Juuso Huurinainen

Stokastinen optimointitehtävä lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

14. toukokuuta 2020

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Juuso Huurinainen

Yhteystiedot: juuso.r.k.huurinainen@jyu.fi

Ohjaaja: Tytti Saksa

Työn nimi: Stokastinen optimointitehtävä lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa

Title in English: A stochastic programming model for air traffic flow management

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 14+0

Tiivistelmä: Tässä tutkielmassa tarkastellaan stokastista optimointitehtävää sovellettuna lentoliikenteeseen. Tavoitteena on selvittää, miten tai mihin tarkoitukseen stokastista optimointitehtävää on kehitetty lentoliikenteen sujuvuuden hallintaan.

Avainsanat: optimointi, päätösanalyysi, stokastinen optimointitehtävä, lentoliikenteen sujuvuuden hallinta

Abstract: This document is a review of using a stochastic programming model for air traffic flow management.

Keywords: Stochastic programming, optimization, air traffic flow management, decision analysis

Sisältö

1 Johdanto

Tämä tutkielma käsittelee lentoliikenteen sujuvuuden hallintaan kehitettyä stokastista optimointitehtävää, jonka ovat kehittäneet (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011), ja johon tässä tutkielmassa perehdytään. Tämän malli on kehitetty ongelmalle, joka koskee lentokenttien kapasiteettien allokoimista ja jonka tarkoitus on hoitaa ruuhkailmiöitä lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa. Mallia voi siten käyttää päätöksenteossa, kun kyse on resurssien eli kapasiteettien allokoimisesta.

Tässä tutkielmassa halutaan löytää vastaus tutkimuskysymykseen, joka on se, että miten tai mihin tarkoitukseen optimointimallia voidaan käyttää lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa.

Tämä tutkielma sisältää johdannon jälkeen luvun 2, jossa käsitellään tarvittavat käsitteet optimoinnin, päätösteorian ja lentoliikenteen osalta. Tämän jälkeen luvussa 3 käsitellään itse tutkimuskysymys eli lentoliikenteen sujuvuuden hallinnan stokastinen optimointitehtävä. Luvussa 4 tarkastellaan optimointitehtävän ratkaisemista.

2 Optimointi ja lentoliikenne

Tämä luku käsittelee optimointia ja lentoliikennettä yleistasolla. Tavoite on käsitellä käsitteet, joita tarvitaan kuvaamaan ja ymmärtämään tutkimuskysymys, eli miten tai miksi stokastista optimointitehtävää voi käyttää lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa.

2.1 Yleistä optimoinnista

Optimointi on keskeinen osa ongelmia, joihin liittyy päätöksentekoa. Päätöksentekoon liittyy vaihtoehtoja, joista halutaan valita paras vaihtoehto (Chong ja Zak 2013, preface). Optimaalinen tarkoittaa parasta mahdollista vaihtoehtoa, ja optimointi taas tarkoittaa optimaalisen vaihtoehdon etsimistä. Esimerkkinä optimoinnista Yang (2008, s. 3) esittää yrityksen, joka haluaa maksimoida tuottoja tai minimoida kuluja.

Matemaattisessa optimoinnissa on kyse päätösongelmasta, johon halutaan löytää paras mahdollinen ratkaisu. Päätösongelma täytyy olla jollain tavalla mitattavissa, jotta sitä voidaan matemaattisessa mielessä optimoida. Lisäksi päätösongelmalla täytyy olla eksplisiittinen tavoite (Yang 2008, s. 3). Edellisten ehtojen toteutuessa voidaan muodostaa päätösongelma eli optimointitehtävä, johon kuuluu minimoitava tai maksimoitava objektifunktio, jonka muuttujia kutsutaan päätösmuuttujiksi (Chong ja Zak 2013, s. 81). Optimointitehtävä on siis matemaattinen malli, jonka objektifunktion arvo vaihtelee eri päätösmuuttujien arvoilla.

Optimointitehtävään kuuluu myös mahdolliset päätösmuuttujien rajoitteet. Joukkoa, johon päätösmuuttujat kuuluvat, kutsutaan rajoitejoukoksi, ja optimointitehtävää, johon kuuluu rajoitejoukko, kutsutaan rajoitetuksi optimointitehtäväksi. Jos rajoitejoukko on koko Euklidinen avaruus $\mathbb{R}^n$, eli päätösmuuttujilla ei ole rajoitteita, optimointitehtävää kutsutaan rajoittamattomaksi optimointitehtäväksi. (Chong ja Zak 2013, s. 82)

Matemaattisessa optimoinnissa halutaan löytää päätösmuuttujat, joilla objektifunktio saa pienimmän tai suurimman arvonsa (Chong ja Zak 2013, s. 81). Optimointitehtävä eli sopivan päätösmuuttujan etsiminen ratkaistaan optimointimenetelmällä, jonka valitseminen perustuu optimointitehtävään. Esimerkiksi Chongin ja Zakin (2013, s. 305) mukaan lineaarisiin optimointitehtäviin, eli sellaisiin joiden objektifunkio on lineaarinen, käytetään niihin sopivia optimointimenetelmiä.

Stokastinen optimointitehtävä on malli, jonka parametreissa esiintyy satunnaisuutta (Herrera ja Narciso 2017, preface). Tässä tutkimuksessa tutustutaan stokastiseen optimointitehtävään lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa.

Päätösongelmaa eli optimointitehtävää voidaan myös käsitellä päätösteorian näkökulmasta. Päätös tarkoittaa vaikeasti peruutettavissa olevaa resurssien allokointia (Howard 1966). Tähän liittyen Howard (1966) kutsuu päätösongelman analyysiä päätösanalyysiksi. Tarkemmin määriteltynä hän kuvaa päätösanalyysiä päätökseen vaikuttavien tekijöiden tasapainottamisen menettelyksi, johon kuuluu päätöksen konstruktointi rakenteelliseksi malliksi laskentaa varten (Howard 1966). Optimointitehtävän muotoileminen ja ratkaiseminen on siis päätösanalyysia.

2.2 Lentoliikenteen hallinnasta

Määritellään tässä alaluvussa muutama tutkielmaan liittyvä lentoliikenteen käsite.

Lentokentän kapasiteetti voidaan esittää maksimimääränä olioita, jotka voivat olla sijoitettuina tietyn aikavälin tietyissä olosuhteissa (Janic 2009, s. 95). Janicin (2009) mukaan (Janic 2001) määrittelee olioihin lukeutuvan lentokentällä tapahtuvaa liikennettä, johon kuuluu esimerkiksi lentoalusten laskeutumista ja nousua sekä matkustajien ja matkatavaroiden kauttakulkua (Janic 2009, s. 95). Tässä tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita lentokentän kapasiteetista kentän lentokoneiden lähtöjen ja laskeutumisten kontekstissa.

Lentoliikenteen hallinta (englanniksi *air traffic management, (ATM)*) tarkoittaa niitä prosesseja, joilla lentoliikenne saadaan turvalliseksi, tehokkaaksi ja nopeaksi (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011). Lentoliikenteen sujuvuuden hallintaa (englanniksi *air traffic flow management (ATFM))* käytetään organisoimaan ja säännöstelemään liikennevirtoja ilmatilan tai lentokentän ruuhkan välttämiseksi (Durand ym. 2016, s. 4).

3 Lentoliikenteen sujuvuuden hallinnan stokastinen optimointitehtävä

Tässä luvussa esitetään lentoliikenteen sujuvuuden hallinnan stokastinen optimointitehtävä. Ensiksi kuvataan optimointitehtävää yleisellä tasolla, jonka jälkeen tutustutaan itse optimointitehtävään.

Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) esittävät lentoliikenteen sujuvuuden hallintaan matemaattisen mallin, joka ottaa huomioon kolme tärkeää ongelmaa. Ensimmäinen ongelma liittyy epävarmuuteen lentokentän kapasiteeteissa, joita malli ottaa huomioon skenaarioiden käytöllä. Toinen ongelma liittyy mahdolliseen kompromissiin lähtö- ja saapumiskapasiteettien välillä. Kolmas ongelma liittyy eri lentokentillä olevien lentokoneiden lähdön viivästymisistä aiheutuvaan verkoston vaikutukseen.

Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) ovat kehittäneet makroskooppisen mallin ratkaistaakseen edellä mainitut kolme ongelmaa yhtä aikaa, mihin aiemmin kehitetyt mallit eivät ole kyenneet. Tämä malli ehdottaa, montako lentoa pitäisi lykätä tiettynä harkittavana aikavälinä. Malli on tarkoitettu kaupallisille lentokentille.

Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) esittävät ongelman, joka koskee lentokenttien kapasiteettien allokoimista ja jonka tarkoitus on hoitaa ruuhkailmiöitä lentoliikenteen sujuvuuden hallinnassa. Toisin sanoen tavoite on laskea optimaalinen sekoitus saapumisien ja lähtöjen määriä annetulla lentokenttäverkostolla, mikä minimoi kokonaisviiveen lentokentillä ruuhka-aikana. Viiveeksi katsotaan sitä, kun lentokonetta ei voida päästää nousemaan eikä laskeutumaan.

Päätösteorian näkökulmasta päätöksen kohteena on lentokenttien kapasiteettien allokoiminen. Päätösanalyysissa tälle päätösongelmalle muotoillaan optimointimalli, joka voidaan ratkaista päätöksentekoa varten.

3.1 Oletukset ja notaatiot

Tässä alaluvussa tehdään tarvittavia oletuksia ja notaatiota optimointiongelman tarkempaa kuvailua ja stokastista optimointitehtävää varten.

Olkoon annettu lentokenttien joukko $\mathscr{K}$ ja olkoon lentokentät $h, k \in \mathscr{K}$. Lisäksi olkoon jokaiselle annetulle lentokentälle annettu kysyntä sekä saapumisille että lähdoille aikahorisontin $[0, T]$ aikana, jolloin ruuhkaa on odotettavissa. Aikahorisontti täytyy diskretisoida ajanjaksoiksi. Merkinnällä $D_{\tau}^{h,k}$ merkitään kumulatiivista lähtöjen kysyntää lentokentältä h lentokentälle k ajanjaksolla τ. Kumulatiivista saapumisien kysyntää lentökentältä h lentokentälle k ajanjaksolla $\tau + FT^{h,k}$, missä $FT^{h,k}$ tarkoittaa lentoaikaa lentokentän h ja k välillä, merkitään $D_{\tau}^{h,k}$. (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011)

Huomataan, että kumulatiivista lähtojen ja saapumisien kysyntää merkitään samalla notaatiolla $D_{\tau}^{h,k}$, mutta niillä on se ero, että jälkimmäisen ajanjaksoon lisätään lentoaika $FT^{h,k}$. Malli olettaa myös sen, että lentoaika kahden lentokentän välillä on sama kaikille lentokoneille (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011).

Lentokentän kapasiteetin kuorta (englanniksi *envelope*) merkitään $\mathscr{E}(k,t)$, mikä tarkoittaa käyttökelpoisia saapumisien ja lähtöjen kombinaatioita lentokentällä $k \in \mathscr{K}$ ajanjaksolla $t \in \{1, ..., T\}$. (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011)

Ongelma saadaan edellä kuvattujen parametrien avulla määriteltyä seuraavalla tavalla. Tavoite on laskea mille tahansa ajanjaksolle t ja verkoston lentokentälle k viiveen suhteen optimaalinen sujuvuus saapuville ja lähteville lennoille kapasiteettirajoitteet huomioon ottaen. Kapasiteettirajoitteet liittyvät jokaisen verkoston lentokentän sekoitukseen saapumisia ja lähtöjä jokaisena ajanjaksona. (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011)

$\mathscr{E}(k,t)$ halutaan esittää satunnaisina muuttujina, jolloin saadaan aikaan lentokentän kapasiteetin epävarmuus (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011). Tällöin päästäänkin muotoilemaan esitetyn ongelman stokastinen optimointimalli.

3.2 Stokastisen optimointitehtävän muotoilu

Tässä alaluvussa lähdetään muotoilemaan stokastista optimointitehtävää. Ensin huomioidaan se, että stokastisessa puitteissa hallintapäätöksissä käytetään lentokoneen maassa ja ilmassa olevia viivästysmääräyksiä määräämään sopiva sekoitus lähtöjä ja saapumisia (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011).

Kapasiteetin tulee sisältyä johonkin joukkoon. Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) olettavat kapasiteetin informaation olevan annettu stokastisena diskreettinä prosessina. Stokastinen diskreetti prosessi tarkoittaa satunnaisten muuttujien jonoja (Dobrow 2016, s. 6). Tässä tapauksessa muuttujat kuvaavat kapasiteetteja.

Kuten luvun 3 alussa mainittiin, kapasiteettien epävarmuus otetaan huomioon skenaarioiden käytöllä. Jokainen skenaario esittää satunnaisen muuttujan toteuttamista. Näiden skenaarioiden suhteet esitetään skenaariopuun avulla, missä puuta merkitään $\mathfrak{J}$, joka kuvaa kaiken informaation kehityksen kehityskaarilla ajan myötä. Skenaariopuun solmuissa olevat haarat kuvaavat mahdollisia tulevaisuuden tapahtumia, mitkä on mallinnettu satunnaisilla muuttujilla, jotka vastaavat puun solmuja. (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011)

Ongelmasta on muotoiltu deterministinen versio mutta Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) muotoilevat ongelman monivaiheisena stokastisena kokonaislukuoptimointitehtävänä. Ensinnäkin päätösmuuttujiksi määritellään kaksi muuttujaa. Ensimmäistä muuttujaa eli lähtöjen määrää lentokentältä h lentokentälle k aikana t skenaariossa s merkitään $d_s^{h,k}(t)$. Toista muuttujaa eli saapumisien määrää lentokentälle k lentokentältä h aikana t skenaariossa s merkitään $a_s^{k,h}(t)$. (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011)

3.2.1 Objektifunktio

Objektifunktioksi Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) muotoilevat odotetun painotetun aritmeettisen keskiarvon viiveelle, jota halutaan minimoida. Painotus reflektoi erilaista viiveen yksikköhintaa lentokoneen ilmassa pitämisen ja maassa pitämisen välillä (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011). Viive koostuu siitä, kun lentokoneet joutuvat odottamaan maasta lähtöä tai ilmasta laskeutumista lentokentälle.

Objektifunktiossa käytetään hyväksi summamerkin yleistystä eli sitä, että $\sum_{i,j} = \sum_i \sum_j$. Edellä mainittujen notaatioiden lisäksi Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) määräävät vielä $\mathscr{S}$ skenaarioiden joukoksi ja $s \in \mathscr{S}$ skenaarioksi, p_s skenaarion s todennäköisyydeksi, c_g kustannukseksi lennon maassapidolle ja c_a kustannukseksi lennon ilmassapidolle. Nyt edellisten notaatioiden avulla Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) määrittelevät seuraavaksi objektifunktion

$$\mathrm{Min} \sum_{s \in \mathscr{S}} p_s \sum_{\substack{k,h \in \mathscr{K}, \\ t \in \mathscr{T}}} \Big[c_a \sum_{\tau=1}^{t} \Big(d_s^{k,h}\big(\tau - FT_s^{h,k}\big) - a_s^{h,k}(\tau) \Big) + c_g \Big(\sum_{\tau=1}^{t} d_s^{k,h}(\tau) - D_t^{h,k} \Big) \Big]. \tag{3.1}$$

3.2.2 Rajoitteet

Objektifunktion määrittämisen jälkeen optimointitehtävään kuuluvat päätösmuuttujien rajoitukset, jotka Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) kuvaavat seuraavasti. Ensimmäisenä ovat kapasiteetin rajoitukset, jossa saapumisien ja lähtojen kokonaismäärä jokaisella lentokentällä ja jokaisena ajanjaksona kuuluvat kapasiteetin kuoreen. Toisena ovat kysynnän rajoitukset, missä rajoitetaan lähtöjen määrää jokaisena ajanjaksona jokaiselle lentomatkalle jokaisessa skenaariossa. Kolmas rajoitus yhdistää saapumisien ja lähtöjen muuttujat yhteen, missä yhteys seuraa lentojen kysynnästä. Neljäs rajoitus koskee viiveen etenemistä eli sitä, että lähdöt rajoittuvat saapumisien ja tietyn ajanjakson kumulatiivisten lähtöjen mukaan. Loput kaksi rajoitusta ovat yleiset stokastisen optimointitehtävän rajoitukset eli ne, että päätökset tehdään vain aiemman annetun tiedon mukaan. (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011)

4 Optimointitehtävän ratkaisu

Luvussa 2 kerrottiin, että optimointitehtäviä ratkaistaan optimointimenetelmillä. Tässä luvussa tarkastellaan lyhyesti tässä tutkielmassa esiintyvän optimointitehtävän ratkaisemista.

Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli (2011) ratkaisevat optimointitehtävän CPLEX-ohjelmiston haarautumismenetelmällä (englanniksi *branch-and-bound method*) käyttäen AMPL-ohjelmointikieltä. Haarautumismenetelmä on tekniikka, jossa simuloidaan kaikkien mahdollisten ratkaisujen luetteloimista (Korte ja Vygen 2012, s. 584).

Käytännöllisyyden näkökulmasta optimointitehtävän 20-30 minuutin ratkaisuaika vastaa aikavakioita, jotka liittyvät Eurocontrollin eli Euroopan lentoliikenteen sujuvuuden hallinnan koordinoivan laitoksen päätössykleihin (Andreatta, Dell'Olmo ja Lulli 2011). Mallista on siis käytännön hyötyä. On kuitenkin epävarmaa, päteekö käytännöllisyyden havainto vielä nykyään ottaen huomioon artikkelin julkaisuajankohdan.

5 Yhteenveto

Tässä tutkielman tavoitteena oli tarkastella optimoinnin sovellusaluetta eli lentoliikenteen sujuvuuden hallinnan stokastista optimointitehtävää. Tätä optimointitehtävää voidaan käyttää lentoliikenteen ruuhkanhallinnassa allokoimalla lentokenttien kapasiteetteja ottaen samalla huomioon kapasiteetin stokastisen luonteen. Tutkielmassa esittiin optimointitehtävän tausta, optimointiongelma, objektifunktio ja optimointitehtävän rajoitteet. Optimointitehtävän ratkaisusta mainittiin jättäen kuitenkin ratkaisuun käytettävän optimointimenetelmän käsittelyn lyhyeksi. Optimointitehtävän lisäksi tutkielmassa käsiteltiin yleisellä tasolla teoriaa matemaattisesta optimoinnista ja lentoliikenteestä. Optimointitehtävää käsiteltiin myös hieman päätösteorian osalta.

Lähteet

Andreatta, Giovanni, Paolo Dell'Olmo ja Guglielmo Lulli. 2011. "An aggregate stochastic programming model for air traffic flow management". *European Journal of Operational Research* 215:697–704. doi:10.1016/j.ejor.2011.06.028.

Chong, Edwin K. P., ja Stanislaw H. Zak. 2013. *An Introduction to Optimization.* 4. painos. Wiley Series in Discrete Mathematics and Optimization Ser. 76. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, Incorporated. https://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=1124000.

Dobrow, Robert P. 2016. *Introduction to Stochastic Processes with R.* Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, Inc. http://search.ebscohost.com.ezproxy.jyu.fi/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1214883&site=ehost-live.

Durand, Nicolas, David Gianazza, Jean-Baptiste Gotteland ja Jean-Marc Alliot. 2016. *Metaheuristics for Air Traffic Management.* 1. painos. Nide 2. Great Britain: John Wiley Sons, Incorporated. https://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=4205907.

Herrera, Bouza, ja Carlos Narciso. 2017. *Stochastic Programming : Theory, Applications, and Impacts.* Mathematics Research Developments. New York: Nova Science Publisher, Inc. http://search.ebscohost.com.ezproxy.jyu.fi/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1512238&site=ehost-live.

Howard, Ronald A. 1966. "Decision Analysis: Applied Decision Theory". Teoksessa *Proceedings of the Fourth International Conference on Operational Research.* Luettu 30.3.2020. John Wiley Sons, Inc. https://sdg.com/publications/decision-analysis-applied-decision-theory.

Janic, Milan. 2001. *Analysis and Modeling of Air Transport System: Capacity, Quality of Service and Economics.* London, UK: Taylor ja Francis.

Janic, Milan. 2009. *Airport Analysis, Planning and Design : Demand, Capacity and Congestion.* Transportation Infrastructure - Roads, Highways, Bridges, Airports and Mass Transit. New York: Nova Science Publishers, Incorporated. https://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=2194179.

Korte, Bernhard, ja Jens Vygen. 2012. *Combinatorial Optimization Theory and Algorithms.* 5. painos. Algorithms and Combinatorics 21. Berlin, Heidelberg: Spinger. doi:10.1007/978-3-642-24488-9.

Yang, Xin-She. 2008. *Introduction to Mathematical Optimization : From Linear Programming to Metaheuristics.* Cambridge, United Kingdom: Cambridge International Science Publishing. http://search.ebscohost.com.ezproxy.jyu.fi/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=311051&site=ehost-live.