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

横田 孝義¹・玉川 大²

¹正会員 京都大学大学院教授 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
E-mail: tyokota@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院助教 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
E-mail: d-tamagawa@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本稿では貨物車両の高速道路の利用実態を明確にするために必要となる高架道や並走路の正確な分離を可能とするプローブ情報の新たなオフラインマップマッチングアルゴリズムを提案する。次に、本アルゴリズムを京阪神地域の 300 台の貨物車両から取得したプローブ情報に適用して明らかになった旅行速度の現状などを述べる。また、貨物車両が高速道路を利用する際の一般道路と高速道路間のアクセス、イグレスの距離の特性について分析し、このアクセス長、イグレス長の短縮が貨物車交通の高速道路利用を増やし効率向上を図るための一つの大きな課題であることを示す。

Key Words : probe cars, freight vehicle, map-matching, logistics, GPS

1. はじめに

(1) 研究の目的

報告者らは京阪神地域の貨物車交通の実態を調査し、その課題の抽出を行う研究を行っている。このためには、実際に走行している貨物車両の行動を把握する必要があると考え、2009 年 10 月 1 日から 31 日の期間、21 社、300 台のトラックを対象に GPS 携帯電話を用いたプローブ調査を実施した^{1)~4)}。この調査で収集したこのようなプローブ調査においては、貨物車両のトリップの起終点の分布や所要時間、走行経路など所望の分析を行う際に、車両が実際のどの道路を走行しているかを判定するための、いわゆるマップマッチング処理が必要となる。本研究で対象としている京阪神地域のように、高架道の都市高速道路とその下に国道が並走する場合や、非常に接近した並走路があるような場合に一般に数 10m の誤差を持ち得るプローブ情報から正確に車両がどの道路を走行しているかを識別することは困難である。そこでまず、本研究ではこのような状況でも正確に道路の識別を可能にする新たなマップマッチング技術を提案する。次に、このマップマッチング技術によって車両の高速道路の乗り降り进行を正しく判定することが可能になるため、京阪神地域の貨物車交通の高速道路の利用状況をトリップ単位で分析し、高速道路の利用の重要な要因と考えられる高速道路へのアクセス距離、およびイグレス距離に着目して分析を行った。

(2) 既往研究のレビューと本研究の位置づけ

a) 貨物車両の行動分析の研究

プローブ情報を用いた貨物車両の行動分析の例として、Yokota & Tamagawa⁵⁾は、図-1 に示すように、マップマッチングを行わないでプローブ情報の空間的な密度を集計することで貨物車両の走行道路を利用頻度の観点で 2 極分化された階層構造にできることを見出している。貨物車両の行動を分析し、交通状況や交通施策が貨物車交通へ与える影響について数理モデルによって定性的に捉える研究は Filiozzi^{6),7)}などに見られる。ただし、ここで提案されているモデルでは道路ネットワークをある面積で規定される集中した配送エリアと、この配送エリアと距離をなす配送センター間をある距離の道路で結ばれているという形で抽象化されたモデルであり、実際の現象を説明しようとする際には、実道路ネットワークとの対応付けが非常に困難であると考えられる。例えば走行速度はモデルの中で一つのパラメータで表現しているなど、現実のようにボトルネックの場所が空間的に分布しているような交通状況での適用が困難であると考えられる。より実データとの対比を意識した研究として Greaves⁸⁾の研究がある。この研究では、Melbourne において、30 台の貨物車両の 7 日分の GPS データを収集して分析を行い、OD 行列をプローブ情報より推計するなどの可能性に言及している。ただし、GPS データから実際に貨物車両が走行した道路を推定する方法は Fitzgerald et al.⁹⁾の方法を用いている。すなわち、GPS データの位置から最も近いノード同士の最短距離ルートを採用する簡便な方法をとっている。

図-1 京阪神地域の貨物車両 300 台のプローブ情報の収集例
(青色：高頻度利用道路，灰色：低頻度利用道路)

実際の車両が最短経路を通行するとは限らないことと、GPS データの誤差を考慮すると GPS データの近傍のノードが必ずしも正しいノードであるとは限らないことから、この方法は本研究のように、貨物車両が実際に走行した道路を正確に把握することを必要とする場合には適さない。特に我が国の京阪神地域のように道路密度が高く、並走路や高架道が数多く存在する場合に対して十分な精度で車両の走行道路を推定することは非常に困難となる。

一方、プローブ情報は用いていないが、配送事業者の運行日誌情報等から貨物車両の行動分析を行う研究として、Holguin-Veras¹⁰⁾が商用車のトリップの目的の確率をトリップチェーンの数、目的地の数の平均値、トリップチェーンの長さ、車種などから推定する方法について Denver の事例を挙げて述べている。Browne et al.¹¹⁾は、英国における 1970 年代から今日に至る貨物車両のアンケートに基づく行動の実態調査方法についてレビューを行っている。Christian et al.¹²⁾は、同様にフランスにおいて実施されたアンケートに基づく貨物車両の行動の実態調査方法についてレビューを行っている。これらの事例において、各貨物車両の走行ルートデータの取得は大きな課題であったが、近年は GPS の普及によって可能になってきている。

b) プローブ情報の処理アルゴリズムの研究

GPS 情報から正しく車両の走行している道路を推定する技術はマップマッチング技術、あるいは経路同定技術として一つの研究分野を形成しているが、その多くはカーナビゲーション装置のように、リアルタイム

システムを前提としている。これらの技術については Quddus et al.¹³⁾などでレビューされている。基本的にはプローブ情報と地図情報の道路リンクの位置の近接度、方位の類似性などを評価関数としてプローブ情報に対応する最適な道路上の点を決定する方法、地図上の道路形状とプローブ情報の軌跡の形状の類似度を用いる Greenfield¹⁴⁾の方法や、車両の進行方向を予測してマッチングを試みる Miyashita et al.^{15), 16)}などの方法も提案されている。一方、本研究で対象とするのはリアルタイム処理ではなく、収集した GPS データを後から分析するものであり、リアルタイム処理よりも計算資源や用いる情報に制約の少ない、いわゆるオフラインのマップマッチングアルゴリズムである。このような分野の研究事例には Miwa et al.^{17), 18)}がある。この方法は、300 m 程度の間隔になるプローブ情報（以降、本稿では低頻度プローブ情報と呼ぶ）を対象に、高架道や並走路の分離という本研究と同一の課題が指摘されており、対象とする起終点間を結ぶ最適なリンク列を推定するものである。この際、Dijkstra 法が用いられ、リンクコストとしては、1) リンク長、2) リンクとプローブ情報との距離、3) 速度に依存した重み、の 3 項目の積を用いる方法を提案している。この方法は、本研究で対象とする数秒ピッチで取得されるプローブ情報（以降、本稿では高頻度プローブ情報と呼ぶ）のように一つのリンクに複数のプローブ情報が存在し得るような状況は想定していないため Miwa et al.¹⁷⁾の方法を高頻度プローブ情報に適用することは困難であると考ええる。また、時間帯によってプローブ情報の速度情報から高速道路と並走する一般道路を識別する手法が提案されているが、高速道路上で突発的な渋滞が発生するような場合にはその有効性は低下してしまう。このように、既往の研究では移動体通信のコストの制約から低頻度に取得したプローブ情報から正確な車両や歩行者の移動経路を推定しようとするアルゴリズムの検討に主眼が置かれてきたと言える。

一方、近年の移動体通信のコストの低下によって高頻度プローブ情報の取得が容易に可能になってきており、このように細かなプローブ情報を正確にデジタル道路地図にマッチングさせる技術の重要性が益々高まってきていると報告者は考える。このような高頻度プローブ情報から並走路や密集した道路が存在する市街地においても正確にマップマッチングを行う試みとして Makimura et al.²⁰⁾が提案した手法がある。この手法は GPS とジャイロを有したナビゲーション装置でマップマッチング処理をさせて得た 1 秒ピッチの位置情報の時系列を取得し、その時系列の方位変化の大きい折れ線区間を抽出し、その折れ線区間と近接した DRM ノードとを対応づけるというマッチング方法をとっている。

表-1 オフラインマップマッチングアルゴリズムの既往研究との比較と位置付け

比較項目		本手法	Makimura et al. ²⁰⁾	Miwa et al. ¹⁷⁾	朝倉ら ²¹⁾
プローブ情報頻度	高頻度 (数秒)	○	○	×	×
	低頻度 (数分)	×	×	○	○
処理形態	オフライン	○	○	○	○
	オンライン	○	×	×	×
位置情報	GPS のみ	○	△	△	△
	GPS+デッドレコニング	○	○	○	△
	PHS 基地局測位	△	△	△	○
評価関数	大域的	ツアー	折れ線単位	トリップ	トリップ
	局所的	—	—	—	—

○：適用可能，×：適用不可，△：未適用，—：非該当

しかしながら、ナビゲーション装置を用いたとしても高速道路と並走路の識別は現在でもなお困難な課題であり、また、提案されているマッチング処理は上記の折れ線区間と類似した近傍の DRM のリンク（ノード）と対応させる局所的な処理である。さらには、ナビゲーション装置内で使用されている地図情報と DRM の一致性が担保されていない場合、誤ったマップマッチングの可能性が残ると考える。

報告者の主な関心事である貨物車両の走行実態を調査しようとするような場合、現状では貨物車両でのナビゲーション装置の普及は非常に低水準であるのが実態であり、簡便な GPS のみによる調査が現実的であると考え。

朝倉ら²¹⁾は、PHS の位置特定サービスによって得られる位置情報から人の移動軌跡を求める手法を提案している。この方法はトリップ単位に経路を決定するので、トリップの起終点に近いノードを選択し、その起終点ノード間を結ぶ複数経路の候補を列挙して、起終点の間で観測された途中のプローブ情報（位置情報）との誤差が最も少なくなる経路を選択するという方法であり、位置情報の取得頻度は2分程度を想定している。一方、本研究で想定しているように数秒ピッチでプローブ情報が得られ、トリップ長も10kmに及ぶような場合にはその間の候補経路を列挙して評価する方法は計算量が膨大となってしまう現実的ではないと考える。すなわち、数秒ピッチで取得されるの個々のプローブ情報に対して逐次リンク候補を決定して行く方法の方が現実的であると考え。表-1にこれら既往の研究と本研究の位置付けを示した。本研究および既往の研究で適用可能な項目を“○”，適用不可の項目を“×”で表わし、未適用の項目については“△”とし、また、該当しない項目は“—”とした。本研究で提案するアルゴリズムの特徴は、センサとしてはGPS単独で十分な精度とは言えない数秒ピッチの高頻度のプローブ情

報に対して、大域的な評価関数によって、かつ、オフライン処理にてマップマッチングを実現するものであり、対象としてはMaikimuraら²⁰⁾の研究対象に類似しているが、求めているプローブ情報の品質が異なること、ならびに用いている評価関数がMakimuraら²⁰⁾の方法ではやや局所的な範囲に留まるのに対し、本提案手法は終日のトリップチェーン、いわゆるツアー全体にわたって総合的に評価する点に大きな相違がある。また、使用するカーナビゲーション装置やその中で使用されているデジタル道路地図と DRM との相違など種々の外部要因に精度が依存する懸念があるが、本手法ではそのような外部要因が少ないことも特徴である。なお、本提案手法はオフラインでの適用に主眼を置いているが、2.(4)で後述するように精度低下を許容すればオンライン適用も可能である。マップマッチングの処理単位は入力されるプローブ情報の単位に依存し、一日単位を想定しているが、数日にわたっての連続したデータを対象にしても問題はなく、他の多くの手法のように、プローブ情報からトリップを判定して起終点に分割する必要はない。

c) その他

その他、貨物車両以外の分析では、タクシーのプローブ情報からドライバーの経路選択行動のモデルの同定を試みる研究例も見られる^{19), 22), 23)}。森脇ら²³⁾はバスのプローブ情報を旅行時間のセンシング手段に用いて都市道路網の旅行時間変動要因の分析を行っている。以上、既往研究を総括すると、近年、貨物車両の行動分析にプローブ情報を利用する事への期待が高まっており、高頻度のプローブ情報の入手も可能になってきている。一方、プローブ情報による各種分析を都市部の高架道、並走路の多い都市部にも適用しようとなると、高精度に道路を識別するという基本的な課題を解決するオフラインのマップマッチング技術の必要性が依然として高いのが実態であり、その検討が急務であると言える。

(3) 本論文の構成

本論文は以下の構成で記述してある。以降、2. では新たに提案する動的計画法によるオフラインマップマッチングアルゴリズムについて説明する。3. ではこのアルゴリズムを適用して分析した京阪神地域の貨物車交通の実態の例として旅行速度の状況や一般道路と高速道路間のアクセス距離、イグレス距離に着目した高速道路の利用実態等について述べ、4. で結論を述べる。

2. 動的計画法を適用したオフラインマップマッチングアルゴリズム

近年、GPS 携帯電話の普及などにより低コストでプローブ調査を実施することが可能になってきた。本研究で対象とするプローブ情報は収集ピッチが数秒オーダーのものであり、可能な限りプローブ情報を棄却しないという方針の下、一切間引きをしないでデジタル道路地図情報にマッチングさせることとした。デジタル道路地図情報にプローブ情報をマッチングすることによって貨物車両の走行する道路の種別等が判明することになり、高速道路の利用実態のように道路属性情報を必要とする分析が可能になる。

(1) マップマッチングの局所的評価関数

今、一つの車両の一日のプローブ情報に着目し、そのプローブ情報に対応する道路リンクとそのリンク上の位置を逐一推定することを考え、以下のような評価関数を定義する。なお、プローブ情報の総数は P 個とする。なお、 i はプローブ情報の時間軸上のシーケンス番号、 j は各プローブ情報に対して候補となる近傍のデジタル道路地図のリンクのインデックスを示す。

$$E(i, j) = \alpha \cdot f(p_p(t_i), p_{m,j}(t_i)) + (1 - \alpha) \cdot g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}), \quad (1)$$

$$f(p_p(t_i), p_{m,j}(t_i)) = \exp\left(-\frac{\|p_p(t_i) - p_{m,j}(t_i)\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

$$p_p(t_i) = (x_p(t_i), y_p(t_i)), \quad (3)$$

$$p_{m,j}(t_i) = (x_m(t_i), y_m(t_i)),$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, P-1, j = 0, 1, 2, \dots, Q-1. \quad (4)$$

式 (1) は局所的な評価関数であり、右辺の 2 つの項から構成している。 $p_p(t_i)$ は時刻 t_i におけるプローブ情報の位置ベクトル、 $p_{m,j}(t_i)$ は同様に時刻 t_i におけるプローブ情報の近傍のリンク候補 j へプローブ情報を射影した垂線の足の位置ベクトルを表す。

パラメータ P はプローブ情報の時系列の数を表わし、パラメータ Q はリンク候補数を表わす。京阪神地域の密集した道路網に対応するために経験的に Q は 16 としてある。式 (1) 中のパラメータ α はプローブ情報と道路リンクの垂線距離に関する評価と車両の走行方位

図-2 プローブ情報とデジタル道路地図の距離の評価

図-3 垂線が存在しない場合の処理

図-4 プローブ情報とデジタル道路地図の方位差の評価

と道路リンクの通行方向との方位差に関する評価のどちらを重視するかを決める重みパラメータであり 0 から 1 の範囲で適切な値を決定する。

a) 近傍リンクへの垂線距離の評価

まず、右辺第一項、式 (2) の $f(p_p(t_i), p_{m,j}(t_i))$ は、時刻 t_i におけるプローブ情報の位置 $p_p(t_i)$ と最寄りの道路リンク候補 j の射影位置 $p_{m,j}(t_i)$ との距離を標準偏差 σ のガウス関数を用いて評価している。この値は、実際の静止した車両の GPS 位置情報のふらつき、デジタル道路地図のデフォルメの状況などを加味して経験的に 20m に設定した⁵⁾。道路リンクは有向リンクでも無向リンクでも良い。図-2 に示すように通常各道路リ

リンクは道路の曲線形状を近似するために複数の補間点を持っており、式 (2) の評価は隣り合う補間点で構成される線分毎に行う。また、**図-3** に示すように垂線の足が存在しない場合には許容範囲 d 以内の最寄りの補間点位置までの距離とした。なお、 d は経験的に 10 m とした。

b) 方位差の評価

式 (1) の右辺第 2 項の $g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m})$ はプローブ情報から推定される車両の進行方位 $\theta_{p,i}$ と道路リンクの方位 θ_m の差を評価するものである。車両の進行方位は GPS 受信機から直接出力される場合もあるが、ここでは**図-3** に示すように、二つの時間的に隣接したプローブ情報の位置ベクトル $\mathbf{p}_p(t_i)$ と $\mathbf{p}_p(t_{i-1})$ の差分から算出している。方位差はプローブ情報の方位と、候補リンクのマップマッチング位置の方位との比較を行う。ここで、リンクは属性データとして車両の通行方向を持つ有向リンクとする。リンクの方位はリンク 1 の該当する線分区間 m の始点座標を (x_1, y_1) 終点座標を (x_2, y_2) とすると

$$\theta_{l,m} = \arg\{(x_2 - x_1) + i(y_2 - y_1)\} * \eta \quad (5)$$

$\eta = 1$: 通行方向がリンクに順方向,

$\eta = -1$: 通行方向がリンクに逆方向 (6)

で表わせる。 $\theta_{l,m}$ の値域は

$$-\pi \leq \theta_{l,m} < \pi \quad (7)$$

である。ここで i は虚数単位、すなわち、 $i^2 = -1$ である。また、式 (5) の関数 $\arg$ は C 言語のライブラリ `math.h` の `atan2` 関数に該当する。一方、プローブ情報の方位は注目している時刻での位置とひとつ前の時刻での位置から求める。すなわち、

$$\theta_{p,i} = \arg\{(x_{p,i} - x_{p,i-1}) + i(y_{p,i} - y_{p,i-1})\} \quad (8)$$

$\theta_{p,i}$ の値域も

$$-\pi \leq \theta_{p,i} < \pi \quad (9)$$

である。ここでは候補リンクの該当線分の方位 $\theta_{l,m}$ とプローブの方位 $\theta_{p,i}$ との差を評価する。すなわち、 $\theta_{l,m} - \theta_{p,i}$ を計算するが、この値の値域は

$$-2\pi < \theta_{l,m} - \theta_{p,i} < 2\pi \quad (10)$$

である。方位の相違を 0 から 1 までの単調関数で表現するために

$$0 \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < 2\pi \quad (11)$$

であることから、車両の進行方位が道路の通行方向と逆方向である場合には評価値が 0 となり、同一方向時に最大値 1 をとるようにするために、

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}) = \max \left\{ 0, 1 - \frac{|\theta_{l,m} - \theta_{p,i}|}{\pi/2} \right\}, \quad (12)$$

$$0 \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < \pi$$

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}) = \max \left\{ 0, -3 + \frac{|\theta_{l,m} - \theta_{p,i}|}{\pi/2} \right\},$$

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m})$$

図-5 方位差の評価関数 g (有向リンクの場合)

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m})$$

図-6 方位差の評価関数 g (無向リンクの場合)

$$\pi \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < 2\pi \quad (13)$$

とした。これを図示すると**図-5** のようになる。

一方、リンクが無向リンクの場合、すなわち双方向に通行可能な場合は、車両の進行方向がリンクと直交する場合に評価値 0 を取るものとして、以下のように定義した。

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}) = 1 - \frac{|\theta_{l,m} - \theta_{p,i}|}{\pi/2}, \quad (14)$$

$$0 \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < \pi/2$$

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}) = -1 + \frac{|\theta_{l,m} - \theta_{p,i}|}{\pi/2}, \quad (15)$$

$$\pi/2 \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < \pi$$

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}) = 3 - \frac{|\theta_{l,m} - \theta_{p,i}|}{\pi/2}, \quad (16)$$

$$\pi \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < 3\pi/2$$

$$g(\theta_{p,i}, \theta_{l,m}) = -3 + \frac{|\theta_{l,m} - \theta_{p,i}|}{\pi/2}, \quad (17)$$

$$3\pi/2 \leq |\theta_{l,m} - \theta_{p,i}| < 2\pi$$

無向リンクの場合の関数 g を図示すると**図-6** になる。本研究では、GPS の時間的に連続する 2 個の位置情報

図-7 パラメータ α の影響

の差分から車両の走行方位を推定するため、速度が低下すると方位の推定精度が低下する。このような方位情報を用いて評価を行うことは危険であるため経験的に速度が 10 km/h 未満の場合は方位が非常に不安定となるため、方位の評価を行わないようにした。なお、図-2、図-3、図-4 では候補となる道路リンクを一本しか示していないが、実際は Q 個の複数のリンクを候補として比較を行う。

c) 垂線距離と方位差の評価の重み α の決定

式 (1) 内の垂線距離と方位差の評価の重みのパラメータ α をどのように決定するかについて明確な指針を得ることは簡単ではない。そこで、 α の値を 0 から 1 までの間で変化させ、マップマッチング性能にどのように影響するかを典型的なプローブ情報を用いて調べることにした。評価に用いたプローブ情報は典型的なプローブ情報とし 2009 年 10 月 1 日 (木) の 8 時 15 分から 19 時 15 分までの 11 時間にわたり、阪神高速道路を含めて大阪都市部を走行し、8577 個のプローブ情報を 134 km 走行して取得した貨物車両 1 台の例である。この結果から α の値を 0.5 にしてマップマッチングを行った 8577 点のそれぞれのプローブ情報にマッチした DRM のリンク番号を基準に、 α の値を増減させた場合のマッチング結果のリンク番号との一致度を調べた。その結果、図-7 に示すように、 α を 0.2 から 0.8 の範囲で変化させてもマップマッチング結果は 98% 以上変化しないことがわかる。すなわち、本手法はパラメータ α に対して極めて安定な特性を有していることが分かる。本研究では垂線距離と方位差について特別にどちらかを優先する理由がないため α の値を 0.5 とした。

(2) マップマッチングの大域的評価関数

式 (1) によって局所的に最適な道路リンクの推定および、マッチング位置の算出が可能であり、これを全て

図-8 局所評価関数によるマッチング例 (大山崎ジャンクション (京都)。黒い点がマッチングした位置を示す。赤い丸は誤ったマッチング位置を示す。正答率 $34/47 = 72\%$)

図-9 大山崎ジャンクションの衛星写真

のプローブ情報に適用すれば経路情報が得られることになるが、実際には道路密度が高い地域や高架道路の直下を道路が存在する場合などにはマッチング処理が誤った結果を示すことになる。そのような例を図-8 に示す。また、該当する道路の衛星写真を図-9 に示す。この例は京都の大山崎ジャンクションを通過中の車両の例である。図-8 中の種々の表示色の三角形の印がプローブ情報を表し、三角形の示す方向が車両の進行方向を示し、色は瞬間速度を示す。寒色系であるほど高速である。このジャンクションを通過中に得た 47 個のプ

図-10 提案アルゴリズムの考え方（赤く示した道路がマッチング結果を示す）

プローブ情報のうち正しくマッチングされたのは34個であり、この部分の正答率は34/47、すなわち73%に留まる。これは、到底許容できない水準である。この例では、デジタル道路地図上の該当するリンクとGPSの位置が50m程度ずれている場所があり、局所的な評価関数ではこのような位置の誤差が直接誤判定につながってしまうことが分かる。特にこのジャンクションのように高架道路下に道路が存在するような場合、捕捉可能な衛星数が低下して位置精度の低下は免れない。このように、正しくジャンクションやランプの乗り降り判定するためには局所的な評価関数では極めて不十分であることが分かる。そこで本研究ではトリップチェーン（あるいはツアーとも呼ぶ）にわたって局所的评价関数を積分する大域的な評価関数を用いてマップマッチングを行うことにした。大域的な評価関数にすることによって以下のような効果が期待できる。

- 局所的にはプローブ情報の位置精度や地図の位置精度が低くても、一連のトリップチェーンを最も矛盾なく説明するリンク列の選択がなされるため、位置精度の低さに対して頑強なリンク列の推定が可能になる。
- トリップチェーン全体にわたって評価を行うため、高架道や近接した並走路など局所的な幾何学的な情報だけでは判定が困難な道路もトリップの前後関係を考慮したリンクの推定が行えるため正しい判定の可能性が高くなる。

すなわち、図-10に示すように、局所的な評価関数によるマップマッチングアルゴリズム、あるいは、大域的な評価関数を用いたとしてもリアルタイムシステムの場合のように過去から現在までのプローブ情報しか使用できない場合は、図-10中の(a)のように、プローブ情報の位置誤差の影響によって、並走する道路に誤ってマッチングしてしまい、途中から不連続に道路を飛

び越えて復帰するような現象が生じてしまう。一方、終日のプローブ情報を用いて大域的な評価関数を用いれば多少のプローブ情報の誤差に影響されずに図-10中の(b)に示すように、正しくマップマッチングする可能性が高まると考えられる。図-10の例は、高速道路から一般道路に分岐している例である。このような考え方を具体化するために最大化すべき大域的な評価関数を F として式(18)を定義した。

$$F(s(i)) = \sum_{i=0}^{P-1} \sum_{j \in \phi_i} \sum_{j' \in \phi_{i-1}} E(i, j) \cdot a_{j, j'} \cdot \delta\{j', s(i)\} \quad (18)$$

ここで、

$a_{j, j'} = 1$: stage i の候補 link $_j$ が上流の stage $i-1$ の候補 link $_{j'}$ から到達可能な時

$a_{j, j'} = 0$: stage i の候補 link $_j$ が上流の stage $i-1$ の候補 link $_{j'}$ から到達不可能な時

(19)

ここで“stage”とは、プローブ情報の時系列のシーケンス番号に対応する。 ϕ_i は stage i でマッチング対象の候補になるプローブ情報の近傍に存在するマッチング候補リンクの集合である。前述のように本研究では経験的に最大16リンクまでを用いた。ここで、プローブ情報の処理対象となる対象エリア全域にわたって道路リンクにはユニークな番号が付与されているものと仮定する。

式(18)中のインデックス i はプローブ情報の時間軸上のインデックスを表わし、式(18)(19)に現れるインデックス j' と j は連続する上流の stage $i-1$ と下流の stage i での近傍リンク集合内の候補リンクを示すものである。 $\delta\{\}$ は Kronecker のデルタ関数で j' と $s(i)$ が一致すれば1、そうでなければ0をとる。すなわち $s(i)$ は stage i で選択すべき最適なリンクのインデックスを表わす。従って、式(5)の最大化問題は $s(i)$, $i = 0, \dots, P-1$ で示されるリンク系列の最適な離散選択問題となる。

評価関数 F を式(19)のリンクの到達条件の下で最大化する問題は、式(18)が再帰的な表現に変形可能であることから動的計画法によって効率的に解くことができる。動的計画法は良く知られているように、問題解決の枠組みを指す方法論であると同時に具体的な解法を指す言葉でもある。評価関数 F の最大化によってマップマッチングと経路同定が同時に達成されることになる。

(3) 動的計画法による求解アルゴリズム

式(18)の評価関数 F の最大化問題は式(20)で示す再帰的な表現と等価である。 $w(i, j)$ は評価開始時点 $i=0$ から時間インデックス i におけるリンク候補インデックス j に至るまでの評価値の積算値を表わす。この関係を図-11に模式的に示す。各ステージにおいて下流リンクに到達する上流リンクの最適な選択が行われると

図-11 動的計画法による求解アルゴリズム

もに評価関数は積算され、後段に上流リンクの選択結果とともに伝搬して行く。なお、プローブ情報の密度によっては同一のリンクを複数のステージにわたって連続して選択されることがある。

$$w(i, j) = \max_{j'} \{w(i-1, j') \cdot a_{j',j} + E(i, j)\}, \quad (20)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, Q-1,$$

$$j' = 0, 1, 2, \dots, Q-1,$$

$$i = 1, 1, 2, \dots, P-1$$

図-11は初段のステージから次のステージまでの流れを表現しているが、最終ステージ $P-1$ まで同様に進む。以下に実際の手順を示す。

ステージ $i = 0$

$$\begin{aligned} w(0, j) &= E(0, j) \\ j &= 0, 1, 2, \dots, Q-1 \end{aligned} \quad (21)$$

を算出する。

ステージ $i = 1$

$$\begin{aligned} w(1, j) &= \max_{j'} \{w(0, j') \cdot a_{j',j} + E(1, j)\} \\ &= \max_{j'} \{E(0, j') \cdot a_{j',j} + E(1, j)\} \\ j &= 0, 1, 2, \dots, Q-1 \end{aligned} \quad (22)$$

ステージ $i = 2$

$$\begin{aligned} w(2, j) &= \max_{j'} \{w(1, j') \cdot a_{j',j} + E(2, j)\} \\ j &= 0, 1, 2, \dots, Q-1 \end{aligned} \quad (23)$$

⋮

と進めて行き、

最終ステージ $i = P-1$

$$\begin{aligned} w(P-1, j) &= \max_{j'} \{w(P-2, j') \cdot a_{j',j} + E(P-1, j)\}, \\ j &= 0, 1, 2, \dots, Q-1 \end{aligned} \quad (24)$$

まで進める。最後にこの最終ステージ $P-1$ の評価値の組 $\{w(P-1, j)\}$, $j = 0, 1, 2, \dots, Q-1$ の中で最大のものをルートの解とし、各ステージでの選択結果を stage を後ろ向きにたどることで大域的に最適なリンク列が得られる。この方法はステージ数を P とし、リンク候補数を Q とすると、局所評価値 E の算出回数は PQ となる。なお、実際の処理時間を支配するのはプローブ情報の近傍の道路リンクを抽出する空間的な検索処理であり、デジタル道路地図のリンクデータの検索処理の高速化が本アルゴリズムでは大きな効果を持つ。従って本研究ではデジタル道路地図データに対して 100m 四方程度に細分化した空間的なハッシング処理を施し、リンクやノードの検索時間を高速化して臨んでいる。これ

によって一台の車両の1日分のツアーのプローブ情報の処理に要する時間は最大でも4分程度となっている(使用コンピュータ, Intel® Core™2 Duo E8400 3.0 GHz,

メモリ 4GB)。

(4) マップマッチングの有効性の検証

実際のプローブデータを用いて提案するマップマッチングアルゴリズムの有効性の確認を行った。複雑な道路の例として、図-8で説明した大山崎ジャンクションを走行したプローブ情報に適用した結果を図-12に示す。提案アルゴリズムによって全てのプローブ情報が正しくマップマッチングされ、正答率100%が得られていることがわかる。

次に、阪神高速道路の入口ランプ、出口ランプの利用有無の検出の精度を検証した。利用頻度の高いオンランプおよびオフランプそれぞれ50か所を対象に評価した。その結果、提案した手法は全てのランプでの乗り降りの識別ができていることを確認した。

識別が困難なオンランプの例として阪神高速道路13号東大阪線の法門坂のオンランプの識別結果の例を図-13、図-14、図-15に示す。茶色のリンクがランプを表わし、ピンクの路線が阪神高速道路を表わす。このエリアは国道308号線が近接して並走しており、図-13の局所的なマップマッチングアルゴリズム、および、図-14の大域的ではあってもリアルタイム処理で用いられる前向きな推定方法ではこのランプから阪神高速道路に乗ったという車両の挙動の検出に失敗している。図中の赤い丸で示した点は誤った道路にマッチングしていることを表わしている。一方、図-15に示す提案アル

図-12 提案アルゴリズムによるマッチング例(大山崎ジャンクション(京都)。黒い点がマッチングした位置を示す。正答率 $47/47 = 100\%$)

図-13 局所評価関数によるマップマッチング結果(赤い丸は誤ったマッチング位置を示す。)

図-14 大域評価関数によるマップマッチング結果(リアルタイム処理を想定。赤い丸は誤ったマッチング位置を示す。)

図-15 提案アルゴリズムによるマップマッチング結果

図-16 阪神高速 13 号東大阪線と並走する国道 308 号線の衛星写真（法門坂ランプ付近）

ゴリズムによる結果では、プローブ情報に大きな位置誤差があるにもかかわらず正しく検出できていることが分かる。仮に数分程度の時間遅れが許容されるならば、ここで提案するオフラインアルゴリズムによる高精度なマップマッチング処理をリアルタイムに実行し、その結果を基にした交通情報の生成も原理的に可能であると考えられる。

図-16 に対応する衛星写真を示す。今後、さらに評価ケースを増やしていくことで、提案アルゴリズムにおいても誤ったマップマッチングを行うケースが生じ得るが、その割合は数%のオーダーであると予想し、今回提案するマップマッチングアルゴリズムを用いて貨物車用の高速道路利用自体の分析に適用し得ると判断した。より網羅的な本マップマッチングアルゴリズムの精度の評価は今後の課題である。

3. 貨物車交通の高速道路の利用実態の分析

(1) プローブ調査の概要

報告者等は 2009 年 10 月 1 日（木）から 31 日（土）までの 1 カ月にわたり、京阪神地域の貨物車交通の実態調査を目的に 21 社の輸配送事業者の協力を得て、300 台の

貨物車両に GPS 機能付き携帯電話を搭載して約 2 秒間隔の緯度、経度情報からなるプローブ情報を収集した。詳細は Yokota & Tamagawa³⁾、Tamagawa & Yokota⁴⁾を参照されたい。300 台のプローブカーに選定した貨物車両は大阪府の実際の貨物自動車登録台数（軽貨物車を除く）の約 0.1%に過ぎない数ではあるが、可能な限り実際の貨物車両の交通実態を捉えるために、積載貨物の種類と運送地域の OD が京阪神都市圏中間年次調査（物流関連調査）結果²⁴⁾とできるだけ比例関係になるように目標設定した。実際に協力事業者と調整し配送地域、積荷を考慮して決定した貨物車両の配分結果を発生地域に関しては表-2 に、積荷の種類については表-3 に示す。必ずしも目標台数通りにはならなかったが、プローブ情報の取得密度を図示化した図-1 の結果と平成 17 年度の道路交通センサスデータとを比較して貨物自動車の主要道路上の走行密度に関しては比較的忠実に再現していることを確認している⁴⁾。

(2) トリップ長とトリップ数の関係

京阪神地域のトラック 300 台の 1 カ月間の走行データのうち、2009 年 10 月 1 日（木）から 10 月 7 日（水）までの 7 日間のデータを分析対象とすることとし、トリッ

表-2 発生地域別の貨物車両台数

発生地域	目標台数	実績台数
大阪市内	90	136
大阪北部	30	25
大阪東部	60	35
大阪南部	60	60
大阪府外	60	44
計	300	300

表-3 積荷の種類別の貨物車両台数

積荷の種類	目標台数	実績台数
化学工業品	60	24
機械工業品	120	30
軽工業品	120	196
その他	0	50
計	300	300

ブ単位の分析を行うこととした。一般に、トラックのトリップに関する情報、例えば目的地情報などを協力事業者から入手することは困難であることから経験的⁵⁾に車両の停止時間 80 秒以上、かつトリップ長 1 km 以上が成立した場合にトリップが完結したと判断しトリップの自動的抽出を実施し全 11 359 トリップを得た。トリップ端の判定には、プローブ情報を観測して時速 2 km 以下の状況が 80 秒以上持続したという条件を用いた。なお、Yokota & Tamagawa⁵⁾によって今回用いた GPS の観測時間のインターバルを 20 秒以上とることによって、静止している車両を時速 2 km 以下の誤差で 95%の確率で検出できることが分かっており、80 秒以上の車両の停止は十分な確率で検出が可能である。なお、80 秒という停止時間は信号交差点の停止時間によっても稀に生じ得るが、80 秒よりも長い停止時間をトリップ端の判定に用いた場合、トリップの分離ができない例が散見されたので 80 秒とした。なお、これによって信号交差点での停止がトリップ端と誤判定される頻度は十分に少ないと考えた。図-17 にトリップ長とトリップ数の関係、および高速道路利用トリップと高速道路の非利用トリップの内訳との比率を示す。図-18 は図-17 のトリップ長とトリップ数のデータからトリップ数の累積構成比を示したものである。図-17 より、トリップ長が 10 キロ未満では高速道路を利用するトリップがほとんどないことがわかる。また、トリップ長が 10 km 以上で高速道路を利用するトリップの割合はトリップ長が 40 km 程度までは増加傾向がみられる。また、図-18 より、20 km 未満のトリップがトリップ数全体の 80%を占めていることがわかる。

図-17 トリップ長とトリップ数、高速道路利用状況の関係

図-18 トリップ長とトリップ数の関係

(3) トリップ長と利用道路種別の分析

図-19 にトリップ長に対する利用道路種別の構成比と走行距離を示す。走行距離は 10 km から 20 km のトリップ長において最も長いことがわかる。また、都市高速道路である阪神高速道路の利用はトリップ長が 10 km を超えると発生し、阪神高速道路の利用距離の比率が 20%を超えるのは 20 km から 30 km のトリップ長になってからであることがわかる。一方、都市間高速道路（NEXCO 西日本）の利用距離の比率が 20%を超えるのはトリップ長が 40 km から 50 km の距離帯になってからである事がわかる。

次に、旅行速度について分析した結果を図-20 に示す。トリップ長と旅行速度の散布図を高速道路を利用したトリップと全く利用しなかったトリップで色分けしてあり、茶色が高速道路未利用のトリップ、緑が高速道路を利用したトリップを示している。同様に、高速道路の利用有無と走行に要した消費時間の関係を図-21 に示す。高速道路を利用したトリップの方が明らかに旅行速度が高い一方、消費時間は圧倒的に高速道路を利

図-19 トリップ長と利用道路種別の構成比

図-20 トリップ長と旅行速度の関係

用しないトリップが多いことがわかる。なお、図-21 を累積すると旅行速度 20 km/h 以下の消費時間は全消費時間の約 70%となる。

(4) 高速道路アクセス、イグレスと高速道路利用有無の関係

前節の分析によって京阪神地域の貨物車交通の旅行速度が時速 20 km に満たない割合が消費時間で全体の約 70%を占めていることが示され、効率面、環境面から旅行速度の向上が望まれる。旅行速度を向上させる方法としては高速道路の利用の促進が考えられる。そこで、本節では高速道路へのアクセス、および高速道路からのイグレス距離が高速道路利用の意思決定にど

図-21 旅行速度と消費時間

図-22 トリップ長と高速道路へのアクセス距離

のように影響しているかを調べることにした。すなわち、各トリップを、

$$\begin{aligned} \text{トリップ長} = & \text{アクセス距離} + \text{イグレス距離} \\ & + \text{高速道路利用距離} \quad (25) \end{aligned}$$

というモデルで表現する。高速道路を利用したトリップの中でトリップ長 60 km までの 1378 トリップについて高速道路へのアクセスに要した距離（オンランプまでの距離）を図-22 に示し、高速道路を下りてトリップ終点に到達するまでのイグレス距離（オフランプからの距離）を図-23 に散布図で示す。それぞれの結果に対してトリップ長に対して回帰分析を行った結果、分散が大きく、決定係数はそれぞれ 0.0575, 0.1239 と低い値となった。

一方、トリップ長に対しての高速道路の利用距離について回帰分析を行うと図-24 に示すように決定係数が 0.6357 と比較的高い相関を裏付ける値を示した。次に、アクセス距離、イグレス距離の分布は非対象性が強く正規分布と大きく異なるためトリップ長への依存性をさらに詳しく調べることにした。図-22、図-23 で示したアクセス距離、イグレス距離の分布に対してトリップ長を距離帯に分けて、それぞれ 50% タイル、80% タイ

図-23 トリップ長と高速道路からのイグレス距離

図-24 トリップ長と高速道路利用距離の関係

ル、95%タイル値を調べた。その結果を図-25に示す。この結果から、30 km 程度の距離帯まではアクセス距離、イグレス距離の各タイル値はトリップ長に対してほぼ線形に増加していることがわかる。なお、図-25の6本の折れ線グラフをそれぞれ線形回帰した場合の決定係数（ R^2 値）は0.72から0.984と高い値を示した。図-25からは、例えば旅行速度の低い距離帯である10～20 kmの距離帯のトリップではアクセス距離、イグレス距離ともに約7 km以上になると高速道路を利用する貨物車両はほとんど存在しなくなることを示している。この結果から高速道路の利用を促すためにはアクセス距離、イグレス距離が図-25の許容範囲に収まるような改善策が必要であることを示唆していると考えられる。

図-25 トリップ長と許容されたアクセス距離、イグレス距離の関係

4. おわりに

本稿ではプローブ情報から高速道路の利用実態を分析するために必要となる動的計画法を用いたマップマッチングアルゴリズムを提案した。次にこのアルゴリズムを2009年10月に取得した京阪神地域の貨物車両300台のプローブ情報に適用した。この結果、京阪神地域の貨物車交通の旅行速度が時速20 kmに満たない速度域で消費時間全体の70%以上を費やしているなど、効率面での課題を明確にした。さらに、一般道路と高速道路間のアクセス距離とイグレス距離の特性を分析し、貨物車両が高速道路を利用する際のアクセス、イグレス距離とトリップ長とに高い相関性を見出し、これらに上限値が存在する可能性を示した。今後はさらにこれらの結果をアンケートなどを併用して精査し、この上限値を物理的に超えないような都市高速道路網のあり方、料金施策によって等価的に抵抗を低減する等の検討が必要となる。

謝辞： 本研究を推進するにあたり、有益なご助言をいただき、プローブ実験にご協力いただきました、(社)関西経済連合会、(財)日本ロジスティックスシステム協会関西支部、(社)大阪府トラック協会、および、参加21社に深謝します。

なお、本稿中の図-8、図-12、図-13、図-14、図-15でデジタル道路地図データ（住友電工(株)）製を使用した。

参考文献

- 1) 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, 第 41 回土木計画学研究発表会 (春大会), 2010.6.
- 2) 玉川大, 横田孝義: 高速道路の通行止がトラックの都市内定期配送へ与える影響に関する分析, 第 41 回土木計画学研究発表会 (春大会), 2010.6.
- 3) Yokota, T. and Tamagawa, D.: An Analysis of Urban Freight Transport Behavior Using A Probe Car System - A Case Study of Keihanshin Area in Japan ?, WCTR Lisbon, Lisbon, 2010.
- 4) Tamagawa, D. and Yokota, T.: An Evaluation of Urban Road Network from a Viewpoint of Logistics by Using Probe Car Systems - A Case Study of the Keihanshin Area in Japan, The 3rd International Conference on Transportation and Logistics (T-LOG 2010), 2010.
- 5) Yokota, T. and Tamagawa, D.: Constructing Two-layered Freight Traffic Network Model from Truck Probe Data, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-11, 2011.
- 6) Figliozzi, M.: Analysis of the Efficiency of Urban Commercial Vehicle Tours Data Collection Methodology, and Policy Implications, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, No. 9, pp. 1014-1032, 2007.
- 7) Figliozzi, M.: The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics and costs, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, Issue 4, pp. 496-506, July 2010.
- 8) Greaves, S. P.: Collecting Commercial Vehicle Tour Data with Passive Global Positioning System Technology, *Transportation Research Record*, No. 2049, pp. 158-166, 2008.
- 9) Fitzgerald, C., Zhang, J. and Stopher, P.: Processing GPS Data From Travel Surveys, International Global Navigation Satellite Systems Society (IGNSS) Symposium, Gold Coast, Australia, 2006.
- 10) Holguin-Veras, J.: Observed Trip Chain Behavior of Commercial Vehicles, *Transportation Research Record*, Vol. 1906, pp. 74-80, 2005.
- 11) Browne, M., Allen, J., Steele, S., Cherrett, T. and McLeod, F.: Analysing the results of UK urban freight studies, *Proceedings of the 6th International Conference on City Logistics, Puerto Vallarta*, pp. 79-99, 2009.
- 12) Christian, A., Daniele, P. and Louis, R. J.: Urban freight establishment and tour-based surveys for policy-oriented modelling, *Proceedings of the 6th International Conference on City Logistics, Puerto Vallarta*, pp. 161-177, 2009.
- 13) Qudus, 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, pp. 312-328, 2007.
- 14) Greenfield, J.: Matching GPS Observations to Locations on a Digital Map, In Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2002.
- 15) Miyashita, K., Terada, T. and Nishio, S.: A Map Matching Algorithm for Car Navigation Systems that predict User Destination, *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshop*, pp. 1551-1556, 2008.
- 16) 宮下浩一, 寺田努, 田中宏平, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーション装置のためのマップマッチング, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 75-86, 2009.1.
- 17) 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, October 2004.
- 18) 三輪富生, 木内大介, 山本俊行, 薄井智貴, 森川高行: 低コストプローブカーデータのオンラインマップマッチング手法の開発, 交通工学, Vol.44, No.3, pp.100-110, 2009.5.
- 19) Miwa, T. and Morikawa, T.: Analysis on Route Choice Behavior Based on Probe-Car Data, 10th World Congress on Intelligent Transport Systems, Madrid, 2003.
- 20) Makimura, K., Kikuchi, H., Tada, S., Nakajima, Y., Ishida H. and Hyodo, T.: Performance Indicator Measurement Using Car Navigation Systems, the 81th Transportation Research Board, CD-ROM, 2002.
- 21) 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行動調査手法, 土木学会論文集, No.663/IV-48, pp.95-104, 2000.7.
- 22) Kitamura, S., Yamamoto, T., Yoshii, T. and Miwa, T.: Descriptive Analysis of Detouring Traffic through Neighbourhood Streets Using Probe Car Data, 10th World Congress on Intelligent Transport Systems, Madrid, 2003.
- 23) 森脇啓介, 宇野伸宏, 塩見康博: バスプローブ情報を用いた所要時間分布影響要因分析, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, IV-005 (CD-ROM), 2009.
- 24) 京阪神都市圏交通計画協議会: 平成 18 年度京阪神都市圏総合都市交通体系調査報告書 物流に関する現状分析と施策検討編, 2007.

(2011. 2. 25 受付)

STUDY ON THE ROAD USAGE BEHAVIOUR OF FREIGHT VEHICLES IN KEIHANSHIN AREA BY USING PROBE DATA

Takayoshi YOKOTA and Dai TAMAGAWA

In order to be able to analyze the road usage behavior of freight vehicles from the GPS probe data, the authors developed an expressway usage detection algorithm by introducing a new dynamic programming based map-matching and route estimation algorithm. By applying the algorithm, the road use behaviour of 300 freight vehicles of Keihanshin area, Japan is made clear. One of the typical results shows that more than 80% of all VHT (vehicle hours travelled) was consumed with low speed driving at less than 20 km/h velocity. The length of access to expressways and the egress from them is crucial in choosing the expressway in freight vehicles' trips. It is shown that the thresholds of the length of access and egress is almost linear to the trip length they take. In order to increase the usage of expressway by freight vehicles, decreasing the length of the access and egress physically or by toll policy is desired.