Ceder, A., Butcher, M. and Wang, L.

Optimization of bus stop placement for routes on uneven topology

Transportation Research Part B, Vol.74, pp.40-61, 2015.

理論談話会#4 2015/5/15
吉野 大介

まとめると

- アクセス・イグレスの際の勾配を考慮してバス路線のネットワーク計画と配分を二段階最適モデルで解いている点が新しい.
- 定式化自体は既往研究に倣ったものであり勾配以外の部分は一般的. アルゴリズムは既往研究を参考に進化的アルゴリズムを使用しており, 計算速度は今一つ. 筆者も見直しが必要と言っている.
- 全ての目的関数・制約条件の式の解説が丁寧に施されており分かりやすい. 使用したプログラム・パッケージ, データの作成方法などが具体的に紹介されており, 実装の参考になる点が有用.

Contents

Introduction

■停留所配置におけるトレードオフ

- アクセシビリティとオペレーション
- これまでに多くの数理モデルが開発されてきたが、アクセシビリティとオペレーションにかかるコスト両者を組み込んだモデルは少ない

■地形の不均一性（勾配の考慮）

- 勾配を考慮することの重要性
  - 停留所における加減速の際に大きな影響
  - 平坦な道や下り坂と比べて上り坂は歩行速度が低下し、停留所の位置がアクセシビリティに大きく影響
  - 停留所アクセスに時間がかかることで歩行者の需要が低下
- 重要性は認識されつつも、これまでモデルの中で明示的に取り扱われてこなかった

Related literature

■バス停留所配置デザインに係る技術

- 単一路線を取り扱って停留所配置を決定し、路線間の相互作用は考慮せずネットワーク全体に拡大する方法
- 最適な停留所間隔もしくは密度を選定し、エリア全体における停留所候補地の離散集合の中から最適な停留所の組み合わせを見つける方法
- 沿線需要を連続関数で考慮し、需要をポイントもしくはエリアの離散集合の中から発生させる方法
- 道路ネットワークを単純化、もしくはGISデータを用いて複雑なネットワークを取り扱う

■停留所デザインにおける勾配の考慮

- Rodriguez and Joo (2004)

  坂、沿道環境、歩道や自転車道の整備がモードチョイスに与える影響を多項選択モデルにより記述。これらの影響の変化に伴うモード選択の弾力値を算出し、勾配による遅延にともなう歩行選択の弾力値を算出。

- Fruth and SanClemente (2006)

  坂付近の停留所は遅延を生じさせることを異なる勾配のバス路線間の比較分析により整理。

- Terrier et al. (2010)

  勾配の変化により歩行者の加速度と酸素消費量の関係性について整理。

Model

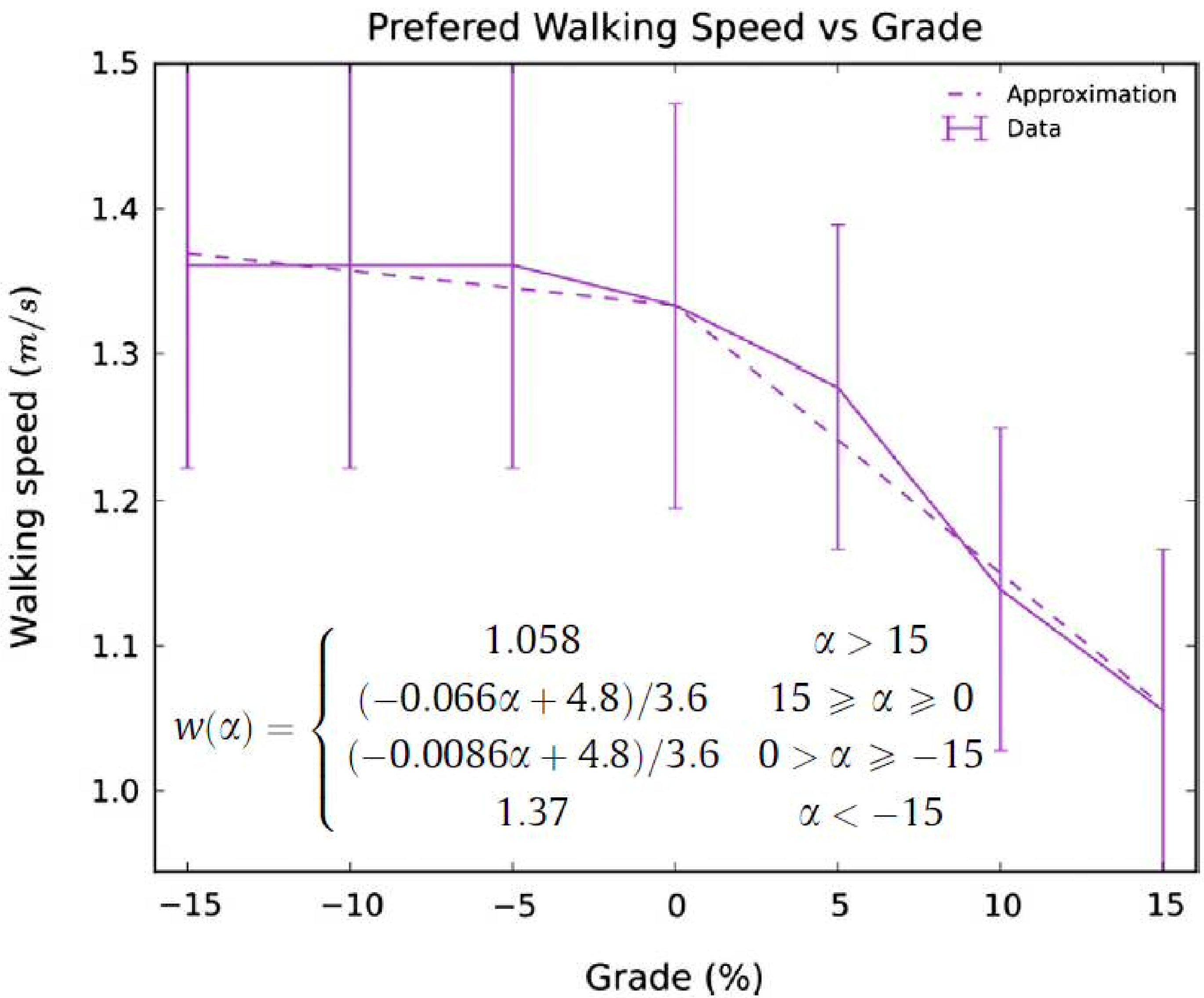
■ネットワーク条件の定義

$$\underbrace{ac_{im}}_{\text{アクセスコスト}} = \underbrace{\varepsilon_{im}}_{\text{勾配パラメータ}}\underbrace{at_{im}}_{\text{所要時間}}, \qquad ac_{nj} = \varepsilon_{nj} at_{nj}$$

$$at_{im} = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\underbrace{x_{k+1} - x_k}_{\text{距離}}}{w(\underbrace{(e_{k+1} - e_k)/(x_{k+1} - x_k)}_{\text{標高/距離＝勾配}})}$$

Model

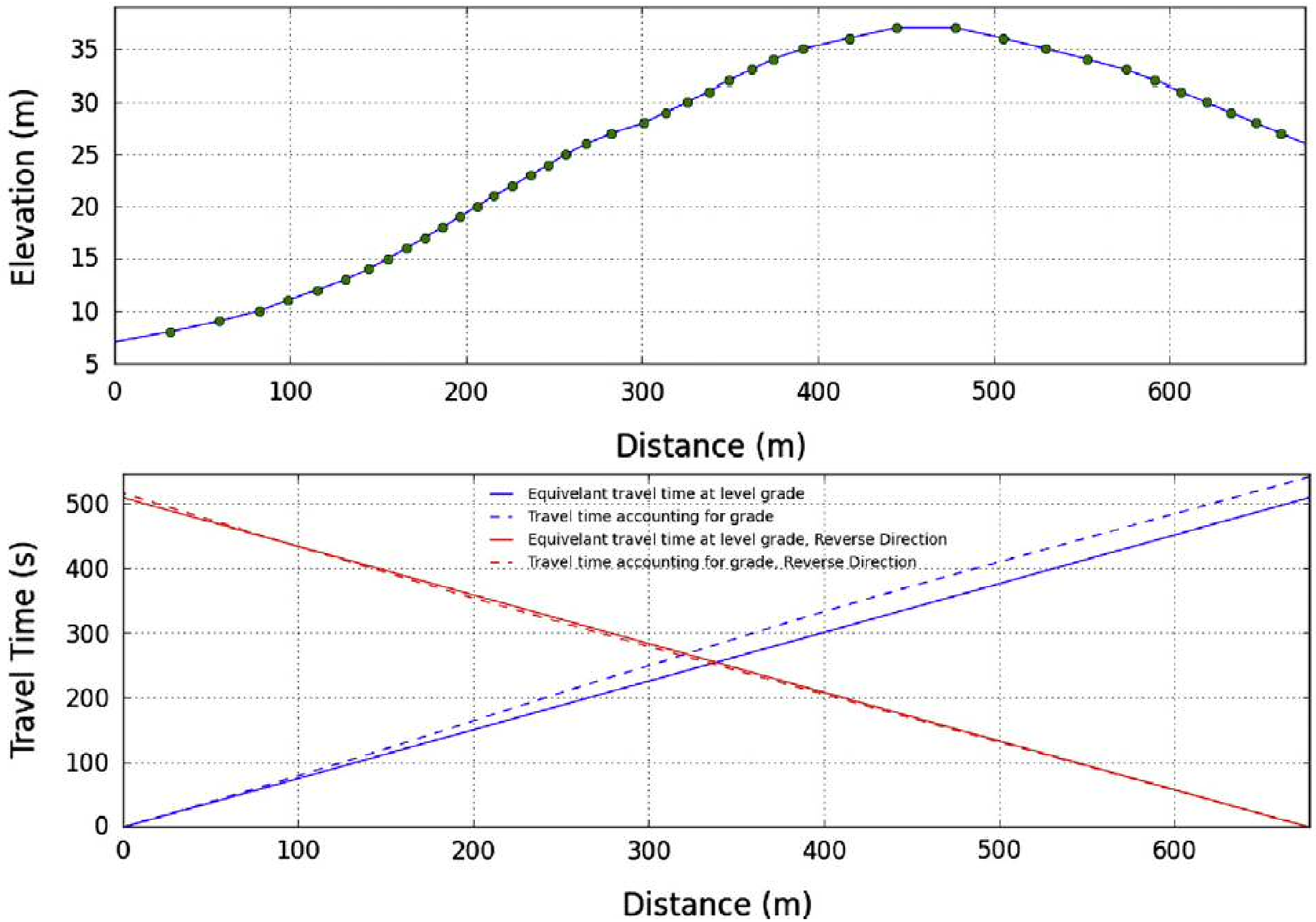
■勾配と歩行速度の関係



Model

■勾配データの補完

$$e_n = \max\left(e_{n-1} - \delta e, \min\left(e_{n-1} + \frac{e_{n-1} - e_{n-2}}{x_{n-1} - x_{n-2}}(x_n - x_{n-1}), e_{n-1} + \delta e\right)\right)$$



Model

■勾配パラメータ

$$\varepsilon_{im} = 1 + 0.162\left(\frac{at_{im} - l_{im}/w(0)}{l_{im}/w(0)}\right)$$

実際の移動時間と経路がフラットな場合の移動時間の差

経路がフラットな場合の移動時間

勾配と歩行者需要の弾力値

$$E_{X_{slope}}^{P_{ped}} = \frac{\delta P_{ped}/P_{ped}}{\delta X_{slope}/X_{slope}}$$

歩行者モードシェアの変化量

勾配による遅れ時間の変化量

＜計算例＞

- 完全にフラットな道であれば1.7kmの距離は約20分で移動できる（歩行速度＝1.4m/s）
- 上り勾配により移動時間が25分になった場合

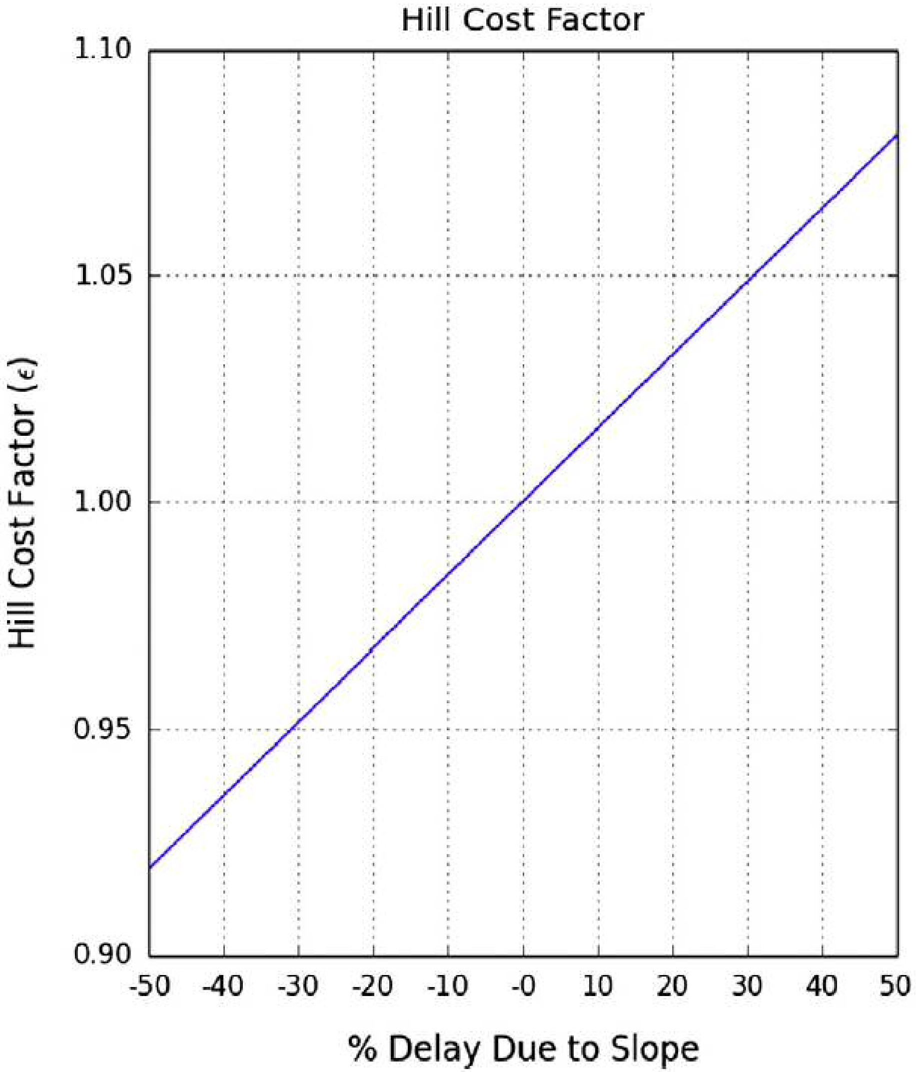
$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{(\quad)}{20}\right) \times -0.162 = 1.04$$

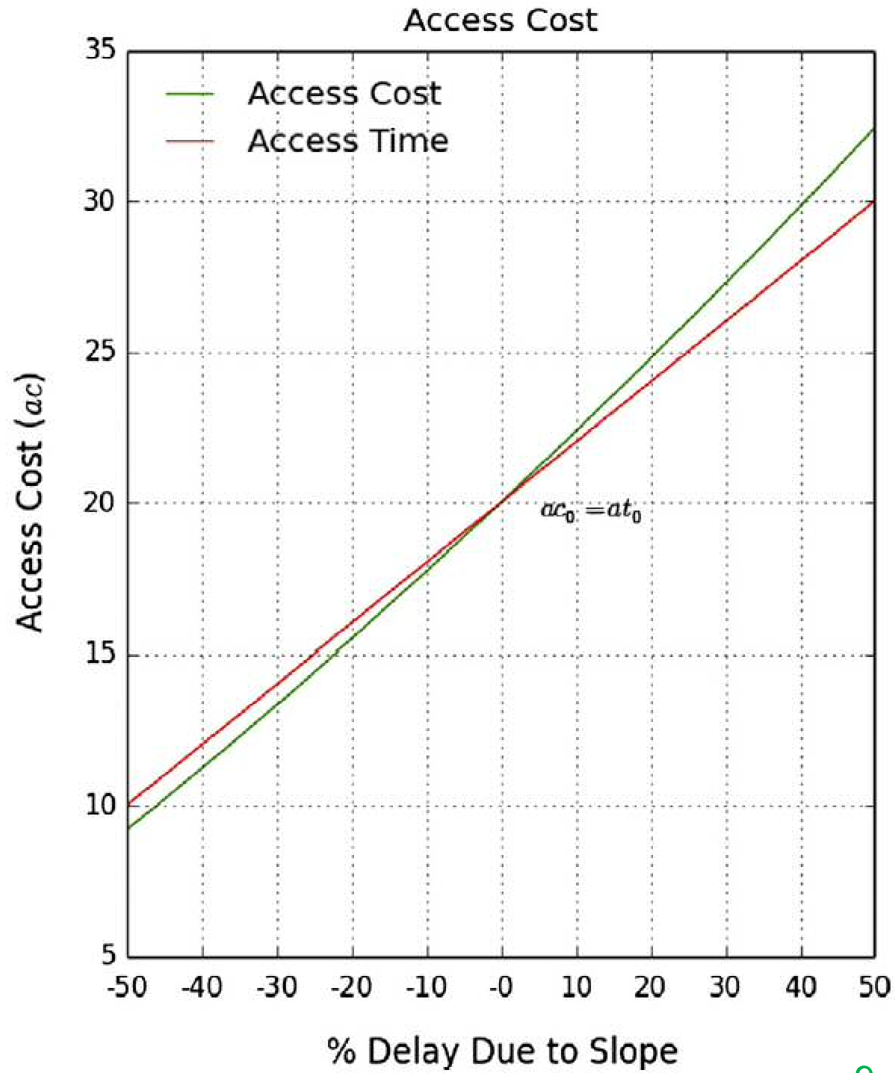
- 下り勾配により移動時間が5分短縮した場合

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{-5}{20}\right) \times -0.162 = 0.96$$

Model

■勾配による遅れと勾配パラメータ，アクセスコストの関係（ac(0)=20minの場合）





Model

■到達可能性の考慮

- 起点需要ポイントiから乗車停留所mに到達できるか否か

$$\beta_i^m = \begin{cases} 1 & ac_{im} \leqslant \gamma \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \forall i \in D, m \in S$$

- 降車停留所nから終点需要ポイントjに到達できるか否か

$$\beta_m^i = \begin{cases} 1 & ac_{mi} \leqslant \gamma \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \forall i \in D, m \in S$$

- 閾値γはアクセス許容時間の上限値（所与）で設定
- 行きと帰りで勾配が異なるため，$ac_{im} \neq ac_{mi}$

Model

■二段階最適化問題として定式化

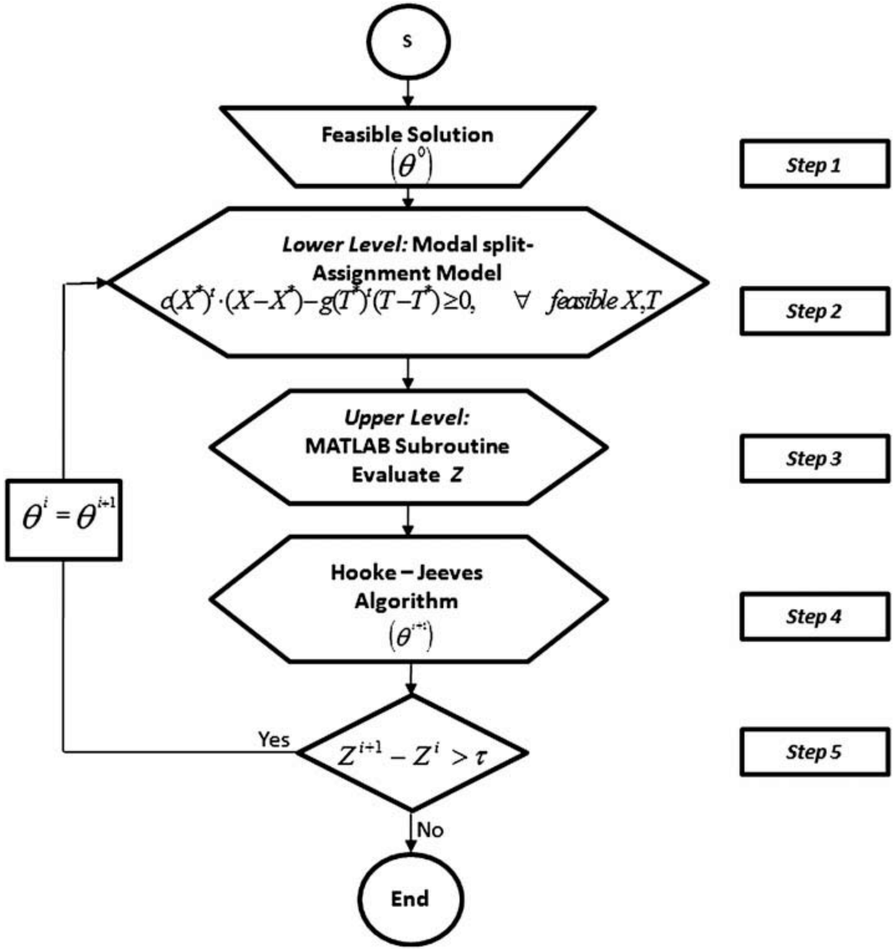
$$\begin{aligned}&\min_{x\in X, y\in Y} \quad F(x,y) \\ &\text{s.t.} \quad G(x,y) \leqslant 0\end{aligned} \quad \text{上位問題}$$

$$\begin{aligned}&\min_{y} \quad f(x,y) \\ &\text{s.t.} \quad g(x,y) \leqslant 0\end{aligned} \quad \text{下位問題}$$

上位問題：停留所配置の最適化
Obj: オペレーションコストと利用者コストの最小化

下位問題：乗客を各路線に配分
Obj: アクセス時間と乗車時間の最小化

■Ibeas et al. (2010)を参考に定式化



Model

■上位問題：バス停留所配置の最適化

目的関数：オペレーションコストと利用者コストの最小化

$$\min_{x^{(1)},x^{(-1)},\delta} \quad Z_U = \underbrace{C_{km} + C_{idle} + C_{pers} + C_{fix}}_{} + \underbrace{\phi_{access} T_{access} + \phi_{veh} T_{veh}}_{}$$

オペレーションコスト
（運行経費・アイドリング
コスト・人件費・固定費）

利用者コスト
（停留所アクセス時間に係るコスト・
乗車時間に係るコスト）

制約条件：起点から到達できる停留所が1つ以上，かつ終点に到達できる停留所が1つ以上

$$\text{s.t.} \quad \sum x_m^{(1)} \beta_m^i \geqslant 1, \quad \forall i \in D$$

$$\sum x_m^{(-1)} \beta_m^i \geqslant 1, \quad \forall i \in D$$

$$\sum x_m^{(1)} \beta_i^m \geqslant 1, \quad \forall i \in D$$

$$\sum x_m^{(-1)} \beta_i^m \geqslant 1, \quad \forall i \in D$$

$$x_m^{(1)}, x_m^{(-1)} \in \{0,1\} \quad \forall m \in S$$

$x_m^{(1)}$: 順方向(O⇒D)の停留所セット

$x_m^{(-1)}$: 逆方向(D⇒O)の停留所セット

※停留所が採用される場合1，そうでなければ0をとるバイナリ変数

Model

■オペレーションコストの定義

運行経費

$$C_{km} = \phi_{km} 2 l^r \left\lceil \frac{span}{h/60} \right\rceil$$

分析対象時間(h)
単価($/km)
運転間隔(min)
ルート延長(km)

アイドリングコスト

$$C_{idle} = \phi_{idle} \frac{2\Delta_p}{3600} span \sum_{(i,j)\in D} d_{ij}$$

1人当たり平均乗降時間(sec)
単価($/h)
分析対象時間(h)
ij間の需要量(veh/h)

人件費

$$C_{pers} = \phi_{pers} \left\lceil \frac{t_{cyc}}{h/60} \right\rceil span$$

ルート1サイクルあたりの総所要時間(h)
分析対象時間(h)
単価($/h)
運転間隔(min)

車両に係る固定費

$$C_{fix} = \phi_{fix} \left\lceil \frac{t_{cyc}}{h/60} \right\rceil$$

ルート1サイクルあたりの総所要時間(h)
単価($/veh)
運転間隔(min)

Model

■オペレーションコストの定義

総所要時間 $t_{cyc} = t_{cruise} + t_{dwell} + t_{accel} + t_{layover}$

移動＋待ち＋加減速＋乗継待合わせ（固定）

Furth and SanClemente (2006)より

移動時間 $t_{cruise} = \dfrac{2l^r}{v}$ 平均運行速度(km/h)

待ち時間 $t_{dwell} = \dfrac{2\Delta_p}{3600}\dfrac{h}{60}\sum_{(i,j)\in D} d_{ij}$

$$\Delta_s(\alpha) = \begin{cases} 0 & \alpha < 4 \\ 5 & 4 \leqslant \alpha < 7 \\ 9 & 7 \leqslant \alpha < 9 \\ 11 & 9 \leqslant \alpha < 12 \\ 10 & \alpha \geqslant 12 \end{cases}$$

加速に起因する遅れ　勾配に起因する遅れ　減速に起因する遅れ

加減速遅れ $t_{accel} = \sum_{m\in S} \underbrace{x_m^{(1)}\left(\frac{\Delta_\alpha + \Delta_s(\alpha_m) + \Delta_d}{3600}\right)}_{\text{順方向の遅れ}} + \underbrace{x_m^{(-1)}\left(\frac{\Delta_\alpha + \Delta_s(-\alpha_m) + \Delta_d}{3600}\right)}_{\text{逆方向の遅れ}}$

Model

■利用者コストの定義

需要量　バイナリ変数（起点iから停留所m, nを経由して終点jに到達できれば1，そうでなければ0）

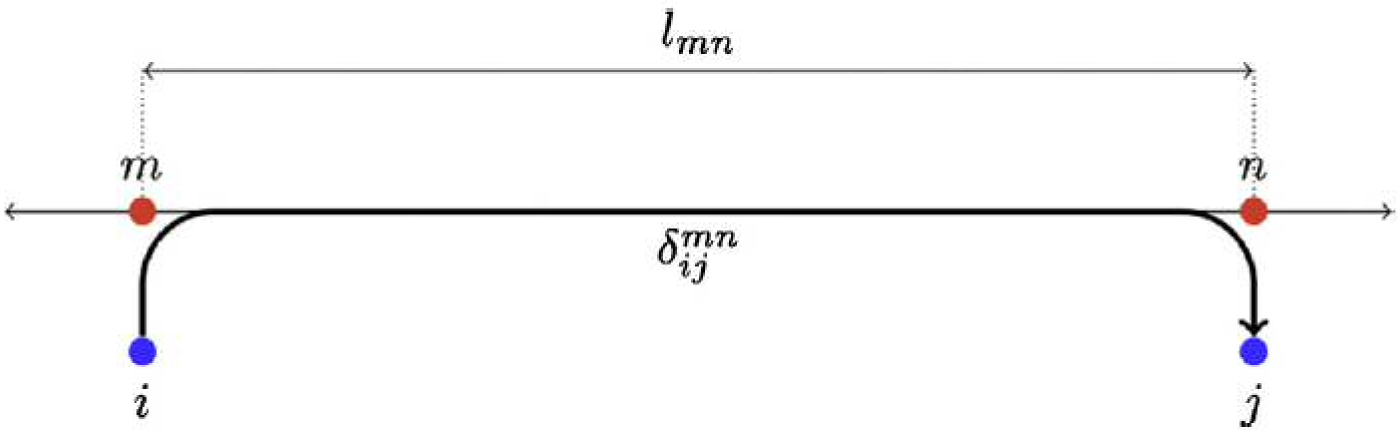
アクセス時間　$T_{access} = \sum_{(i,j)\in D} d_{ij} \sum_{(m,n)\in S^{ij}} \delta_{ij}^{mn} \left(\frac{ac_{im}}{60} + \frac{ac_{nj}}{60} \right)$

アクセスコスト　イグレスコスト

乗車時間　$T_{veh} = T_{cruise} + T_{accel} + T_{dwell}$

移動時間　$T_{cruise} = \sum_{(i,j)\in D} d_{ij} \sum_{(m,n)\in S^{ij}} \delta_{ij}^{mn} \frac{l_{mn}}{v}$

停留所mn間の所要時間(h)



Model

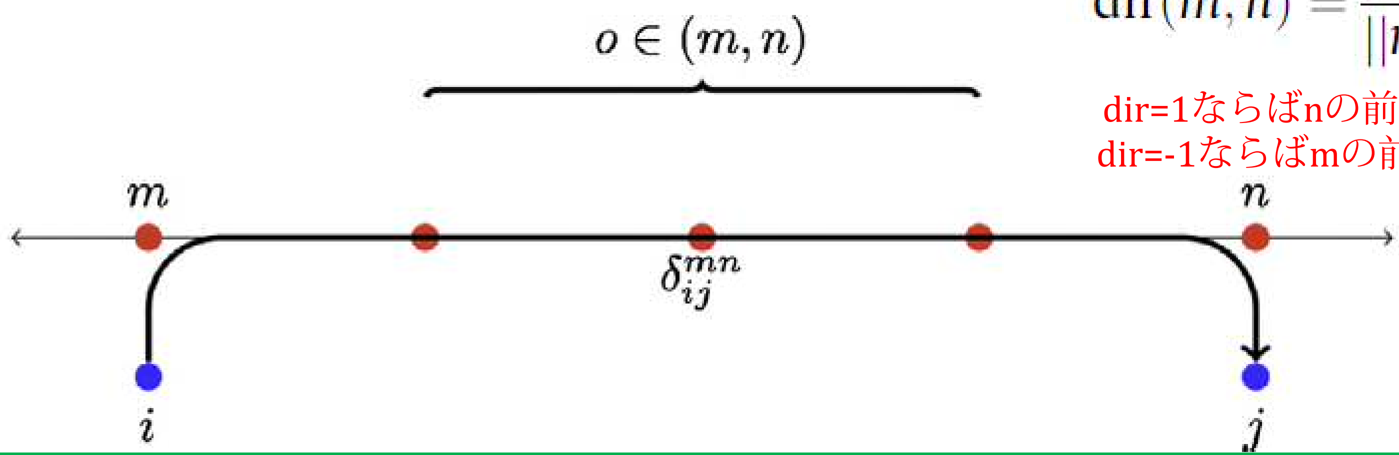
■利用者コストの定義

遅れ時間

$$T_{accel} = \sum_{(i,j)\in D} d_{ij} \sum_{(m,n)\in S^{ij}} \left[\underbrace{\delta_{ij}^{mn} \frac{\Delta_a + \Delta_s(\mathrm{dir}(m,n)\alpha_m)}{3600}}_{\text{起点停留所mにおける加速遅れ}} + \sum_{\substack{o \in S: \\ o \in (m,n)}} \underbrace{x_o^{(\mathrm{dir}(m,n))} \frac{\Delta_a + \Delta_s(\mathrm{dir}(m,n)\alpha_o) + \Delta_d}{3600}}_{\text{中間停留所oにおける加速・減速遅れ}} + \underbrace{\frac{\Delta_d}{3600}}_{\text{終点停留所nにおける減速遅れ}} \right]$$

$$\mathrm{dir}(m,n) = \frac{|n| - |m|}{||n| - |m||}$$

dir=1ならばnの前にmが配置
dir=-1ならばmの前にnが配置

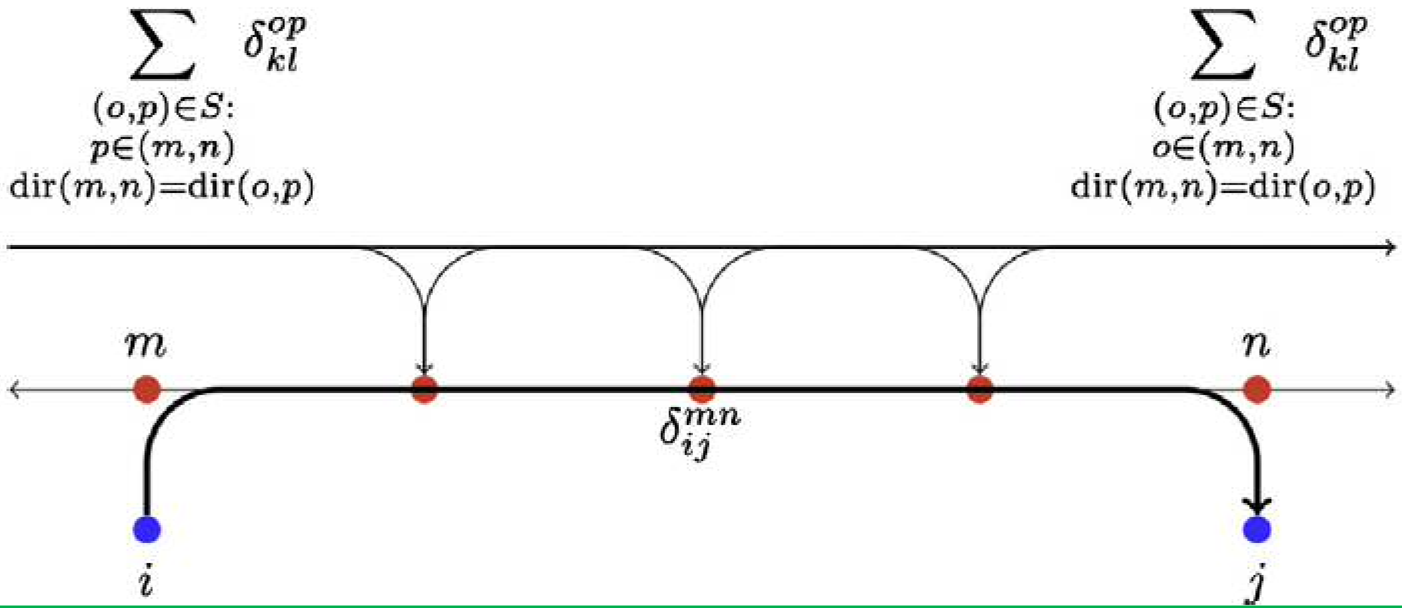


Model

■利用者コストの定義

待ち時間

$$T_{dwell} = \frac{\Delta_p}{3600} \sum_{(i,j)\in D} d_{ij} \sum_{(m,n)\in S^{ij}} \delta_{ij}^{mn} \sum_{(k,l)\in D} \frac{h}{60} d_{kl} \left[\underbrace{\sum_{\substack{(o,p)\in S^{kl} \\ p\in(m,n) \\ \mathrm{dir(m,n)}=\mathrm{dir}(o,p)}} \delta_{kl}^{op}}_{\text{中間停留所で終了するトリップ}} + \underbrace{\sum_{\substack{(o,p)\in S^{kl} \\ o\in(m,n) \\ \mathrm{dir(m,n)}=\mathrm{dir}(o,p)}} \delta_{kl}^{op}\delta_{kl}^{op}}_{\text{中間停留所から発生するトリップ}} \right]$$



Model

■下位問題：利用者の配分

目的関数：アクセス時間と乗車時間の最小化（もしくはアクセス時間のみの最小化）

$$\min_{\delta} \quad Z_L = T_{access} + T_{veh} (\text{or } Z_L = T_{access})$$

制約条件：全ての需要がルート上に配分される

$$\text{s.t.} \quad \sum_{(m,n)\in S^{ij}} \underbrace{\delta_{ij}^{mn}}_{\text{ダミー変数}} x_o^{(\mathrm{dir}(m,n))} = d_{ij} \quad \forall (i,j) \in D$$

$$\delta_{ij}^{mn} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in D, \forall (m,n) \in S^{ij}$$

任意のODペアijについて到達停留所ペアを抽出（アクセス・イグレス両方とも実現できる場）

$$S^{ij} = \{(m,n) : \beta_i^m \beta_n^j = 1, \forall (m,n) \in S \times S, m \neq n\}, \quad \forall (i,j) \in D \times D, i \neq j$$

↓

$$\delta = \{\delta_{ij}^{mn}, \forall (i,j) \in D, (m,n) \in S^{ij}\}$$

Solution method

■解法について

- 上位問題はNP困難であり近似解法を用いる必要がある.
- 下位問題は上位問題の解をインプットして解を返す反応関数によって定式化されており，上位問題の解を固定して解くことになるため単純．CPLEX等のソルバーで解ける.

■二段階最適化問題の上位問題を一般式を整数計画問題として定式化

$$\begin{aligned} \min_{x} \quad & F(x, \delta(x)) \\ \text{s.t.} \quad & G(x, \delta(x)) \leqslant 0 \end{aligned}$$

■適合度関数

- 上位問題の制約条件をペナルティ項として与えるとともに，下位問題の実現不可能解については選定しないように定式化.

$$\mathrm{fit}(x) = \begin{cases} Z_U(x, \delta(x)) + P, & \text{if } \delta(x) \text{ exists} \\ +\infty & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P = \Theta \sum_{i \in D} \sum_{m \in S} \max(1 - x_m^{(1)} \beta_m^i, 0) + \max(1 - x_m^{(-1)} \beta_m^i, 0) + \max(1 - x_m^{(1)} \beta_i^m, 0) + \max(1 - x_m^{(-1)} \beta_i^m, 0)$$

Solution method

■アルゴリズム（進化的アルゴリズム）

$g := 0$ 初期集団の生成，評価

initialize $\left(\mathfrak{B}_p^{(0)} := \{(x_k^{(0)}, \mathrm{fit}(x_k^{(0)})), k = 1, \ldots, \mu\}\right)$ 初期親集団μ個を生成

親集団　変数　適合度

repeat

  for $l := 0$ to λ do 子世代の生成，評価（生成個数λ）

    if random$(0, 1) \leqslant$ CXPB then

      $\tilde{x}_l := 1 - \mathrm{point} - \mathrm{crossover}(\mathfrak{B}_p^{(g)})$; 確率CXPBで交叉させる（一点交叉）

    else

      $\tilde{x}_l := \mathrm{flip} - \mathrm{bit}(\mathfrak{B}_p^{(g)})$; 確率1-CXPBで突然変異させる（FLIP_BIT）

    end if

    $\tilde{\mathrm{fit}}_l := \mathrm{fit}(\tilde{y}_l)$; 子の適合度を算出

  end for

  $\mathfrak{B}_o^{(g)} := \{(\tilde{x}_l, \tilde{\mathrm{fit}}_l), l = 1, \ldots, \lambda\}$; g世代の子集団が生成される

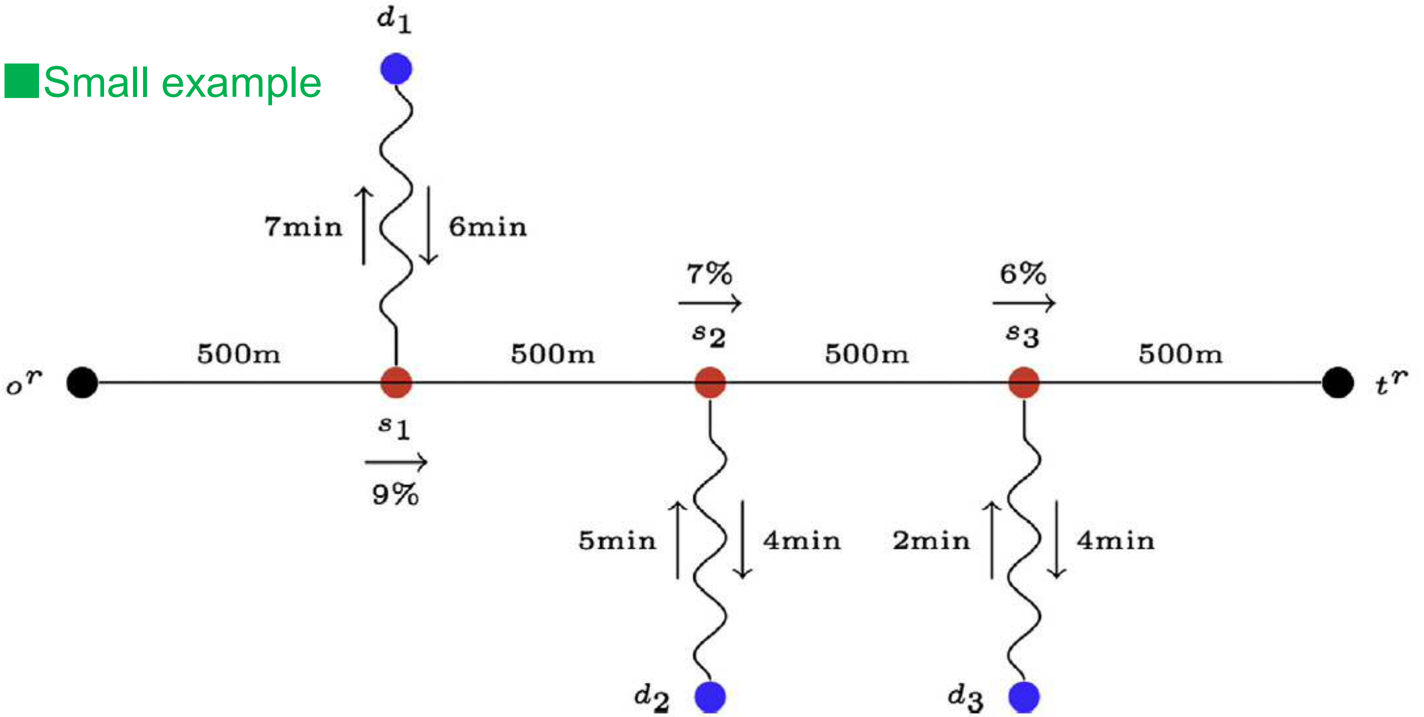
  $\mathfrak{B}_p^{(g+1)} := \mathrm{selection}(\mathfrak{B}_o^{(g)}, \mathfrak{B}_p^{(g)}, \lambda + \mu)$; g+1世代の親集団はg世代の親・子のうちエリートから抽出

  $g := g + 1$ 次の世代へ

until $g >$ max generations 収束条件まで繰り返し

Example

- Small example



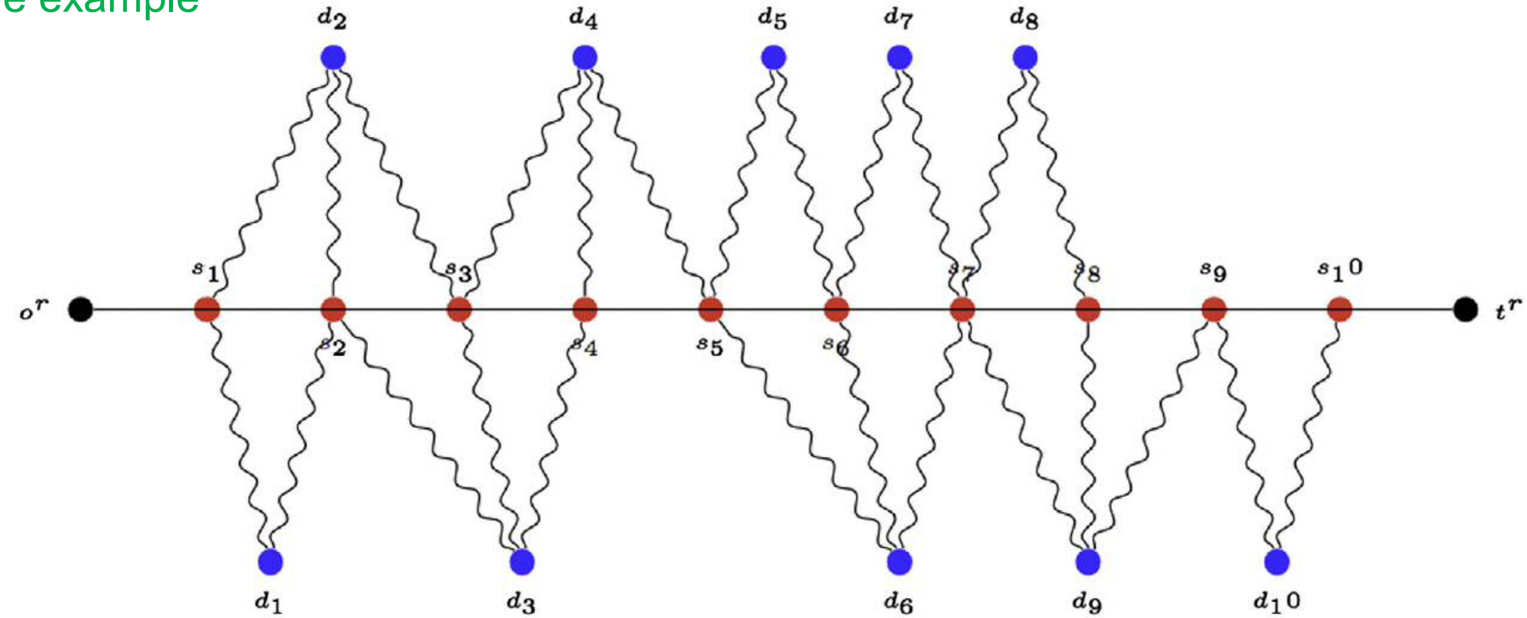
	d1	d2	d3
d1	-	100	200
d2		-	
d3	200		-

Table 2
Small example problem parameters.

Parameter	Description	Value
span	Length of analysis period (h)	1 h
v	Average bus cruise speed (km/h)	30 km/h
Δ_a, Δ_d	Delay due to accelerating and decelerating at a stop (s)	5 s
Δ_p	Dwell time per passenger (s/pass)	2.5 s
ϕ_{access}	Passenger value of access time ($/h)	$15/km
ϕ_{fixed}	Fixed cost per vehicle ($/veh)	$10/veh
ϕ_{idle}	Cost per hour of idle time ($/h)	$0.5/min
ϕ_{km}	Operational cost per kilometer ($/km)	$1/km
ϕ_{pers}	Personnel cost per driver ($/h)	$22/h
ϕ_{veh}	Passenger value of in-vehicle time ($/h)	$10/h

Example

■Large example



Origin Destination

	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10
d1	-				20	10	50	10		30
d2		-			10	20	20	20	20	30
d3			-					10	20	20
d4				-				10	30	10
d5	20				-					10
d6	10	20				-				
d7	50	20					-			
d8	10	20	10	10				-		
d9		20	20	30					-	
d10	30	30	20	10	10					-

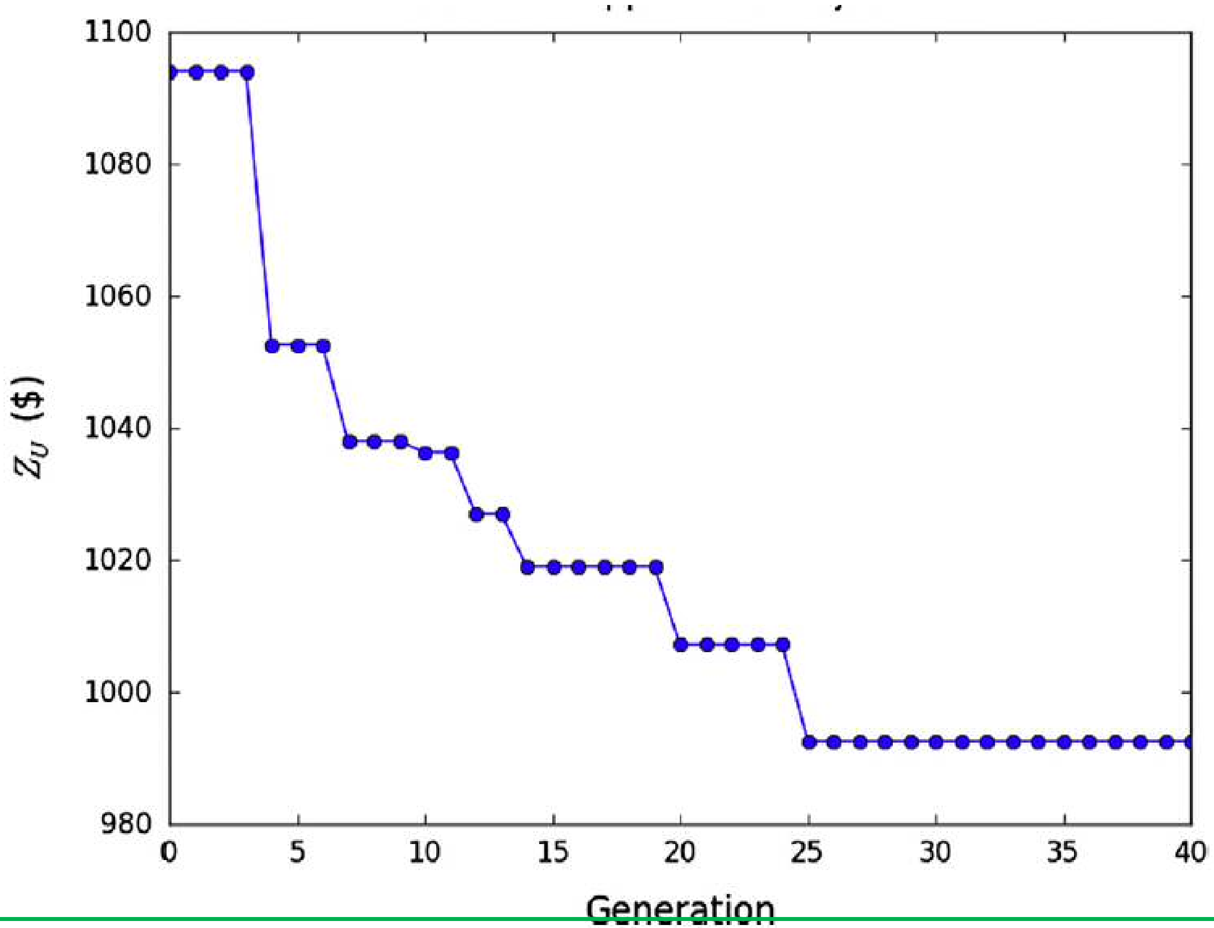
Access Time

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
d1	5-4	4-3								
d2	4-7	3-5	3-6							
d3		8-6	6-5	5-4						
d4			4-5	2-4	6-8					
d5					4-5	3-4				
d6					9-7	5-3	5-4			
d7						4-6	4-6			
d8							3-4	3-4		
d9							6-4	4-2	5-4	
d10									5-4	3-2

Example

■上位問題目的関数の収束状況

- 反復回数40
- 解の生成個数40（μ=30，λ=10）
- 突然変異確率0.4（FLIP_BIT確率0.1），交叉確率0.6



Example

■上位問題計算結果（40回反復終了後／緑色が利用された停留所）

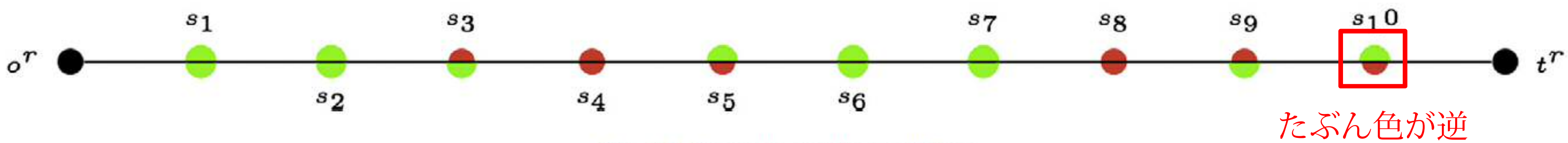
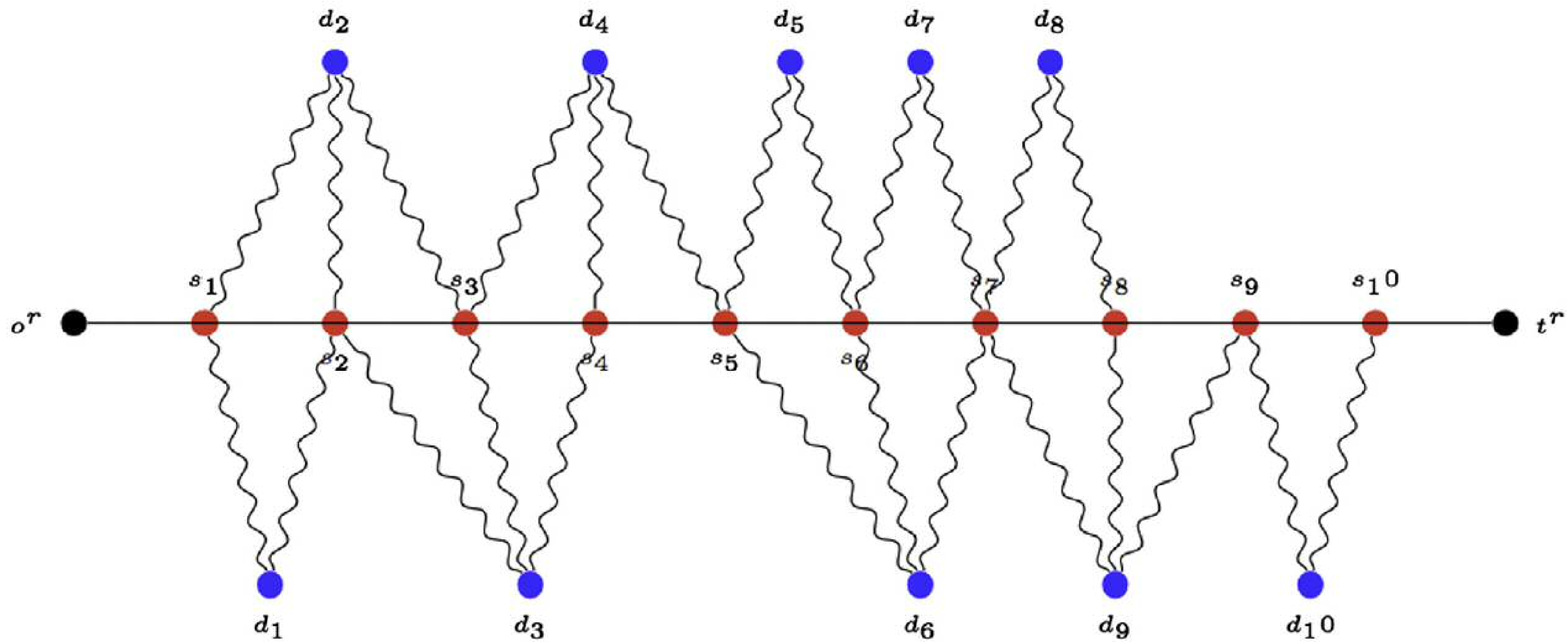


Fig. 10. Example problem solution.



Example

■下位問題の解ベクトル（需要ポイント・停留所の組み合わせ）

Table 3
Large example, non-zero components of the lower level solution vector.

δ				δ				δ				δ			
i	*j*	*m*	*n*	*i*	*j*	*m*	*n*	*i*	*j*	*m*	*n*	*i*	*j*	*m*	*n*
1	5	2	6	2	9	2	7	5	10	6	9	9	2	7	2
1	6	2	6	2	10	3	9	6	1	6	2	9	3	7	2
1	7	2	6	3	8	3	7	6	2	7	2	9	4	7	5
1	8	2	7	3	9	3	9	7	1	7	2	10	1	10	2
1	10	2	9	3	10	3	9	7	2	7	2	10	2	10	2
2	5	3	6	4	8	3	7	8	1	7	2	10	3	10	2
2	6	3	6	4	9	3	7	8	2	7	2	10	4	10	5
2	7	3	7	4	10	3	9	8	3	7	2	10	5	10	6
2	8	3	7	5	1	6	2	8	4	7	5				

Case study

■概要

- Auckland CBDにおける朝ピーク時間帯（7:00-9:00）を対象にケーススタディを実施.
- データのソートはPostgreSQL，PythonとPortgreSQLデータベースを接続する際にはGeoDjangoを使用．最短経路探索はPythonのNetworkXを使用.
- 計算アルゴリズムについてはPythonのDistributed Evolutionary Algoritums in PythonとPuLP(CPLEXソルバー組み込み)を使用.
- 可視化についてはQGISを使用.

■ネットワークデータ

- ネットワーク：Open Data Commons Open Databese LicenseのOSMプロジェクトより入手，PortGISで整理（※歩行不可能なネットワークは除外）
- 標高データ：Auckland Council GIS Viewer websiteから1m間隔のものを入手
- 既存バス路線・停留所：OSMプロジェクト（The Google Transit Feed Specification Data Exchangeなどで代替可能）
- 停留所候補地：既存路線に沿って50mピッチで設置
- 需要のポリゴンデータ：OSMプロジェクト（スポーツ施設，商業，医療，ホテル，住宅，学校等）
- 需要発生箇所：ポリゴンデータの重心に最も近い道路ネットワーク上のノード

Case study

■ODデータ

- New Zealand trips database bureauのトリップ数データを使用（1985から2012年までの施設機能別床面積当たりのトリップ数データが整備）
- コードンライン（CBDエリア）上にエントリーポイントと呼ばれるダミーの需要ポイントを設置し，CBD外の需要を全て集約（AMは起点，PMは終点となる）

■最短経路探索

- 到達可能停留所マトリクス，到達可能需要ポイントマトリクス，アクセスコストマトリクスの作成.
- PythonのパッケージのNetworkXを使用．まずOSMのネットワークデータをNetworkXのグラフオブジェクトに変換し，停留所候補地や需要ポイントのノード（ユニークID付き）を作成.
- リンクコストは勾配に応じて付与.
- NetworkXパッケージのダイクストラ法で最短経路探索を実施．カットオフ値γはアクセス時間の許容上限（ここではγ=5min）を使用.

■アルゴリズム

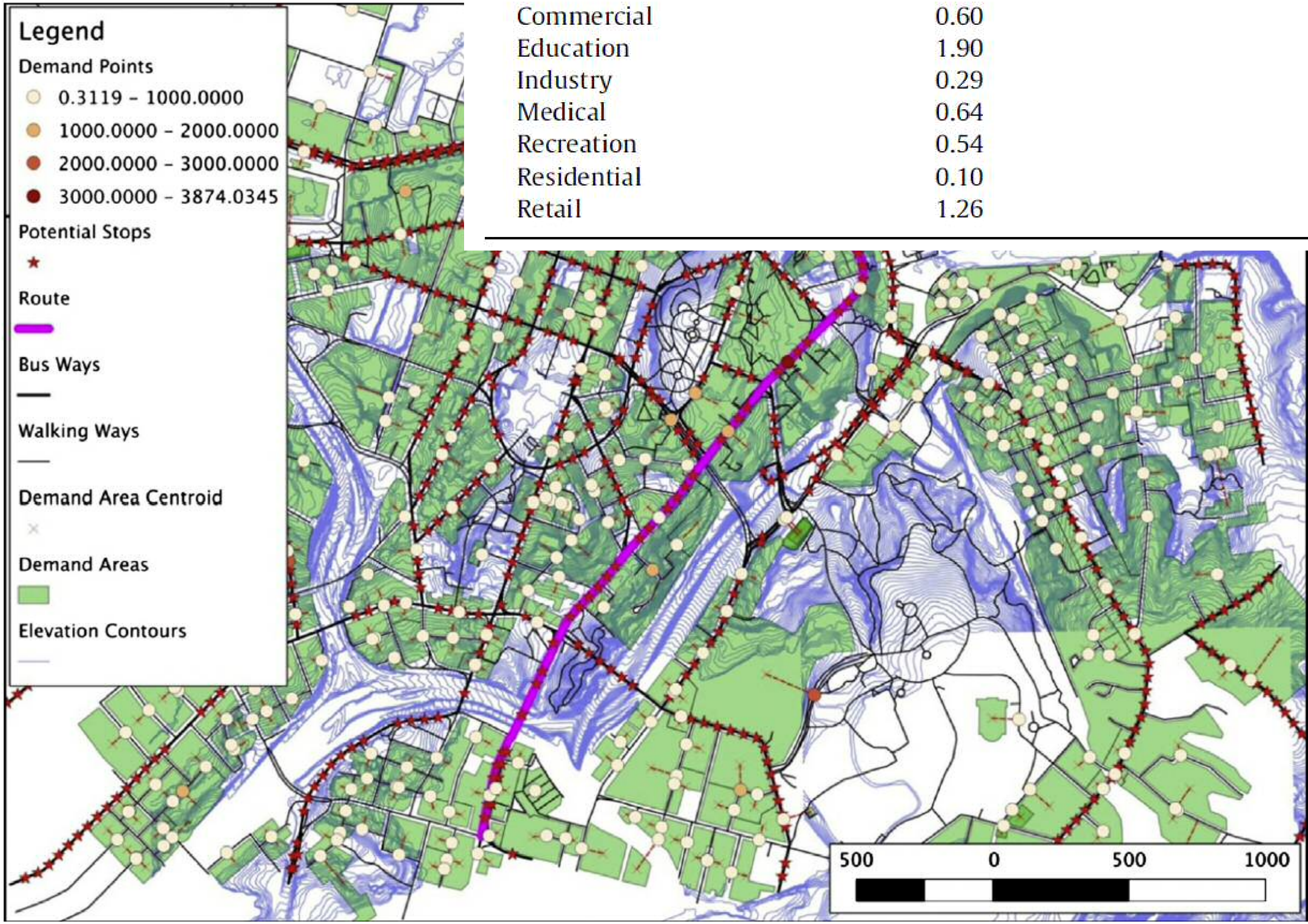
- 繰り返し回数300

Case study

Auckland CBD data

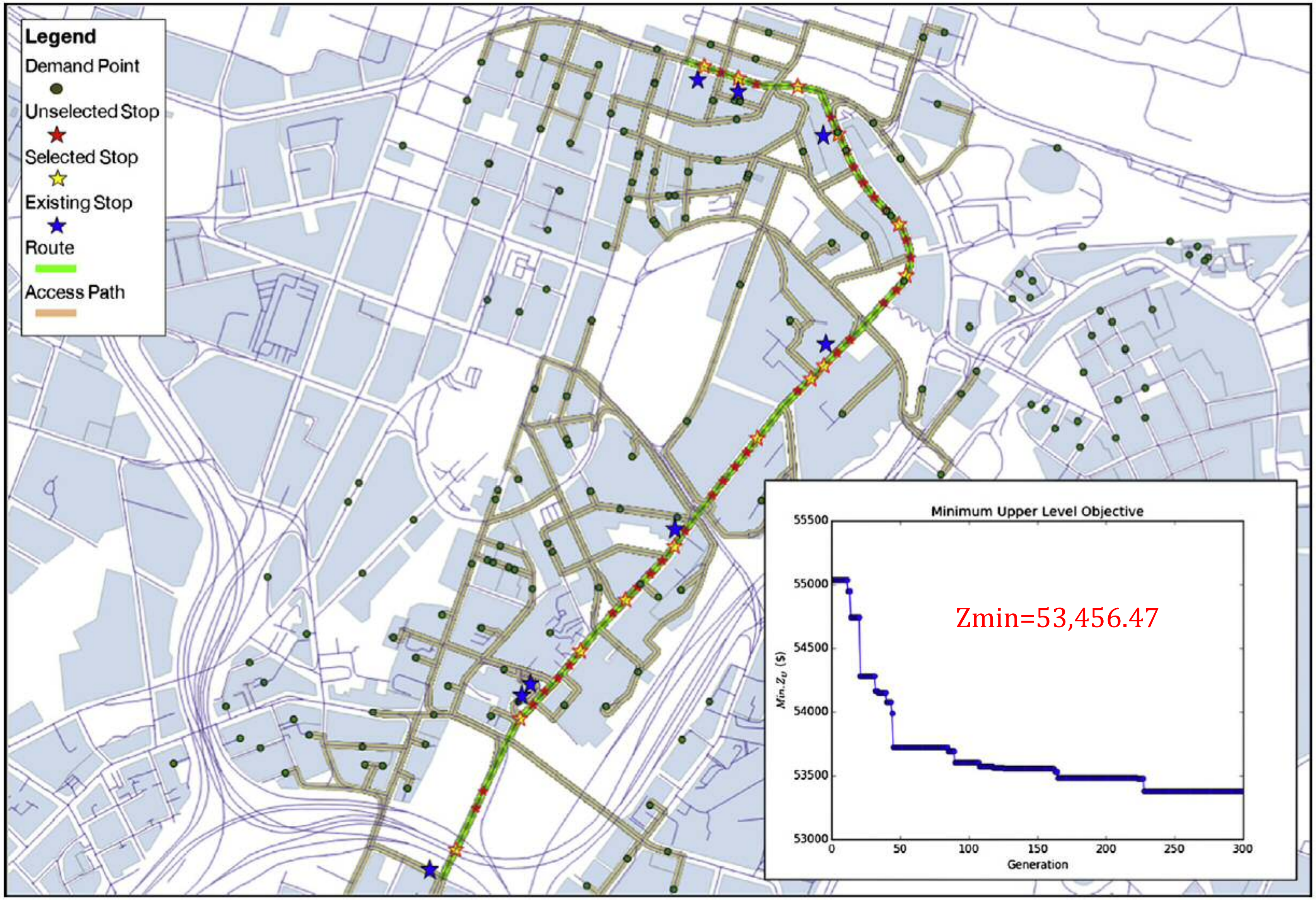
Table 4
Bus trip rates.

Facility type	Trip rate per m^2 footprint area (AM)
Commercial	0.60
Education	1.90
Industry	0.29
Medical	0.64
Recreation	0.54
Residential	0.10
Retail	1.26



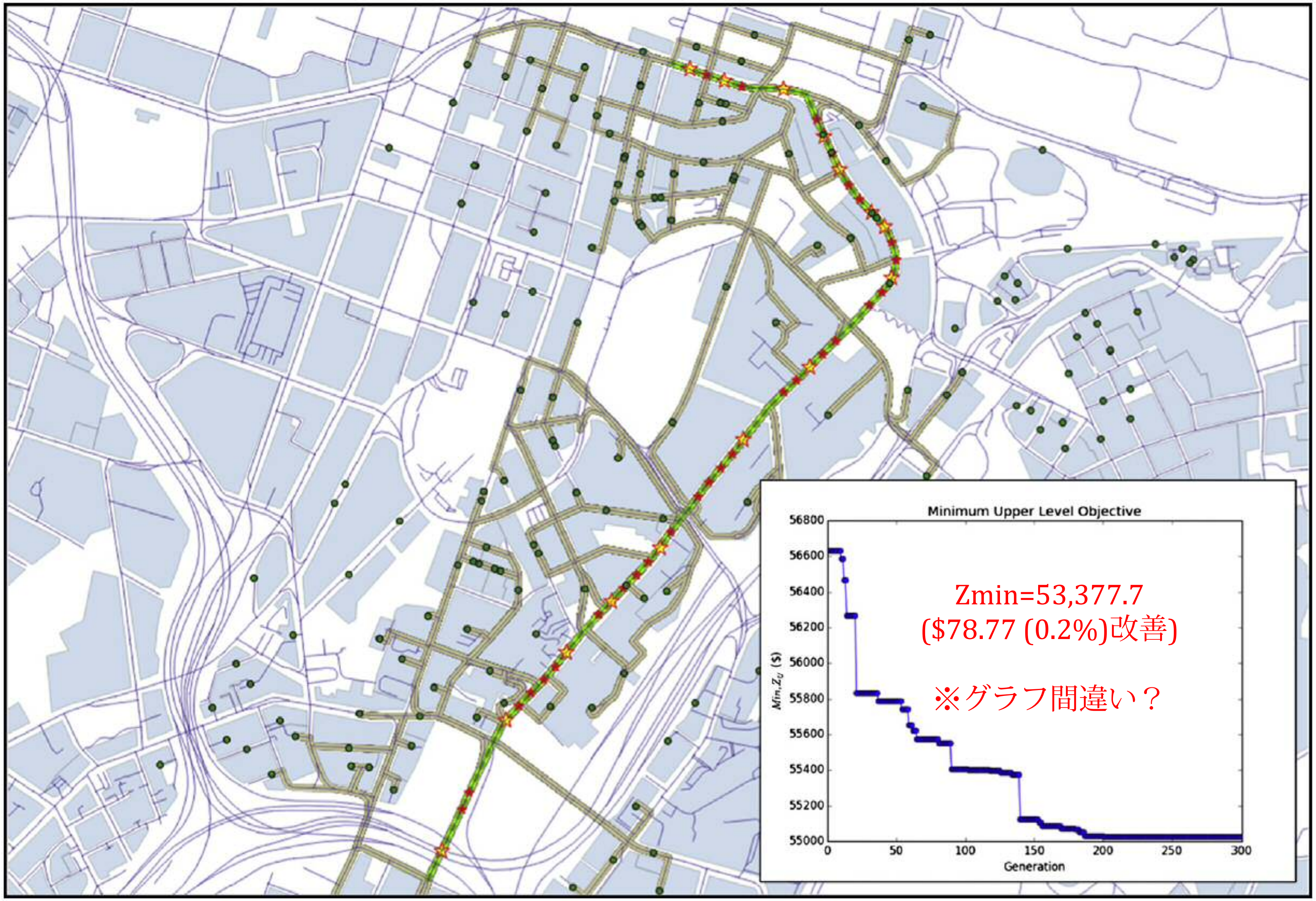
Case study

■ルート211朝ピーク需要下での停留所配置



Case study

■ルート211朝ピーク需要下での停留所配置（フラットネットワークの場合）



Case study

■ルート296朝ピーク需要下での停留所配置（フラットネットワークの場合）

Case study

■ルート296朝ピーク需要下での停留所配置（勾配を考慮したネットワークの場合）

Case study

■勾配の考慮

- 勾配を考えることで上り坂の経路の利用が減り，下り坂・平坦な経路の利用が増
- 目的関数値0.2%の差はインプットデータの誤差を踏まえると有意な差とは言えない
- が，San Franciscoのような坂が多い地域では重要な要素になるのでは・・

■朝ピークと夕ピークの違い

- Aucklandの場合，朝はほとんどのトリップがハーバーフロント方面（下り方面），夕方は上り坂
- 夕方の分析結果の方が停留所分布が密になる

Conclusions

■成果

- ネットワークデザインの検討にあたって勾配を考慮するとともに，アクセス経路におけるアクセシビリティをルート検討の際に明示的に取り扱った
- GISを活用することで標高や道路特性の詳細なデータを取扱い，大規模ネットワークの計算にも対応した

■定式化における課題

- 複数ルートの組み合わせ（ルート間の相互作用）への対応
- 下位問題を均衡配分に拡張
- 経路選択における確率モデルの導入
- 運行間隔の決定問題も同時に解くべき
- 需要発生ポイントの与え方

■アルゴリズムにおける課題

- 高速化
- アルゴリズム自体見直した方がいい

本資料作成に係るその他参考文献

- Ibeas, A., dell'Olio, L., Alonso B., Sainz, O.: Optimizing bus stop spacing in urban areas, Transportation Research Part E, Vol.46, pp.446-458, 2010.
- Beyer, H.-G., Schwefel, H.-P.: Evolution strategies: a comprehensive introduction, Natural Computing, Vol.1, pp.3-52, 2002.