最短経路探索に基づくマップマッチング手法における複数の観測点の位置情報を用いたリンクコストの開発

茂木　渉 [1]

[1]正会員　一般財団法人計量計画研究所（〒 162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2-9）
E-mail: wmogi@ibs.or.jp

GPS/GNSS 等によって測位された移動体の移動軌跡から，道路ネットワーク上の移動経路を特定する手法を総称してマップマッチングと呼ぶ．我が国の実務において主に使用されるマップマッチング手法としては，最短経路探索に基づいて移動経路を推定する方法があり，そのリンクコストには，リンクと観測点の近接度合を考慮するために，リンクの最寄りの観測点との距離をリンク長に重み付けた値を用いる方法が提案されている．しかしながら，このようなリンクコストでは，リンクの周辺に複数の観測点が存在するような高頻度なプローブ情報に対応できず，また，リンクの分割・統合によってリンクコストの総和が変わってしまうといった問題がある．本研究では，最短経路探索に基づくマップマッチング手法において，リンクに対して複数の観測点の位置情報を活用し，かつ，リンクの分割・統合に対しても総和が一意となるリンクコストを提案する．

Key Words: *map-matching, GPS/GNSS data, link cost, Voronoi tessellation*

1. はじめに

GPS/GNSS 等によって測位された移動体の移動軌跡から，道路ネットワーク上の移動経路を特定する手法を総称してマップマッチング（Map-Matching）と呼ぶ．

マップマッチングはオンラインとオフラインの 2 つに大別される．オンラインマップマッチングは主にカーナビゲーションシステム等に用いられるもので，ほぼリアルタイムでの道路ネットワーク上の走行リンクを特定することを目的としている．一方，オフラインマップマッチングは，記録および保存された移動軌跡データから移動体の移動経路を特定することにより，連続するリンクの軌跡として抽出することを目的としている．

移動軌跡を道路ネットワークに対応付けることで，リンク交通量や経路交通量の集計分析，経路選択モデルの構築，リンクのパフォーマンス指標（所要時間や走行速度）の分析などに活用できるため，交通工学分野ではオフラインマップマッチングが主に研究・活用されている．我が国の実務において用られることが多いマップマッチング手法は，最短経路探索に基づく方法である．その代表例としては，国土交通省によって開発された PROLIMAS（Probe car Link Matching System）[1)]，Miwa et al. [2)]，朝倉ら [3)] などが挙げられる．

本稿では，これら最短経路探索に基づくマップマッチング手法に着目し，最短経路探索に用いるリンクコストに関して，観測点との距離による重みづけの理論や問題点を整理し，改良したリンクコストについて提案する．

2. マップマッチング問題の定義と手法の分類

マップマッチング手法に関するレビュー論文としては，Quddus et al. [5)] や Chao et al. [6)] がある．特に，Chao et al. [6)] では，マップマッチングの問題の定義や近年の手法について，詳しく整理している．

(1) マップマッチング問題の定義

Chao et al. [6)] に従い，入力データである移動軌跡と道路ネットワーク，出力データである推定経路，および，マップマッチング問題を，それぞれ以下のように定義する．

定義 1 (移動軌跡（Trajectory）)．移動軌跡 Tr は時系列に沿った位置情報を持つ観測点データ $Tr : p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow \cdots \rightarrow p_n$ である．ここで，各観測点 p_i は 2 次元座標 $\langle x_i, y_i \rangle$，時刻 t_i，速度 spd_i，角度 θ_i を要素として持つ．すなわち，$p_i = \langle x_i, y_i, t_i, spd_i, \theta_i \rangle$ である．ただし，速度 spd_i と角度 θ_i は任意で与えられるものとする．

定義 2 (道路ネットワーク（Road Network）)．道路ネットワークを有向グラフ $G = (V, E)$ で定義する．こ

表–1 Chao et al. [6] によるマップマッチング手法の分類

分類	手法
1) 類似性モデル（Similarity Model）	距離ベース（Distance-Based） パターンベース（Pattern-Based）
2) 状態遷移モデル（State-Transition Model）	隠れマルコフモデル（Hidden Markov Model：HMM） 条件付き確率場（Conditional Random Field：CRF） 加重グラフ手法（Weighted Graph Technique：WGT）
3) 候補進化モデル（Candidate-Evolving Model）	パーティクルフィルタ（Particle Filter：PF） 多重仮説手法（Multiple Hypothesis Technique：MHT）
4) スコアリングモデル（Scoring Model）	単純な重みづけ（Naïve Weighting）

こで，$v = \langle x, y \rangle \in V$ は交差点や道路端などのノードであり，リンク $e = \langle o, d, l \rangle \in E$ は始端・終端ノード（$e.o, e.d \in V$）と有向ポリライン l から構成されるものとする．

定義 3 (経路（Route）)．経路 R はリンク列で表されるものとする．すなわち，$R : e_1 \to e_2 \to \cdots \to e_n$，ここで，$e_i \in G.E(1 \leqq i \leqq n)$，かつ，$e_k.d = e_{k+1}.o$ である．

定義 4 (マップマッチング（Map-Matching）)．道路ネットワーク $G = (V, E)$ と移動軌跡 Tr が与えられたときに，経路 R を見つけることをマップマッチング $\mathcal{MR}_G(Tr)$ と定義する．

なお，ネットワークデータや観測点の座標系は緯度経度 (ϕ, λ) で与えられることが一般的であるが，本稿では，UTM（Universal Transverse Mercator）座標などの xy 平面座標系に変換済であることを前提とする．

また，本稿においては議論の簡単のため，l はポリラインではなく線分とする．しかし，線分を繋げたものがポリラインであり，本稿において提案する手法は線分として議論を展開しても一般性を失うことはないことを注意しておく．

(2) マップマッチング手法の分類

Quddus et al. [5] では，初期のマップマッチング技術を，幾何解析（Geometric Analysis），位相幾何解析（Topological Analysis），確率的マップマッチング（Probabilistic Map-Matching Algorithms），高度なマップマッチング（Advanced Map-Matching Algorithms）の 4 つのクラスに分類している．

しかし，Chao et al. [6] では，近年のマップマッチング技術の発展を鑑みると，幾何解析の一部の主要な手法はパフォーマンスが低いことや，マップマッチングは様々な数学ツールを組み合わせて実装されていることなどの理由から，これらのクラスでの分類では不十分になっていることを指摘し，コア・マップマッチングモデルでの分類として，類似性モデル（Similarity Model），状態遷移モデル（State-Transition Model），候補進化モデル（Candidate-Evolving Model），スコアリングモデル（Scoring Model）の新たな 4 つのクラスに分類している（**表–1**）．

3. 最短経路探索に基づくマップマッチング手法とリンクコスト

我が国の実務において主に活用されるマップマッチング手法は，最短経路探索に基づくアルゴリズムであり，Chao et al. [6] の分類では “スコアリングモデル” に該当するものと考えられる．

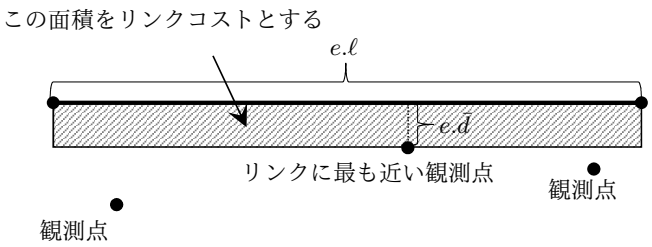
(1) 最短経路探索に基づくマップマッチング手法

最短経路探索に基づくマップマッチング手法の代表的なものとしては，PROLIMAS [1]，Miwa et al. [2]，朝倉ら [3] が挙げられる．また，これら 3 つの手法に関しては横田・玉川 [4] で詳細にレビューされている．

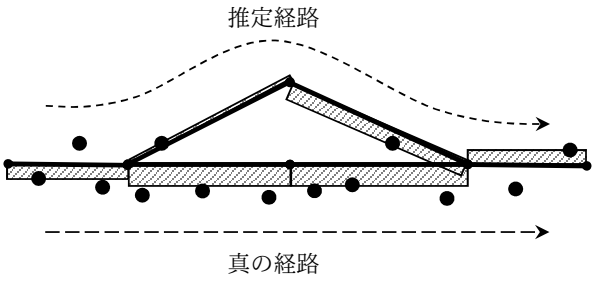
朝倉ら [3] はリンク長をリンクコストとする最短経路探索に基づくシンプルな方法と，k-shortest-path の一種である Screening 法を用いて複数経路を列挙し，観測点群と列挙した経路との許容誤差が範囲内にあるものの中で最短経路を採用する方法の，2 つの手法を提案している．

Miwa et al. [2] では最短経路探索のリンクコストとして，①リンク長，②リンク長 × 位置座標距離，③リンク長 × 位置座標距離 × 速度ウェイト，の 3 つを提案して，マップマッチングの精度の比較分析を行っている．なお，①リンク長を用いた場合は，朝倉ら [3] の最短経路探索による手法とほぼ同様となる．

一方，PROLIMAS [1] では，観測点群の時系列の方位変化の大きい箇所で観測点の座標間を線分で結び，その線分の周囲のリンクを抽出して，その区間ごとに最短経路探索によってマップマッチングを行っている．この区間は，トリップをさらに区切っていることから，横



図–1 リンクコスト②のイメージ



図–2 リンクコスト②における問題点 **(a)** のイメージ

田・玉川 [4] では “折れ線区間” と呼んでいる．

(2) リンクコストと観測点の位置情報による重みづけ

マップマッチング手法のうち，最短経路探索によって経路を特定するためには，リンクごとにリンクコストを与える必要がある．そのリンクコストの単純な与え方としては，Miwa et al. [2] での検証でも用いられている、以下が考えられる．

① リンク長

$$e.c = e.\ell \qquad \forall e \in E \qquad (1)$$

② リンク長 × 位置座標距離

$$e.c = e.\ell \cdot e.\bar{d} \qquad \forall e \in E \qquad (2)$$

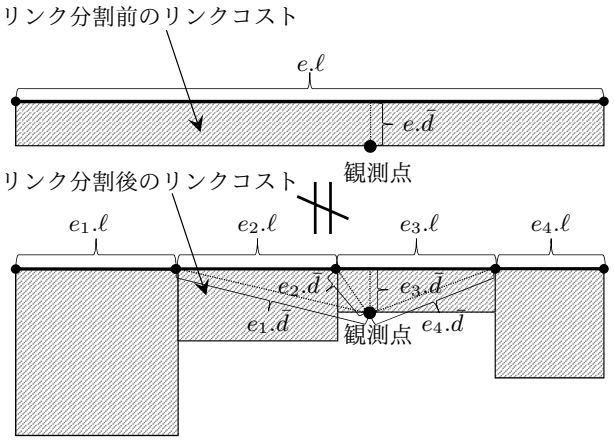
ここで，

$e.c$ ： リンク e のリンクコスト
$e.\ell$ ： リンク e のリンク長
$e.\bar{d}$ ： リンク e から最も近い観測点までの距離

リンクコスト①は通常の最短経路探索と同じである．この場合には，リンクと観測点の近接度合が反映されないため，マップマッチングの対象となる道路ネットワークを広くとりすぎると，誤った経路が推定される可能性がある．このため，PROLIMAS [1] では，このような誤マッチングを少なくするために，トリップではなく “折れ線区間” でのマッチングを行っているものと考えられる．

リンクコスト②ではリンク e から最も近い観測点との距離 $e.\bar{d}$ を重みとして使っており，これは，リンク長 $e.\ell$ と最寄りの観測点との距離 $e.\bar{d}$ を両辺の長さとする矩形の面積をリンクコストにしているものと解釈することができる（**図–1**）．これによりマップマッチングの対象となる道路ネットワークのリンク集合を広い範囲で抽出しても，観測点に近いリンクを通過する経路が推定されやすくなることが期待できる．

一方で，リンクコスト②を用いる場合には，リンクと観測点との距離の情報を 1 個の観測点に代表させていることから，以下の点が問題になると考えられる，



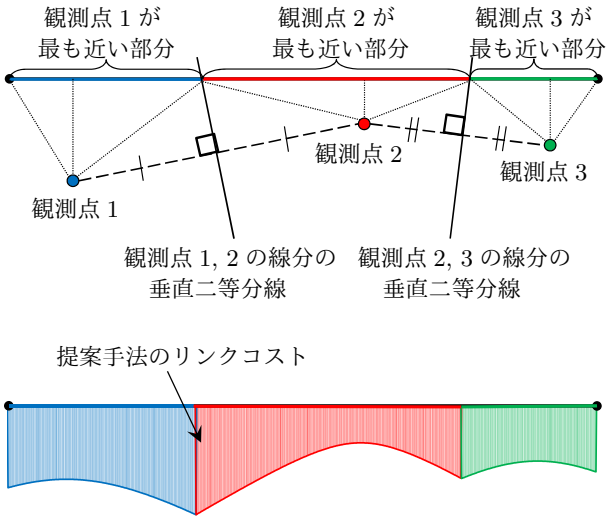
図–3 リンクコスト②における問題点 **(b)** のイメージ

(a) 他にリンクに近い観測点があったとしても，その情報は使われない
(b) リンクを分割・統合した場合には，リンクコストの総和が変わってしまう

問題点 **(a)** については，リンクに最も近い観測点がたまたま近かった場合が考えられる．道路ネットワークや観測点のデータには様々な誤差が含まれるため，例えば**図–2** のように，真の経路は観測点が多く分布するリンクを通過する方だったとしても，リンクに最も近い観測点の測定位置がリンク上にほぼ重なるような場合には，重み $e.\bar{d}$ が極端に小さくなってしまい，観測点が少ない迂回する経路のコスト（面積の総計）が最小となることで，推定経路として得られてしまう．

問題点 **(b)** については，例えば**図–3** のように，元々は 1 本のリンク e に 1 つの観測点が対応付いていたとき，リンクを複数（n 本）に分割することを考えると，各分割リンク e_i における観測点との距離によって重み $e_i.\bar{d}$ は異なってしまうため，1 本だったときのリンクコストと複数に分割したときのリンクコストの総和が一致しなくなってしまう．すなわち，リンクに最も近い観測点との距離による重みづけによるリンクコストは，リンクの分割・統合に対して，一般的に以下の式のように等号は成り立たない．

$$e.\ell \cdot e.\bar{d} \neq \sum_{i=1}^{n} e_i.\ell \cdot e_i.\bar{d} \qquad (3)$$



図–4 提案手法におけるリンクコストのイメージ

4. 提案手法

前述したとおり，リンクと観測点の距離によってリンク長を重み付けることは，リンク長と観測点との距離で囲まれる領域の面積をリンクコストにするものと解釈できる．

ここで，リンクに最も近い観測点のみを使うのではなく，複数の観測点をリンクに対応付け，そのときのリンクコストとなる面積の計算方法を考案する．

(1) 基本的な考え方

まず，リンクの周辺に複数の観測点が存在するとき，リンク上の任意の点がどの観測点から最も近いかを判定することを考える．平面上（に存在するリンク上）の任意の点が，複数個の観測点に対してどの観測点に最も近いかによって領域分けすることは，すなわち，観測点を母点としたボロノイ図を作成して，各ボロノイ領域に含まれる部分を求めることと同意である．

次に，リンク上の任意の点と観測点との距離が，遠いほどリンクコストが大きくなり，近いほどリンクコストが小さくなることを表現する．つまり，リンクの各ボロノイ分割領域と各領域に最も近い観測点との距離によって与えられる面積をリンクコストとすることを考える．

以上のことを図示したイメージが図–4 のとおりとなる．これにより，リンクの分割・統合をしてもリンクコストの総和は変わることはなく，また，リンクの周辺に観測点が多く存在するほどリンクコストが小さくなるため，リンクコストの整合性を保ったまま経路推定の精度向上が期待できると考えられる．

(2) リンクコストの計算方法

リンク上の任意の点の座標を，媒介変数 $s \in [0,1]$ を用いて，以下のように定義する．

$$\begin{cases} \left(e\left(s\right)\right).x = \left(\left(e.d\right).x - \left(e.o\right).x\right)s + \left(e.o\right).x \\ \left(e\left(s\right)\right).y = \left(\left(e.d\right).y - \left(e.o\right).y\right)s + \left(e.o\right).y \end{cases} \tag{4}$$

この媒介変数表示を用いて，リンク e 上の任意の点と観測点 p_i とのユークリッド距離の関数を

$$D_{e,p_i}\left(s\right) = \sqrt{\left(\left(e\left(s\right)\right).x - x_i\right)^2 + \left(\left(e\left(s\right)\right).y - y_i\right)^2} \tag{5}$$

として，このときのリンク e の重み $e.w$ を次式で定義する．

$$e.w = \sum_{p_i \in \boldsymbol{O}_{e,Tr}} \int_{s^{\mathrm{low}}_{e,p_i}}^{s^{\mathrm{up}}_{e,p_i}} D_{e,p_i}\left(s\right) ds \tag{6}$$

ここで，$\boldsymbol{O}_{e,Tr}$ はリンク e を観測点群 Tr でボロノイ分割したときの母点となる観測点の集合であり，また，積分区間 $\left[s^{\mathrm{low}}_{e,p_i}, s^{\mathrm{up}}_{e,p_i}\right]$ はリンク e における観測点 p_i のボロノイ領域である．

式 (4),(5) の定数項を，

$$\begin{cases} e.\bar{x} = \left(e.d\right).x - \left(e.o\right).x \\ e.\hat{x}_i = \left(e.o\right).x - x_i \\ e.\bar{y} = \left(e.d\right).y - \left(e.o\right).y \\ e.\hat{y}_i = \left(e.o\right).y - y_i \end{cases} \tag{7}$$

と定義すると，$D_{e,p_i}\left(s\right)$ は，

$$\begin{aligned} D_{e,p_i}\left(s\right) &= \sqrt{\left(e.\bar{x}\cdot s + e.\hat{x}_i\right)^2 + \left(e.\bar{y}\cdot s + e.\hat{y}_i\right)^2} \\ &= \Big\{\left(\left(e.\bar{x}\right)^2 + \left(e.\bar{y}\right)^2\right)s^2 \\ &\quad + 2\left(e.\bar{x}\cdot e.\hat{x}_i + e.\bar{y}\cdot c.\hat{y}_i\right)s \\ &\quad + \left(\left(e.\hat{x}_i\right)^2 + \left(e.\hat{y}_i\right)^2\right)\Big\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{8}$$

と変形できる．さらに，

$$\begin{cases} e.\zeta = \left(e.\bar{x}\right)^2 + \left(e.\bar{y}\right)^2 \\ e.\eta_i = 2\left(e.\bar{x}\cdot e.\hat{x}_i + e.\bar{y}\cdot c.\hat{y}_i\right) \\ e.\mu_i = \left(e.\hat{x}_i\right)^2 + \left(e.\hat{y}_i\right)^2 \end{cases} \tag{9}$$

と再定義し，平方根の中の 2 次式を平方完成することで，一般形から標準形に変形する．

$$\begin{aligned} D_{e,p_i}\left(s\right) &= \sqrt{e.\zeta\cdot s^2 + e.\eta_i\cdot s + e.\mu_i} \\ &= \left\{e.\zeta\cdot\left(\left(s + \frac{e.\eta_i}{2\cdot e.\zeta}\right)^2 \right.\right. \\ &\quad \left.\left. + \left(-\frac{\left(e.\eta_i\right)^2 - 4\cdot e.\zeta\cdot e.\mu_i}{4\left(e.\zeta\right)^2}\right)\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{10}$$

変数を以下のように変換して，置換積分を適用する．

$$\begin{cases} \nu = s + \dfrac{e.\eta_i}{2\cdot e.\zeta} \\ e.\xi_i = -\dfrac{\left(e.\eta_i\right)^2 - 4\cdot e.\zeta\cdot e.\mu_i}{4\left(e.\zeta\right)^2} \\ d\nu = dt \end{cases} \tag{11}$$

表–2 積分区間

s	s^{low}_{e,p_i}	$\rightarrow$	s^{up}_{e,p_i}
ν	$\nu^{\mathrm{low}}_{e,p_i} = s^{\mathrm{low}}_{e,p_i} + \dfrac{e.\eta_i}{2\cdot e.\zeta}$	$\rightarrow$	$\nu^{\mathrm{up}}_{e,p_i} = s^{\mathrm{up}}_{e,p_i} + \dfrac{e.\eta_i}{2\cdot e.\zeta}$

このとき，積分区間は表–2 のように変換される．また，2 次式の平方根の定積分は公式があるため，$D_{e,p_i}(s)$ の積分は以下のように陽に計算できる．

$$\begin{aligned}\int_{s^{\mathrm{low}}_{e,p_i}}^{s^{\mathrm{up}}_{e,p_i}} D_{e,p_i}(s)\,ds &= \int_{\nu^{\mathrm{low}}_{e,p_i}}^{\nu^{\mathrm{up}}_{e,p_i}} \sqrt{e.\zeta\cdot\left(\nu^2+e.\xi_i\right)}d\nu \\ &= \sqrt{e.\zeta}\int_{\nu^{\mathrm{low}}_{e,p_i}}^{\nu^{\mathrm{up}}_{e,p_i}} \sqrt{\nu^2+e.\xi_i}d\nu \\ &= \frac{\sqrt{e.\zeta}}{2}\Bigg[\nu\sqrt{\nu^2+e.\xi_i} \\ &\quad + e.\xi_i\cdot\ln\left|\nu+\sqrt{\nu^2+e.\xi_i}\right|\Bigg]_{\nu^{\mathrm{low}}_{e,p_i}}^{\nu^{\mathrm{up}}_{e,p_i}}\end{aligned} \tag{12}$$

ただし，ここで求められる $e.w$ は，媒介変数 $s\in[0,1]$ に射影したうえでの，s 軸と関数 $D_{e,p_i}(s)$ で囲まれる領域の面積であるため，これにリンク長 $e.\ell$ を乗じることでリンクコストとなる．

$$e.c = e.\ell\cdot e.w \qquad \forall e\in E \tag{13}$$

(3) アルゴリズム

提案したリンクコストを用いた最短経路探索に基づくマップマッチングアルゴリズムのプロトタイプ例を示す．基本的には，PROLIMAS [1]，Miwa et al. [2]，朝倉ら [3] を踏襲しており，同様の計算フローとなっている．

Step1: トリップ分解

移動軌跡 Tr から移動/滞在判定を行い，トリップ単位の観測点群のデータ集合 $\{Tr_1,\ldots,Tr_m,\ldots,Tr_M\}$ に分割する．

Step2: サブネットワークの抽出

道路ネットワークデータ G から，第 m トリップのマップマッチングの対象となるサブネットワーク G_m を抽出する．例えば，観測点群 Tr_m の周囲のリンクを抽出する，など．

Step3: ボロノイ分割

サブネットワーク G_m に対して，トリップデータ Tr_m に含まれる観測点群を母点としたボロノイ分割を行い，リンクごとのボロノイ領域（積分区間 $\left[s^{\mathrm{low}}_{e,p_i}, s^{\mathrm{up}}_{e,p_i}\right]$）を求める．

Step4: 起終点の特定

サブネットワーク G_m に対して，トリップデータ Tr_m から最短経路探索における起点 S_m と終点 T_m を対応付ける．例えば，$p_1,p_n\in Tr_m$ の最寄りのノードをそれぞれ起点と終点とする，など．

Step5: リンクコストの計算

サブネットワーク G_m のリンクごとに次式によりリンクコストを計算する．

$$\begin{aligned}e.c = e.\ell\cdot\frac{\sqrt{e.\zeta}}{2}\sum_{p_i\in\boldsymbol{O}_{e,Tr_m}}\Bigg[&\nu\sqrt{\nu^2+e.\xi_i} \\ &+ e.\xi_i\cdot\ln\left|\nu+\sqrt{\nu^2+e.\xi_i}\right|\Bigg]_{\nu^{\mathrm{low}}_{e,p_i}}^{\nu^{\mathrm{up}}_{e,p_i}}\end{aligned}$$
$$\forall e\in E \tag{14}$$

Step6: 最短経路探索

式 (14) のリンクコストを用いて起終点 S_m-T_m 間の最短経路探索を行い，推定経路 $\mathcal{MR}_{G_m}(Tr_m)\rightarrow R_m$ とする．

Step7: 終了判定

すべてのトリップのマップマッチングが完了したら終了する．そうでなければ $m := m+1$ として **Step2** へ．

5. おわりに

本稿では，最短経路探索に基づくマップマッチング手法のリンクコストに関して，観測点との距離による重みづけの理論を整理し，複数の観測点に対応した重みづけの手法を提案した．具体的には，リンクの周囲に観測点が複数存在するとき，観測点を母点と見立ててリンクをボロノイ分割し，分割された区間ごとに母点との距離の面積を計算し，これをリンクコストの重みとして使用する手法を提案した．

提案手法は，リンクコストの重みを 1 つの観測点からの距離に代表させるのではなく，複数の観測点の位置情報を活用することで，リンクの周囲に観測点が多く分布している経路が特定されやすく，また，リンクの分割・統合に対してもリンクコストが変わることがなく，道路ネットワークと観測点群に対してリンクコストを一意に定めることができる．

さらに，そのリンクコストの計算方法についても，距離関数にユークリッド距離を使用することで，陽な形で表現できており，数値積分することなく計算が可能である．

REFERENCES

1) Makimura, K., Kikuchi, H., Tada, S., Nakajima, Y., Ishida, H. and Hyodo, T.: Performance Indicator Measurement Using Car Navigation Systems, *81st Transportation Research Board*, CD-ROM, 2002.
2) Miwa, T., Sakai, T. and Morikawa, T.: Route Identification and Travel Time Prediction Using Probe-Car Data, *International Journal of ITS Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 21-28, 2004.
3) 朝倉康夫，羽藤英二，大藤武彦，田名部淳：PHS による位置情報を用いた交通行動調査手法，土木学会論文集，

No. 653/Ⅳ-48，pp. 95-104，2000．[Asakura, Y., Hato, E., Daito, T., and Tanabe, J.: Monitoring Travel Behaviour Using PHS Based Location Data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 653/Ⅳ-48, pp. 95-104, 2010.]
4) 横田孝義，玉川大：プローブ情報による京阪神地域貨物車交通の道路利用特性に関する分析，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 65，No. 5，pp. I_643-I_656，2011．[Yokota, T. and Tamagawa, D.: Study on The Road Usage Behaviour of Freight Vehicles in Keihanshin Area by Using Probe Data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol. 65, No. 5, pp. I_643-I_656, 2011.]
5) Quddus, M. A., Ochieng, W. Y. and Noland, R. B.: Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions, *Transportation Research Part C*, Vol. 15, No. 5, pp. 312318, 2007.
6) Chao, P., Xu, Y., Hua, W. and Zhou, X.: A Survey on mapmatching algorithms, *Databases Theory and Applications*, Springer International Publishing, pp. 121-133, 2020.

DEVELOPMENT OF LINK COST BY UTILIZING POSITIONAL INFORMATION FROM MULTIPLE OBSERVATIONS IN SHORTEST PATH SEARCH-BASED MAP-MATCHING METHODS

Wataru MOGI