaliratomalli yksinään pysty ratkaisemaan. Se muodostaa kuitenkin rungon, jonka ympärille käytännöllinen ampumataulukkojen laatimismenetelmä voidaan rakentaa. Menetelmän perustana on koeammunnoilla määritettävä vastaavaisuus lentoratojen ja normaaliratojen välillä. Tämän vastaavaisuuden perusteella saadaan ammukselle sen ilmanvastusominaisuuksia kuvaava ballistinen kerroin. Normaaliratomalli ei pysty kuitenkaan yksin selittämään kaikkia koeammunnoissa havaittavia ilmiöitä; monet todellisten lentoratojen poikkeamat normaaliradoista saavat normaaliratomallin ulkopuolelta tulevan esim. asefysikaalisen selityksen. Koeammuntojen tulosten käsittelyn yhteydessä selvitetään myös, missä määrin kullakin aseella ja ammuksella ammuttavat lentoradat käyttäytyvät normaaliratomallista eroavalla tavalla. Näissä eroissa ilmenevät systemaattiset piirteet eristetään virhetekijöistä ja ne esitetään määritettävillä kokeellisilla korjausfunktioilla. Nämä apufunktiot otetaan huomioon laadittaessa ampumataulukoita, jotka näin vastaavat todellisuutta huomattavasti paremmin kuin teoreettinen normaaliratomalli.

Voidaankin sanoa, että ulkoballistinen normaaliratomalli täydennettynä riittäväillä koeammunnoilla pystyy antamaan ampumataulukoille sellaisen tarkkuuden kuin ampumatekniikka kulloinkin vaatii.

Paitsi normaaliratojen integroimiseen on tietokonetta päästy käyttämään muutenkin automatisoitaessa ampumataulukoiden laatimista. Vuoden 1968 alussa valmistui Elliott 503-tietokoneelle tietokoneohjelma [1], joka lähtien korjausfunktioista yms. perustiedoista laatii täydelliset numeeriset ampumataulukot sekä laskee piirtäjää varten graafisen ampumataulukon asteikkoviivojen paikat. Tietokoneen laatimat numeeriset ampumataulukot siirretään suoraan valokuvausmenetelmällä tykistön vaatimaan lomakemuotoon. Sisäisesti tähän tarvittava tietokoneohjelma toimii siten, että se laskee taulukon laatimiseen käytettävät normaaliradat derivaattoineen, tarkistaa normaaliratojen lukumäärän riittävyuden laskentatarkkuuden kannalta, suorittaa asiaan kuuluvat interpoloinnit normaaliradoista, valitsee ampumataulukon tyyppin mukaiset käsittelykaavat sekä toimii — nopean rivikirjoittimen ansiosta — luotettavana ja nopeana puhtaaksikirjoitusautomaattina.

Edellä todettiin ballistiikan vapautuneen numerolaskujen painolastista tietokoneen käyttöönotton avulla. Käytännöllisen koeampumatoinnin kannalta mahdollisuus laajempiin numerolaskuihin normaaliratomallia käytettäessä on tuonut hyötyä erityisesti tarkempien reduktiolaskujen muodossa. Ne ovat helpottuneet tietokoneella kutakin koeammuntaa varten laskettavan täydellisen korjauskertoimiston ollessa nyt käytettävissä. Koeammuntatoimintaa on päästy kehittämään jo pitkälle kohti sitä lopullista tavoitetta, että jokainen ammuttu laukaus voitaisiin redukoida normaaliolosuhteisiin yksilöllisesti toisista laukauksista riippumatta. Aikaisemmin jopa poikkeuksellisen suurina satunnaisvirheinä ilmenneitä reduktiolaskujen epätarkkuuksia on myös saatu poistetuiksi. Kaikki tämä on tehnyt kokeelliset korjausfunktiot entistä luotettavammiksi. Korjauslaskut ovat myös helpottuneet mm. laajojen interpolointien jäätyä suurelta osalta pois. Koeampumatulosten saattaminen lopullisen ampumataulukon muotoon on siis tietokoneen avulla suuresti rationalisoitunut ja nopeutunut.

Tätä esitystä kirjoitettaessa on ampumataulukoiden laatimisen automaatio saavuttanut tietyn tavoitteen: ampumataulukon laatimiseen tar-

vittavat rutiinilaskelmat on saatu siirretyiksi tietokoneelle. Tämä työ on vaatinut paljon uutta tutkimustyötä yksityiskohdissaan. Huomattavin ratkaisu, joka on tehnyt mahdolliseksi kehityksen, on ollut normaali-rataverkostosta luopuminen ja sen korvaaminen tietokoneen kutakin taulukkotehtävää varten erikseen laskemilla radoilla. Tämän ratkaisun ovat tehneet mahdolliseksi tietokoneen nopeus sekä työn yhteydessä kehitetyt parannetut häiriölaskentamenetelmät.

Kaikki mahdollisuudet tietokonetekniikan soveltamiselle ballistikkassa eivät suinkaan ole vielä loppuun käytetyt. Koeampumalaitoksen piirissä onkin tekeillä tutkimustyö, jonka päämääränä on koeampumaseaman mittaustulosten tietojenkäsittelyn systematisointi ja tehostaminen. Tähän liittyy läheisesti koeammunnoista kertyvän tilastollisen aineiston hyväksikäyttö ballistiseen ja asefysikaaliseen tutkimukseen. Tässä yhteydessä on myös syytä viitata tietokoneiden tuleviin soveltamismahdollisuuksiin keskuslaskintekniikassa. Koko tykistön ampumatekniikka ja samalla myös ampumataulukot joutuvat tällöin aivan uusien mahdollisuuksien eteen.

Kirjoittajat haluavat vielä lopuksi esittää kiitoksensa Koeampumalaitokselle, Puolustusvoimien tietokonekeskukselle, Maanpuolustuksen tieteelliselle neuvottelukunnalle ja Oy Nokia Ab Elektronikalle, joiden tuella tämä työryhmä on saanut tutkia koeampumatoiminnan automaatiota viime vuosien aikana.

LÄHDELUETTELO:

- 1 Fontell, L: Suora-, pinta- ja ilma-ampumataulukoiden automaattinen laatiminen Elliott 503 tietokoneella, Koeampumalaitoksen esikunnan arkisto, Helsinki 1968.
- 2 Garnier, M: Calcul des tables et abaques de tir (Méthode G.H.M.). Table B. Fonctions empiriques de la résistance de l'air. 1929. Paris.
- 3 Laakso, A: Taulukkoballistiikka, Sotakorkeakoulun luentomoniste, Helsinki 1966.
- 4 Liikkanen, Ilmari: Zur Störungstheorie der äusseren Ballistik, Comment. Physico-Mathematicae Soc. Scient. Fenn. XII. 1., Helsinki 1943.
- 5 Nevanlinna, Rolf: Berechnung der Normalflugbahn eines Geschosses, Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Series A.I. Mathematica-Physica 15, Helsinki 1943.
- 6 Ralston-Wilf: Mathematical Methods for Digital Computers, New York 1960.
- 7 Tienari, M., Väliaho, H: Ballistinen ratalasku ohjelmoituna Siemens 2002-tietokoneelle, Koeampumalaitoksen esikunnan arkisto, Helsinki 1962.