

# Lectio Praecursoria 31.5.2013

Arvoisa valvoja, arvoisa vastaväittäjä, arvoisat kuulijat.

---

Kysyntäohjautuvalla joukkoliikenteellä tarkoitetaan bussi- ja taksipalvelujen välimuotoa, joka perustuu ajoneuvojen joustavaan reititykseen. Kysyntäohjautuvassa joukkoliikenteessä matkat tilataan etukäteen ja ajoneuvojen reitit muodostuvat matkati-  
lausten perusteella. Väitöskirjassa on tutkittu ja kehitetty matemaattisia malleja kysyntäohjautuvalle joukkoliikenteelle, ja algoritmeja eli menetelmiä, joilla voidaan ratkaista ajoneuvojen reitinlaskentaan ja matkansuunnitteluun liittyviä kombina-  
torisia ongelmia liikenneverkossa.

Väitöskirjan ensimmäinen osa käsittelee ajoneuvojen reitinlaskentaongelmaa. Toisessa osassa tarkastellaan matkustajien matkansuunnittelua liittyen joukkoliiken-  
nevälineen ja reitin valintaan. Lopuksi tutkitaan taloudellisen tasapainopisteen, eli kysynnän ja tarjonnan kohtaamispisteen, määrittämistä liikenneverkossa.

---

## Reitinlaskenta

Reitinlaskentaa hyödynnetään useissa erityyppisissä kuljetus- ja logistiikkatehtävissä. Matemaattisesti reitinlaskentaongelma voidaan määritellä usealla eri tavalla riip-  
puen sovelluskohteesta.

---

Reitinlaskentaongelmista tunnetuin on niin sanottu kauppamatkustajan ongel-  
ma. Ongelman määrittelee joukko maantieteellisiä pisteitä, esimerkiksi kaupunkia, joiden väliset etäisyydet tunnetaan. Tavoitteena on löytää lyhin reitti joka kulkee  
kaikkien pisteiden kautta. Kauppamatkustajan ongelma on laskennallisesti haasta-  
va: sen ratkaisemiseen tunnetaan ainoastaan algoritmeja, joiden laskenta-aika kasvaa eksponentiaalisesti pisteiden määrän suhteen.

---

Tilausten perusteella toimivissa kuljetuspalveluissa reitinlaskentaongelma on usein kauppamatkustajan ongelmaa monimutkaisempi. Tilauskuljetuspalveluissa asiakkaat  
voivat tilata matkoja tai tavarakuljetuksia noutopisteistä toimituspisteisiin. Ajoneu-  
vot palvelevat tilauksia siten että useampi asiakas tai tavarakuljetus voi olla samaan  
aikaan ajoneuvon kyydissä.

---

Tilaukskuljetukset voivat toimia joko staattisesti tai dynaamisesti. Staattisessa tapauksessa tilaukset tehdään ennakoon, esimerkiksi kuljetusta edeltävänä päivänä, ja ajoneuvojen reitit lasketaan etukäteen ennen palvelun aloittamista. Dynaamisessa tapauksessa tilauksia voi tehdä reaaliaikaisesti ja ajoneuvojen reitit voivat muuttua palvelun toiminta-aikana. Esimerkiksi lähettipalvelut toimivat yleensä dynaamisesti, kun taas useat tilausbussipalvelut edellyttävät matkojen varhaista ennakkotilausta. Dynaamisia reitinlaskentaongelmia käsitellään usein staattisten onelmien jonoina. Reitit voidaan optimoida uudelleen jokaisen uuden tilauksen yhteydessä, tai tilaukset voidaan lisätä ajoneuvojen reiteille erissä.

Tilaukskuljetuksiin liittyvissä reitinlaskentaongelmissa on usein kolme osittain ristiriitaista tavoitetta: palveltujen tilausten lukumäärän maksimointi, kustannusten minimointi ja asiakkaiden palvelutason optimointi. Kustannukset liittyvät ajoneuvojen lukumäärään sekä ajettujen reittien kokonaiskeston ja -pituuteen. Palvelutasoa mitataan usein sillä, kuinka paljon toteutuneet nouto- ja toimitusajat poikkeavat toivotuista. Matkustajaliikenteessä palvelutasoon vaikuttavat lisäksi kävely-, odotus- ja ajoaika sekä vaihtojen lukumäärä.

Tilaukskuljetuksissa nouto- ja toimitusaikoihin liittyy usein aikarajoitteita, joilla pyritään takaamaan tietty minimipalvelutaso asiakkaille. Tiukat aikaikkunat parantavat palvelun laatua, mutta toisaalta rajoittavat kuljetusten yhdistelymahdollisuuksia.

---

Dynaamisessa kysyntäohjautuvassa joukkoliikenteessä asiakkaat voivat tilata matkoja reaaliaikaisesti esimerkiksi internet-käyttöliittymällä ja ajoneuvojen reitit muodostuvat tilattujen matkojen perusteella. Jokaiselle uudelle asiakkaalle valitaan ajoneuvo ja valitulle ajoneuvolle lasketaan uusi reitti. Ajoneuvon ja reitin valinnassa tulee ottaa huomioon muun muassa uuden asiakkaan aiheuttama reitin pitenemä, uuden asiakkaan palvelutaso, muille asiakkaille aiheutuva palvelutason muutos sekä kysyntäennuste.

---

Ajoneuvon- ja reitinvalintaongelma voidaan ratkaista joko hajautetusti tai keskitetysti.

Hajautetussa ratkaisussa lisätään uusi asiakas johonkin olemassaolevista reiteistä laskemalla jokaiselle ajoneuvolle niin sanottu reittiehdotus ja valitsemalla niistä paras. Ajoneuvojen reittiehdotukset lasketaan erikseen ja toisistaan riippumatta, mikä mahdollistaa rinnakkaisen reitinlaskennan usealla suorittimella.

---

Hajautettu ratkaisu perustuu yksittäisten reittien tarkkaan optimointiin. Yksittäinen reitti voidaan muodostaa tehokkaasti niin sanotulla lisäysperiaatteella, jossa asiakkaat lisätään yksi kerrallaan reitille sopiviin väleihin. Väitöskirjassa on esitetty lisäysperiaatteen yleistys, joka mahdollistaa reitinlaskennan tehokkuuden ja tarkkuuden säätämisen käytettävissä olevan laskentakapasiteetin mukaan.

---

Keskitetyn ratkaisun periaate on se, että uuden matkatilauksen saapuessa etsitään parasta mahdollista asiakkaiden, ajoneuvojen ja reittien yhdistelmää. Toisin kuin hajautetussa mallissa, keskitetyssä ratkaisussa noutamattomia asiakkaita voidaan siirtää ajoneuvolta toiselle eli asiakkaalle määrätty ajoneuvo voi vaihtua ennen noutohetkeä.

---

Väitöskirjassa esitetty maksimiklusterimenetelmä ratkaisee ajoneuvon- ja reitinvalintaongelman keskitetysti. Menetelmän perusideana on etsiä toistuvasti jäljelläolevista asiakkaista suurin klusteri eli asiakasjoukko, joka sopii yhden ajoneuvon reitille. Toisin sanoen menetelmä pyrkii maksimoimaan palveltujen asiakkaiden lukumäärän jokaisella ajoneuvolla.

---

Maksimiklusterit voidaan määrittää tehokkaasti järjestämällä asiakkaiden nouto- ja toimituspisteet arvojärjestykseen. Suurimman arvon saavat pisteet, joista on mahdollista siirtyä mahdollisimman moneen arvokkaaseen pisteeseen aikarajojen sisällä. Arvojärjestys voidaan määrittää laskemalla nouto- ja toimituspisteiden vierekkäisyysmatriisin suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori.

---

Nouto- ja toimituspisteiden arvojärjestyksen määrittäminen perustuu internetin hakukoneita varten suunniteltuihin algoritmeihin, jotka järjestävät internet-sivuja hakusanojen perusteella.

---

Arvojärjestysmenetelmä tuottaa tehokkaasti käyviä ratkaisuja tiukkojen rajoitusten vallitessa ja testiaineiston perusteella se on keskimäärin kertaluokkaa nopeampi aikaisempiin menetelmiin verrattuna. Yleisesti keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu, kun aika- tai kapasiteettirajoitteet ovat tiukkoja ja reittejä suunnitellaan pitkälle aikavälille. Hajautettu ratkaisu soveltuu tilanteisiin joissa reitit ovat lyhyitä tai ajoneuvojen lukumäärä on pieni.

---

## Matkansuunnittelu

Väitöskirjan toisessa osassa tarkastellaan matkustajan matkansuunnitteluongelmaa joukkoliikenneverkossa, joka liittyy kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen lisäksi myös perinteiseen joukkoliikenteeseen.

---

Yleisesti matkansuunnitteluongelma koostuu joukkoliikennevälineen, reitin ja aikataulun valinnasta liikenneverkossa. Tavoitteena on löytää reitti ja aikataulu jossa matkustajan odotus- kävely- ja ajoaika sekä vaihtojen lukumäärä ja hinta minimoituvat. Useissa kaupungeissa, joissa on laaja joukkoliikenneverkko, on käytössä internetissä toimiva matkansuunnittelupalvelu. Palveluissa matkustaja valitsee lähtöpisteen ja määränpään sekä toivotun lähtöajan tai saapumisaajan, jonka jälkeen palvelu tarjoaa matkustajalle yhden tai usean reittiehdotuksen, joka voi sisältää vaihtoja eri kulkumuotojen välillä. Vaihdollisten yhteyksien suunnittelu mahdollistaa myös kysyntäohjautuvan joukkoliikennejärjestelmän liittämisen perinteiseen joukkoliikenneverkkoon.

---

Graafiongelmien näkökulmasta matkansuunnittelu muistuttaa niin sanottua lyhimmän polun ongelmaa, jossa tarkoituksena on löytää lyhin mahdollinen polku kahden pisteen välillä verkossa, jonka pisteiden väliset etäisyydet tunnetaan. Kaupamatkustajan ongelmaan verrattuna lyhimmän polun ongelma on helpompi, sillä polun ei tarvitse kulkea verkon jokaisen pisteen kautta.

---

Deterministisillä matkansuunnittelumenetelmillä voidaan laskea etukäteen paras reitti joukkoliikenneverkossa halutun tavoitteen suhteen. Käytännössä etukäteen laskettu reitti ei kuitenkaan välttämättä toteudu esimerkiksi liikennevälineiden myöhästymisien tai vuorojen peruutuksien takia. Väitöskirjassa esitelty uudentyyppinen stokastinen matkansuunnittelumalli ottaa huomioon mahdolliset reittimuutokset matkan varrella. Stokastisen matkansuunnittelun avulla voidaan laskea parhaan reitin lisäksi paras matkastrategia tavoitefunktion suhteen.

---

Stokastisessa matkansuunnittelussa joukkoliikennepalvelujen arvioidut ohitusaikat pysäkeillä määritellään satunnaismuuttujina. Satunnaismuuttujien jakaumat määrittelevät vaihtojen onnistumisien todennäköisyydet eri joukkoliikennevälineiden välille.

---

Matka joukkoliikenneverkossa voidaan esittää Markov-päätösprosessina. Prosessi kuvaa päätöksentekoa tilanteissa, jossa lopputulos on osittain satunnainen ja osittain päätöksentekijän hallinnassa. Markov-päätösprosessin avulla voidaan ratkaista useita optimointiongelmia liittyen muun muassa robotiikkaan, automaatioon, taloustieteeseen ja tuotantotekniikkaan.

Markov-päätösprosessi kuvaa päätöksentekoa diskreettiaikaisesti. Tietyllä ajanhetkellä prosessi on tietyssä tilassa ja päätöksentekijä voi valita tietyn toiminnan. Seuraavalla ajanhetkellä prosessi siirtyy uuteen tilaan ja samalla päätöksentekijä saa tietyn palkkion. Todennäköisyys sille että prosessi siirtyy tiettyyn tilaan riippuu valitusta toiminnasta.

Matkansuunnittelussa päätösprosessin tilat määritellään joukkoliikenneverkon etappeina ja toiminnat matkustajan valintoina. Ollessaan tietyllä etapilla, matkustaja voi valita, mille etapille pyrkiä seuraavaksi. Stokastinen malli määrittelee, millä todennäköisyydellä matkustajan suunnittelema vaihto onnistuu.

Markov-päätösprosessille voidaan laskea optimaalinen politiikka niin sanotulla takaperoisella induktiolla. Optimaalinen politiikka koostuu odotusarvoltaan parhaista mahdollisista valinnoista matkan eri vaiheissa. Toisin sanoen optimaalinen politiikka määrittää parhaan reitin lisäksi matkastrategian, joka neuvoo matkustajalle parhaat kiertotiet silloin kun suunnitellut vaihdot eivät toteudu alkuperäisen reittisuunnitelman mukaisesti.

---

Yleisesti stokastisen matkansuunnittelun merkitys eri sovelluksissa korostuu kun liikennevälineiden välisten vaihtojen lukumäärä on suuri, vaihtoihin liittyy epävarmuutta tai halutaan maksimoida matkan luotettavuutta. Stokastisen mallin tarkkuus on myös säädeltävissä käytössä olevan laskentakapasiteetin mukaan.

---

## Talodellinen tasapaino

Väitöskirjan kolmannessa osassa tarkastellaan kysyntäohjautuvaa joukkoliikennettä yleisen tasapainoteorian ja liikennetalouden näkökulmasta.

---

Yleinen tasapainoteoria pyrkii selittämään kysynnän, tarjonnan, ja hintojen käyttäytymisen toistensa kanssa vuorovaikutuksessa olevilla markkinoilla. Tasapainolla tarkoitetaan

tilannetta, jossa kysyntä, tarjonta ja hinta eri markkinoilla pysyvät muuttumattomina tietyn ajanjakson sisällä.

Liikenneverkossa jokaisen lähtöpaikan ja määränpään välillä on markkina, jossa tarjonnan luovat eri kulkumuodot, kuten henkilöauto, joukkoliikenne ja kevyt liikenne. Kulkumuotojen kysyntä riippuu niiden laadusta ja hinnasta. Koko liikenneverkon kattavassa verkkotasapainotilassa kaikkien kulkumuotojen kysyntä, tarjonta ja hinta pysyvät muuttumattomina kaikilla välimatkoilla.

---

Kysynnän eri kulkumuodoille määrittelee diskreetti valintamalli, joka kuvaa matkustajien kulkumuodon valintaa tarjolla olevista vaihtoehtoista. Valintamallissa jokainen kulkumuoto tuottaa tietyn utiliteetin eli hyödyn, joka riippuu kulkumuodon laadusta ja hinnasta. Tietyn kulkumuodon kysyntä tietyllä välimatkalla riippuu sen utiliteetista ja vaihtoehtoisten kulkumuotojen utiliteeteista.

---

Väitöskirjassa tarkastellaan kysyntäohjautuvaa joukkoliikennettä osana liikennemarkkinoita. Kysyntäohjautuvan joukkoliikennepalvelun tuottama palvelutaso eri välimatkoille riippuu ajoneuvojen tiheydestä liikenneverkon eri osissa. Ajoneuvojen lukumäärä ja jakauma liikenneverkossa vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti ajoneuvoja on saatavilla kuljetusta varten eri välimatkoille.

Ajoneuvojen jakauman liikenneverkossa määrittelee niin sanottu reititysstrategia, joka kuvaa ajoneuvojen liikkeitä. Kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen stokastisessa mallissa reititysstrategia vastaa siirtymätodennäköisyyksiä reittien välillä. Esimerkiksi reittien  $r$  ja  $s$  välinen siirtymätodennäköisyys kuvaa sitä, kuinka suuri osuus ajoneuvoista siirtyy reitille  $s$  kuljettuaan reitin  $r$ .

---

Yleisellä tasapainomallilla voidaan optimoida kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen ajoneuvojen lukumäärä ja matkojen hinnoittelu eri tilanteissa. Lisäksi tasapainoteoria soveltuu erityyppisten säännöstelymallien, kuten hinta- ja ajoneuvosäännöstelyn, vaikutusten tutkimiseen. Mikrosimulointiin verrattuna esitetyn analyttisen mallin etuna on skaalautuvuus kysynnän ja ajoneuvojen lukumäärän suhteen.

---

# Päätelmät

Väitöskirjassa on kehitetty älykkään joukkoliikenteen matemaattista teoriaa reitinlaskennan, matkansuunnittelun ja liikennetalouden näkökulmista.

---

Reitinlaskentaan liittyvien tutkimusten perusteella voidaan todeta, että ajoneuvon ja reitin valinnassa on tärkeää ottaa huomioon sekä kustannukset että palvelutaso. Kustannuksia voidaan vähentää yhdistelemällä matkoja niin että reittien pituudet ja ajoneuvojen lukumäärä minimoituvat. Palvelutasoa voidaan säädellä asettamalla matkoille aikarajoitteita.

Kysyntäohjautuvan joukkoliikennejärjestelmän koko vaikuttaa merkittävästi sen suorituskykyyn. Suuri kysyntä mahdollistaa hyvän palvelutason tuottamisen tehokkaasti. Lisäksi varhain ennakoon tilatut matkat mahdollistavat reittien suunnittelun etukäteen ja näin ollen myös tarkan optimoinnin.

---

Matkansuunnittelun avulla voidaan liittää kysyntäohjautuva palvelu olemassaolevaan joukkoliikennejärjestelmään. Matkansuunnittelu mahdollistaa vaihdolliset yhteydet eri kulkumuotojen välillä ja erityisesti kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen hyödyntämisen syöttöliikenteessä esimerkiksi juna- tai metroasemalle.

---

Joukkoliikenteen lisäksi väitöskirjassa esitetyjen menetelmien mahdollisia sovel-luskohteita ovat muun muassa rahti- ja lentoliikenne, lähetti- ja ruoankuljetuspalve-lut sekä sotilaslogistiikka. Menetelmät soveltuvat erityisesti tehtäviin, joihin liittyy aikarajoituksia, sekä kuljetusten luotettavuuden optimointiin.

---

Esimerkkinä dynaamisen reitinlaskennan soveltamisesta on Helsingin seudun li-ikenteen vuoden alussa käynnistämä kysyntäohjautuva joukkoliikennepalvelu. Palvelun tilaus- ja ohjausjärjestelmä on täysin automatisoitu, ja se mahdollistaa matkojen alkamisen lyhyen ajan kuluttua tilaushetkestä. Tällä hetkellä palvelu on kokeiluvai-heessa ja se toimii noin 10 kilometrin säteellä Helsingin keskustasta. Liikenteessä on 10 minibussia ja suunnitelmissa on ajoneuvojen määrän kasvattaminen.

Lopullisena päätelmänä voidaan todeta, että nykytilanteessa kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen matemaattinen teoria on käytäntöä edellä. Reitinlaskennan merki-tys korostuu laajoissa kutsuliikennepalveluissa, joissa kysynnän ajallinen ja paikalli-nen tiheys mahdollistaa useiden matkojen yhdistelyn samalle reitille.

---

Pyydän teitä, arvoisa professori, Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulun määräämänä vastaväittäjänä esittämään ne muistutukset, joihin katsotte väitöskirjan antavan aiheita.