

第2回 若手研究者の研究会

---

# 時空間上の状態遷移推定に基づく 歩行者流動モデル

2013年7月14日(日)

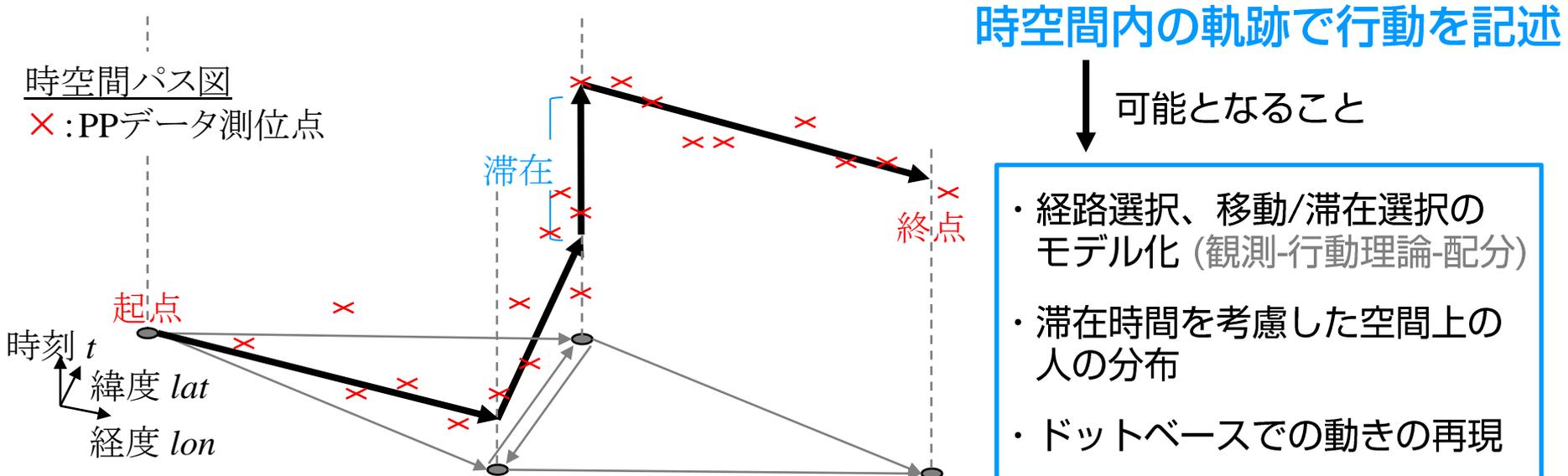
東京大学大学院 工学系研究科  
都市工学専攻 修士2年  
都市生活学・ネットワーク行動学研究室  
伊藤 創太

# 中心市街地の歩行者行動の記述

## 従前の交通行動分析 (PT調査・静的交通量配分に立脚)



## 本研究で考える歩行者行動分析



# 歩行者行動の考慮すべき性質

## (1) 周回・迂回など多様な経路が存在

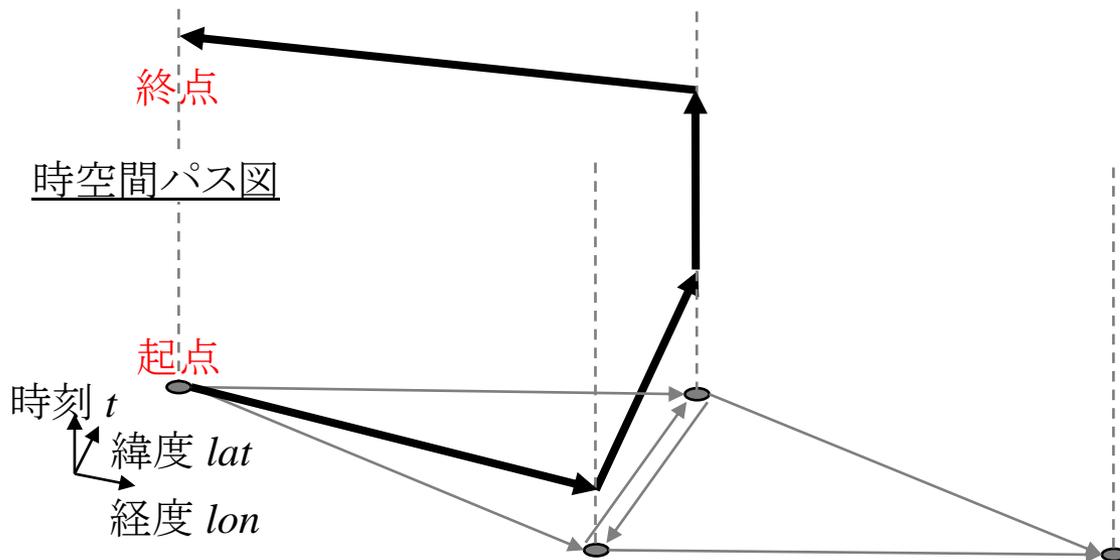
Simple pathsの配分

膨大な経路集合から、経路の列挙は困難

**マルコフ連鎖配分** (佐佐木, 1965, 1968)

全経路対象、周回経路を含めて配分

logit型経路選択と整合 (Bell, 1995; Akamatsu, 1996; 鈴木ら, 2006)



## (2) 移動中に立ち止まりや活動が容易に行える

従前の交通分析：トリップで分割

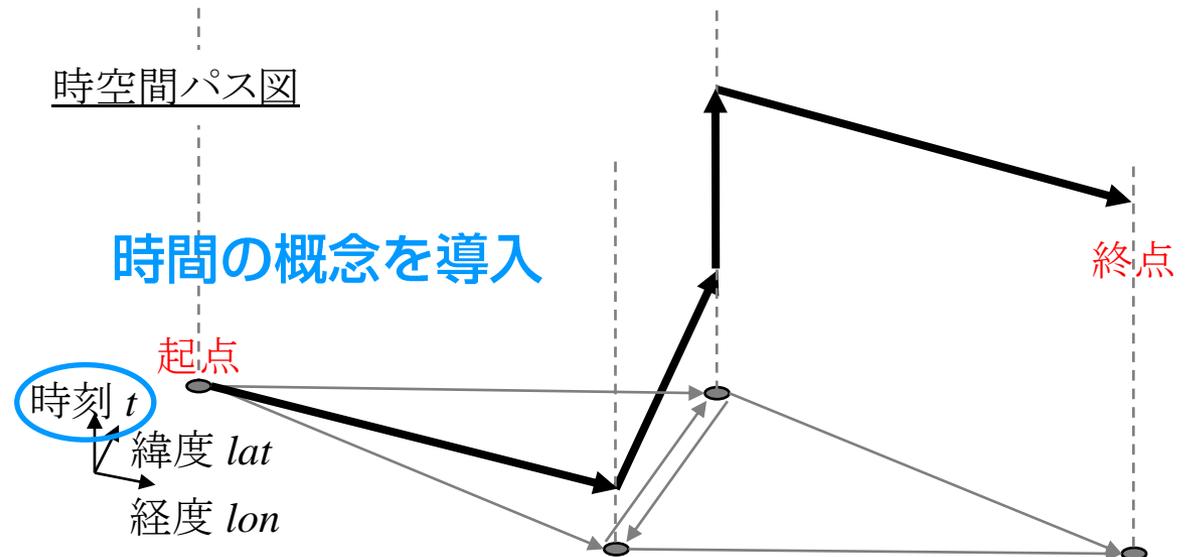
- ・移動/滞在を繰り返す回遊行動には不向き
- ・PT調査ではゾーン内行動は捕捉できない



スケジューリングと経路選択を同時に考える必要性

strategic level - tactical level - operational level の3つの段階

(Hoogendoorn and Bovy, 2004)



# 歩行者行動の考慮すべき性質

## (3) 誤差を持つ観測(プローブデータ)

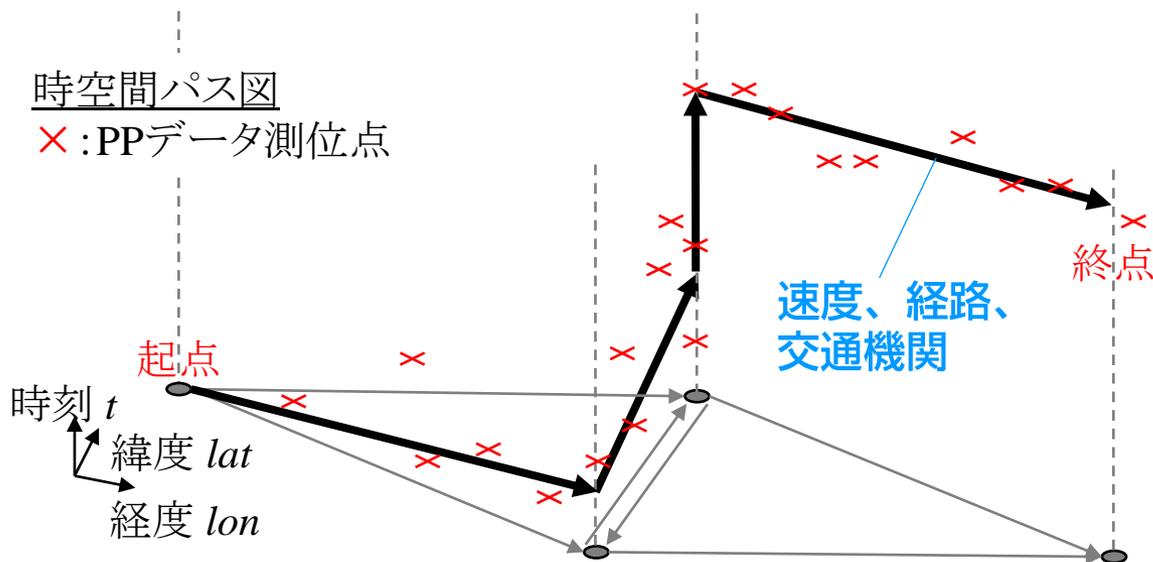
従前の観測：アンケート調査、追跡調査



GPSや移動端末技術の向上で歩行者のメゾレベルの観測が可能に

歩行者の状態や交通機関を、位置情報や加速度から判別

(Chen et al., 2009; 藤原ら, 2010; Stenneth et al., 2011; 大村・羽藤, 2011; Bierlaire et al., 2013)



# 歩行者行動の考慮すべき性質

## (4) flow-independentな交通流

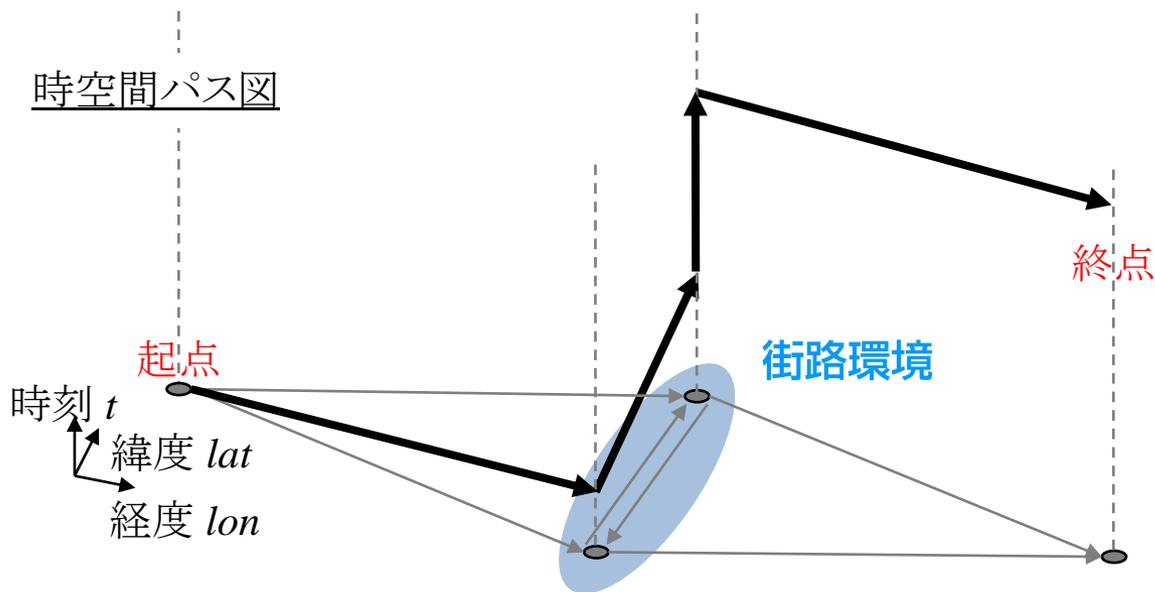
### 自動車交通流

BPR関数による混雑の考慮、均衡配分

### 歩行者交通流

雑踏状況下でない限り交通量が速度や経路選択に及ぼす影響は限定的

寧ろ、街路環境など他の多様な要因が行動に影響



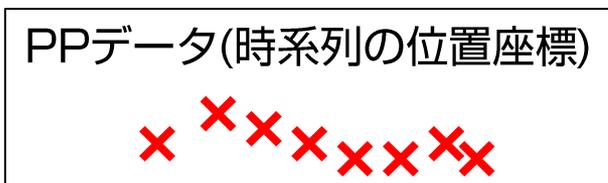
# 本研究で構築するモデル

## 考慮すべき性質

- (1) 周回・迂回など多様な経路が存在
- (2) 移動中に立ち止まりや活動が容易に行える
- (3) 誤差を持つ観測(プローブデータ)
- (4) flow-independentな交通流

## モデル

→	マルコフ連鎖による 状態遷移記述	1
→	連続時間の 導入(指数分布)	1,3
→	観測誤差を含む データによる状態推定	2
→	事前情報としての 歩行速度の仮定	3

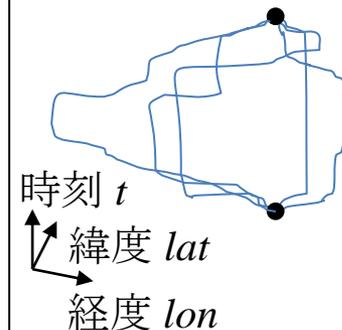


1. マルコフ連鎖モデル  
状態間の推移(経路選択)

2. 観測モデル(DDR)  
観測データと位置座標

3. 移動モデル  
位置座標間の推移

時空間上の  
歩行者の動き



# 確率過程としての歩行者行動

歩行者の来街してから帰るまでの状態遷移(経路)

$$k = \{a_1, a_2, \dots, a_N\} \quad a_n \in A \quad (A: \text{リンクの集合})$$

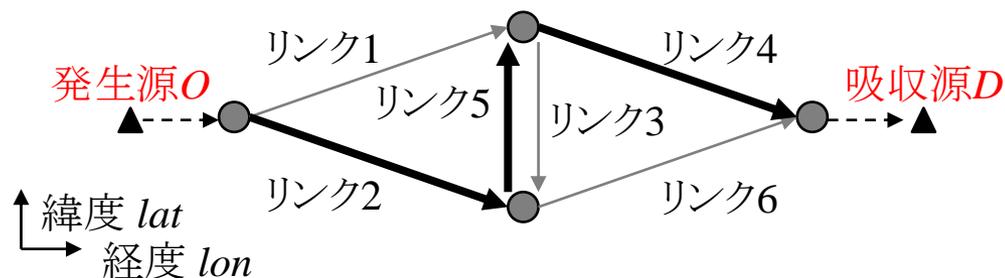
状態は発生源から吸収源までのネットワーク上のリンクで表す

例:  $k = \{2, 5, 4\}$

状態遷移は遷移確率行列  $P$  で表す

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} D & O & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} D \\ O \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

ネットワーク図



吸収状態では遷移確率は1

リンク2→リンク5の遷移確率は0.2

経路選択確率:

$$\Pr(k = \{2, 3, 5\}) = p_{O2} p_{25} p_{54} p_{4D} = 0.5 * 0.2 * 0.9 * 1.0 = \underline{0.09}$$

遷移確率を掛け合わせる

# 確率過程としての歩行者行動

## 吸収マルコフ連鎖における行列の計算操作

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} D & O & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} D \\ O \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

### マルコフ基本行列

$D$  0ステップ~ $\infty$ ステップで到達する  
 $O$  通過回数の期待値

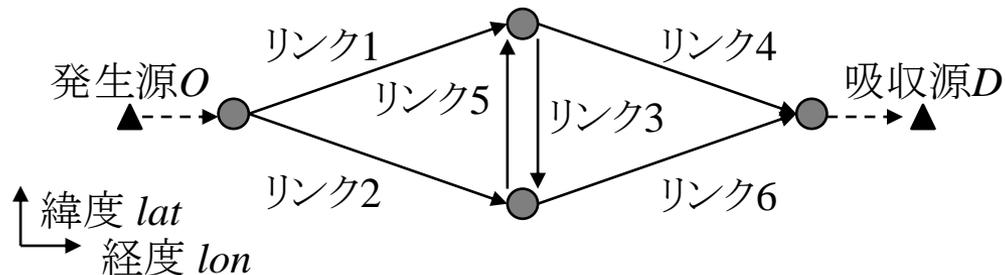
$$I + Q_2 + Q_2^2 + \dots = (I - Q_2)^{-1}$$

### 交通量配分

$$X = uQ_1(I - Q_2)^{-1}R$$

$X$	配分交通量
$u$	OD交通量

### ネットワーク図



# 連続時間マルコフ連鎖

状態が遷移するまでの時間(継続時間)に  
指数分布に従う継続時間を設定

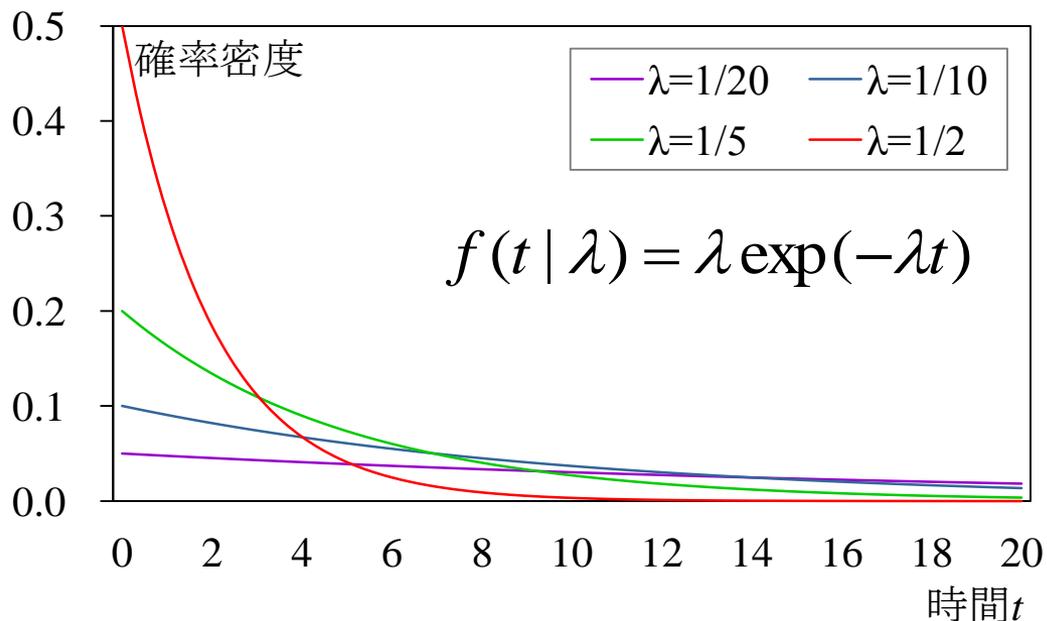


状態が遷移するまでの時間は  
パラメータ  $\lambda_j$  の指数分布に  
したがう

指数分布の確率密度分布

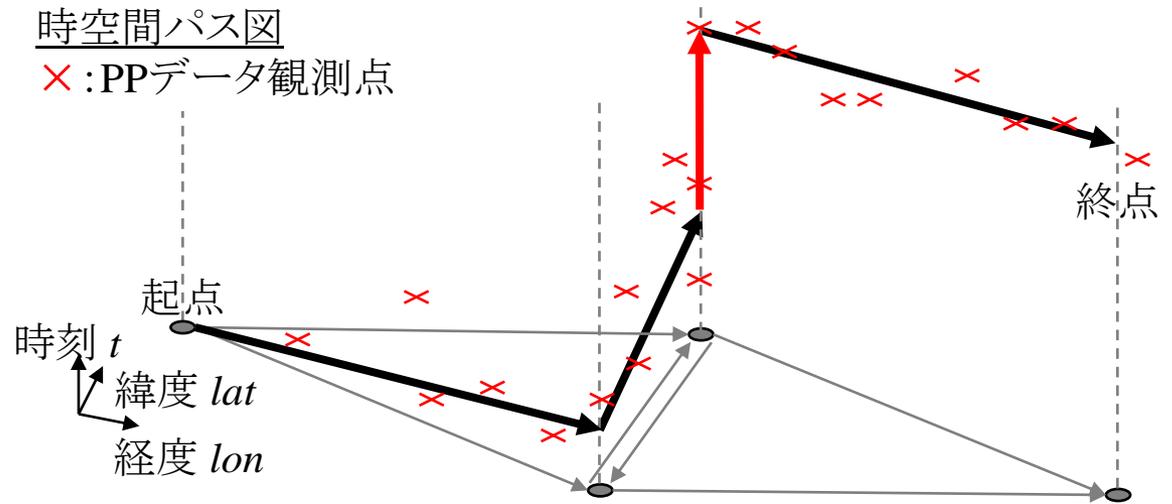
$$f(t | \lambda) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

状態の継続時間の平均は、  
指数分布の定義から  $1/\lambda_j$



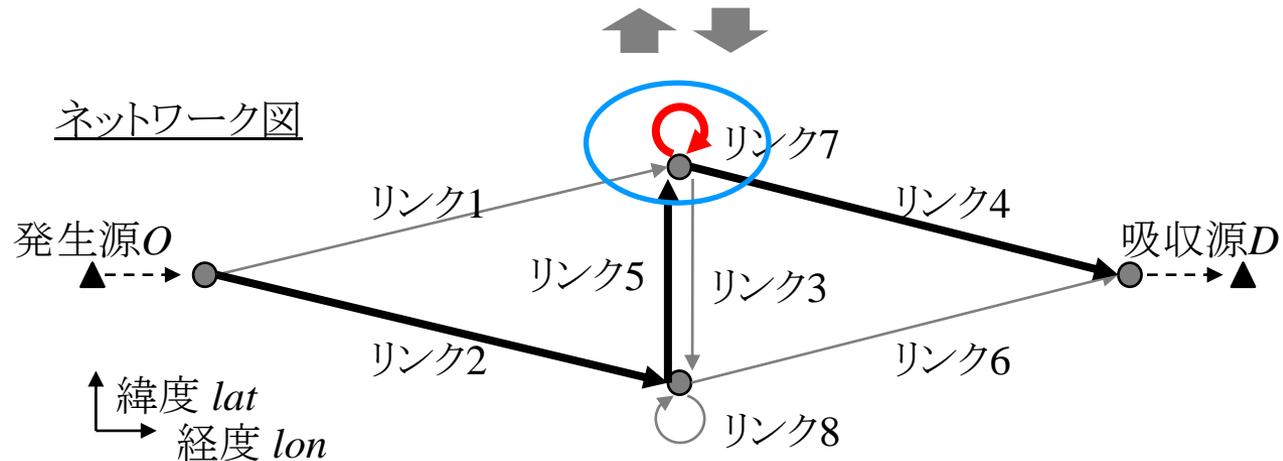
# 歩行者の時空間上の状態の記述

滞在を1つのリンクとして、行動を表す



滞在状態は、  
同一ノードに戻る  
リンクとして表す

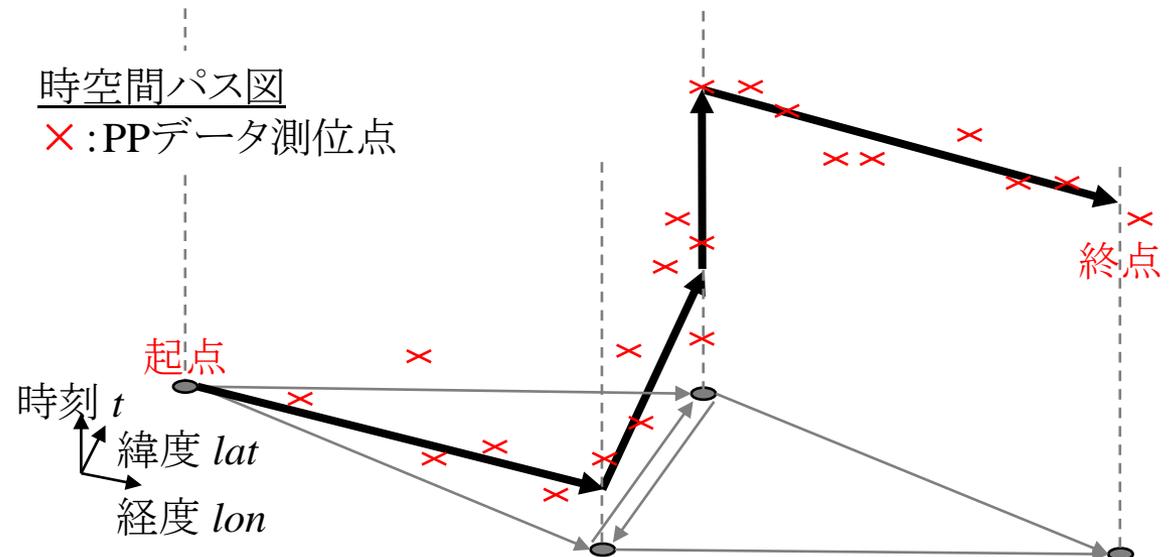
$$k = \{2, 5, 7, 4\}$$



プローブデータ(時系列)  $\{\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_J\}$

観測モデル(測定方程式)と移動モデル(運動方程式)で  
結び付ける

経路(状態遷移、リンク遷移)  $k = \{a_1, a_2, \dots, a_N\} \quad a_n \in A$

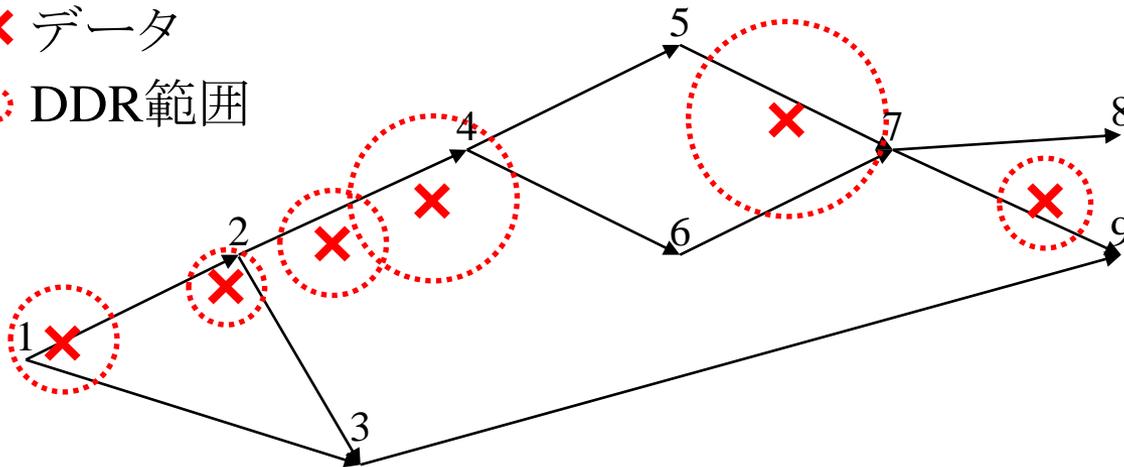


# DDR (Domain of data relevance) 13

Bierlaire and Frejinger (2008) で提案、データの有効範囲  
データが関連をもつ領域を表す

- DDRの大きさは観測データの正確さを表す  
ネットワークフリーデータとネットワークを結びつける
- 経路はDDRの範囲の中で経路集合として決定する

✕ データ  
○ DDR範囲



左の場合、  
{1,2,4,5,7,9}と  
{1,2,4,6,7,9}の2経路が考えられる

# PPデータの時系列観測データ

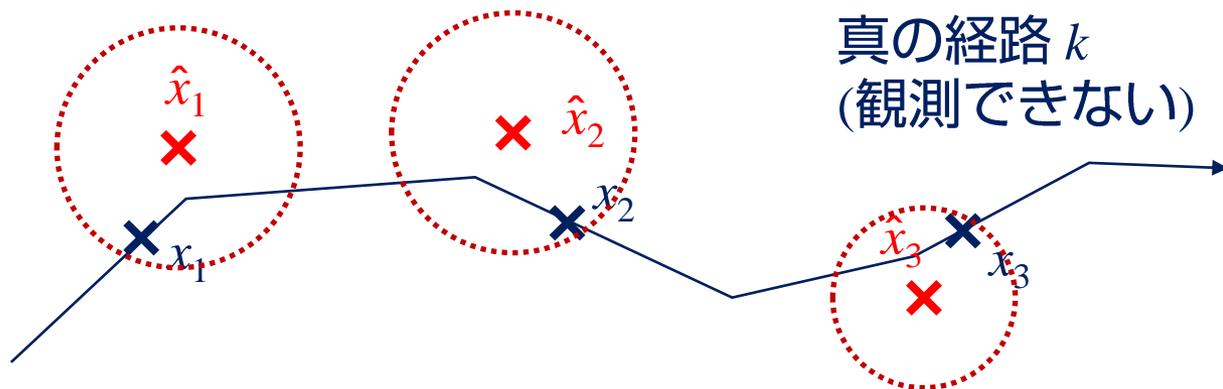
時系列順のPPデータ：

$$\{\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_J\}$$

各測位点では、時刻/位置座標/測位誤差が記録

$$\hat{g} = (\hat{t}, \hat{x}, \hat{\sigma}) \quad \hat{x} = (\hat{x}_{lat}, \hat{x}_{lon})$$

$t$	時刻
$x$	位置座標ベクトル
$\sigma$	水平距離測位誤差



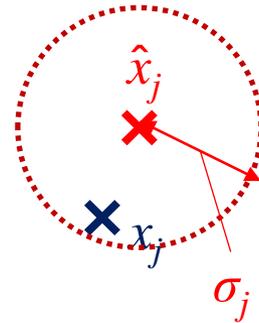
- × 真の位置座標( $x_j$ )  
(観測できない)
- × 観測位置座標( $x^j$ )
- 測位誤差範囲( $\sigma_j$ )

# 観測モデル

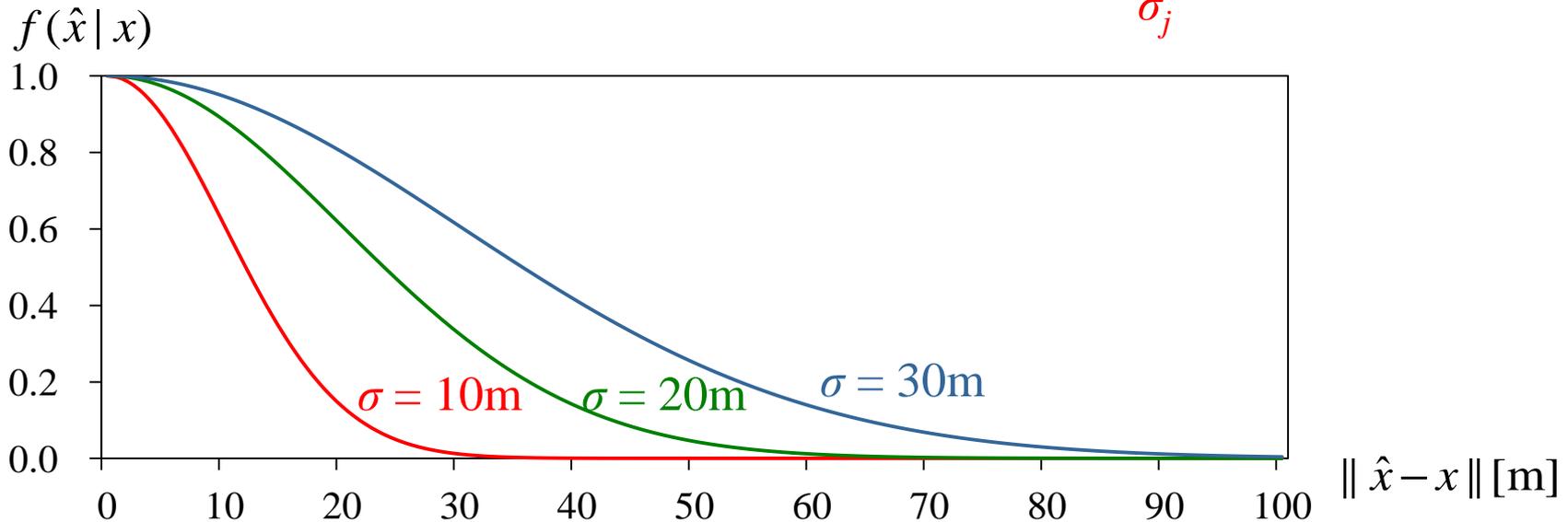
## (1) 測位誤差を考慮した測位点観測尤度

真の位置座標に対する測位点の観測尤度  
水平方向観測誤差は正規分布に従うと仮定する

$$f(\hat{x}_j | x_j) = \exp\left(-\frac{\|\hat{x}_j - x_j\|^2}{2(\hat{\sigma}_j)^2}\right)$$



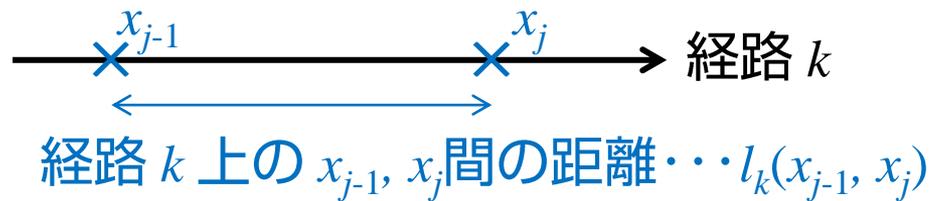
- × 真の位置座標( $x_j$ )  
(観測できない)
- × 観測位置座標( $x_j^{\wedge}$ )



# 歩行者移動モデル

## (2) 歩行者の移動モデル

- 仮定：
- ・リンク通過時間は指数分布に従う
  - ・測位時刻に誤差はない( $\hat{t}_j = t_j$ )
  - ・歩行最大速度  $v_{max}$  を超えて移動することはない



$$\lambda = \frac{1}{\left( \frac{l_k(x_{j-1}, x_j)}{v} \right)}$$

歩行速度  $v$  のとき  
 $l_k(x_{j-1}, x_j)$  を通過する  
 所要時間の期待値

$l_p(x_{j-1}, x_j) \leq v_{max} (\hat{t}_j - \hat{t}_{j-1})$  のとき

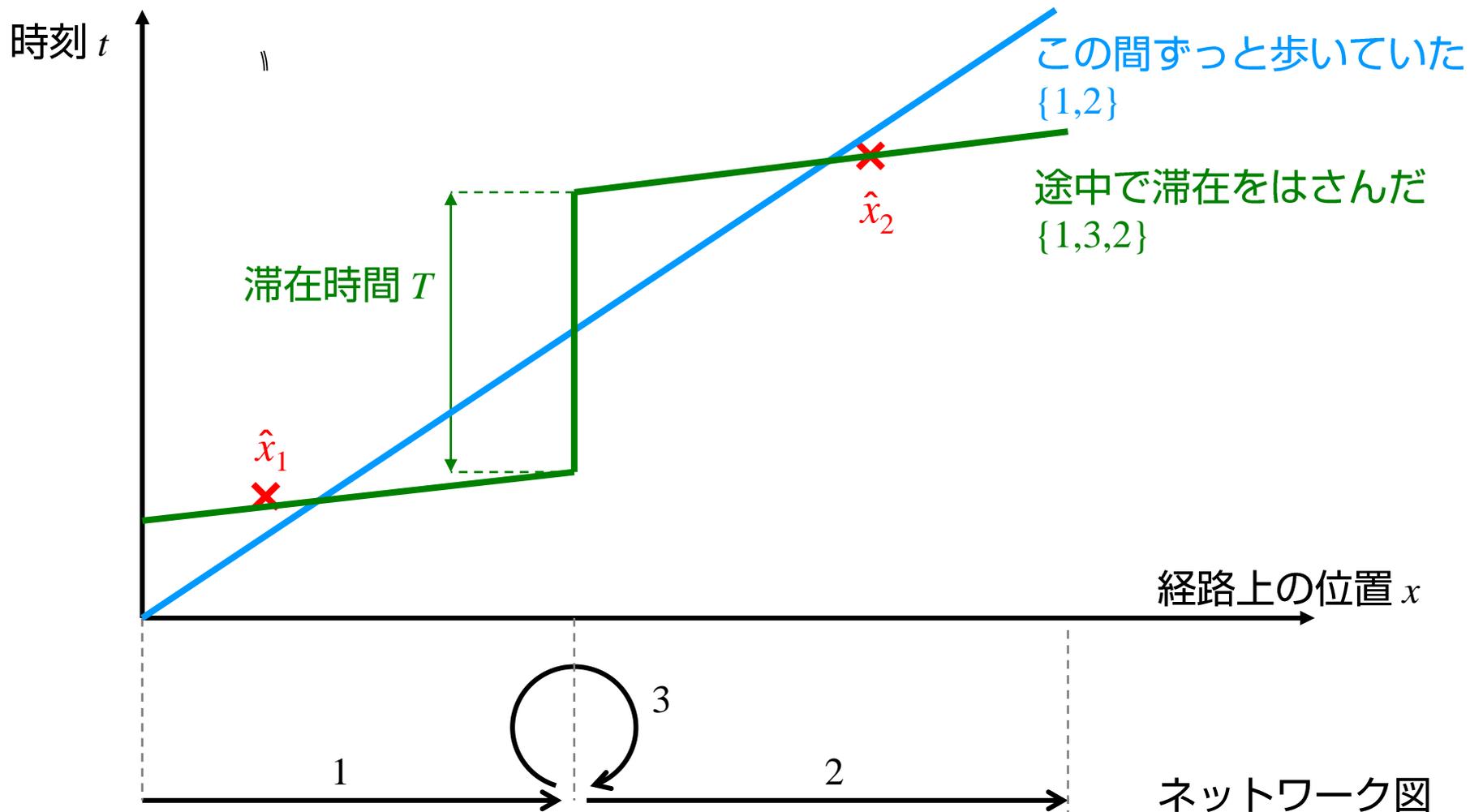
$$f(x_j | x_{j-1}, \hat{t}_{j-1}, \hat{t}_j, v) = \lambda \exp(-\lambda(\hat{t}_j - \hat{t}_{j-1}))$$

$l_p(x_{j-1}, x_j) > v_{max} (\hat{t}_j - \hat{t}_{j-1})$  のとき

$$f(x_j | x_{j-1}, \hat{t}_{j-1}, \hat{t}_j, v) = 0$$

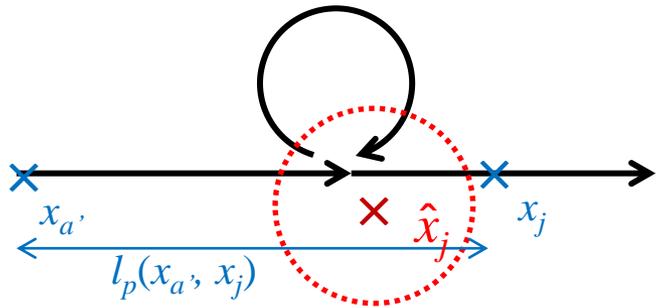
$k$	推定される経路
$\hat{t}$	測位時刻
$x$	位置座標ベクトル
$v$	標準歩行速度
$v_{max}$	最大速度

## (2) 歩行者の移動モデル



# 時空間パス上での状態推移

## (2) 歩行者の移動モデル – 滞在をはさむ場合



$k$	推定される経路
$t^{\wedge}$	測位時刻
$x$	位置座標ベクトル
$v$	標準歩行速度
$l_k(x_i, x_j)$	$x_i, x_j$ 間の経路 $k$ 上での距離

直前のリンク  $a'$  について、 $a'$  がDDR内に含まれた最初の測位点を  $x_{a'}$  として格納する

リンク列挙時に次リンクとの間に滞在を挟むとき：

$$f(x_j | \hat{t}_j, \hat{t}_{a'}, v) = \lambda \exp(-\lambda T_j) \quad T_j : \text{ノードで滞在していた時間}$$

$$T_j = \underbrace{(\hat{t}_j - \hat{t}_{a'})}_{\text{測位間隔}} - \underbrace{\frac{l_k(x_{a'}, x_j)}{v}}_{\text{歩いていたと考えられる時間}}$$

測位間隔

歩いていたと考えられる時間

# 経路上の位置の尤度

## (3) 経路上の位置に関する存在確率

分布に従い、ベイズの定理を用いて重みづけする  
観測確率を全区間の観測確率の和で、正規化

$$f(x_j | \hat{x}_j, k) = \frac{f(\hat{x}_j | x_j, k)}{\int_{x'_j \in k} f(\hat{x}_j | x'_j, k) dx'_j}$$

$k$	推定される経路
$x_j^{\wedge}$	測位点 $j$ の位置座標
$x_j$	真(とする)位置座標

# 測位点群の観測尤度

経路  $k$  に関する  $\{x_1, x_2, \dots, x_J\}$  の観測尤度を求める

## ● 1 点目

1 点目は前の測位点がないため、観測モデルのみ

(1) 観測誤差を考慮した測位点の観測尤度

$$\underline{f(\hat{x}_1 | k)} = \frac{1}{L_k} \int_{x_j \in k} \underline{f(\hat{x}_1 | x_1)} dx_1$$

経路についての測位点観測尤度



$k$	推定される経路
$x_j^{\wedge}$	測位点 $j$ の位置座標
$x_j$	真(とする)位置座標
$\sigma_j$	測位点 $j$ の水平方向測位誤差
$L_k$	経路 $k$ の長さ

経路  $k$  上で観測尤度  $f(\hat{x}_1 | x_1)$  を積分

事前分布として与える存在確率は  
全ての点について  $1/L_k$  で与える

# 測位点群の観測尤度

経路  $k$  に関する  $\{x_1, x_2, \dots, x_J\}$  の観測確率を求める

● 2点目以降 ( $j \geq 2$ )

歩行者移動モデルと観測モデルで尤度を更新する

$$\begin{aligned}
 f(\hat{x}_1, \hat{x}_2 | k) &= \underbrace{f(\hat{x}_2 | \hat{x}_1, k)}_{(1) \text{ 観測モデル}} \underbrace{f(\hat{x}_1 | k)}_{(3) \text{ 前測位点の存在確率}} \\
 &= \left( \underbrace{\int_{x_2 \in k} \underbrace{f(\hat{x}_2 | x_2, \hat{x}_1, k)}_{(1) \text{ 観測モデル}} \underbrace{f(x_2 | \hat{x}_1, k)}_{(2) \text{ 歩行者移動モデル}} dx_2}_{(3) \text{ 前測位点の存在確率}} \right) \underbrace{f(\hat{x}_1 | k)}_{(3) \text{ 前測位点の存在確率}} \\
 &= \int_{x_1 \in k} \underbrace{f(x_2 | x_1, \hat{x}_1, k)}_{(2) \text{ 歩行者移動モデル}} \underbrace{f(x_1 | \hat{x}_1, k)}_{(3) \text{ 前測位点の存在確率}} dx_1
 \end{aligned}$$

(1) 観測モデル

$$f(\hat{x}_2 | x_2) = \exp\left(-\frac{\|\hat{x}_2 - x_2\|^2}{2(\hat{\sigma}_2^x)^2}\right)$$

(2) 歩行者移動モデル

(3) 前測位点の存在確率

# 経路の選択確率

各測位点ごとに、経路推定確率を更新する

$$f(\hat{g}_1, \dots, \hat{g}_j | k) = \underbrace{f(\hat{g}_j | \hat{g}_1, \dots, \hat{g}_{j-1}, k)}_{\text{経路所与のときの観測データの尤度}} \underbrace{\Pr(k | \hat{g}_1, \dots, \hat{g}_{j-1})}_{\text{前の時点での経路推定確率}}$$

経路所与のときの  
観測データの尤度

前の時点での経路推定確率

尤度関数を用いて、経路推定確率を求める

$$\Pr(\hat{g}_1, \dots, \hat{g}_j | k) \propto f(\hat{g}_j | \hat{g}_1, \dots, \hat{g}_{j-1}, k) \Pr(k | \hat{g}_1, \dots, \hat{g}_{j-1})$$

$$\Pr(k | \hat{g}_1, \dots, \hat{g}_j) = \frac{f(\hat{g}_1, \dots, \hat{g}_j | k)}{\sum_{k \in K} f(\hat{g}_1, \dots, \hat{g}_j | k)}$$

(ベイズの定理)

$k$	推定される経路
$K$	経路集合

## 山口・周南市で2012年に行われたPP調査データ

android端末による位置座標・加速度取得と  
webダイアリによるトリップ記録

調査期間 2012年12月7日～2013年1月15日  
(年末年始を除いた20日間)

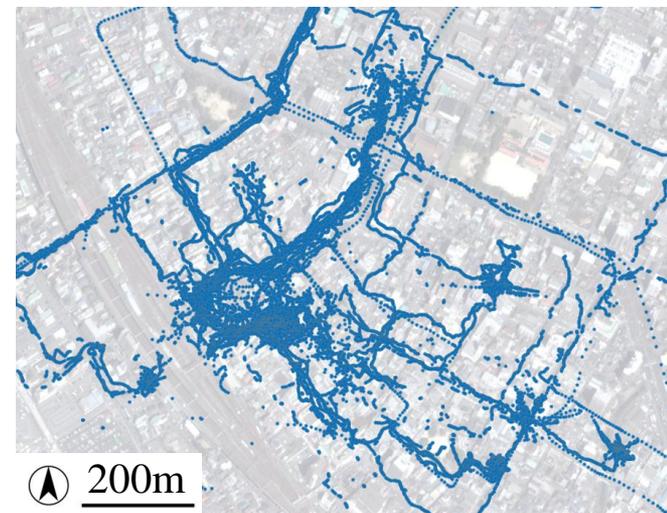
被験者数 16歳～70歳の男女20名  
(1人あたり5日間調査を実施)

測位間隔 移動中: 1秒間隔  
滞在中: 5分(300秒)間隔

GPS測位点数 316,411  
徒歩移動中 77,352



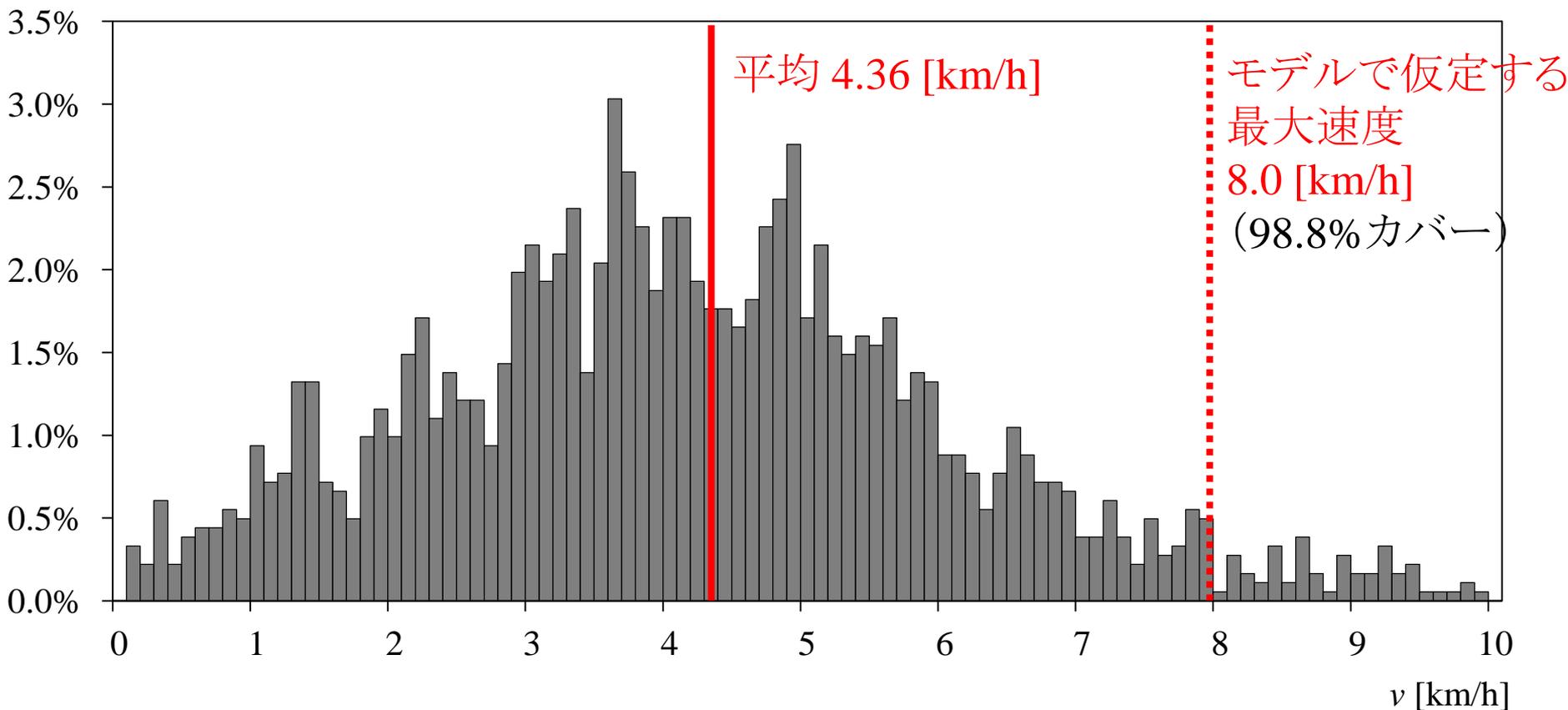
測位点(徒歩移動のみ)プロット図



時系列の測位点列に関して、10点前のデータとの  
からの平均時速の分布

$$v_j = \frac{\|\hat{x}_j - \hat{x}_{j-10}\|}{\hat{t}_j - \hat{t}_{j-10}}$$

分布確率



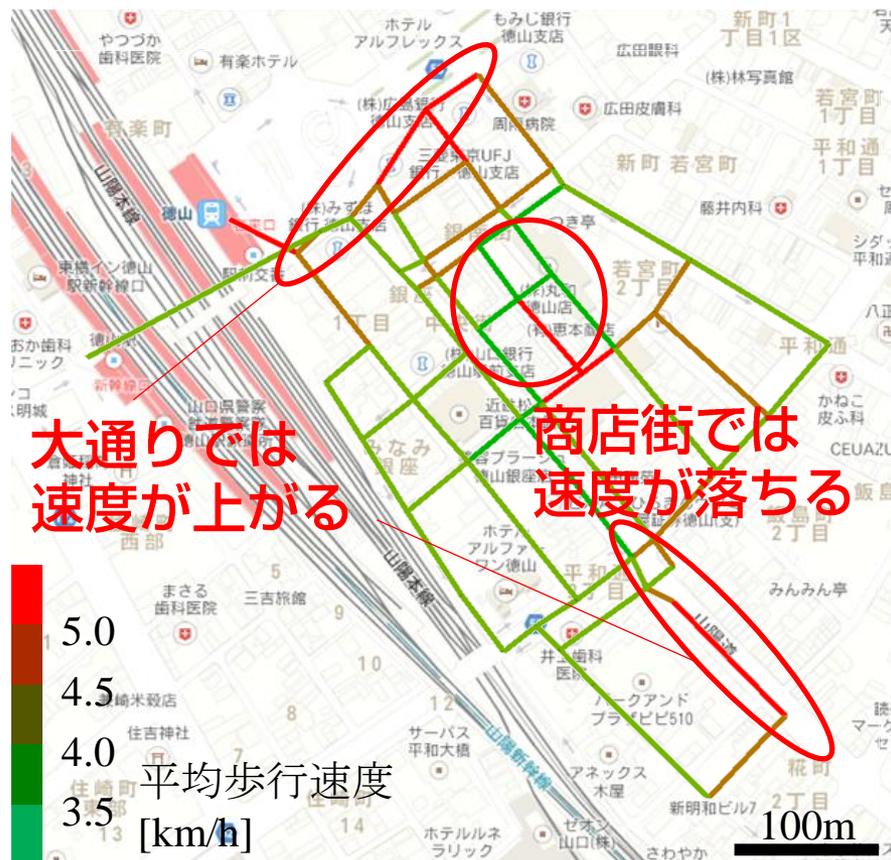
# PPデータの歩行速度分析

測位点の最寄りのリンクを計算し、リンクごとに平均速度を集計、街路環境の歩行速度への影響をモデル化  
街路環境をもとに速度を事前情報として与える

## 重回帰モデル

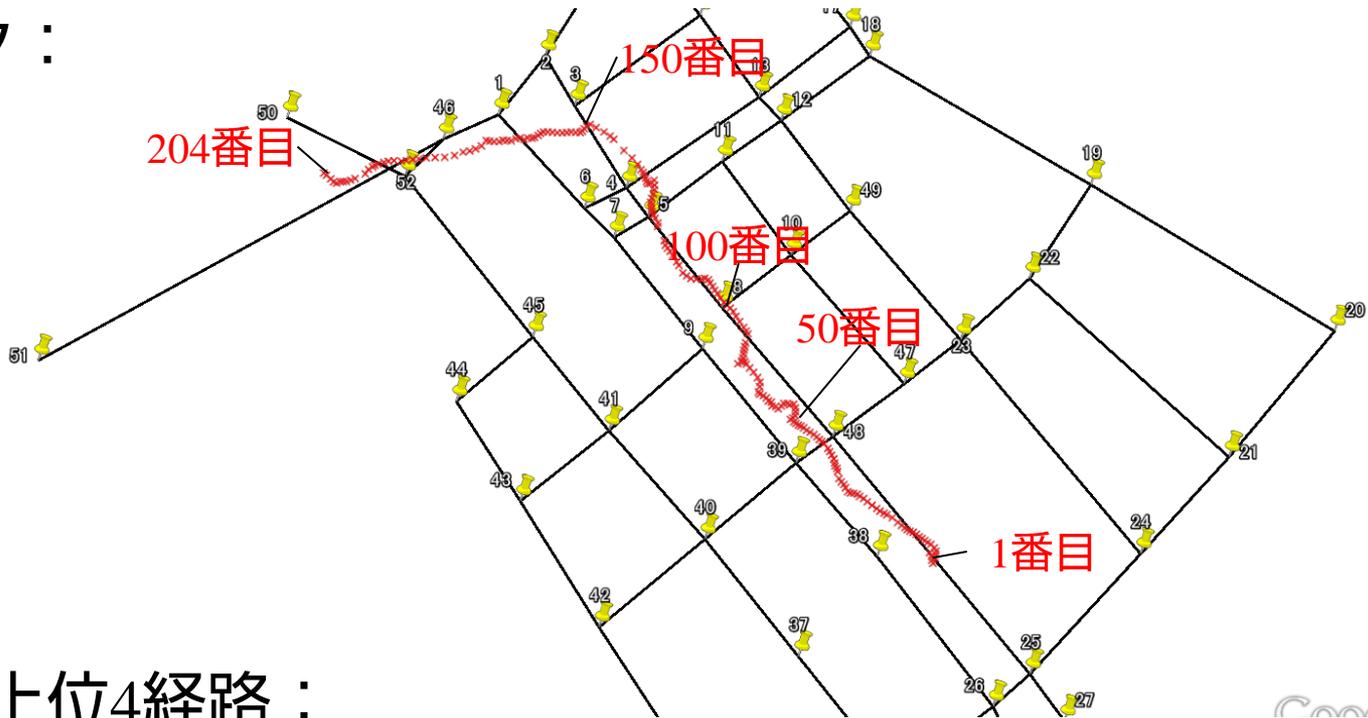
	パラメータ	t値	
切片	4.119	35.02	*
歩道幅員 [m]	0.072	3.42	*
道路横断	-0.108	-1.15	
地下道	-0.115	-0.53	
アーケード	-0.190	-2.69	*
サンプル数	156		
重相関 $R$	0.326		
重決定係数 $R^2$	0.106		

\* : 1%有意

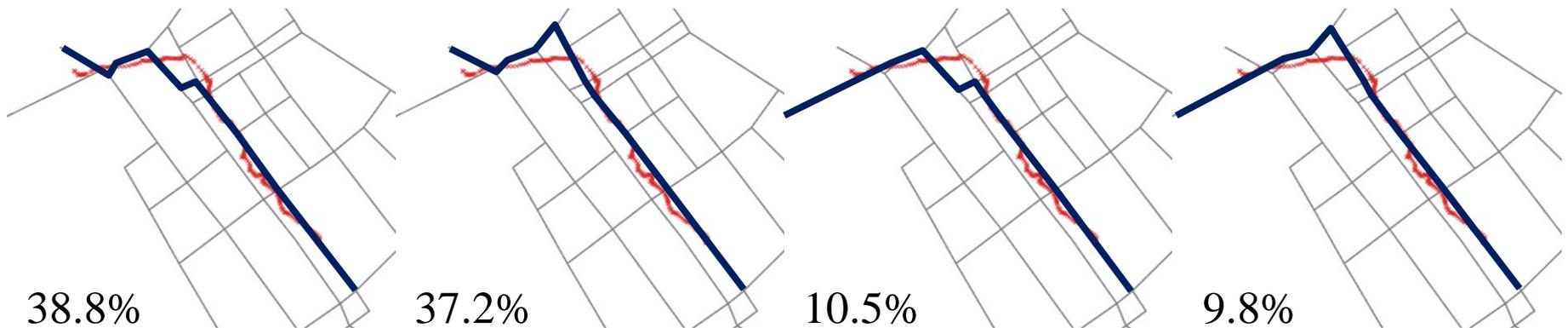


# 確率的な経路列挙例

PPデータ：  
 $J=204$



推定確率上位4経路：



# 遷移確率の推定

リンク間遷移確率を、街路環境等を説明変数として推定

リンク  $j$  の選択確率

$$\Pr(j | i) = \frac{\exp(V_j)}{\sum_{j \in A_i} \exp(V_j)}$$

$A_i$ : リンク  $i$  から接続するリンクの集合

対数尤度関数

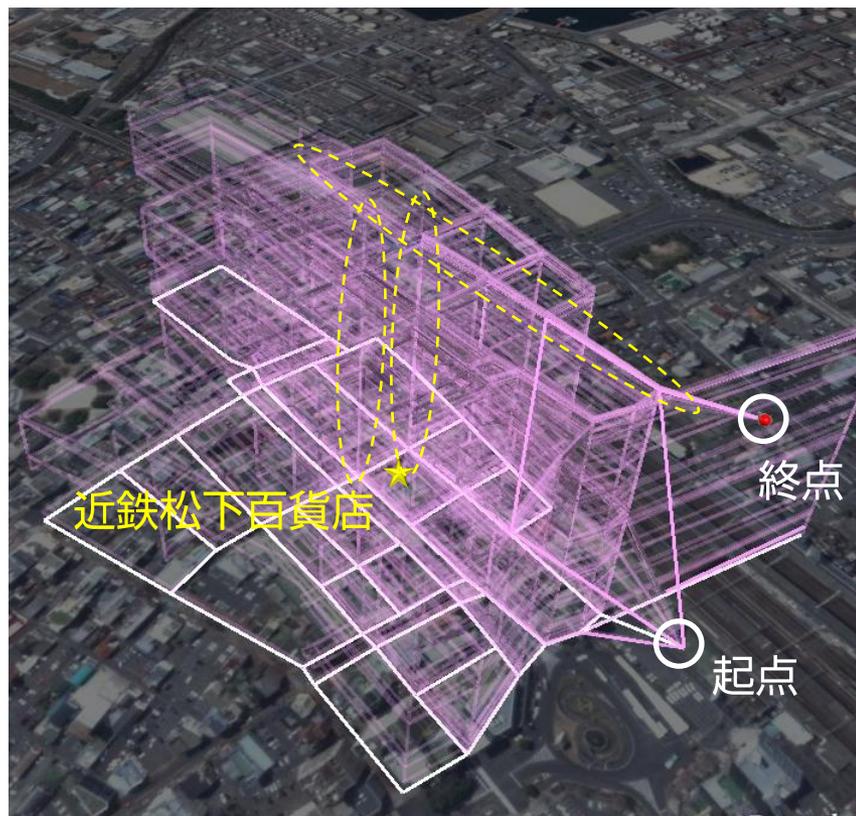
$$LL = \sum_n \sum_i (\log(\Pr(y_n)) \times \Pr(k_n))$$

$y_n$	$n$ 番目データにおける選択結果
$k_n$	$n$ 番目データの属する経路
$\Pr(k_n)$	経路の推定確率

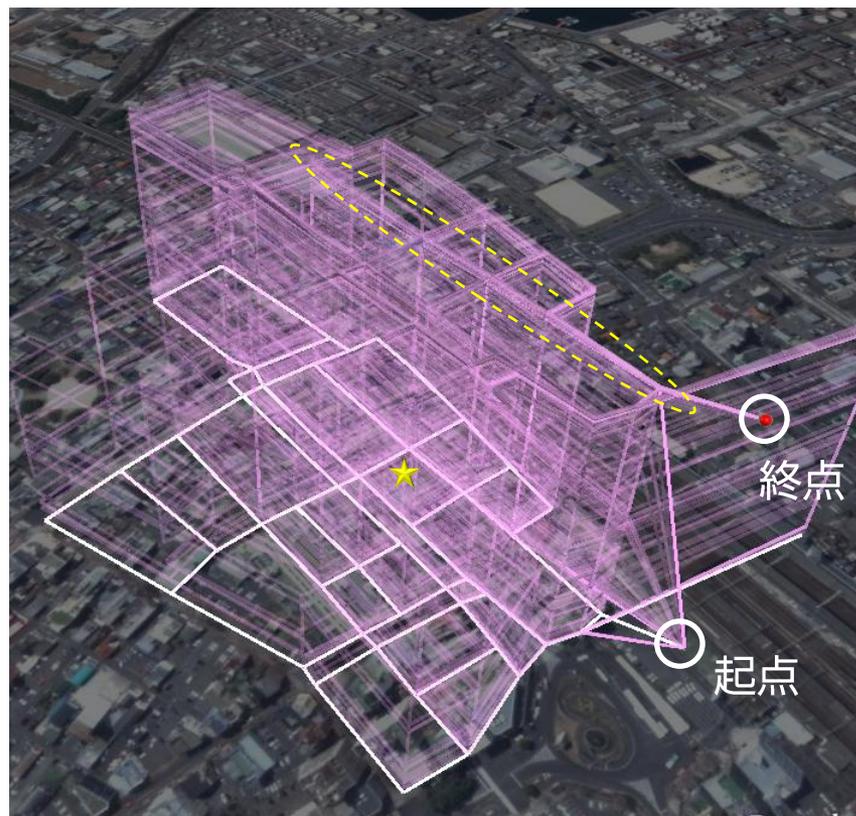
	パラメータ	t値	
定数項(滞在)	-1.351	-2.34	*
百貨店(滞在)	3.760	7.80	*
店舗数(滞在)	0.123	3.21	*
距離 [km] (移動)	-8.720	-1.80	
地下道 (移動)	-1.551	-1.44	
アーケード (移動)	1.176	4.79	*
空き店舗率 (移動)	-0.370	-0.49	
歩道幅員 [m] (移動)	0.137	1.91	
サンプル数	100		
初期尤度	-368.29		
最終尤度	-260.29		
尤度比	0.292		

\* : 5%有意

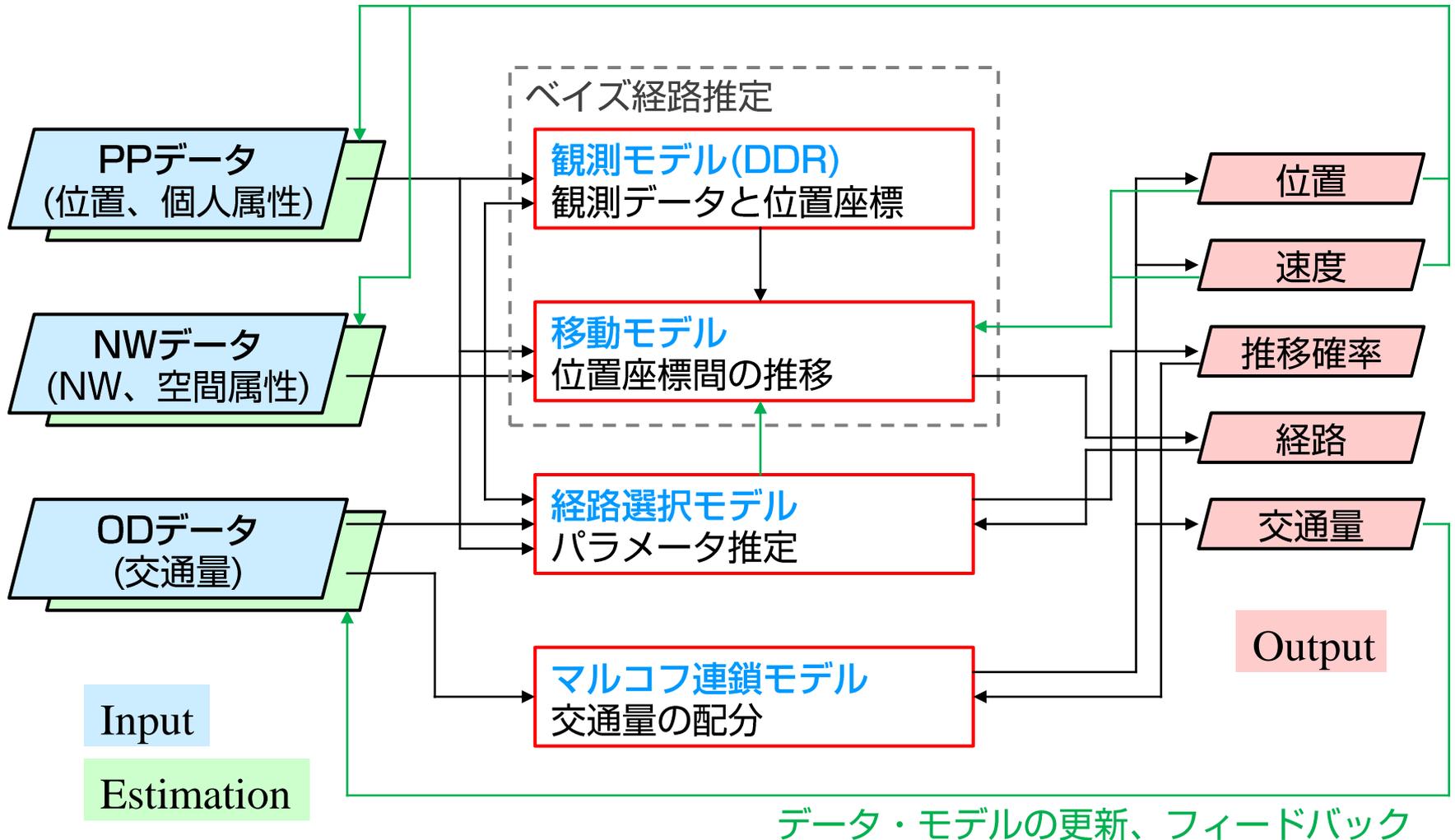
近鉄松下撤退前後での流動変化  
(徳山駅を出発&到着、範囲内で60分過ごすとき)



近鉄松下撤退前



近鉄松下撤退後



- ・ 時空間上のメゾレベルの状態推移で歩行者行動を表すマルコフ連鎖モデルを用いて、観測-行動モデル-配分が統合した手法を構築
- ・ ドットベース、滞在時間を含むアウトプットにより、時空間の配分や流動の分布が表現可能
- ・ 観測モデル-移動モデル-行動モデル-配分のフィードバックと情報更新のフレームが今後の課題

- 佐佐木綱: 吸収マルコフ過程による交通量配分理論, 土木学会論文集, No.121, pp.28-32, 1965.
- 佐佐木綱, 松井寛: 会場内の観客流動モデル, 土木学会論文集, Vol. 159, pp. 90-95, 1968.
- 鈴木哲矢, 高山純一, 中山晶一郎, 赤松隆: LOGIT型配分による吸収マルコフ連鎖を用いたOD交通量推計に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.33, CDROM, 2006.
- 鈴木哲矢, 高山純一, 中山晶一郎, 赤松隆: 吸収マルコフ連鎖を用いたOD交通量推計の誤差に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.34, CDROM, 2006.
- Bell, M. G. H.: Alternatives to Dial's logit assignment algorithm, *Transportation Research B*, Vol. 29, pp. 125-137, 1995.
- Bierlaire, M., Frejinger, E.: Route choice modeling with network-free data, *Transportation Research C*, Vol. 16, pp. 187-198, 2008.
- Bierlaire, M., Chen, J., Newman, J.: A probabilistic map matching method for smartphone GPS data, *Transportation Research C*, Vol. 26, pp. 78-98, 2013.
- Chen, J., Newman, J., Bierlaire, M.: Modeling route choice behavior from smart-phone GPS data, *Proceedings of the The 12th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR)*, 2009.
- Chen, J., Bierlaire, M.: Probabilistic multimodal map-matching with rich smartphone data, *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, accepted, 2013.
- Hoogendoorn, S. P., Bovy, P. H. L.: Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models, *Transportation Research Part B*, Vol.38, No.2, pp.169-190, 2004.
- Akamatsu, T.: Cyclic flows, Markov process and stochastic traffic assignment, *Transportation Research B*, Vol. 30, No. 5, pp. 369-386, 1996.

- Dial, R. B.: A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol. 5, pp. 83-111, 1971.
- Durrett, R.: 確率過程の基礎, 丸善出版, 今野紀雄, 中村和敬, 曾雌隆洋, 馬霞訳, 2012.
- 大村朋之, 羽藤英二: 高齢者行動に着目した都市内のうろつきの観測識別可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 44, CDROM, 2006.
- Hato, E., Itsubo, S., Mitani, T.: Development of MoALs (Mobile Activity Loggers supported by gps-phones) for travel behavior analysis, *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*, CDROM, 2006.
- Stenneth, L., Wolfson, O., Yu, P. S., Xu, B.: Transportation Mode Detection using mobile phones and GIS information, *the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pp. 54-63, 2011.
- 藤原直生, 田中伸治, 桑原雅夫: 携帯電話からのGPSデータを用いた歩行者の経路選択肢集合生成, 生産研究, Vol. 62, No. 4, pp. 435-438, 2010.