

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnissa

Ahti Salo, Aalto Yliopisto, ahti.salo@aalto.fi, +358-50-383 0636
Juho Roponen, Aalto Yliopisto

Tiivistelmä

Liike on ja on aina ollut äärimmäisen olennainen osa sodankäyntiä. Onnistuneet reittivalinnat mahdollistavat joukkojen tehokkaan ja turvallisen liikuttelun, vihollisen asemien tiedustelun sekä oman toiminnan salaamisen. Reittioptimointi on paljon tutkittu aihealue, mutta valtaosa tutkimuksesta on keskittynyt siviililiikennöintiin kuten rahtikuljetuksiin ja toimituksien hallintaan. Taisteluolosuhteissa on kuitenkin sellaisia huomioitavia tekijöitä kuten reitin huomaamattomuus ja turvallisuus, joita siviilisovelluksissa ei yleensä tarvitse huomioida.

Tässä tutkimuksessa olemme reittioptimointimenetelmiä, jotka mahdollistavat älykkään reitinvalinnan erilaisten vihollisuhkien vallitessa. Olemme myös soveltaneet menetelmiä todentuntaiseen esimerkkitarkasteluun, jossa merivoimien alus pyrkii suorittamaan ammus- ja polttoainetäydennyksen mahdollisimman hyvin viholliselta salassa. Kehitetyt menetelmät soveltuvat myös muihin ympäristöihin.

1. Johdanto

Vaikuttavuusarviointia tarvitaan asejärjestelmien strategisten hankintapäätösten valmistelussa sekä taktisten ja operatiivisten toimenpiteiden suunnittelussa. Asevaikutusten riittävän tarkka mallintaminen ei ole pelkästään tekninen ongelma, koska iso osa järjestelmien tehosta tulee hyvistä käyttöperiaatteista ja kohdetta koskevasta tiedosta. Lisäksi asejärjestelmät usein tulevat käyttöön vasta vuosia hankinta-päätösten jälkeen, jolloin niiden toimintaympäristö poikkeaa nykyisestä, koska myös vastapuoli on ehtinyt kehittää omia järjestelmiään ja toimintaansa. Siksi on ensiarvoisen tärkeää, että tulevaisuuden taistelukenttää mallinnettaessa pystytään ottamaan huomioon myös ihmisen tai muun älykkään toimijan rooli osana järjestelmien käyttöä. Tällaisia epävarmuuksia ei voida käsitellä arvioimalla päätösvaihtoehtoja perinteisen skenaarioanalyysin keinoin (Bunn ja Salo, 1993), sillä vastapuolen päätöksiin voidaan reagoida vaiheistetusti ajan edetessä. Kysymyksessä on ajan kuluessa muuttuva peliteoreettinen asetelma.

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi (ARA, adversarial risk analysis) (Rios Insua et al., 2009; Roponen ja Salo, 2015) tarjoaa peliteoriaan pohjautuvan lähestymistavan vastapuolen toimintaan liittyvien epävarmuuksien käsittelemiseksi. Tyypillisesti vastakkainasettelullisissa riskianalyysissä

1. yhdistellään tietoa eri lähteistä (ml. simulointimallit, asiantuntija-arviot) ja muodostetaan näistä perusteltu tilannekuva;
2. tehdään peliteoreettinen tarkastelu, joka syventää vastapuolen käyttäytymisestä

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

koskevaa ymmärrystä.

Tutkimuskenttänä vastakkainasettelullinen riskianalyysi on verraten uusi. Sitä voidaan soveltaa eri yhteyksissä (ml. strategiset hankintapäätökset sekä taktiset ja operatiiviset päätökset). Sillä on potentiaalia varsinkin taistelumallinnuksen yhteydessä, jossa vastapuolen tavoitteet, tilannekuva ja resurssit osaltaan määrittävät, mitä vastapuoli luultavimmin tekee.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa perusteltu arvio siitä, miltä osin ja missä määrin vastakkainasettelullinen riskianalyysi on puolustusvoimien kannalta varteenotettava lähestymistapa asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnin tukena. Tämä arvio sisältää itsessään käyttökelpoista tietoa ja varmistaa osaltaan, että vastakkainasettelullista riskianalyysiä kehitetään ja hyödynnetään sille otollisissa sovelluskohteissa.

Lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa menetelmiä ja työvälineitä, joiden pohjalta puolustusvoimien taistelumalleja ja niiden käyttöä voidaan kehittää tuomalla niihin peliteoriaan, robustiin päätösanalyysiin ja stokastiseen optimointiin perustuvia toiminnallisuuksia. Kehitystyö toteutetaan siten, että nämä toiminnallisuudet ovat taistelumallien lisäksi myös asiantuntija-arviointiprosessien kautta toteutettavissa (ks. Kangaspunta ja Salo, 2014).

Uusina menetelmällisinä tulokulmina lähdettiin käsittelemään erityisesti aikaan ja paikkaan liittyviä epävarmuuksia realistisessa analyysikohteessa. Tavoitteena oli löytää robusteja (kaikilla vaihtoehtoisilla oletuksilla verrattain hyviä) päätösvaihtoehtoja joukkojen liikkeelle ja sijoittelulle tilanteissa, joissa vastustajan toiminnasta on saatavilla vain vähän tietoa. Tämä valikoitui tutkimuksen painopisteeksi juuri analysoitavan tilanteen haasteellisuuden vuoksi. Päätösvaihtoehtojen vertailu asiantuntijaprosessilla muuttuu lähes mahdottomaksi, kun vaihtoehtojen erojen hahmottaminen on vaikeaa.

Tutkimuksessa on tehty myös todentuntuinen esimerkkitarkastelu, jonka tavoitteena oli arvioida menetelmän käytettävyyttä monimutkaisiin käytännön ongelmiin. Esimerkkitarkastelun aiheeksi valittiin Meritaistelukeskuksen toivomuksesta ja yhteisymmärryksessä tutkimuksen seurantaryhmän kanssa saaristossa tapahtuvan alustäydennyksen suojaaminen miehittämättömillä ilma-aluksilla (UAV, unmanned aerial vehicle) tapahtuvalta tiedustelulta.

3. Aineisto ja menetelmät

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi (ARA) on tutkimuskenttä, joka yhdistää riskianalyysiä, päätösanalyysiä ja peliteoriaa. Se tuottaa menetelmiä, jotka mahdollistavat riskien kartoittamisen ja riskienhallintatoimenpiteiden valinnan tilanteissa, joissa useampi omia tavoitteitaan ajava toimija tekee päätöksiä. Eri osapuolten päätökset vaikuttavat kaikkien osapuolten lopputuloksiin (Banks et al., 2015). ARAlla on etuja muihin vaihtoehtoihin menetelmiin verrattuna, koska perinteinen riski-analyysi ei huomioi vihamielistä toimintaa. Klassisessa peliteoriassa tehdään yleensä vahvoja oletuksia jaetusta tiedosta ratkaisujen löytämiseksi. Päätösanalyysi yksinään ei tarjoa keinoja vastustajan toiminnan arviointiin (Keeney, 2007). ARAlla ei ole samoja rajoituksia kuin niillä yksittäisillä menetelmillä, joihin se tukeutuu.

Tässä tutkimuksessa olemme keskittyneet aika- ja paikkaepäätietoisuudesta syntyviin ongelmiin, mikä on ARAssa aikaisemmin ollut vähemmällä huomiolla. Lisäksi olemme saavuttaneet edistystä partiointipelien analysoinnissa. Partiointipelit ovat peliteoreettinen ongelma, jolle ei ole vielä esitetty yleistä ratkaisua. Lisäksi olemme kehittäneet työkaluja, joilla voidaan mallintaa laivojen liikettä ja niihin kohdistuvaa tiedustelu-uhkaa ympäristössä, jossa niiden liike on rajoitettu, kuten saaristossa. Osiot 3.1 ja 3.2 käsittelevät kehitettyjä teoreettisia malleja ja osiossa 4 on kuvattu mallien soveltaminen todentuntuiseen esimerkkitarkas-

teluun.

3.1 Ilmatiedustelu partiointipelinä

Partiointipelin käsitteen ovat esitelleet Alpern et al. (2011). Yksinkertaisuudessaan kyse on kahden pelaajan pelistä, jota pelataan graafissa. Toinen pelaajista asettaa etsittävän kohteen johonkin graafin solmuista valitsemallaan ajanhetkellä ja poistaa sen ajan m kuluttua. Toinen pelaajista on partioija, joka päättää, millaista reittiä ja millä aikataululla partio liikkuu graafin kaaria pitkin annetulla nopeudella. Kumpikaan pelaaja ei näe toisen valitsemaa strategiaa. Jos partio on graafin solmussa samaan aikaan kohteen kanssa, partioija voittaa pelin. Muussa tapauksessa kohteen asettaja voittaa. Pelin voidaan nähdä esimerkiksi vastaavan tilannetta, jossa toinen pelaajista yrittää murtautua sisään partioituun kohteeseen ja tarvitsee ajan m onnistuakseen. Peli kuvaa hyvin myös tilannetta, jossa ilmassa (tai muutoin) liikkuva tiedustelija etsii kohdetta, joka on löydettävissä vain rajatussa aikaikkunassa.

Formaalimmin sanottuna partiointipeli $G=G(Q,m)$ on win-lose -peli (ja siten nollasummapelejä) maksimoivan partioidijan ja minimoivan hyökkääjän välillä. Tutkimassamme versiossa pelistä, pelaajilla ei ole aikatauluun liittyviä rajoitteita toiminnallaan (tai ainakaan rajoitteet eivät ole tiedossa niin tarkasti, että niillä olisi väliä), jolloin partioidien ja hyökkäyksen aikataulutus on vastustajan näkökulmasta täysin satunnainen. Peliä pelataan graafissa Q , jossa on n solmua \mathcal{N} ja joukko kaaria \mathcal{E} . Hyökkääjän puhdas strategia on hyökkäyssolmun $i \in \mathcal{N}$ valinta. Hyökkäyksen alkamisaika ajatellaan satunnaiseksi, koska pelaajilta puuttuu yhteinen aikareferenssi. Partioidijan puhdas strategia on kierros (cycle) $W: \mathcal{T} \rightarrow Q$, jota kutsutaan partioksi. $\mathcal{T}^*=[0, T[$ on partioidijan valitsema aikaympyrä. Partio siis kulkee samaa kierrosta toistuvasti ja kaikki aikoihin liittyvä aritmetiikka tapahtuu modulo T :ssä. Pelaajat saavat pelata sekastrategioita. Hyökkäyksen tapahtumapaikkaa ja aikaa voidaan merkitä parilla $[i, I]$, jossa i on hyökkäyssolmu ja $I \subset \mathcal{T}^*$ hyökkäyksen (satunnaisesti valittu) aikaväli suhteessa partiointireitin aikatauluun. Jos $i \in w(I)$, partio saa hyökkäyksen kiinni ja partioija voittaa ja palkkio $P=1$. Muussa tapauksessa hyökkääjä voittaa ja palkkio $P=0$. Pelin arvo on siis sama kuin hyökkääjän kiinnijäämistodennäköisyys.

Tällä versiolla partiointipelistä, jota voisi kutsua jatkuvaksi partiointipeliksi, on useita hyviä ominaisuuksia partiointireittien valinnassa. Vaikka hyökkääjän kyvyttömyys valita hyökkäyksen ajankohta voikin vaikuttaa epäintuitiiviselta, kyse on oikeastaan vain siitä, että hyökkääjä ei voi valita ajankohtaa suhteessa partion kulkuun, koska se ei pysty havaitsemaan sitä. Alpern et al. tutkivat kahta versiota partiointipelistä, joiden nimet voisi kääntää kertapeliksi ja sykliseksi peliksi. Kertapelissä hyökkäyksen pitää tapahtua T :n pituisen aikaikkunan sisällä ja partion ei tarvitse päättää liikettään lähtöpisteeseen. Syklisessä pelissä taas pelataan T :n pituisella aikaympyrällä, kuten esittämässämme jatkuvassa pelissä, mutta partioija ei voi valita T :tä vaan se on saneltu pelin säännöissä. Vaikka molemmat näistä peleistä sopivatkin omanlaistensa tilanteiden analysointiin, niissä molemmissa pelaajat jakavat yhteisen käsityksen toistensa aikarajoitteista. Tämä oletus ei kuitenkaan sovi kaikkiin käytännön sovelluksiin. Jos partioija ei tunne aikaikkunaa, jossa hyökkääjän on toimittava kertapelissä, tai partioija voi valita partiointisyklinsä pituuden vapaasti syklisessä pelissä, päädytään ratkaisuihin, jotka ovat lähempänä esittämäämme jatkuvaa peliä.

Paras löytämämme yleinen partiointistrategia on sekastrategia, joka etsii joukon partiointikierroksia, jotka kattavat kaikki partioidtavat solmut ainakin kaksi kertaa siten, että ainakin kahdella vierailuista jokaisessa solmussa on välissään vähintään m :n eli hyökkäyksen keston pituinen aika, ja eri kierrokset eivät käy samoissa solmuissa. Tutkimus kuitenkin edelleen jatkuu siitä, onko kyseessä paras mahdollinen partiointistrategia. Tässä partiointistrategiasa on kuitenkin joka tapauksessa se hyvä puoli, että sitä vastaavat partiointikierrokset voidaan löytää mille tahansa painotetulle graafille ratkaisemalla lineaarinen (sekoitettu) kokonaislukuoptimointitehtävä

$$\min c^T x \text{ s.t. } x \in \mathbb{Z}^{|E|} \times \mathbb{R}^{|V|}$$

$$m \sum_{e=(u,v); u \in S, v \in S} x_e + m \sum_{e=(u,v); u \in S, v \in S} x_e - \sum_{v \in S} x_v \geq -\mu_S - r + 2m(|S| + 1), \forall S \subset V$$

$$(m - \mu_S) \sum_{e=(u,v); u, v \in S} x_e - \sum_{v \in S} x_v \geq 2m(|S| - 1), \forall S \subset V$$

$$\sum_{e=(v,u); u \in V} x_e = 2, \forall v \in V$$

$$\sum_{e=(u,v); u \in V} x_e = 2, \forall v \in V$$

$$x_e \in \{0, 1\} \text{ ja } x_v \in [0, m].$$

Optimointimalli olettaa, että graafi on täydellinen (complete) ja toteuttaa kolmioepäyhtälön, mutta mikä tahansa yhtenäinen (connected) graafi voidaan muuntaa tällaiseen muotoon asettamalla alkuperäisen graafin solmujen välille kaaret, jotka kuvaavat solmujen välisiä lyhimpiä etäisyyksiä alkuperäisessä graafissa.

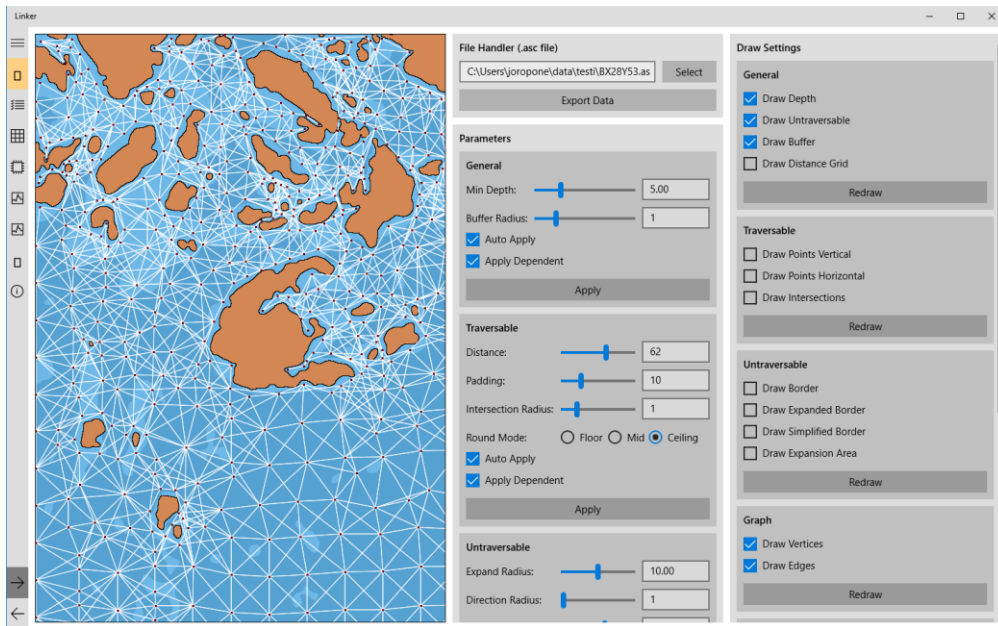
Kaksi epäyhtälörajoitusta varmistavat, että partiointikierrokset eivät käy samassa solmussa liian usein, ja kaksi yhtälörajoitusta, että jokaiseen solmuun tullaan täsmälleen 2 kertaa ja solmusta lähdetään täsmälleen kaksi kertaa. Epäyhtälörajoitusten määrä kasvaa eksponentiaalisesti graafin solmujen määrän kasvaessa, mutta todellisuudessa kaikkia rajoituksia ei tarvitse käyttää ratkaisussa. Tehtävä voidaan ratkaista ensin ilman epäyhtälörajoituksia ja sen jälkeen lisätä rajoituksia ratkaisijaan iteratiivisesti, kunnes saadaan käypä ratkaisu. Laskenta-aika ei kasvanut ongelmallisen suureksi kokeiluissa alle 50 solmun graafeissa.

Koska partiointipeli on nollasummapeli, molempien pelaajien paras strategia on pelata kaikissa tilanteissa Nashin tasapainoa (strategiaa, jota vastaan vastustajalla ei ole parempaa vaihtoehtoa kuin pelata omaa tasapainostrategiaansa). Nollasummapelissä kaikki tasapainostrategiat myös tuottavat keskenään saman hyödyn. Tästä seuraa, että hyökkääjän paras strategia saadaan myös ratkaistua parhaasta partiointistrategiasta vaatimalla, että mikään partiointistrategia ei saa tuottaa parempaa hyötyä valittua hyökkäyssolmujen todennäköisyysjakaumaa vastaan. Tästä saadaan joukko epäyhtälöitä, jotka määrittävät hyökkääjän tasapainostrategian mahdolliset todennäköisyysjakaumat.

3.2 Merialueen kulkukelpoisuuden esittäminen graafina

Automatisoitu reitinhaku vaatii, että tieto mahdollisista kulkureiteistä pystytään esittämään muodossa, jonka pystyy syöttämään optimointityökaluun. Suomessa tämä on maalla yleensä verrattain suoraviivaista, koska valtaosa kulkuneuvoista on rajoittunut kulkemaan teitä pitkin, jolloin vaihtoehtojen joukko on hyvin rajattu, ja ilmassa nopein reitti on käytännössä aina suorin reitti. Suomen aluevesillä merialukset eivät voi liikkua vapaasti johtuen saarista ja matalikoista. Merenkulkuväylät eivät myöskään kata kaikkia mahdollisia kulkureittejä alueella varsinkaan pienemmille aluksille. Tarvitsimme siis paremman tavan mallintaa alusten mahdollisia kulkureittejä.

Kulkureittien mallintamisen pohjaksi valikoitui Liikenneviraston jakama syvyyskartta-aineisto (Liikennevirasto, 2018). Aineiston hyödyntämiseksi luotiin tietokoneohjelma, joka pystyy luomaan kartta-aineiston pohjalta kulkukelpoisuusgraafin (ks. kuva 1). Ohjelma hyödyntää kuvankäsittelyalgoritmeja tunnistamaan kartasta alueet, joissa veden syvyys on riittävä turvalliseen liikkumiseen käyttäjän asettamien parametrien mukaan. Riittävän syville vesialueille asetetaan graafin solmuja kuvaamaan paikkoja, jotka alusten on mahdollista saavuttaa. Solmujen välille lisätään kaaria kuvaamaan mahdollisia liikesuuntia eri alueilla. Muodostettu graafi on tiheämpi alueilla, joissa liike on rajoitetumpaa, kuten saarien ja matalikkojen lähellä, koska aluksen tarkka reitti on siellä tärkeämpi. Tarkempi kuvaus graafin muodostamiseen käytettävistä menetelmistä löytyy Leevi Olanderin kandidaatintyöstä (2018).

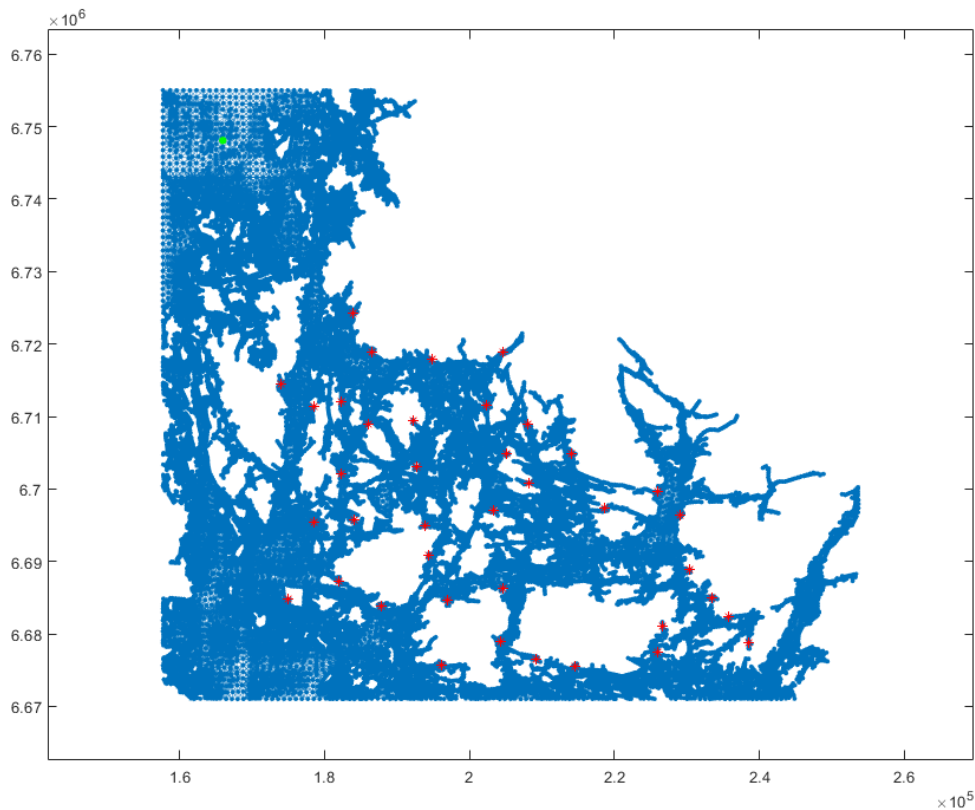


Kuva 1: Kuvakaappaus kulkukelpoisuusgraafityökalusta.

4. Tulokset ja pohdinta

Kehitettyä menetelmää testattiin soveltamalla sitä todentuntuiseen esimerkkiin, jossa merivoimien alus pyrkii piiloutumaan vihollisen tiedustelulta. Esimerkissä yksi alus lähtee operaatioalueelta saariston suojaan hakemaan ammustäydennyksiä. Siellä alus kohtaa huoltoaluksen, ja ne ankkuroituvan rinnakkain täydennyksen ajaksi. Aluksien ei ole mahdollista liikkua, joten ne ovat erityisen alttiita vihollisen asejärjestelmille, mikäli ne löydetään. Saaristo kuitenkin suojaa aluksia pinta-tutkilta ja valtaosalta muista sensoreista. Suurin uhka aluksille muodostuu ilmasta käsin tapahtuvasta tiedustelusta ja erityisesti miehittämättömistä ilma-aluksista. Tarkastelussa keskityttiin selvittämään aluksen kykyä piiloutua tiedustelulta. Vuonna 2019 tarkastelunäkökulmaa laajennetaan kattamaan myös aktiivisempia toimenpiteitä kuten ilmatorjunnan tuominen alueelle.

Kuvassa 2 on esitetty kehitetyllä kulkukelpoisuusgraafityökalulla luotu graafi, joka kattaa 96km x 96km kokoisen alueen Turusta länteen. Liikkumiseen vaadittava syvyys on graafissa asetettu viiteen metriin ja siitä on myös poistettu alueet, joita ei voida saavuttaa ylittämättä matalampia vesialueita tai maata. Kuvassa myös näkyy täydennyksiä hakemaan lähtevän aluksen lähtöpaikka. Graafiin on myös sijoitettu mahdolliset kohtaamispaikat huoltoaluksen kanssa.

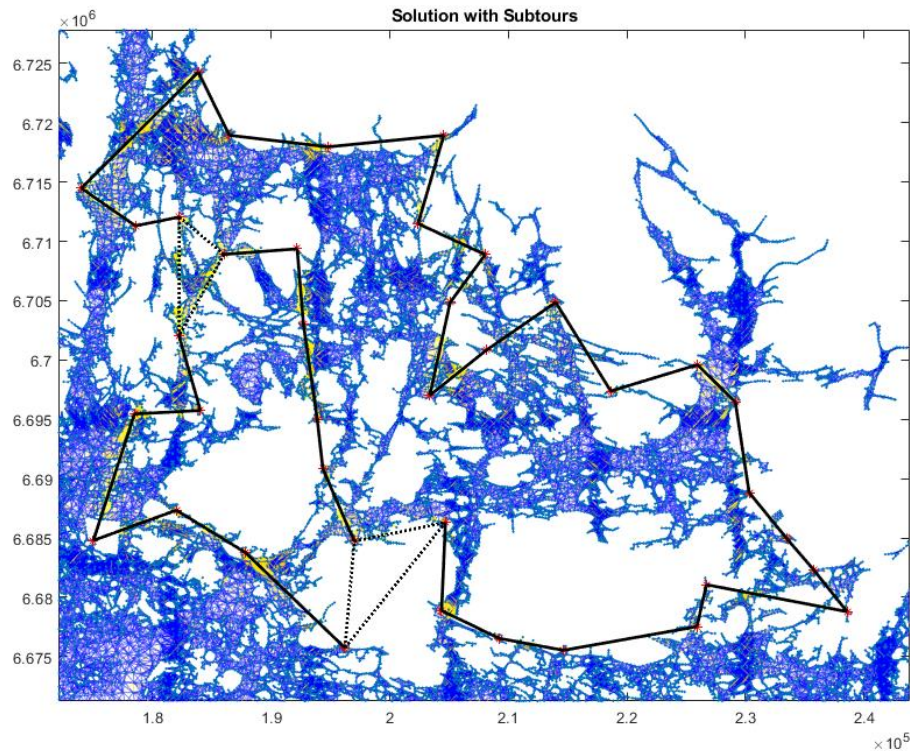


Kuva 2: Kulkukelpoisuusgraafi toiminta-alueesta. Aluksen lähtöpiste luoteessa on merkitty vihreällä ympyrällä ja mahdolliset täydennyspaikat punaisilla tähdillä. Kuvattu alue kattaa 96km x 96km saaristomerta Turun länsipuolella.

Ensimmäinen vaihe hyvän toimintasuunnitelman etsimisessä oli muodostaa arvio tiedustelu-uhasta. Koska alukset ovat käytännössä puolustuskyvyttömiä alustäydennyksen ollessa käynnissä ja paikallaan olevan kohteen löytäminen on helpompaa kuin liikkuvan, oletettiin, että vihollinen keskittäisi huomionsa juuri alustäydennyksen etsimiseen. Itse alustäydennys voidaan ajatella partiointipelinä, jossa partioija vain yrittää etsiä helppoa maalia hyökkääjän sijasta. Molemmissa tilanteissa on samanlainen rajallinen aikaikkuna, jossa kohde on löydettävä. Vihollisella oletettiin olevan sama tieto mahdollisista täydennyspaikoista kuin meilläkin. Näin tehtiin sen vuoksi, että mahdollisten täydennyspaikkojen on tarkoitus kuvastaa paikkoja, joihin alukset voivat riittävän helposti ankkuroitua rinnakkain täydennyksen ajaksi, ja tällaisen tiedon hankkiminen kartoista on täysin mahdollista. Lisäksi, vaikka vihollinen ei päätyisikään todellisuudessa samanlaiseen arvioon mahdollisista paikoista, se ei ole meidän oman toimintamme kannalta ongelmallista. Partiointipelin tasapainoratkaisuilla on sellainen ominaisuus, että jos partioija etsii kohdetta väärältä alueelta eli paikoista, joita ei ole edes harkittu, tai jättää osan harkituista paikoista etsimättä, se voi ainoastaan nostaa todennäköisyyttä, että täydennys onnistuu huomaamattomasti.

Partiointipeliin liittyvä laskenta oli varsin suoraviivaista. Koska UAV liikkuu ilmassa, luotiin partioitava graafi yksinkertaisesti asettamalla siihen solmuiksi kaikki mahdolliset täydennyspaikat ja niiden kaikkien välille lisättiin kaaret, joiden painoina oli UAV:ltä niiden kulkemiseen kuluva aika. UAV:n nopeutena käytettiin 100km/h ja alue jolla kuvassa 2 näkyvät 39 mahdollista täydennyspaikkaa sijaitsevat on kooltaan n. 50km x 60km. Optimaalisen parti-

ointireitin etsimiseen meni osiossa 3.1 mainitulta algoritmilta MATLABilla toteutettuna ja kannettavalla tietokoneella laskettuna n. 1,5 sekuntia, josta puolet kuvan piirtämiseen. Laskettu partiointireitti on esitetty kuvassa 3. Paras strategia täydennyspaikan valintaan on valita jokin paikoista satunnaisesti käyttäen todennäköisyyksiä, jotka muodostavat tasapainoratkaisun esitetyn partiointireitin kanssa. Tässä esimerkkitalanteessa todennäköisyys, että alustäydennys löydetään, on n. 35%.



Kuva 3: Partiointipelistä ratkaistu paras partiointireitti. Yhtenäisellä viivalla merkityt osat reitistä kuljetaan kahdesti ja katkoviivalla merkityt kerran. Kuvassa on myös väritetty taustalla näkyvän kulkukelpoisuusgraafin kaaret niihin kohdistuvan tiedustelu-uhan mukaan. Siniset ovat turvallisimpia, punaiset vaarallisimpia ja keltaiset siltä väliltä.

Kuvassa 3 on myös nähtävissä vihollisen tiedustelusta koitua uhka alueella liikkumiseen. Kuvassa taustalla näkyvän kulkukelpoisuusgraafin kaaret on väritetty niihin kohdistuvan tiedustelu-uhan perusteella. Uhka on laskettu UAV:n havainnointietäisyyden sekä UAV:n ja aluksen keskinäisten liikenopeuksien perusteella. Muuntamalla riskit logaritmisiksi ja asettamalla ne graafin kaarien painoiksi, voidaan minkä tahansa reitin vaarallisuus laskea summaamalla kaarien riskejä yhteen. Tämä myös tarkoittaa sitä, että yleisesti käytettyjä reitin-hakualgoritmeja voidaan käyttää turvallisimpien reittien etsimiseen valittaville täydennyspaikoille. Alueella kulkemiseen liittyvät riskit ovat kuitenkin häviävän verrattuna täydennyspaikaiseen löytymisriskiin. Suuruusluokaltaan löytymistodennäköisyydet eri täydennyspaikoille siirtyessä ovat alle prosentin. Tämä ei toki ole yllättävää, kun vihollisen oletetaan keskittyvän nimenomaan alustäydennyksen löytämiseen.

5. Loppupäätelmät

Olemme esitelleet uuden menetelmän partiointireittien valintaan, kun vastassa oleva toimija yrittää pitää suhteellisen lyhyessä aikaikkunassa tapahtuvan operaation salassa. Menetelmä on sovellettavissa useisiin operatiivisen suunnittelun päätösongelmiin. Esitetty versio laskentamallista olettaa, että kaikki mahdolliset sijainnit salassa pidettävälle toimenpiteelle ovat yhtä hyviä, mutta mallia on mahdollista myös kehittää siten, että eri sijainneissa on eroja esimerkiksi löytymistodennäköisyyksien, aikaikkunan tai löytymisen seurauksien kannalta.

Olemme myös luoneet työkalun kulkukelpoisuusgraafien luomiseen vesialueille. Kartta-aineiston esittäminen graafimuodossa mahdollistaa useanlaisten optimointimallien käytön reitinhaussa aina lyhimmän reitin etsimisestä turvallisimman reitin etsintään tiedustelu-uhan alla. Kehitetty graafinluontityökalu on myös luovutettu Puolustusvoimien Tutkimuslaitoksen käyttöön, mikä tukee liikkeen optimointityökalujen kehittämistä myös siellä.

Emme päässeet partiointipelin analysoinnissa aivan niin pitkälle kuin alun perin tavoittelimme, mutta työ jatkuu vielä esitetyn ratkaisun optimaalisuuden tutkimisen parissa sekä tutkimuksesta kirjoitettavan tieteellisen julkaisun kirjoittamisessa. Nämä saataneen valmiiksi vuoden 2019 alussa. Tavoitteenamme on myös jatkaa vuosi 2019 saman esimerkkitarkastelun parissa, tuoden mukaan myös aktiivisempia tapoja suojata alustäydennystä kuten ilma-atorjuntaa.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksesta kirjoitettavat tieteelliset julkaisut ovat käsikirjoitusvaiheessa. Työn alla on artikkeli partiointipelin ratkaisusta sekä konferenssijulkaisu esimerkkitarkastelusta.

7. Lähteet

Alpern, S., Morton, A. and Papadaki, K. (2011). Patrolling games. *Operations Research*, 59(5), pp.1246-1257.

Banks, D.L., Aliaga, J.M.R. and Insua, D.R. (2015). *Adversarial Risk Analysis*. CRC Press.

Bunn, D.W, Salo, A. (1993). Forecasting with scenarios. *European Journal of Operational Research*, 68, 291-303.

Kangaspunta, J., Salo, A. (2014). Expert judgments in the cost-effectiveness analysis of resource allocations: A case study in military planning, *OR Spectrum*, 36(1), 161-185.

Keeney, R.L. (2007). Modeling Values for Anti-Terrorism Analysis. *Risk Analysis*, 27(3), pp.585-596.

Liikennevirasto (2018). Finnish Transport Agency – Download Service. url: <https://julkinen.liikennevirasto.fi/oskari/?lang=en> (accessed 15.07.2018).

Olander, L. (2018). Generating a Navigation Graph for Coastal Waters. Kandidaatintyö. (Luonnos)

Rios Insua, D., Rios, J., Banks, D. (2009). Adversarial risk analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 104(486), pp.841-854.



Roponen, J., Salo, A. (2015). Adversarial Risk Analysis for Enhancing Combat Simulation Models. *Journal of Military Studies*, 6(2).