

角度指標に基づく経路選択モデルと その実証分析

長崎 滉大¹・瀬尾 亨²

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: nagasaki.k.ab@m.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: seo.t.aa@m.titech.ac.jp

人々の経路選択には道路網そのものの形状が強く影響している。道路網の形状のうち、リンクの長さや接続関係などの指標はこれまで広く着目されてきた。一方、角度にまつわる指標はあまり着目されていない。角度にまつわる指標の中で、隣り合うリンク間の方角の変動という指標は経路選択に影響を与える可能性が高い。例えば、この指標の絶対値が大きい経路はUターンに近い挙動となり、旅行者に望まれにくい。この指標と人々の経路選択の関係性を見出すことで、経路選択における角度という指標の重要性を測れる。本研究では、これらの角度指標を効用関数に組み込んだ経路選択モデルを構築した。さらに、ETC2.0データから得られた都市規模のプロープデータに、提案したモデルを適用し分析した。

Key Words : route choice model, road network, angular indicator, utility function

1. はじめに

説明変数の選択は経路選択モデルにとって非常に重要である。従来より、リンクや経路全体の長さや、媒介中心性や次数中心性などの接続関係の指標は広く着目されてきた。一方、角度にまつわる指標はあまり着目されていない。角度にまつわる指標の中で、隣り合うリンク間の方角の変動という指標、すなわち曲がる角度という指標は経路選択に影響を与える可能性が高い。例えば、ドライバーは何度も右左折をするような経路選択を望まないと予想される。

角度に着目した研究として、Dalton¹⁾はVR空間上での被験者の経路選択を実験的に観測した。この実験では、被験者は正方形の領域内の複雑な道路網を、ある頂点から対角の頂点に移動する。その際、道路網や移動距離を最小にする経路については知らされておらず、目的地が対角線上にあることだけを知らされている。実験の結果として、被験者は各交差点ではなるべく大きく曲がらず、目的地の方角に向かってなるべく直進する経路を選ぶことが示されている。Duckham and Kulik²⁾はOD間で一番右左折する回数の少ない“simplest path”を提案した。さらに、“simplest path”は移動距離を最小にする経路に比べて16%ほど移動距離が大きいことを示した。Turner³⁾は各交差点で曲がる角度を重みとしてその和を最小にする

経路である“shortest angular path”を提案した。この研究では、ロンドン内の道路網で“shortest angular path”から計算される媒介中心性と、実際に観測された交通量を比較し、ある程度の相関を見出した。さらに、Manley et al.⁴⁾はロンドン内の2,970台のミニキャブから得られた677,411個の経路に対して、実際の経路と簡単な指標を用いたOD間の経路を比較した。具体的には、移動距離を最小にする経路、観測された旅行時間を最小にする経路、自由流での旅行時間を最小にする経路、右左折する回数を最小にする経路などを比較対象にした。比較の結果、右左折する回数と移動距離の積を最小にする経路が実際の経路と最も一致していた。また、時間を参照するモデルは他のモデルよりも実際の経路との乖離が大きいことを示した。

以上のように、曲がる角度の和を最小にするようなモデルや右左折する回数を最小にするようなモデルはいくつか提案されている。さらに、それらのモデルが単純な移動距離を最小にするようなモデルに比べて実際の経路選択を良く再現しているという結果も出ている。しかし、移動距離や時間の変数と、曲がる角度の変数のパラメータの比などについては議論されていない。さらには、曲がる角度を組み込んだ離散的な経路選択モデルも見られない。曲がる角度のみに基づくモデルに加えて、距離や時間の変数を導入した離散選択モデルを構築することで、

人々の経路選択行動をさらに精度よく予想できる可能性がある。

さらに、曲がる角度という道路網の形状にのみ依存する指標から選択されやすい経路を知ること、移動の効率が良い道路網の形状を議論できる可能性がある。道路網の形状によってOD間の直線距離と最小移動距離の差を議論する研究は存在する⁵⁾、最小移動距離ではなく角度的な指標で経路選択が行われることを示せば、さらに精度の高い道路網の移動効率性も議論できる。

そこで本研究では、距離の変数と曲がる角度の変数を組み合わせた経路選択モデルを構築し、各々のパラメータの値から双方の変数がどの程度経路選択に影響を与えるのか考察することを目的とする。

2. 経路選択モデル

(1) 曲がる角度の定義

本研究では、曲がる角度を θ とし、その定義を“曲がる前の進行方向と曲がった後の進行方向のなす角”とする。 θ の定義を図にしたものが図-1である。便宜上 θ の定義域は $(-\pi, \pi]$ とする。本研究ではこの θ を用いて曲がる角度の変数 x_θ を(1)のように定義する。

$$x_\theta = 1 - \cos \theta \quad (1)$$

θ が0のとき、すなわち曲がらず直進する場合は $x_\theta = 0$ となる。 θ が $\pi/2$ または $-\pi/2$ のとき、すなわち直角に曲がる場合は $x_\theta = 1$ となる。 θ が π のとき、すなわちUターンをする場合は $x_\theta = 2$ となる。 θ の余弦をとることにより、角度データを直接扱う際の不連続性などの問題を解決し、1から引くことで、すべての θ に対して非負の変数としている。

(2) Recursive Logitモデル

本研究では、Recursive Logitモデル⁶⁾（以後RLモデルと呼ぶ）を用いる。RLモデルは、ドライバーは今いるリンク k 上で、リンク k と接続している複数のリンク集合 $A(k)$ のうちから次のリンク a を決めるリンクベースのモデルである。このリンクベースの経路選択モデルと曲がる角度という指標の相性の良さからRLモデルを用いる。

(3) 効用関数

本研究では、リンク k 上での次のリンク a の効用関数 $v(a|k)$ を(2)のように定義する。

$$v(a|k) = \beta_l x_{l(a)} + \beta_\theta x_{\theta(a|k)} \quad (2)$$

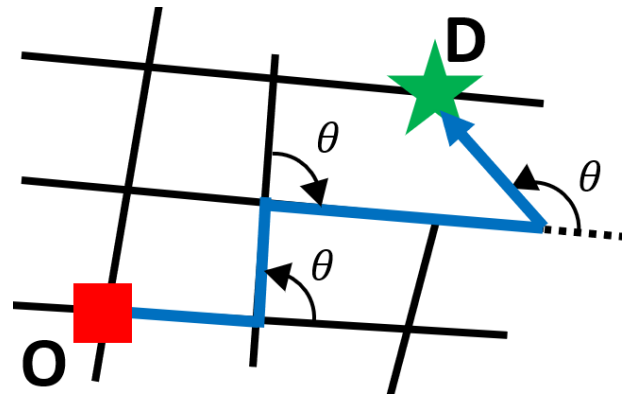


図-1 曲がる角度 θ の定義

ここで、 $x_{l(a)}$ はリンク a の長さ (m) , $x_{\theta(a|k)}$ はリンク k から次のリンク a への曲がる角度についての変数、 β_l 、 β_θ はそれぞれのパラメータである。モデルの都合上 $v(a|k)$ は0以下の値になるため、 β_l 、 β_θ は負の値になる。なお、旅行時間ではなくリンクの長さを用いている理由は、プローブデータのみを用いている本分析上の都合で、正確な旅行時間を算出することが難しいためである。

3. データ

本研究では、ETC2.0データから得られた車両軌跡データのうち、神戸市周辺の2次メッシュ (523502) 内のある平日の一日の全トリップのデータを用いる。ネットワークデータは、鍾ら⁷⁾で提案された手法を用いてプローブデータから道路ネットワークを成形したものを用いる。具体的なデータの処理方法は以下の手順で行った。

- 1) ETC2.0データのうち、2次メッシュ523502を通過するトリップ、もしくは領域内で完結するトリップを抽出する。
- 2) 1)の処理で抽出した車両軌跡データに対して、鍾ら⁷⁾の手法を用いて道路ネットワークを成形し、マップマッチングを行う。以後マップマッチング後のデータをトリップデータと呼ぶ。
- 3) 各トリップデータのうち、最初のノードより前のデータと最後のノードより後のデータを削除し、最初のノードをトリップの起点、最後のノードを終点とする。
- 4) 同じノードを二回以上通っているトリップデータを削除する。
- 5) 各リンクに対して、交通量が一定以下のリンクを通るトリップデータを削除する。
- 6) 実際の地図と比較して明らかに現実と一致しないリンクを削除、置換し、トリップデータに反映する。

1),2)の操作により, 車両軌跡データのみから道路ネットワークのデータと各車両がどのリンクを通っているのかというトリップデータを得る. 3)の操作により, トリップの起終点を明確にしている. 4)の操作により, 寄り道をしているなどの明らかに通常の経路選択をしていないデータを除く. 5)の操作により, これにより明らかに道路が存在しないところを通過しているトリップデータをある程度削除する. 6)の操作により, 交差点を数個飛ばしてしまっているデータなどを修正している. 以上の手順で成形した道路ネットワークを図-2に示す. リンクの太さは交通量に対応している. ノード数は303個, リンク数は730本, トリップ数は11,797個である.

また, 実際の道路網を図-3に示す. 図-2内の中央と南部を東西を貫く二本の交通量の多い道路は高速道路とその下を走る国道であり, そのほかにも東西を貫く幹線が存在する. また, 南部分には島が点在し, その島と本土をいくつかの道路で繋いでいる.

本研究では, 曲がる角度 θ は曲がる前と曲がる後のリンクの両端点の偏角同士の差から計算する. そのため, 本研究では交差点以外でのリンクの線形, すなわちカーブは一切無視している.

4. 分析結果

(1) 基礎分析

3章のデータについて, 全ての $x_{l(a)}$ と $x_{\theta(a|k)}$ のヒストグラムを図-4に示す. $x_{l(a)}$ は平均345.7 mで, 最大値は1500.2 mである. 8割程度のリンクが長さ100 mから500 mに分布する. $x_{\theta(a|k)}$ は0付近と2付近に多く分布する. これは直進とUターンを意味している. また, 直角に曲がることを意味する1付近にも多く分布しており, $0.7 < x_{\theta(a|k)} < 1.3$ の間に3割程度が分布している. なお, $0.7 < x_{\theta(a|k)} < 1.3$ とはおおよそ 70° から 110° 曲がることを意味する.

(2) 推定結果

3章のデータを用いて2章の経路選択モデルを推定した結果を表-1に示す.

t 値によると, 双方のパラメータが有意である. パラメータの比は $\beta_\theta/\beta_l = 5.062 \times 10^3$ となり, これは一回の直角の右左折が約5 kmの移動に相当することを意味する. 非常に大きい値になった理由として, 領域内を東西に貫く幹線が高速道路を含め複数存在し, その道路の影響で右左折する回数が非常に少ないためだと考えられる.

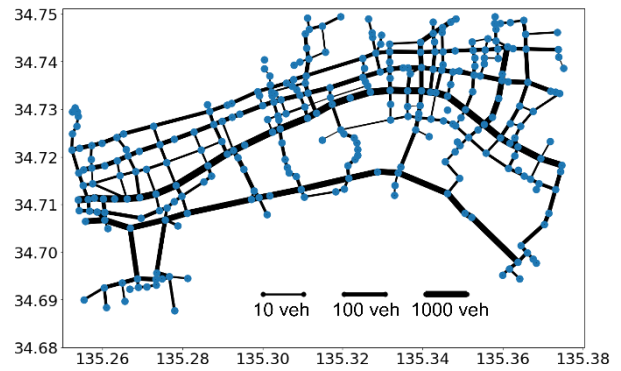


図-2 成形後の道路ネットワーク
(横軸: 経度, 縦軸: 緯度)



図-3 対象領域の地図
(国土地理院: 地理院地図に筆者が加筆)

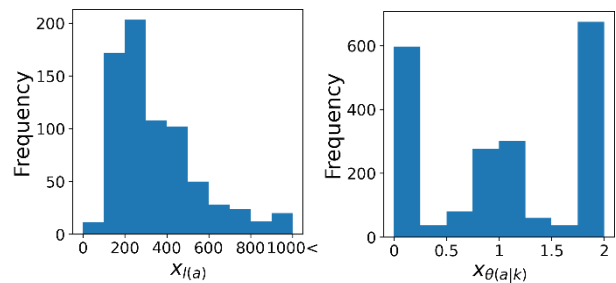


図-4 $x_{l(a)}$ (左) と $x_{\theta(a|k)}$ (右) のヒストグラム

表-1 推定結果

	推定値	標準誤差	t 値
β_l	-5.658×10^{-4}	3.015×10^{-5}	-18.8
β_θ	-2.864	2.661×10^{-2}	-107.6
サンプル数			11,797
LL($\hat{\beta}$)			-6367

(3) 経路選択の一致度

得られたモデルがどの程度実際の経路選択を反映しているかを測る指標として, 既往研究⁴⁾で用いられていた, (3)で与えられる一致度 CO_n を導入する.

$$CO_n = \frac{\sum_{a \in M_n} \delta_a^s x_{l(a)}}{\sum_{a \in S_n} x_{l(a)}} \quad (3)$$

ここで、 S_n はトリップ n で実際に選択された経路内の全リンクの集合、 M_n はトリップ n でモデルによって得られた経路内の全リンクの集合、 $x_{l(a)}$ はリンク a の長さ、 δ_a^s はリンク a が S_n に含まれる場合に1、含まれない場合には0となる二値変数である。すなわち、 CO_n はモデルで選ばれた経路内のリンクと実際に選択された経路内のリンクの中で一致しているリンクの長さの合計を、実際に選択された経路の全体の長さで除したものである。モデルによって得られた経路が実際に選択された経路に完全に一致している場合は CO_n は1になる。

推定されたパラメータを代入した効用が常に最大になるリンクのみを選んだ場合の全11,797個のトリップの CO_n についてまとめたものを表-2に示す。また、全体の平均は91.76%であった。大部分のトリップに対して完全に一致する経路を再現できているといえる。トリップごとの詳細な分析、考察は次章の比較にて行う。

5. 他のモデルとの比較, 考察

(1) 比較するモデル

本研究で提案したモデル（モデルAと呼ぶ）と、距離 $x_{l(a)}$ の和のみを最小にする経路（モデルB）、曲がる角度の変数 $x_{\theta(a|k)}$ の和のみを最小にする経路（モデルC）、移動距離と右左折する回数の積を最小にする経路（モデルD）を比較する。なお、 $x_{\theta(a|k)}$ の値が0.5以上になったとき、すなわち $\pm\pi/3$ 以上曲がった場合を右左折したと判断する。 $x_{\theta(a|k)}$ の値が0.5以上ものは全体の約7割である（図-4）モデルBは普遍的に用いられている移動距離を最小にするモデル、モデルCはTumer³⁾で提案されている”shortest angular path”，モデルDはManley⁴⁾で最良のモデルとされているものである。

(2) 各モデルの比較結果

各モデルについて計算した CO_n の一覧を表-3に示す。平均を見ると、モデルAの CO_n が一番高い。ただ、モデルC、モデルDとの差はごくわずかである。さらに、完全に一致している経路の割合はモデルAよりもモデル

表-2 提案したモデルの CO_n の分布

CO_n	トリップ数	割合
0	293	2.48 %
(0,1)	1520	12.88 %
1	9984	84.63 %

Dの方が高い。しかし、モデルDはまったく一致していない経路の割合も一番高いため、平均でモデルAより劣っている結果が得られた。

なお、全体的にかなり CO_n が高くなっているのは、前述のように領域内を東西に貫く幹線が複数存在し、その道路のみで完結するトリップはどのモデルでもすべて同じ経路となるためである。

(3) トリップごとの各モデルでの経路比較

モデルBが最も CO_n が低く、ほかの三つのモデルの CO_n が1であったトリップを図-5に示す。四角い点がトリップの起点、星印の点がトリップの終点で、赤線が実際に選択された経路、黄線がモデルA、Dで最適となる経路。緑線がモデルBで最適となる経路である（これ以降の図も同様）。なお、本論文で紹介するODではモデルA、Dで最適となる経路はすべて一致したため、色の区別はしない。

選択された経路は右左折する回数が一度の右折のみであり、それによりモデルA、C、Dも同じ経路が最適になっている。しかし、右左折するとき若干の迂回をしているため、モデルBではなるべくOD間を直線的に結ぶ経路を選ぶことにより、移動距離を最小にしている。実際、モデルA、C、Dの経路の移動距離が12,022 mなのに対して、モデルBの経路の移動距離は10,994 mである。しかし、モデルBの経路では計4回の右左折をしているため、モデルA、C、Dの観点では選ばれにくい経路となっている。

表-3 各モデルの CO_n の値の分布と平均

モデル	CO_n の分布			CO_n の平均
	0	(0,1)	1	
A	2.48 %	12.88 %	84.63 %	91.76 %
B	2.14 %	23.87 %	73.98 %	87.09 %
C	2.43 %	12.98 %	84.59 %	91.75 %
D	2.56 %	12.67 %	84.77 %	91.73 %

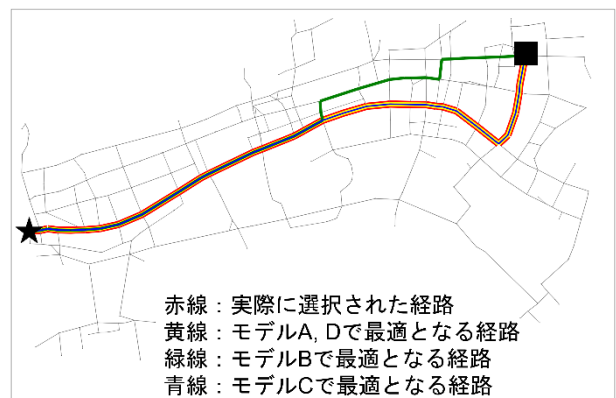


図-5 モデルBの CO_n のみが低い例



図-6 モデルA,Dの CO_n のみが高い例

次に、モデルAとDの CO_n が1で、その他のモデルの CO_n が低いトリップを図-6に示す。モデルBの結果は図中央のカーブのような軌跡を通っており、その前後でも複数回の右左折をしているため、移動距離は短いが曲がる角度の変数の値が大きくなってしまっている。モデルCの経路は、二回の右折のみ以外はほぼ直線的な経路になっているため曲がる角度の変数の和は2.017であるが、遠回りをしてしまっており、移動距離は9,845 mである。一方、モデルA, Dの経路は同様に二回の右左折であり、二度目の左折で直角以上に曲がっているため曲がる角度の変数の和は2.413であるが、モデルCに比べて移動距離が短く、7,588 mである。そのため、4章で推定したパラメータを代入した効用について、モデルCの経路は11.35で、モデルA, Dの経路は11.20となっている。モデルA, Dで最適となった経路が実際に選択された経路になっている。

最後に、モデルAの CO_n が低かった例を図-7に示す。実際のトリップでは近道である南側の経路を利用しているのに対して、モデルA, C, Dでは北側に迂回し、右左折する回数を減らした経路が最適となる。実際のトリップの移動距離は8,198 mなのに対して、モデルA, C, Dの経路は9,918 mとなっている。また、実際のトリップの曲がる角度の変数の和は右左折の回数が多いため3.859となり、モデルA, C, Dの経路は右左折の回数が少ないため2.169となっている。効用については曲がる角度の変数が強く効いているため、前者は15.69、後者は11.82となっている。

(4) 全体の考察

曲がる角度と移動距離の双方を考慮するモデルAは、実際の経路選択行動をかなり良く再現できている。しかし、曲がる角度のみを最小にするモデルCや曲がる回数に基づくモデルDも、ほぼ同程度のパフォーマンスを示している。現状の分析ではモデルAがモデルCやDよりも優れているとは結論付けられない。図-6のように、移

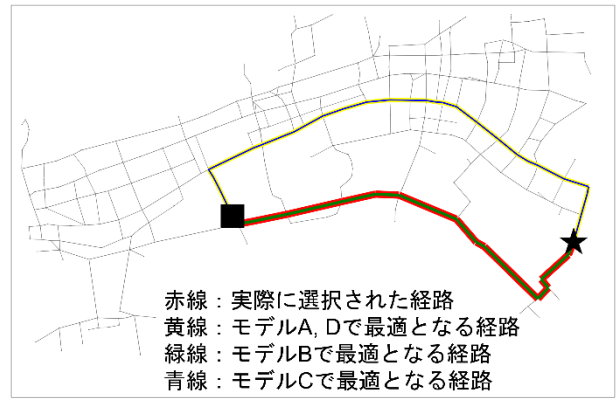


図-7 モデルA,C,Dの CO_n が低い例

動距離のパラメータを導入することにより実際の経路選択を再現できるケースもあるが、全体の平均を見る限りこのようなことはかなり稀である。

また、実際に選択された経路での $x_{\theta(a|k)}$ の和を横軸に、 $x_{l(a)}$ の和を縦軸にして、全モデルの CO_n が1ではなかった経路の散布図を色分けしたものを図-8に示す。点の数は1886個である。実際に選択された経路の $x_{\theta(a|k)}$ の和が1程度よりも小さい場合はモデルAが、1から2程度だとモデルDが、それ以上だとモデルBが優位である。この理由は、 $x_{\theta(a|k)}$ の和が1程度よりも小さいというのは概ね右左折する回数が2回以下であることを意味し、そのような経路は $x_{\theta(a|k)}$ を小さくするモデルAが優位になるためである。また、それ以上では極端に $x_{\theta(a|k)}$ を小さくしてしまうモデルAはほかのモデルに劣るためであると思われる。

これらのように $x_{\theta(a|k)}$ がかなり強く効用関数に効いている理由は、そもそもとして用いているデータがかなり直線的な動きをするトリップが多く、実際の経路選択で

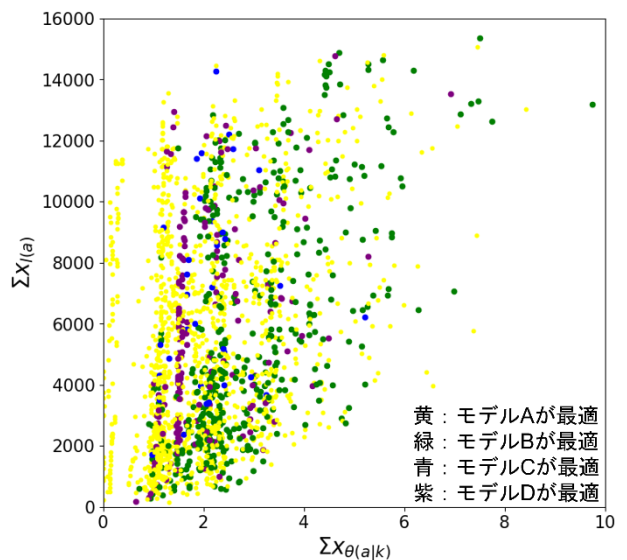


図-8 実際の経路の $x_{\theta(a|k)}$ の和と $x_{l(a)}$ の和と CO_n の関係

右左折をするであろう起終点付近のデータがあまり多くないためであると予想できる。事実、この領域は神戸市と大阪府の中間地点に位置する領域であり、双方の都市圏を起終点としたトリップが多く通過していることが予想される。そのようなトリップが大半を占めるデータでは、角度変化を極度に抑えると評価されてしまう可能性が高い。特に、曲がる角度についてのパラメータは、直進して通過するトリップが多い場合はかなり絶対値の大きい値が得られてしまう。今後、ほかの領域やさらに大きな領域で同じ分析を行うことで、より一般的なモデルを構築することが期待される。

5. 結論

本研究では、ネットワーク上の経路選択挙動に関して、曲がる角度についての変数を導入し、従来から用いられてきた移動距離に関する変数との線形結合を効用関数とするモデルを考案した。そのモデルのパラメータを、プローブデータから得られた実際の経路選択行動のデータから推定し、移動距離のみに基づくモデルよりも高い精度で実際の経路選択行動を再現することを確認できた。さらに、曲がる角度のパラメータは移動距離に関するパラメータよりも経路選択行動に強い影響を与えていることが確認できた。

本研究では神戸市と大阪府の中間地点の領域のデータからパラメータ推定を行ったため、角度変化を極度に抑えると評価されてしまった可能性がある。そのため、角度変化量のみに基づくモデルもほぼ同様の精度を示したと考えられる。今後、ほかの領域での分析によって、より一般的なモデルの構築ができる可能性がある。

ただ、幹線道路はそもそもとして多くの利用者が少ない右左折の回数で目的地に辿り着けるように設計されたものである。曲がる角度という指標が経路選択に影響を与えることは既往研究や本研究でも証明されているため、幹線道路によっていかに利用者の移動が効率的になっているかを分析することも可能であり、さらには道路網全体の移動効率性の議論も可能になる。

さらに、本研究では離散選択モデルを用いているため、利用者全体の経路の選択確率を求めることが可能である。その選択確率を用いた、利用者の配分問題に発展させることも可能である。

謝辞: 本研究を行うにあたり、データ作成の一部を東京工業大学の鍾恒毅氏に協力していただいた。ここに深く感謝の意を表す。本研究の一部は、国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」における研究「ETC2.0データの活用と評価を通じた次世代ETCの基本設計提案」（代表：井料隆雅）の協力のもとで実施した。また、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費（特別研究員奨励費：22J11294）の助成により行われた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Dalton, R.C.: The secret is to follow your nose: Route path selection and angularity, *Environment and Behavior*, Vol. 35, No. 1, pp.107-131, 2003.
- 2) Duckham, M., and Kulik, L.: "Simplest" paths: automated route selection for navigation, *International Conference on Spatial Information Theory*, pp. 169-185, Berlin, Heidelberg, 2003.
- 3) Turner, A.: From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis, *Environment and Planning B: planning and Design*, Vol. 34, No. 3, pp.539-555. 2007.
- 4) Manley, E.J., Addison, J.D. and Cheng, T.: Shortest path or anchor-based route choice: a large-scale empirical analysis of minicab routing in London, *Journal of transport geography*, Vol. 43, pp. 123-139, 2015.
- 5) Boeing, G.: The morphology and circuitry of walkable and drivable street networks, *The mathematics of urban morphology*, pp. 271-287, Birkhäuser, Cham. 2019.
- 6) Fosgerau, M., Frejinger, E., and Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, pp. 70-80, 2013.
- 7) 鍾恒毅, 中西航, 安田昌平, 井料隆雅: 大規模車両軌跡データのみを用いた主要交差点抽出, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 64, CD-ROM, 2021年12月.
- 8) 鍾恒毅, 中西航, 安田昌平, 井料隆雅: 車両軌跡データのみを用いた主要交差点抽出, *GIS-理論と応用*, Vol. 30, No. 2, pp. 7-18, 2022.

(2022.??受付)

ROUTE CHOICE MODEL BASED ON ANGULAR INDICATOR AND CASE STUDY

Kota NAGASAKI and Toru SEO