経路選択モデルの動向

東京工業大学
福田 大輔
fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

経路選択モデルを巡る 最近の実務的話題

- 首都圏都市鉄道需要予測(交通政策審議会)
  - 目標年次2030年とした検討(ポスト18号答申)が本格化
  - 特に，空港アクセス線評価，ならびに，未着手のA1/A2路線の評価が課題
  - 需要予測勉強会(岩倉・加藤先生・福田，社会システム)
- 東京都市圏物流調査(関東地方整備局)
  - 今秋に大規模貨物車プローブ調査を実施
  - ネットワークWG (森本・兵藤・羽藤・川崎先生・福田，計量計画研究所)

ポスト18号答申の鉄道需要予測

	1972 都交審15号	1985 運政審7号	2000 運政審18号	2015 交政審
トリップ目的		通勤・通学	通勤・通学・私事・ 業務の4区分	通勤・通学・私事・業務・ 帰宅等9区分による三 角移動の推計精度向上
年齢階層				65才未満・以上に区分 して経路需要推計 機関選択段階以上では， より細かい設定
機関分担	集計ロジット	非集計ロジット	非集計ロジット	非集計ロジット
経路選択	最短経路配分	非集計ロジット	構造化プロビット	構造化プロビット
経路選択要因 LOS	所要時間のみ	LH　所要時間，費用， 乗換回数 AE　所要時間，費用	LH　所要時間，費用， 乗換+待ち時間，混 雑指標 AE　最短所要時間， 費用	LH　所要時間，費用，乗換上下 移動時間，乗換水平移動時間、 乗換待ち時間、混雑指標 AE　logsum Hyperpath導入による急行 待ち時間設定の適正化
空港アクセス 機関選択			空港アクセス機関選択・ 経路選択モデル導入	時間信頼性指標の導入

出典：需要予測勉強会資料

物資流動調査:経路データの収集方法

①車載器メーカーで一括管理されている経路データの提供を依頼

収集　約6000台を想定）

マップマッチング

②特定の運送事業者の本社から一括して車載器データの提供を依頼

収集　約2000台を想定）

データ変換 ･マップマッチング

③個々の事業所に調査協力を依頼

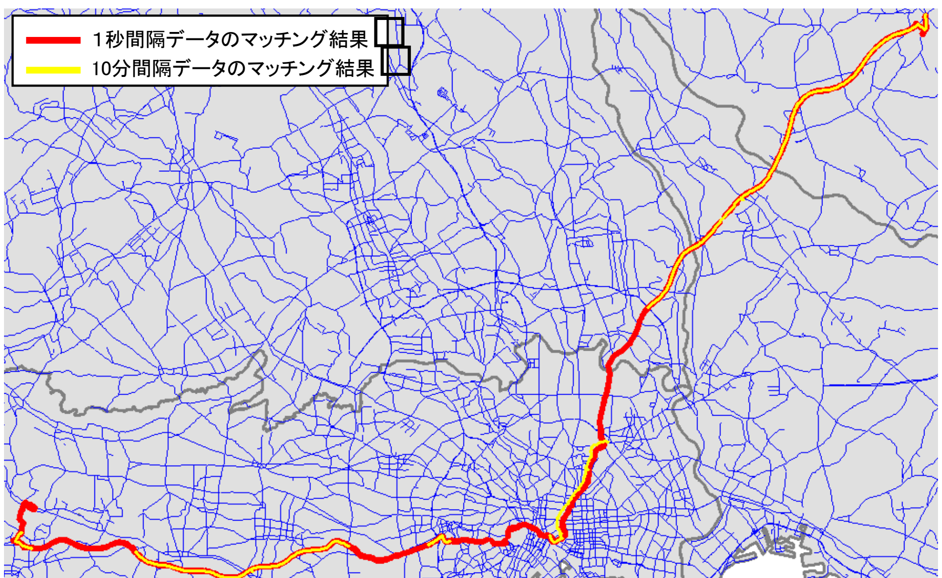
プローブ機器設置

機器回収 ﾃﾞｰﾀ収集　約280台を想定）

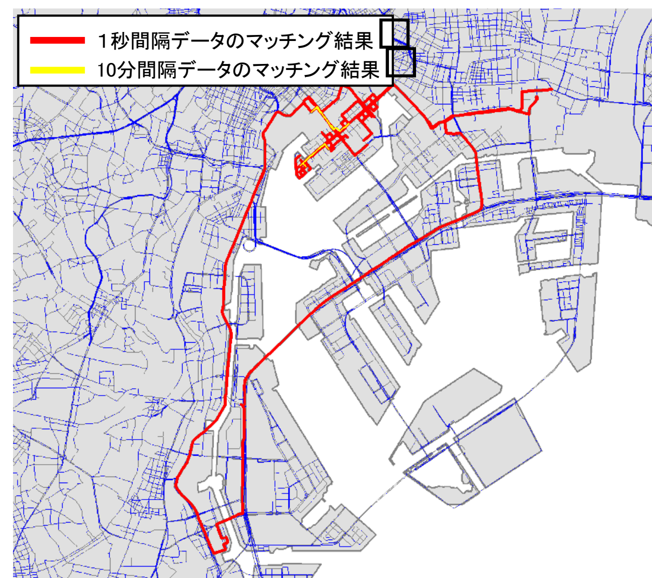
マップマッチング

経路データ

○拠点間輸送のマッチング結果□



○都市内集配のマッチング結果□



出典:東京都市圏物資流動調査ネットワークWG資料

経路選択モデルの構成要素

- 意思決定者(旅行者)
  - トリップ目的(時間価値)
  - 情報の入手方法：逐次 or 事前
- 意思決定ルール
  - 最小費用基準 or ランダム効用理論 or その他
  - 選択タイミング：逐次 or 事前
- 選択肢
  - 経路集合の設定：明示 or 非明示
  - 属性：”Link-Additive” or “Non Link-Additive”

選択肢集合に着目した 経路選択研究の “Two Camps”

- 第1キャンプ：
  - 決定論的/確率論的であれ，事前に経路集合を明示的に定めるアプローチ
- 第2キャンプ
  - Dial (1971) を嚆矢とする，明示的な経路の列挙（経路選択肢集合）を必要としないアプローチ

第1キャンプ

- 決定論的経路集合生成
  - K番目最短経路探索：Eppstein (1998)
  - ラベリング法：Ben-Akiva et al. (1984)
  - 分枝限定法：Hoogendoorn-Lanser (2005)

- 確率論的経路集合生成
  - Implicit Availability Perception：Cascetta and Papola (2001)
  - 選択肢サンプリング：Freginger et al. (2009)
  - ベイズアプローチ：Flötteröd and Bierlaire (2013)

選択肢サンプリング

Freginger et al. (2009)

$$P(i|\mathscr{C}_n) = \frac{e^{\mu V_{in} + \ln q(\mathscr{C}_n|i)}}{\sum_{j\in\mathscr{C}_n} e^{\mu V_{jn} + \ln q(\mathscr{C}_n|j)}} = \frac{e^{\mu V_{in} + \ln\left(\frac{k_{in}}{q(i)}\right)}}{\sum_{j\in\mathscr{C}_n} e^{\mu V_{jn} + \ln\left(\frac{k_{jn}}{q(j)}\right)}}$$

- 分析者が定めた選択肢サンプリング $\mathscr{C}_n$ に対し，補正項 $\ln q(\mathscr{C}_n|i)$ を加えたモデルの推定結果は，パラメータのUnbiasedな推定量を与える．
- $q(\mathscr{C}_n|j)$ 選択肢 j を与件としたサンプリング $\mathscr{C}_n$ の生起確率

$$q(\mathscr{C}_n|i) = \frac{R_n!}{\frac{1}{k_{in}}\prod_{j\in\mathscr{C}_n} k_{jn}!}\frac{1}{q(i)}\prod_{j\in\mathscr{C}_n} q(j)^{k_{jn}} = K_{\mathscr{C}_n}\frac{k_{in}}{q(i)} \qquad K_{\mathscr{C}_n} = \frac{R_n!}{\prod_{j\in\mathscr{C}_n} k_{jn}!}\prod_{j\in\mathscr{C}_n} q(j)^{k_{jn}}$$

- サンプリングによる各経路 i の抽出回数(k_{in})とサンプリング確率 $q(i)$ の情報が必要
- 重点サンプリング(Importance Sampling)の応用

選択肢サンプリング

O-Dペア間でのBiased Random Walkモデルによる選択肢サンプリング

1. 起点の設定
2. 流出リンク $\ell = (v, w)$ に対するウェイト計算:

$$x_\ell = \frac{SP(v, s_d)}{C(\ell) + SP(w, s_d)} \qquad \omega(\ell | b_1, b_2) = 1 - (1 - x_\ell^{b_1})^{b_2}$$

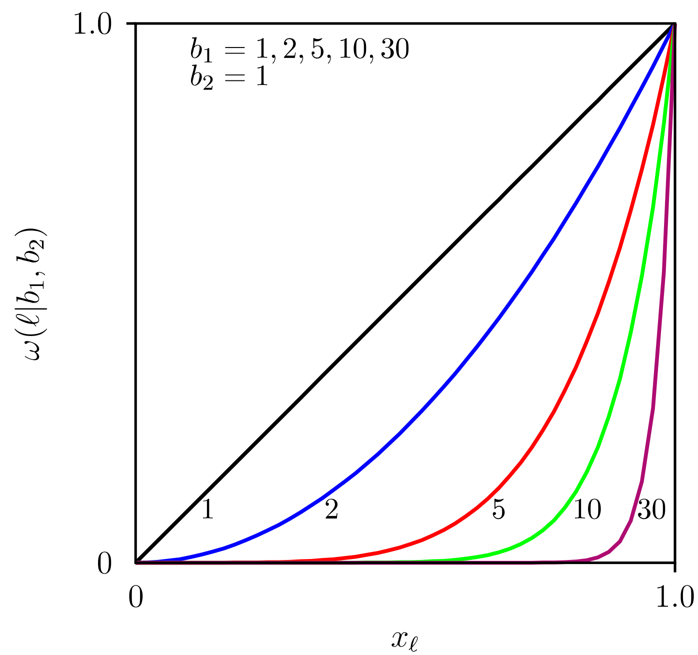
3. ウェイトの正規化による確率分布導出:

$$q(\ell | \mathscr{E}_v, b_1, b_2) = \frac{\omega(\ell | b_1, b_2)}{\sum_{m \in \mathscr{E}_v} \omega(m | b_1, b_2)}$$

4. 得られた分布からのリンクサンプリング
5. 上記ステップの繰り返し

経路 j のサンプリング確率:

$$q(j) = \prod_{\ell \in \Gamma_j} q(\ell | \mathscr{E}_v, b_1, b_2)$$



Kumaraswamy 分布

ベイズアプローチ

Flötteröd and Bierlaire (2013)

- 一般ネットワークにおける“任意の確率分布” から，経路をサンプリングする方法論を提案

1. 任意(例．最短経路)の経路を設定
2. その経路のランダムな修正を繰り返す
   - 各ランダム修正のなされる確率に基づいて，その修正が受容or棄却となるかを判断
   - Metropolis-Hastingアプローチの応用：サンプリング分布の規格化定数を計算する必要がない

ベイズアプローチ

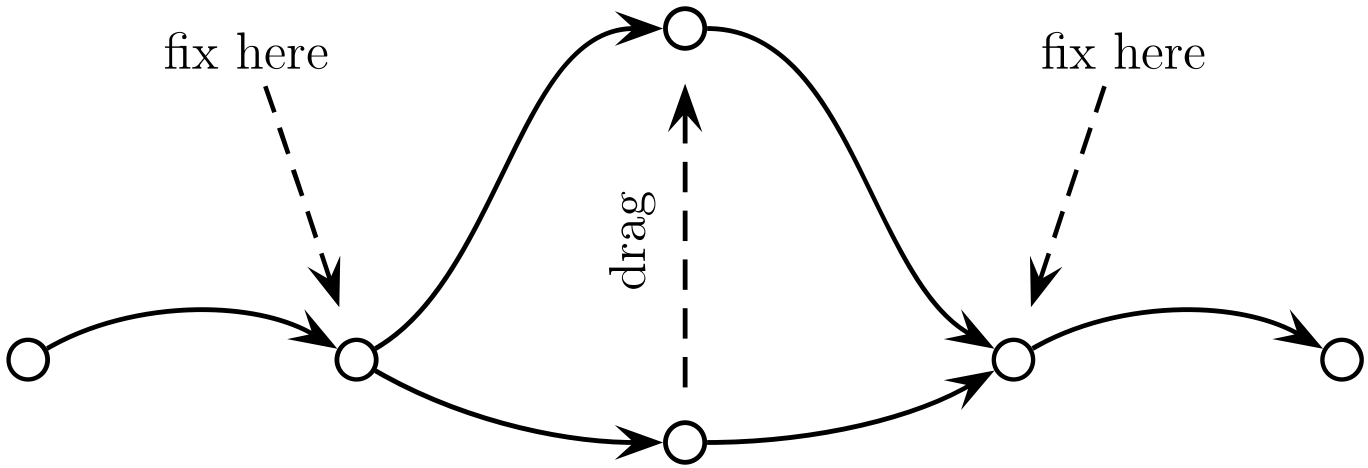


Fig. 1. "Rubber band"-like variation of a path.

- 二箇所の固定点(fix)を選定
- 一箇所の移動点を選定し，新しいポジションに移動(drag)
- すなわち，輪ゴム(rubber band)のように経路を変位させるが，その変位がネットワーク上に制限される

ベイズアプローチ

Metropolis-Hastingsアルゴリズム (Hastings, 1970)：

有限空間 $\mathcal{S}$ における状態 $i\in\mathcal{S}$ の確率密度関数に比例する関数 $\{b(i)\}_{i\in\mathcal{S}}$
既知のとき，以下のアルゴリズム：

1．初期値 $i^{(k)}$ を決め，k=0 とおく

2．次の値 $i^{(k+1)}$ の候補を提案分布 $q(i^{(k)},j)$ から発生させ，

$$\alpha(i^{(k)},j)=\min\left\{\frac{b(j)}{b(i^{(k)})}\frac{q(j,i^{(k)})}{q(i^{(k)},j)},\quad 1\right\}$$

と定義する

3．(0,1)上の一様乱数 u を発生させ，次式により更新する：

$$i^{(k+1)}=\begin{cases} j & \text{if } u\le\alpha(i^{(k)},j) \\ i^{(k+1)} & \text{if } u>\alpha(i^{(k)},j) \end{cases}$$

4．ステップ k を k+1 として，２．に戻る

において，一定ステップ経過して以降の i の生成列は，求めたい（任意の）
確率分布からの生成乱数とみなすことができる．

ベイズアプローチ

M-H Algorithm for Path Sampling (Flötteröd and Bierlaire, (2013) :

1. Set iteration counter $k = 0$.
2. Select arbitrary initial state $i^k = (\Gamma, a, b, c)^k$. For instance,
   (a) let Γ^k be the shortest path;
   (b) draw $(a, b, c)^k$ uniformly with $1 \leqslant a^k < b^k < c^k \leqslant |\Gamma^k|$.
3. Repeat beyond stationarity:
   (a) If Γ^k is spliceable, do with probability P_{splice}:
      (i) Draw candidate state j with a SPLICE operation

   Otherwise (Γ^k is not spliceable or event with probability P_{splice} did not occur),
      (i) draw candidate state j with a SHUFFLE operation

   (b) Compute transition probabilities $q(i^k, j)$ and $q(j, i^k)$
   (c) Compute acceptance probability $\alpha(i^k, j) = \min\left(\frac{b(j)q(j,i^k)}{b(i^k)q(i^k,j)}, 1\right)$.
   (d) With probability $\alpha(i^k, j)$, let $i^{k+1} = j$; else, let $i^{k+1} = i^k$.
   (e) Increase k by one.

ベイズアプローチ

１．ターゲットウェイト[b(i)]の特定化

$$b(i) = \frac{d(\Gamma)}{|\Gamma|(|\Gamma|-1)(|\Gamma|-2)/6} = \frac{\exp[-\mu\delta(\Gamma)]}{|\Gamma|(|\Gamma|-1)(|\Gamma|-2)/6}$$

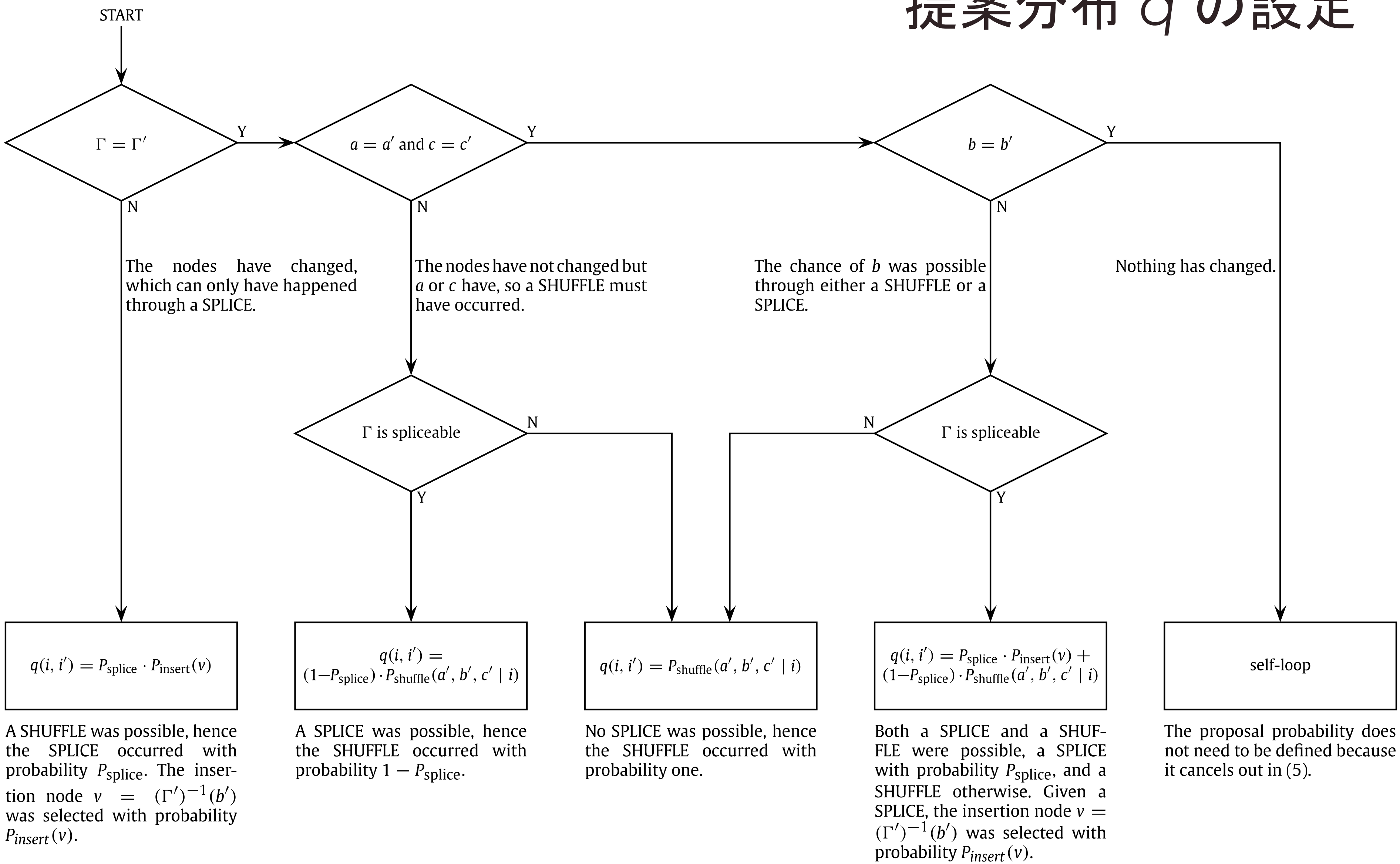
Γ: 経路のラベル，$|\Gamma|$: 経路を構成するノードの数，
a, b, c: 中間ノードの番号→　$1 \leqslant a < b < c \leqslant |\Gamma|$

- 上式の分母は，a, b, c を選びうる組み合わせ数に相当（共通）
- 分子がターゲットウェイトに相当．ここでは，経路コスト $\delta(\Gamma)$ が大きくなるに連れて指数的に逓減すると仮定

２．提案分布 q の設定

- labeled SPLICE and SHUFFLE（略）という，二つの操作により計算

提案分布 q の設定



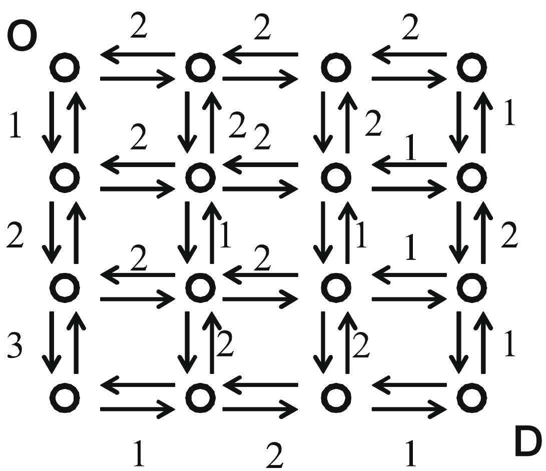
START
$\Gamma = \Gamma'$
Y
N
$a = a'$ and $c = c'$
Y
N
$b = b'$
Y
N
The nodes have changed, which can only have happened through a SPLICE.
The nodes have not changed but a or c have, so a SHUFFLE must have occurred.
The chance of b was possible through either a SHUFFLE or a SPLICE.
Nothing has changed.
Γ is spliceable
N
Y
Γ is spliceable
N
Y
$q(i, i') = P_{\text{splice}} \cdot P_{\text{insert}}(v)$
$q(i, i') = (1-P_{\text{splice}}) \cdot P_{\text{shuffle}}(a', b', c' \mid i)$
$q(i, i') = P_{\text{shuffle}}(a', b', c' \mid i)$
$q(i, i') = P_{\text{splice}} \cdot P_{\text{insert}}(v) + (1-P_{\text{splice}}) \cdot P_{\text{shuffle}}(a', b', c' \mid i)$
self-loop
A SHUFFLE was possible, hence the SPLICE occurred with probability P_{splice}. The insertion node $v = (\Gamma')^{-1}(b')$ was selected with probability $P_{insert}(v)$.
A SPLICE was possible, hence the SHUFFLE occurred with probability $1 - P_{\text{splice}}$.
No SPLICE was possible, hence the SHUFFLE occurred with probability one.
Both a SPLICE and a SHUFFLE were possible, a SPLICE with probability P_{splice}, and a SHUFFLE otherwise. Given a SPLICE, the insertion node $v = (\Gamma')^{-1}(b')$ was selected with probability $P_{insert}(v)$.
The proposal probability does not need to be defined because it cancels out in (5).

第2キャンプ

- Dial (1971)'s アプローチ
  - あるシステマティックな規範に従って生成された交通量配分が, “Efficient paths”を経路集合とするMNLによる配分結果と等価になる
- マルコフ連鎖アプローチ
  - Akamatsu (1996) : 佐々木のMarkov連鎖配分(佐々木, 1965)を応用し, MNL型配分と等価な交通量配分を行う方法論を提案(結果としてInfiniteな経路選択肢集合のMNL となる)
  - 原・赤松 (2012/forthcoming) : Network-GEV Model を対象とした同様の方法論を提案

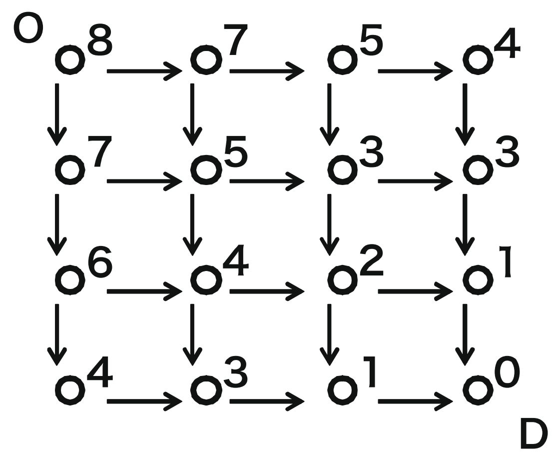
GEV-Networkの構築

道路ネットワーク構造



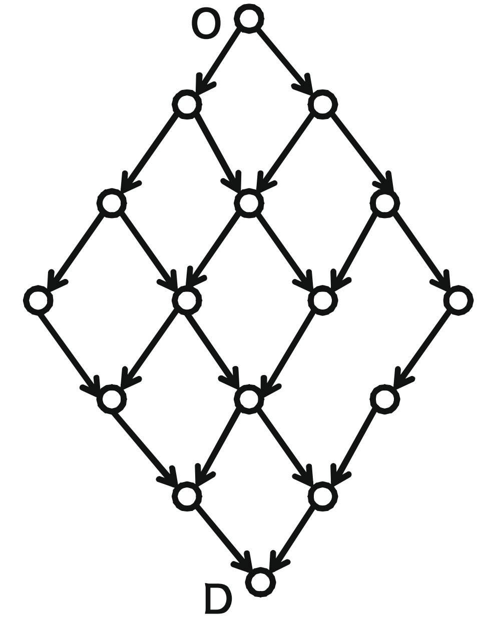
数字はリンクコスト

Dial ネットワーク



数字は終点からのコスト

選択肢の誤差構造を表す GEVネットワーク

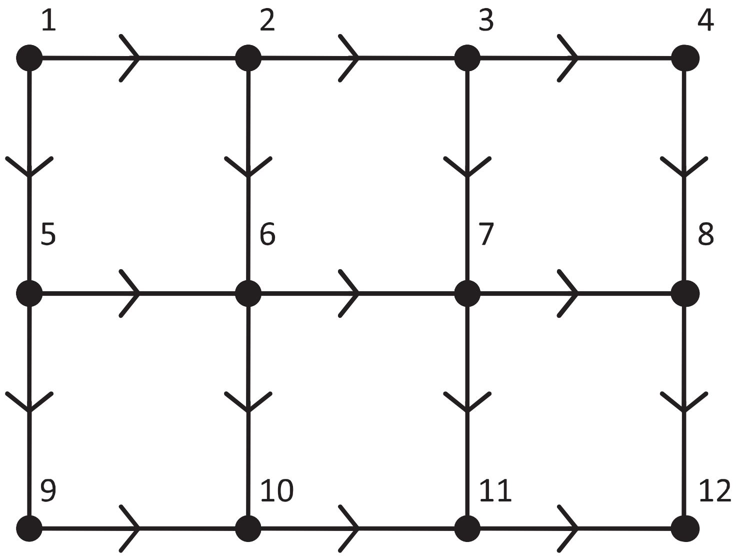


終点から遠ざかる
リンクの集合

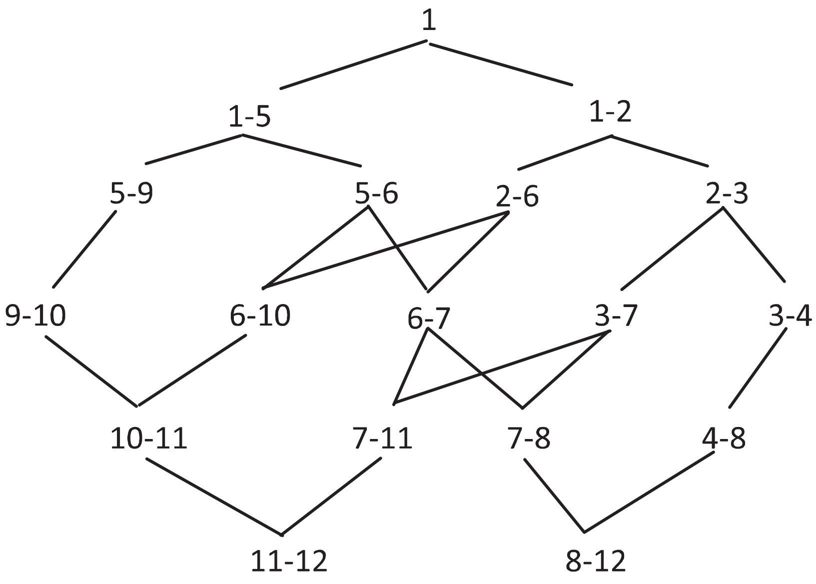
経路同士の類似性を
重複率により明示化

出典：原・赤松 (2012/forthcoming)

GEV-Networkの構築



道路ネットワーク構造



JNG (Joint Network-GEV)
Choice Network

出典：Papola and Marzano (2013)

公共交通NWと自動車交通NW①

- 公共交通：時刻表または事前に定められた運行頻度に基づいてサービスが提供
  - 総旅行時間は，駅/バス停での待ち時間に依存して変動する
  - 同一ホーム等で乗り換え可能な複数の路線が平行運行していることにより，戦略的な乗り換え行動をすることで総旅行時間を小さくすることができる (Common lines problem; Chriqui and Robillard, 1975)
  - その他にも，運行情報の獲得によるEn-Routeでの逐次的な経路選択の可能性
- "Strategyもしくはhyperpath"の概念
  - 乗車方法の組合せ(Attractive set)に明示的に待ち時間を加味したものの総称
- 「旅客は期待旅行費用が最小となるHyperpath (Optimal Strategy) を選択する」と仮定した経路選択モデルを構築することが可能

Spiess & Florian (1988) アルゴリズム概略

1．Optimal Strategyの探索

- 着ノードから発ノードに向かって最小リンクを探索（Dijkstra法に似た手順）
- 各ノードでの待ち時間が現状コストよりも大きくなるまでリンクを集合に追加

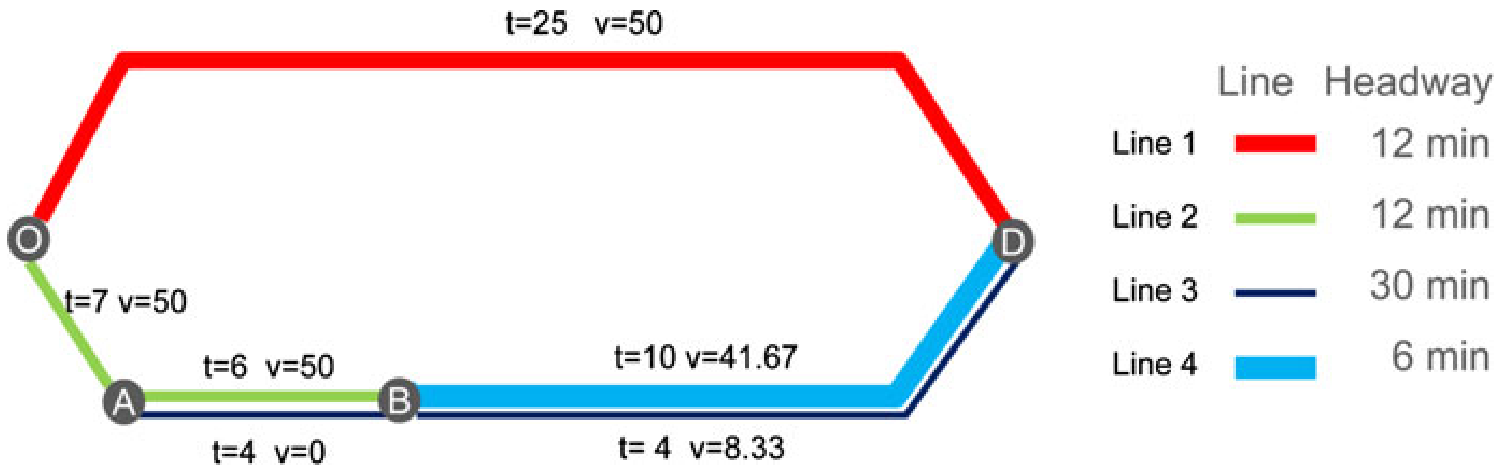
2．Network Loading

- 得られたOptimal hyperpathに利用路線の頻度の逆数に比例して旅客を配分

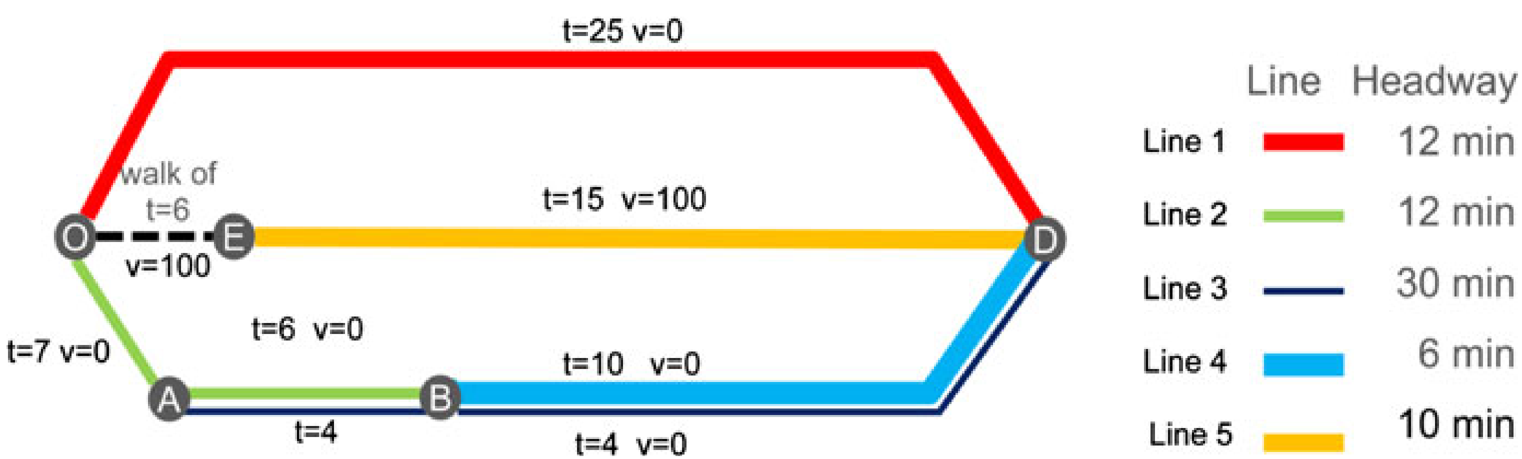
Dialアルゴリズムは「起点から遠ざかる」という規範に基づいて，Efficient PathsをImplicitに生成．一方，Spiess & Florianアルゴリズムは，「Optimal Strategyの概念」に基づきHyperpath(経路群)をImplicitに生成．

Hyperpath型経路選択モデル

Florian and Constantin (2012)



- Optimal Strategy によるOD間の期待最小旅行時間は27.75 分



- 「徒歩リンク＋Line 5」の期待総旅行時間は6+15+10/2=26分
  つまり, 「この追加経路だけを利用する」がOptimal Strategyに？？

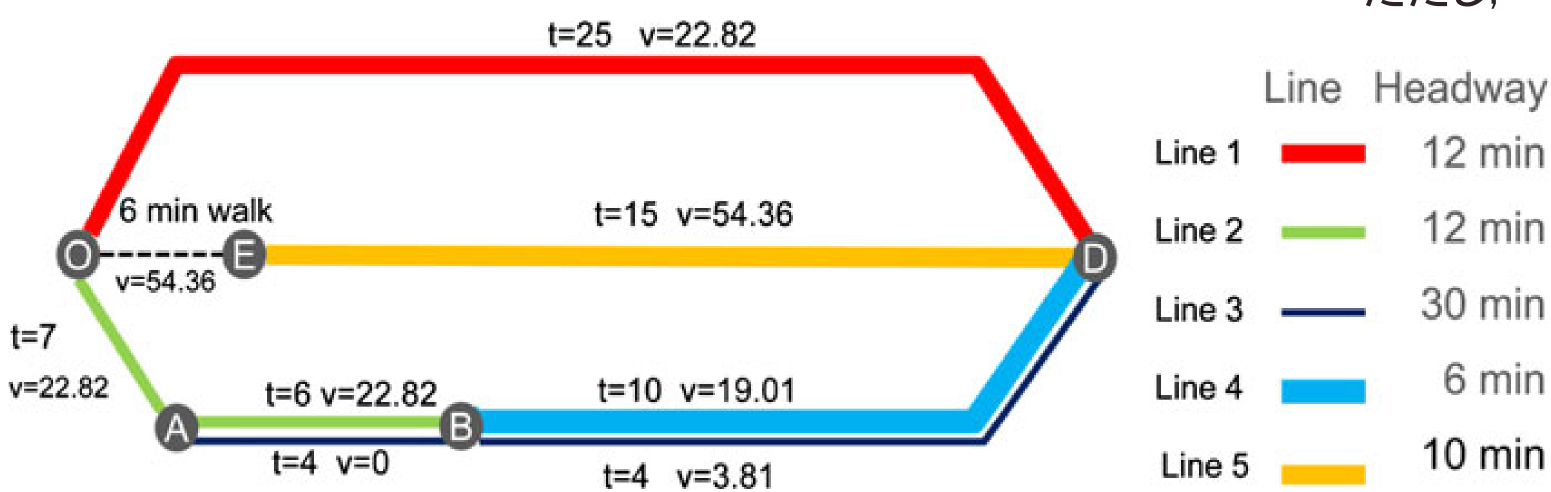
Hyperpath型経路選択モデル

Florian and Constantin (2012)

- このような “extremal property” が，Spiess & Florianモデルには内在し，実際の旅客行動との乖離をもたらし得る．
- そこで，MNL基準により両戦略の間での戦略がなされると仮定する，すると，一番目の戦略の選択確率は：

$$\exp(-\theta \times 27.75)/(\exp(-\theta \times 26) + \exp(-\theta \times 27.75)) = 0.458.$$

ただし，　$\theta = 0.1$

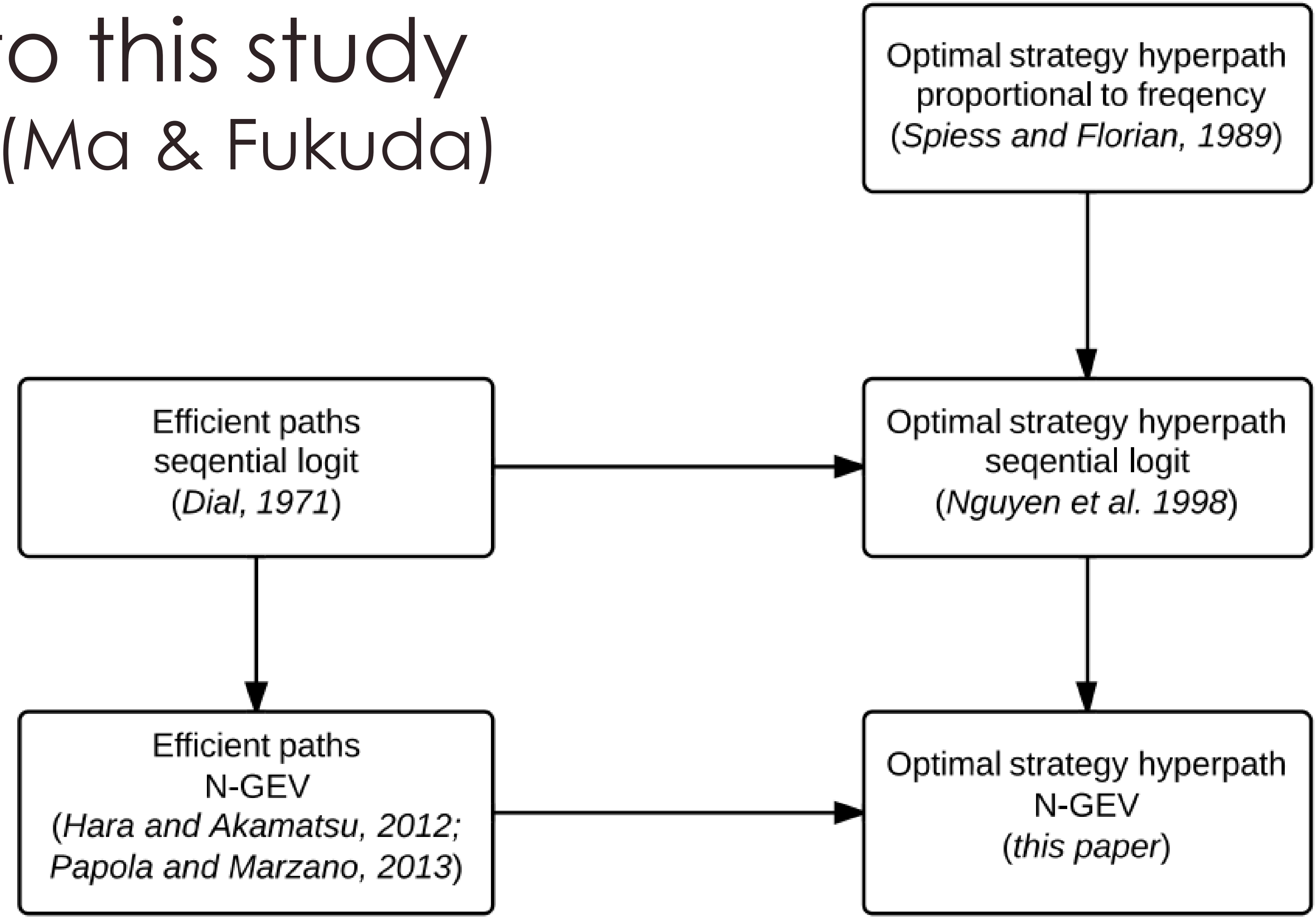


- このとき，期待旅行時間は26.80となり，26分よりも値としては大きいが，現実に近いフローパターンが得られている

Florian meets McFadden？

- Nguyen et al. (1998)：
  Dial型のSequential logitモデルをHyperpathモデルに融合：
- Florian and Constantin (2012)：
  徒歩リンクを考慮した修正logitモデルを導入したHyperpath型公共交通乗客配分モデル
- Ma & Fukuda (Works in progress) ：
  IIAに対処するため，Strategy ChoiceにNetwork-GEV構造を導入したHyperpath型(リスク回避性向を有する)経路選択モデル
  - Bell (2009), Bell et al. (2012)による"Hyperstar"同様に，道路交通における遅刻リスク回避型経路誘導へも適用可能

Road Map from Previous Studies to this study
(Ma & Fukuda)



HP-Based N-GEV Model

Ma & Fukuda (Works in progress)

1. Generalized link utility :

$$V_a + \varepsilon_a + \tilde{V}_a$$

"Uncertain utility (旅行時間変動)"

GEV項

2. A possible definition of node utility:

$$V_i = \frac{\sum_{k \in H_i^+} P_k \cdot \tilde{V}_a}{|H_i^+|}$$

3. Find the optimal strategy:

$$\max \sum_{a \in A} p_a \cdot V_a + \sum_{i \in I} p_i \cdot V_i$$

Expected total travel time by pessimists (risk-averse travelers)

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{a \in A_i^+} P_{a|i} - \sum_{a \in A_i^-} P_{a|i} = \begin{cases} -1 & \text{if } i = s \\ +1 & \text{if } i = r \\ 0 & \text{othewise} \end{cases} \\ p_a = P_{a|i} \cdot p_i \quad \forall\, i \in I \text{ and } \forall\, a \in A \\ p_i = 1 \quad i \in \{r, s\} \end{cases}$$

Node choice probability is shared by its connected links

Independent decisions at decision nodes

Origin and destination are certainly used

HP-Based N-GEV Model

- G_{a_n} をJNGネットワークのレベル n におけるリンクa_nのG関数とする.

- このとき，1つ前のレベルでのリンクa_{n-1}が与えられた時のa_nの選択確率を次のように仮定する:

$$P_{a_n|a_{n-1}} \propto \alpha_{a_{n-1},a_n} \cdot G_{a_n}^{\theta_{a_n}/\theta_{a_{n-1}}} \quad \forall a \in H_i^+$$

スケール(ネスト)パラメータ

アロケーションパラメータ

- G関数の再帰性により，次式が成り立つ

$$G_{a_n} = e^{V_{a_n}/\theta_{a_n}} \sum_{a_{n+1} \in H_i^+} \alpha_{a_n,a_{n+1}} \cdot \left(G_{a_{n+1}}\right)^{\theta_{a_{n+1}}/\theta_{a_n}}$$

$$P_{a_n|i(a_n)} = P_{a_n|a_{n-1}} = \frac{\alpha_{a_{n-1},a_n} \cdot G_a^{\theta_{a_n}/\theta_{a_{n-1}}}}{\sum_{k \in H^+_{i(a_{n-1})}} \alpha_{k_{n-1},k_n} \cdot G_k^{\theta_{k_n}/\theta_{k_{n-1}}}}$$

HP-Based N-GEV Model

- ちなみに，経路選択確率を導出すると，確かにN-GEVモデルになる:

$$p_{\delta_{rs}} = p_r \cdot P_{a_1|r} \cdot P_{a_2|j(a_2)} \cdot \cdots \cdot P_{a_m|j(a_{m-1})} \cdot p_s = \prod_{a_n \in \delta_{rs}} P_{a_n|j(a_{n-1})}$$

$$= \prod_{a_n \in \delta_{rs}} \frac{\alpha_{a_{n-1},a_n} \cdot G_a^{\theta_{a_n}/\theta_{a_{n-1}}}}{\sum_{k \in H^+_{i(a_{n-1})}} \alpha_{k_{n-1},k_n} \cdot G_k^{\theta_{k_n}/\theta_{k_{n-1}}}}$$

- 一般化ベルマン方程式を用いたStrategyの計算も可能:

$$V_{is}^* = \begin{cases} 0 & \text{if } i = s \\ \max_{a \in A_i^+}(V_a + V_{js}^*) & \text{if } i \notin I^H \\ \max_{a \in H_i^+}\left[V_i + \sum_{k \in H_i^+} P_{k|i(k)}(V_k + V_{js}^*)\right] & \text{if } i \in I^H \end{cases}$$

- 但し，アロケーションパラメータ，スケールパラメータの適切な設定方法がなかなか見つからない．．．

参考文献

- Akamatsu, T., 1996. Cyclic flows, Markov process and stochastic traffic assignment, Transportation Research Part B, 30(5), 369–386.
- Bell, M.G.H., 2009. Hyperstar: A multi-path Astar algorithm for risk-averse vehicle navigation, Transportation Research Part B: Methodological, 43, 97–107.
- Bell, M.G.H., Trozzi, V., Hosseinloo, S.H., Gentile, G. and Fonzone, A., 2012. Time-dependent Hyperstar algorithm for robust vehicle navigation, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46, 790–800.
- Ben-Akiva, M.E., Bergman, M.J., Daly, A.J. and Ramaswamy, R., 1984. Modeling inter-urban route choice behaviour, in J. Volmuller and R. Hamerslag (eds), Proceedings from the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, VNU Science Press, Utrecht, Netherlands, 299–330.
- Cascetta, E. and Papola, A., 2001. Random utility models with implicit availability perception of choice travel for the simulation of travel demand, Transportation Research Part C, 9(4), 249–263.

- Chriqui, C. and Robillard, P., 1975. Common bus lines, Transportation Science, 9, 115–121.
- Daganzo, C.F., Sheffi, Y., 1977. On stochastic models of traffic assignment. Transportation Science 11 (3), 253–274.
- Daly A. and Bierlaire M., 2006. A general and operational representation of generalised extreme value models, Transportation Research Part B, 40, 285–305.
- Dial, R.B., 1971. A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, Transportation Research, 5, 83–111.
- Eppstein, D., 1998. Finding the K shortest paths, SIAM Journal of Computing, 28 (2), 652–673.
- Florian, M. and Constantin, I., 2012. A note on logit choices in strategy transit assignment, EURO Journal on Transportation and Logistics, 1, 28–46.
- Flötteröd, G. and Bierlaire, M., 2013. Metropolis–Hastings sampling of paths, Transportation Research Part B: Methodological, 48, 53–66.
- Freginger, E., Bierlaire, M. and Ben-Akiva, M., 2009. Sampling of alternatives for route choice modeling, Transportation Research Part B: Methodological, 43, 984–994.

- Hara, Y. and Akamatsu, T., 2012. Stochastic user equilibrium traffic assignment with a network GEV based route choice model (in Japanese), JSCE Proceedings of Infrastructure Planning Review, 46, paper No. 60.
- Marcotte, P. and Nguyen, S., 1998. Hyperpath formulations of traffic assignment problems, Equilibrium and Advanced Transportation Modelling, Kluwer Academic Publisher, 175–199.
- Nguyen, S., Pallottino, S. and Gendreau, M., 1998. Implicit enumeration of hyperpaths in a logit model for transit networks. Transportation Science, 32 (1), 54–64.
- Papola, A. and Marzano, V., 2013. A network generalized extreme value model for route choice allowing implicit route enumeration, Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 28, 560–580.
- Spiess, H. and Florian, M., 1989. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks, Transportation Research Part B: Methodological, 23, 83–102.