

# Kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen matemaattisia malleja ja algoritmeja

Lauri Häme

Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu

29. toukokuuta 2013

# Johdanto

- ▶ Kysyntäohjautuva joukkoliikenne = bussi- ja taksipalvelujen välimuoto, joka perustuu ajoneuvojen joustavaan reititykseen
  - ▶ Matkat tilataan esim. internetistä ja ajoneuvojen reitit muodostuvat reaaliaikaisesti tilausten perusteella
- ▶ Väitöskirjassa tarkastellaan kolmea teemaa
  - ▶ Ajoneuvojen reitinlaskenta
  - ▶ Matkustajien matkansuunnittelu
  - ▶ Taloudellinen tasapaino

# Reitinlaskenta

- ▶ Tunnetuin reitinlaskentaongelma on ns. kauppamatkustajan ongelma (Traveling Salesman Problem, TSP)
  - ▶ Joukko maantieteellisiä pisteitä, joiden väliset etäisyydet tunnetaan
  - ▶ Tavoitteena on löytää lyhin reitti joka kulkee kaikkien pisteiden kautta
  - ▶ Laskennallisesti haastava ongelma

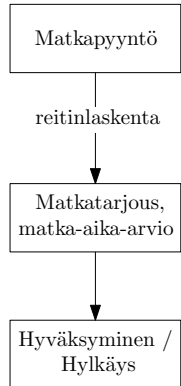


# Reitinlaskenta kuljetuspalveluissa

- ▶ Käytännössä, esim. kuljetuspalveluissa, reitinlaskentaongelma on usein monimutkaisempi
- ▶ Ongelma voi olla staattinen tai dynaaminen
- ▶ Tavoitteita
  - ▶ tilausten lukumäärän maksimointi
  - ▶ kustannusten minimointi
  - ▶ asiakkaiden palvelutason optimointi
- ▶ Rajoituksia
  - ▶ Kapasiteetti - Ajoneuvoihin mahtuu vain tietty määrä tavaraa/ matkustajia kerrallaan
  - ▶ Aika - Kuljetus ei saa kestää liian kauan
  - ▶ Edeltävyys - Esim. noutopisteessä pitää käydä ennen toimituspistettä

# Reitinlaskenta kysyntäohjautuvassa joukkoliikenteessä

- ▶ Asiakkaat voivat tilata matkoja reaaliaikaisesti esim. internet-käyttöliittymällä
- ▶ Ajoneuvojen reitit muodostuvat tilattujen matkojen perusteella
- ▶ Ajoneuvon ja reitin valinnassa pitää ottaa huomioon mm.
  - ▶ Uuden asiakkaan aiheuttama reitin pitenemä
  - ▶ Uuden asiakkaan palvelutaso ja muille asiakkaille aiheutuva palvelutason muutos
  - ▶ Kysyntäennuste

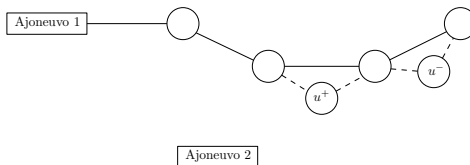


# Hajautettu ratkaisu

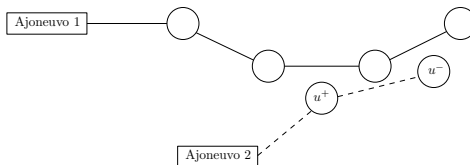
- ▶ Yritetään lisätä uusi asiakas johonkin olemassaolevista reiteistä
- ▶ Lasketaan jokaiselle ajoneuville uusi reittiehdotus ja valitaan niistä paras
- ▶ Ajoneuvojen reittiehdotukset lasketaan erikseen, toisistaan riippumatta
  - ▶ Rinnakkaislaskenta

# Hajautettu ratkaisu, esimerkki

- Ehdotus 1: reitin pitenemä minimoituu, palvelutaso kärsii



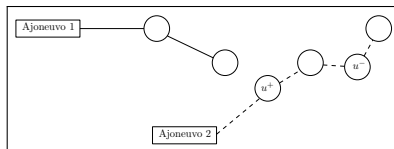
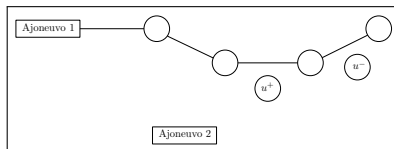
- Ehdotus 2: palvelutaso on paras mahdollinen, reitin pituus kasvaa enemmän





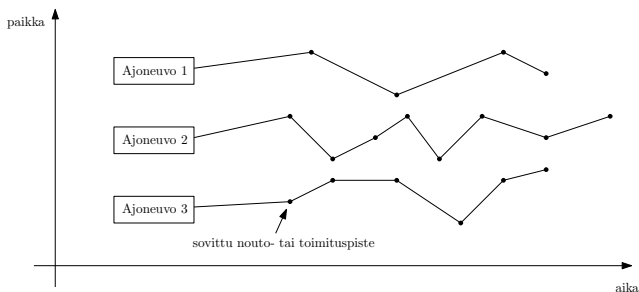
# Keskitetty ratkaisu

- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa etsitään parasta mahdollista asiakkaiden, ajoneuvojen ja reittien yhdistelmää
- ▶ Toistaiseksi noutamattomien asiakkaiden ajoneuvo voi vaihtua



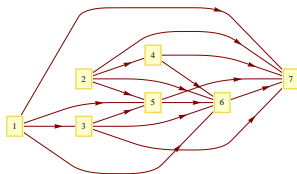
# Maksimiklusteriperiaate (Maximum cluster algorithm)

- ▶ Etsitään suurin asiakasjoukko (klusteri), joka sopii yhden ajoneuvon reitille
- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa klusterit lasketaan uudelleen



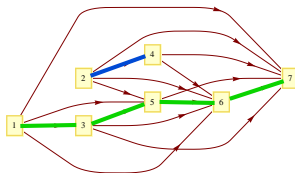
# Arvojärjestysmenetelmä (Routing by Ranking)

- ▶ Maksimiklusterit voidaan määrittää tehokkaasti järjestämällä nouto- ja toimituspisteet arvojärjestykseen
- ▶ Suurimman arvon saavat pisteet, joista on mahdollista siirtyä mahdollisimman moneen arvokkaaseen pisteeseen aikarajojen sisällä
- ▶ Arvojärjestys saadaan laskemalla suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori (ks. HITS-hakualgoritmi)



# Arvojärjestysmenetelmä (Routing by Ranking)

- ▶ Maksimiklusterit voidaan määrittää tehokkaasti järjestämällä nouto- ja toimituspisteet arvojärjestykseen
- ▶ Suurimman arvon saavat pisteet, joista on mahdollista siirtyä mahdollisimman moneen arvokkaaseen pisteeseen aikarajojen sisällä
- ▶ Arvojärjestys saadaan laskemalla suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori (ks. HITS-hakualgoritmi)



# Keskitetty ratkaisu, tuloksia

- ▶ Arvojärjestysmenetelmä tuottaa tehokkaasti käypä ratkaisuja tiukkojen rajoitusten vallitessa
- ▶ Kertaluokkaa nopeampi aikaisempiin menetelmiin verrattuna
- ▶ Yleisesti keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu, kun
  - ▶ rajoitteet ovat tiukkoja
  - ▶ reitit ovat pitkiä (pitkät ennakkotilausajat)

# Matkansuunnittelu

- ▶ Matkansuunnittelu (Journey planning) = joukkoliikennevälineen ja reitin valinta
- ▶ Tarkoituksena on löytää matkustajalle paras reitti ja aikataulu lähtöpisteestä määränpäähän, esim.
  - ▶ 16:27: kävely pysäkillä A,
  - ▶ 16:39: bussi numero 58 pysäkillä A pysäkillä B
  - ▶ 16:53: kävely pysäkillä B määränpäähän, perillä klo 17:11



# Lyhimmän polun ongelma (Shortest Path Problem)

- ▶ Matkansuunnitteluongelma muistuttaa niin sanottua lyhimmän polun ongelmaa
- ▶ Tarkoituksena on löytää lyhin mahdollinen polku kahden pisteen välillä
- ▶ Kauppamatkustajan ongelmaan verrattuna lyhimmän polun ongelma on helpompi



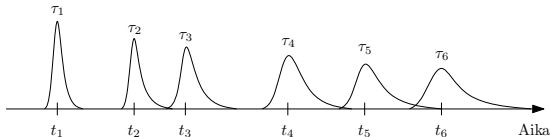


# Deterministinen ja stokastinen malli

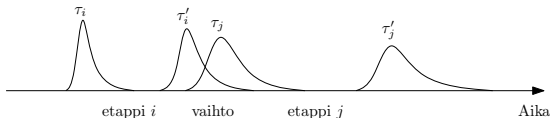
- ▶ *Deterministisillä* menetelmillä voidaan laskea etukäteen paras reitti esim. matka-ajan, odotusajan, kävelymatkan tai vaihtojen lukumäärän suhteen
- ▶ Todellisuudessa etukäteen laskettu reitti ei välttämättä toteudu esim. myöhästymisien tai vuorojen peruutuksien takia
- ▶ *Stokastinen* malli ottaa huomioon mahdolliset reittimuutokset matkan varrella
- ▶ Mallin avulla voidaan laskea parhaan reitin lisäksi paras matkastrategia eri tavoitteiden suhteen

# Matka-ajat stokastisessa mallissa

- Liikennepalvelujen arvioidut ohitusajat pysäkeillä määritellään satunnaismuuttujina odotusarvojen sijaan

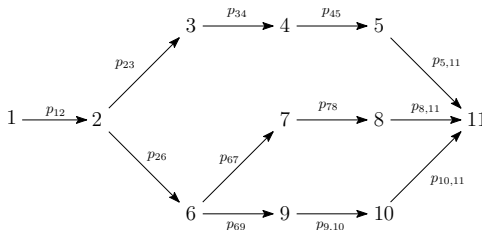


- Vaihto etapilta  $i$  etapille  $j$  onnistuu todennäköisyydellä  $p_{ij} = P(\tau'_i \leq \tau_j)$



# Markov-päätösprosessi (Markov Decision Process, MDP)

- ▶ Matka voidaan esittää Markov-päätösprosessina etappien verkossa
- ▶ Prosessin *tilat* ovat etappeja ja *toiminnot* matkustajan valintoja
- ▶ Tietty valinta tietyssä tilassa johtaa toiseen tilaan siirtymiseen
- ▶ Jokaiselle tilalle voidaan määrittää optimaalinen valinta (=matkastrategia)



# Stokastinen matkansuunnittelu, tuloksia

- ▶ Stokastisen matkansuunnittelun merkitys korostuu kun
  - ▶ vaihtojen lukumäärä on suuri
  - ▶ vaihtoihin liittyy epävarmuutta
  - ▶ halutaan maksimoida matkan luotettavuutta
- ▶ Laskentaa voidaan tehostaa yksinkertaistamalla todennäköisyysmallia
  - ▶ Vaihtojen onnistumisien riippumattomuus
  - ▶ Riippumattomuus matkahistoriasta eli aiempien vaihtojen onnistumisesta

# Taloudellinen tasapaino

# Yleinen tasapainoteoria

- ▶ Yleinen tasapainoteoria selittää kysynnän, tarjonnan, ja hintojen käyttäytymisen toistensa kanssa vuorovaikutuksessa olevissa markkinoissa
- ▶ Tasapaino = tilanne, jossa kysyntä, tarjonta ja hinta eri markkinoilla pysyvät muuttumattomina tietyn ajanjakson sisällä.
- ▶ Lähtöpaikan ja määränpään välillä on markkina
  - ▶ Tarjonta = eri kulkumuodot
  - ▶ Kysyntä riippuu kulkumuotojen laadusta ja hinnasta

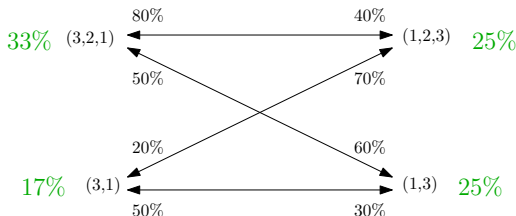
# Kysyntä

- ▶ Kulkumuodon kysyntä määräytyy hinnan, laadun ja vaihtoehtoisten kulkumuotojen mukaan
- ▶ Logit-valintamallissa kulkumuodon  $i$  utiliteetti muodostuu tunnetusta osasta  $V_i$  ja satunnaisesta osasta  $\epsilon_i \sim \text{Gumbel}$
- ▶ Todennäköisyys valinnalle  $i$ :

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_j e^{V_j}}$$

# Tarjonta

- ▶ Kysyntäohjautuvan joukkoliikennepalvelun palvelutaso riippuu ajoneuvojen jakaumasta liikenneverkossa
- ▶ Ajoneuvojen jakauman määrittelee stokastinen reititysstrategia
- ▶ Tilojen  $r$  ja  $s$  välinen siirtymätodennäköisyys  $p_{rs}$  kuvaa kuinka suuri osuus ajoneuvoista siirtyy reitille  $s$  kuljettuaan reitin  $r$





# Taloudellinen tasapaino, tuloksia

- ▶ Analyyttinen malli, jolla voidaan kuvata kysyntäohjautuvaa joukkoliikennettä
- ▶ Mikrosimulointiin verrattuna etuna on skaalautuvuus ajoneuvojen ja matkustajien lukumäärän suhteen
- ▶ Mallin sovelluksia:
  - ▶ Optimaalisen reititysstrategian, hinnoittelun ja ajoneuvojen lukumäärän määrittäminen eri tilanteissa
  - ▶ Säännöstelyn vaikutusten tutkiminen

# Tulosten tarkastelu

# Tulosten tarkastelu

- ▶ Reitinlaskennassa tulee ottaa huomioon sekä kustannukset että palvelutaso: paras kokonaisratkaisu löytyy kahden optimin välistä
- ▶ Suuri kysyntä mahdollistaa hyvän palvelutason tuottamisen tehokkaasti
- ▶ Pidemmät ennakkotilausajat mahdollistavat tarkemman optimoinnin

# Tulosten tarkastelu

- ▶ Matkansuunnittelun avulla voidaan liittää kysyntäohjautuva palvelu olemassaolevaan joukkoliikennejärjestelmään
  - ▶ Vaihdolliset yhteydet (sisäiset ja kulkumuotojen väliset vaihdot), syöttöliikenne



# Tulosten tarkastelu

- ▶ Matkansuunnittelun avulla voidaan liittää kysyntäohjautuva palvelu olemassaolevaan joukkoliikennejärjestelmään
  - ▶ Vaihdolliset yhteydet (sisäiset ja kulkumuotojen väliset vaihdot), syöttöliikenne



# Tulosten tarkastelu

- ▶ Joukkoliikenteen lisäksi reitinlaskenta- ja matkansuunnittelumenetelmiä voidaan hyödyntää
  - ▶ rahti- ja lentoliikenteessä
  - ▶ lähetti- ja ruoankuljetuspalveluissa
  - ▶ sotilaslogistiikassa
- ▶ Menetelmät soveltuvat erityisesti
  - ▶ tehtäviin, joihin liittyy rajoitusehtoja (aika, kapasiteetti)
  - ▶ luotettavuuden optimointiin

# Tulosten tarkastelu

- ▶ Helsingin seudun liikenne käynnisti vuoden 2013 alussa kaikille avoimen kysyntäohjautuvan joukkoliikennepalvelun
- ▶ Enintään 60 minuutin ennakotilausaika
- ▶ Useita erihintaisia matkavaihtoehtoja
- ▶ Toimii noin 10 kilometrin säteellä Helsingin keskustasta
- ▶ 10 minibussia, määrää kasvatetaan
- ▶ Teoria on käytäntöä edellä
  - ▶ Reitinlaskennan merkitys korostuu suurissa järjestelmissä

