

SV用ナビゲーションシステムにおけるリンク重み計算について

庄子 隼人[†] 間邊 哲也[†] 長谷川孝明[†]

[†] 埼玉大学 大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

E-mail: †{shoji,manabe,takaaki}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、SV用ナビゲーションシステムの実現に向けて、SVプローブデータにもとづくリンク重みの計算法を提案している。まず、収集済みのSVプローブデータについて、制限速度、幅員区分、車線数および中央線の有無、歩道の有無、勾配、信号設置密度、交差点密度、1kmあたりの右左折回数の観点で解析を行っている。次に、解析結果にもとづき、リンク重みの算出式を示している。最後に、提案手法、既存手法(市販カーナビゲーションシステム、自転車用ナビゲーションアプリ)のそれぞれで提示された3種類の経路に対して、実車走行を行い、走りやすさなどの観点でアンケートによる三者比較を行い、提案手法によって算出された経路の有効性を示している。

キーワード 超小型低速車両, SV用ナビゲーション, 経路計算, 三者比較, SVプローブデータ

On Link-Weight Calculation of Slow Vehicle Navigation Systems

Hayato SHOJI[†], Tetsuya MANABE[†], and Takaaki HASEGAWA[†]

[†] Saitama University 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

E-mail: †{shoji,manabe,takaaki}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract This paper presents a link-weight calculation method based on slow-vehicle (SV) probe data for realizing SV navigation systems. First, we analyze the SV probe data from the viewpoint of limiting speed, road width class, the number of traffic lanes, presence/absence of sidewalks, incline, traffic light density, intersection density, and the number of turns. Next, the link-weight calculation formula is shown based on the analysis results. Last, we carry out the experiment for evaluating the effectiveness of the routes computed by the proposed method. The tripartite comparison results show the route computed by the proposed method is more preferred than the commercially available car navigation system and the smartphone application for bicycle.

Key words Slow vehicle, SV navigation, Route calculation, Tripartite comparison, SV probe data

1. まえがき

人のモビリティの確保は、経済活性化に加えて、人がいきいきと生きるために必要であるが、高齢化・生産年齢人口比率が低下した社会では、増加する高齢者や免許を持たない若年者の移動支援(送り迎え)を、少ない生産年齢層が担わなくてはならず、生産年齢層が本来行うべき生産活動への影響が懸念される。そこで、高齢者自身・若年者自身の自立的な移動の確保、つまり、高齢者・若年者の中でも自立的に移動できる層(自立移動可能者層[1])を拡大させ、生産年齢層の負担を軽減させる必要があると筆者らは考えている(図1)。自立移動可能者層を増やすためのアプローチの一つとして「超小型な低速車両(Slow Vehicle; SV)」の導入が考えられる。

SVは、徒歩・自転車と自動車との中間のパーソナルな移動手段として注目されている。例えば、文献[2]では、超小型電気自動車を用いた社会実験が行われており、徒歩/自転車/電動

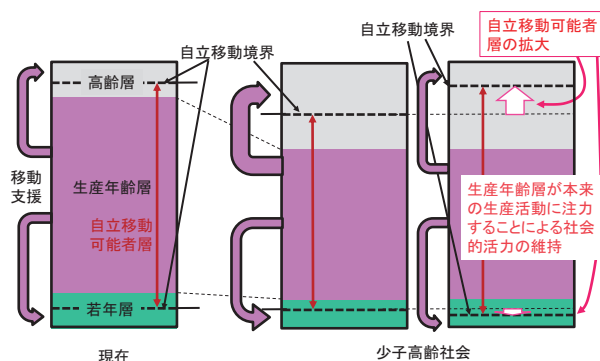


図1 高齢化・生産年齢人口比率低下社会における自立移動可能者層の拡大の意義[1].

アシスト自転車/超小型電気自動車/自動車というマルチモーダルな移動環境下での人々の交通モード選択や外出行動の変化から、スローモビリティ普及には走行環境の整備が鍵となること

が示されている。また、自動車走行指導帯を自転車および超小型車両のための「スローモビリティ・レーン」として活用した走行実験により、超小型電気自動車の走りやすさ、安全性、共存性が示唆されている。筆者らは文献[3]~[5]において、今後自転車に加えて超小型電気自動車のような低速車両が普及し、現在の歩行者(P)/自動車(V)の2モード交通社会から、歩行者(P)/自転車を含む低速車両(SV)/自動車(V)のレーン分離された3モード交通社会への移行に鑑みて、P/SV/Vの3モード交通社会実現に向けた知見提供を目的に、VからSVへのモダリティシフトが交通流に与える影響についてコンピュータシミュレーションが行っている。

また筆者らは、SVの普及・社会定着に必要な要件の一つとして挙げられる「SVが安全かつスムーズに走行できる環境の実現」に向けて、SVの走行実績からそれらの知見を獲得するためのツールとして「SVプローブデータの収集・解析基盤」を構築している[6]。そして、SVプローブデータの収集・解析例として、OD(origin-destination)指定時における交通モードと通行道路種の関係などから、本ツールの利用可能性を示唆している。本稿では、このSVプローブデータの収集・解析基盤を用いて、SV用ナビゲーションシステムの経路算出に必要なリンク重みの計算法を提案する。

2. 関連研究

2.1 既存ナビゲーションシステムの経路計算

市販のカーナビゲーションシステムでは、最短距離などの静的な経路探索が中心であったが、VICS(Vehicle Information and Communication System)の登場によって渋滞を避けた動的な経路探索が行えるようになった。2003年以降は、車両から収集するプローブデータを用いることで、高度な経路探索が行えるようになった。例えば、ホンダ社製インターナビ^(注1)では、プローブデータから算出したリンク旅行時間をもとに、現在地から目的地までのリンク旅行時間の合計値が最小となるような経路の探索が行われている[7],[8]。この他にも、有料道路の最新の料金データと所要時間のバランスを考慮した経路探索なども可能となっている。

文献[9]では、市販のカーナビゲーションシステムの経路探索機能に関する調査が行われており、ドライバの好みを反映させるものとして、道幅優先、直進優先なども一部存在するが、多くの場合、距離優先、時間優先、料金優先であり、ドライバの複数の好みを反映させる経路ではないことが示されている。

2.2 経路選択

文献[9]では、前述の市販カーナビゲーションシステムの経路探索機能に関する調査に加えて、ドライバの経路選択の好みに関するアンケート調査が行われている。重要視する項目として、距離が短い、幅員が広い、視野が良い、信号機が少ない、曲がる回数が少ない、走り慣れた道(経験値)、平均速度が高い、渋滞が少ない、急カーブ・事故が少ない(注意地点)などが挙げられている。また、時間帯による好みの変化も示されており、朝

(注1) : <http://www.honda.co.jp/internavi/>

表1 文献[10]における因子分析結果(一部)

第1因子 (円滑性・空間余裕)	交差点数, 信号数, 待ち時間, 路肩や歩道の広さ, 最短距離で行ける, 歩行者の少なさ
第2因子 (見通し・路面)	景観の良さ, 見通しの良さ, 路面の走りやすさ
第3因子 (走行障害)	路上駐車・駐輪がない, 段差が少ない
第4因子 (外的負荷)	夜間明るくて走りやすいこと, 上り坂がない
第5因子 (構造分離)	自転車道がある, 地下道を通らない
第6因子 (他車との接触)	歩道橋に上がらない, 自動車交通量の少なさ

表2 彩りイヴの実道走行実験におけるアンケート結果

走りやすい道	人通りや交通量の少ない道, 凹凸や段差の少ない道, 右折がしやすい道
通るのを避けたい道	人通りや交通量の多い道, 車線数の多い道, 凹凸や段差の多い道

は速度や時間, 昼は距離や経験値, 夜は速度や時間に加えて, 幅員, 経験値, 注意地点であった。

文献[10]では、自転車利用者が経路選択時に考慮すると思われる要因(計20項目)に対してアンケート調査を実施し、因子分析に基づく経路選択影響要因の把握がなされている。結果の一部を表1に示す。

また筆者らは、SVの一例として、(有)タケオカ自動車工業の超小型電気自動車「ルーキー」^(注2)をベースとした「彩りイヴ」(例えば文献[11])を対象に実道走行実験を行っている。彩りイヴは、原動機付自転車免許で運転可能であり、最高速度が機構的に30km/h強に厳しく制限されている。彩りイヴによる実車走行後のアンケート調査では、被験者が走りやすい道、通るのを避けたい道として、表2のような要素が挙げられている。

2.3 SVプローブデータ

文献[6]では、SVの走行実績からSVが安全かつスムーズに走行できる環境の実現に資する知見を獲得するためのツールとして「SVプローブデータの収集・解析基盤」が構築されている。SVプローブデータ収集基盤では、表3に示す各種情報を収集している。SVプローブデータ解析基盤では、SVプローブデータ収集基盤で収集した緯度経度情報に対して、逆ジオコーディングを行った後、それらを高速道路、国道(路線番号別)、都道府県道(路線番号別)、その他(細街路等)で分類し、解析を行っている。

3. SVプローブデータの解析

本稿では、文献[6]で収集されたSVプローブデータについて

(注2) : <http://www.takeoka-m.co.jp/rookie.html>

(注4) : 全国パーソントリップ(Person Trip; PT)調査で一般的に用いられる9項目

(注4) : Open Weather Map API (<http://openweathermap.org/api>)で取得可能な各種気象データ

表 3 文献 [6] で収集している SV プローブデータ

被験者属性 ^(注3)	氏名, 住所, 勤務先・通学先, 性別・年齢, 職業, 職種, 免許保有の有無, 運転頻度, 自宅の最寄り駅・バス停
移動情報	緯度経度, タイムスタンプ
トリップ特性	出発施設, 目的施設, 移動手段, 移動目的, 時間的制約の有無
気象情報 ^(注4)	データ取得日時, 都市名, 天気, 詳細天気, 気温, 最低気温, 最高気温, 湿度, 気圧, 風速, 風向, 降水量 (1 時間, 24 時間), 雲量

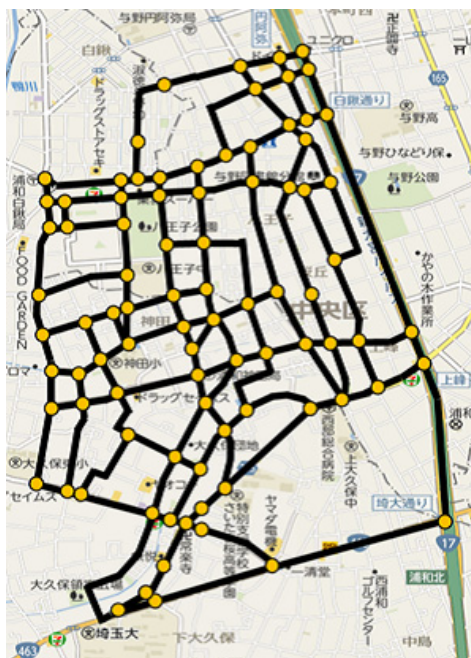


図 2 解析対象の道路ネットワーク。

解析を行う。データ収集期間は、2015 年 11 月 11 日～2015 年 11 月 20 日で、被験者は、普通自動車免許を所有する 22～26 歳の男性 7 名 (日常生活における普通自動車の運転頻度は、週 2・3 回程度が 2 名、ほとんど運転しないが 5 名) である。データ収集は、2 種類の OD に対して、3 種類の交通モード (自転車, 彩りイヴ, 自動車) でそれぞれ 1 往復した。収集された SV プローブデータは、7(被験者) × 2(OD) × 3(交通モード) × 2(往復分) = 84 トリップ分であるが、データが一部欠損していた 1 トリップ分を除く 83 トリップ分を用いる。

解析対象の道路ネットワークを図 2 に示す。収集した SV プローブデータにおける走行実績から作成したもので、92 のノード, 132 のリンクが含まれている。

解析を行う要素は 2.2 で挙げた項目に鑑み、地形や道路構造によって決定する 8 項目 (制限速度, 幅員区分, 車線数および中央線の有無, 歩道, 勾配, 信号設置密度, 交差点密度, 1km あたりの左右折回数) とした。解析には、一般財団法人 日本デジタル道路地図協会より提供を受けた「全国デジタル道路地図研究用データ (さいたま市) (以下, DRM), Yahoo! Japan 社が提供する経路作成・共有サービス「ルートラボ」^(注5) (以下,

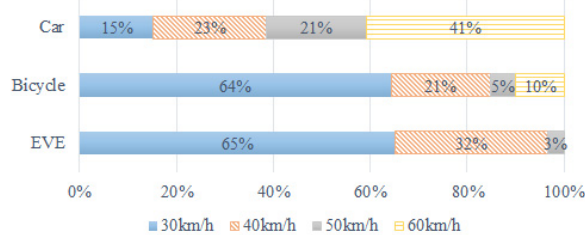


図 3 制限速度による解析結果。

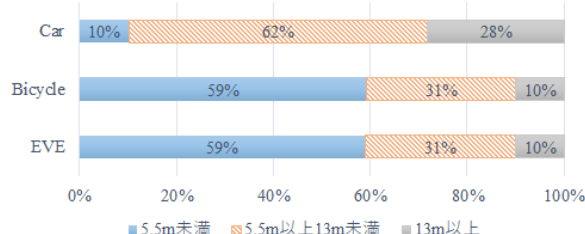


図 4 幅員区分による解析結果。

LLL), Google 社が提供する Google Earth^(注6) (以下, GE), および, Google ストリートビュー^(注7) (以下, GS) を用いた。

3.1 制限速度

収集した SV プローブデータに対して、各リンクの制限速度を取得し、解析を行った。制限速度情報の取得方法は、DRM のリンク情報内の交通規制情報の規制速度コードより取得した。DRM に規制速度コードが記載されていない一部リンクについては、GE および GS を用いた。解析対象の 83 データについては、モード別に各制限速度の総走行距離の割合を算出したものを図 3 に示す。

3.2 幅員区分

各リンクの幅員区分を取得し、解析を行った。幅員区分情報の取得方法は、DRM のリンク情報内の幅員区分コード (3m 未満, 3m 以上 5.5m 未満, 5.5m 以上 13m 未満, 13m 以上の 4 段階で登録されている) より取得した。解析対象の 83 データについては、モード別に各幅員区分の総走行距離の割合を算出したものを図 4 に示す。

3.3 車線数および中央線の有無

各リンクの車線数および中央線の有無を取得し、解析を行った。車線数および中央線の有無に関する情報は、GE を用いて取得した。片側 1 車線 (中央線なし), 片側 1 車線 (中央線あり), 片側 2 車線以上の 3 区分について、モード別の総走行距離の割合を算出したものを図 5 に示す。

3.4 歩道の有無

歩道の敷設状況によって解析を行った。歩道の敷設状況は GE によって取得した。ここで、歩道敷設率 k_t , および、解析対象の道路ネットワーク全体の歩道敷設率 K を、式 (1) および式 (2) でそれぞれ定義し、収集した SV プローブデータの各トリップについて k_t を算出した。 k_t が K 未満, K 以上の 2 区分に

(注6) : <https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>

(注7) : <https://www.google.co.jp/intl/ja/streetview/>

(注5) : <https://latlonglab.yahoo.co.jp/route/>

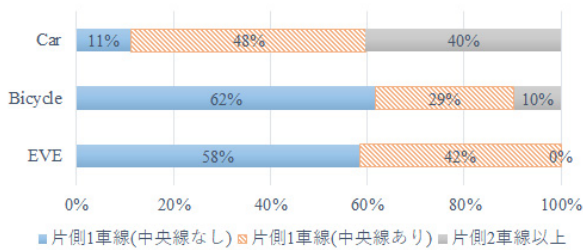


図5 車線数および中央線の有無による解析結果.

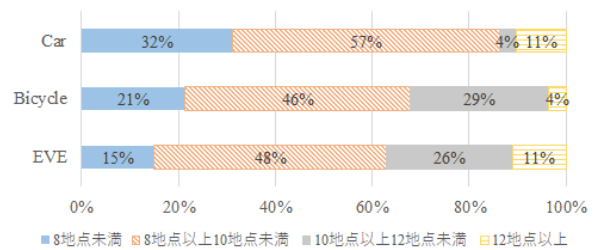


図8 交差点密度による解析結果.

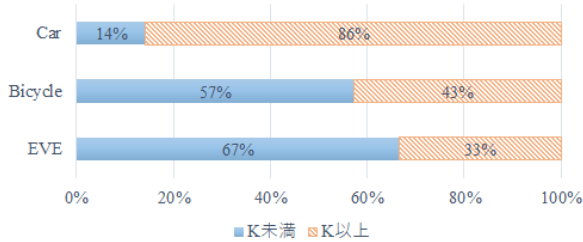


図6 歩道の有無による解析結果.

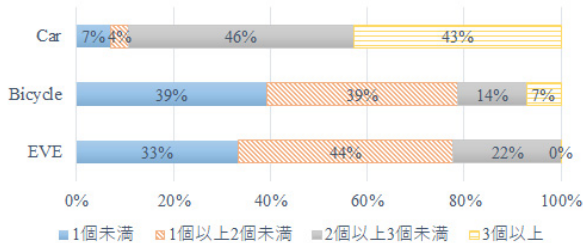
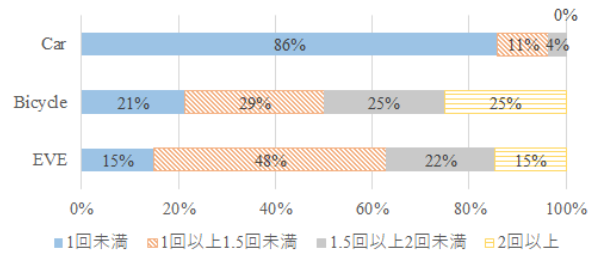
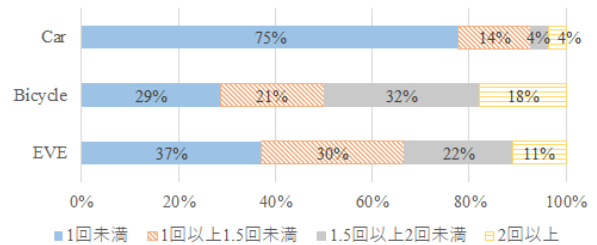


図7 信号設置密度による解析結果.



(a) 左折



(b) 右折

図9 1kmあたりの右左折回数による解析結果.

ついて、各モードの解析結果を図6に示す。

$$k_t = \frac{\text{移動経路中で歩道が併設されているリンクのリンク長}}{\text{移動経路の経路長}} \quad (1)$$

$$K = \frac{16,852[m]}{56,936[m]} = 0.296 \quad (2)$$

3.5 勾配

2.2でも述べた通り、自転車においては上り坂の考慮が重要である。そこで、解析対象の道路ネットワーク内の各リンクについて、リンク長と標高差をDRMから取得し、平均勾配を算出した。収集したSVプローブデータにおいて平均勾配1%以上の上り坂の通行回数は、イヴが19回、自転車が13回であった。

3.6 信号設置密度

SVプローブデータの移動経路内に含まれる信号数を経路長で割ったものを信号設置密度(1kmあたりの信号設置数)と定義し、解析を行った。信号数はLLL、経路長はDRMを用いて取得した。1kmあたり1個未満、1個以上2個未満、2個以上3個未満、3個以上の4区分について、各モードの解析結果を図7に示す。

3.7 交差点密度

SVプローブデータの移動経路内で通過した交差点数を経路

長で割ったものを交差点密度(1kmあたりの通過交差点数)と定義し、解析を行った。交差点数および経路長はDRMを用いて取得した。1kmあたり8地点未満、8地点以上10地点未満、10地点以上12地点未満、12地点以上の4区分について、各モードの解析結果を図8に示す。

3.8 1kmあたりの右左折回数

SVプローブデータの移動経路内での1kmあたりの右左折回数について解析を行った。右左折回数はLLL、経路長はDRMを用いて取得した。1kmあたり1回未満、1回以上1.5回未満、1.5回以上2回未満、2回以上の4区分について、各モードの解析結果を図9に示す。

4. SVプローブデータにもとづくリンク重み計算

4.1 リンク重み計算

本稿では、単一リンクによって決定される要素、具体的には、制限速度、幅員区分、車線数および中央線の有無、歩道の有無、勾配の5要素を用いて、リンク重み $W_{n,mode}$ を式(3)より算出する。ここで、 l_n は n 番目のリンクのリンク長である。なお、単一リンクとその両端のノードによって決まる要素(信号設置密度、交差点密度)、複数リンクの組み合わせによって決定される要素(1kmあたりの右左折回数)については今後の課題とする。

$$W_{n,mode} = l_n \times \prod_{i=0}^4 w_{i,n,mode} \quad (3)$$

制限速度による係数 $w_{0,n,mode}$ は、式 (4) より算出する。 $a_{v,n,mode}$ は当該モード ($mode$) における n 番目のリンクの制限速度の相対度数、 $a_{v,max,mode}$ はそのモードにおける相対度数の最大値である。

$$w_{0,n,mode} = \frac{a_{v,max,mode}}{a_{v,n,mode}} \quad (4)$$

幅員区分による係数 $w_{1,n,mode}$ は、式 (5) より算出する。 $a_{w,n,mode}$ は当該モード ($mode$) における n 番目のリンクの幅員区分の相対度数、 $a_{w,max,mode}$ はそのモードにおける幅員区分の最大値である。

$$w_{1,n,mode} = \frac{a_{w,max,mode}}{a_{w,n,mode}} \quad (5)$$

車線数および中央線の有無による係数 $w_{2,n,mode}$ は、式 (6) より算出する。 $a_{l,n,mode}$ は当該モード ($mode$) における n 番目のリンクの車線区分の相対度数、 $a_{l,max,mode}$ はそのモードにおける車線区分の最大値である。

$$w_{2,n,mode} = \frac{a_{l,max,mode}}{a_{l,n,mode}} \quad (6)$$

歩道の有無による係数 $w_{3,n,mode}$ は、式 (7) より算出する。ここで、 $a_{s1,mode}$ は 3.4 で算出した対象道路ネットワーク全体の歩道敷設率 K よりも歩道敷設率の高いトリップ数、 $a_{s0,mode}$ は K よりも歩道敷設率の低いトリップ数である。

$$w_{3,n,mode} = \begin{cases} \frac{a_{s0,mode}}{a_{s1,mode}} & (\text{歩道あり}) \\ 1 & (\text{歩道なし}) \end{cases} \quad (7)$$

勾配による係数 $w_{4,n,mode}$ は、式 (8) より算出する。自転車において平均勾配 1% 以上の上り坂に対して重みを乗ずる。 s_b は自転車での平均勾配 1% 以上の上り坂の通過回数、 s_e はイヴでの通過回数である。

$$w_{4,n,mode} = \begin{cases} \frac{s_e}{s_b} & (\text{自転車で平均勾配 1\% 以上の上り坂}) \\ 1 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (8)$$

4.2 経路計算例

OD が与えられた際に式 (3) により求められるリンク重みの総和が最小となる経路を Dijkstra 法により算出する。提案手法による算出した各モードにおける推奨経路の例を図 10 に示す。

5. 評価実験

5.1 実験概要

提案手法によって算出した経路の有効性を評価するために実車走行実験を行う。対象とする SV サブモードはイヴとした。被験者は 22~25 歳の男性 5 名である。埼玉大学 (北緯 35.865429°, 東経 139.607345°) を出発地、近隣小学校 (北緯 35.875280°, 東経 139.608386°) を目的地として、提案手法、市販カーナビゲーションシステム (クラリオン社製 DrivTrax P10)、自転車用ナ

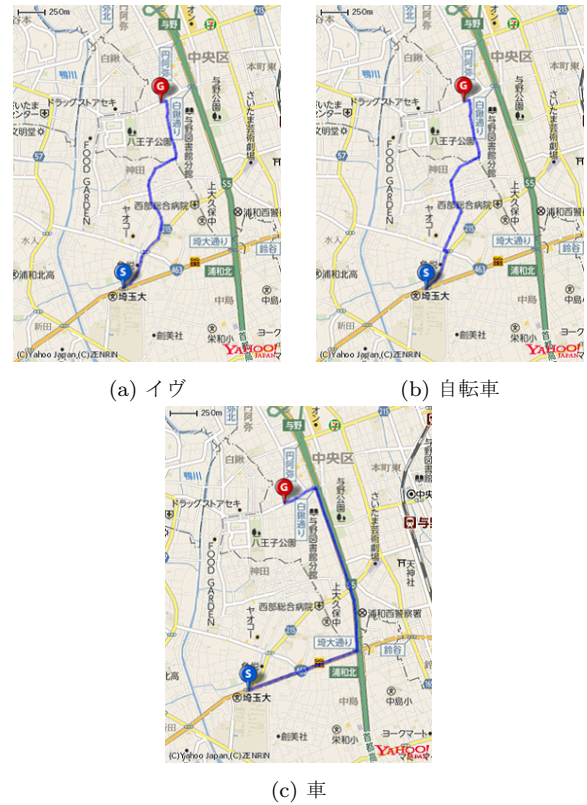


図 10 提案手法による各モードでの推奨経路の計算例。

表 4 各ナビゲーションシステムの設定

提案手法	イヴ
市販カーナビ	標準ルート
自転車ナビ	推奨ルート

ビゲーションシステム (ナビタイムジャパン社製スマートフォンアプリケーション「自転車ナビ」) で提示された経路を実際に走行し、走りやすさなどの観点でアンケートによる三者比較を行った。各ナビゲーションシステムから提示された経路を図 11 に示す。このときの各ナビゲーションシステムの設定は表 4 の通りである。

実車走行後に実施したアンケートの質問項目を表 5 に示す。この 4 項目について Scheffe の一対比較法 (中屋変法) による三者比較を行う。この比較法では、比較対象となる各経路の走行順序を無視し、各被験者が全ての組み合わせ (A:提案手法と B:自転車ナビ, A:自転車ナビと B:カーナビ, A:カーナビと B:提案手法) について回答する。被験者は提示された二つの経路 (A・B) について、 $-2 \sim +2$ 点の得点を与え、全被験者分の合計を求める。そして、基準となる各経路の特定の総和に対して、 $15 (= \text{被験者数} 5 \times \text{比較対象数} 3)$ で除算することで主効果 α を求める。

5.2 実験結果

各質問に対する主効果 α の算出結果を図 12 に示す。主効果の誤差に対して F 検定を行い、有意水準 0.01 で有意差が認められたものには [*] を、有意水準 0.05 で有意差が認められたものには [*] を付している。Q1~Q3 に関して、いずれも提案手法で提示した経路が最も好まれるという結果を得た。Q4 (経



図 11 各ナビゲーションシステムから提示された経路。

表 5 アンケートの質問項目

Q1	他の車両に対する恐怖・ストレスの少ない経路だったのはどちらですか？
Q2	急いでいるときに利用したい経路だったのはどちらですか？
Q3	路面状況が良く、走りやすい経路だったのはどちらですか？
Q4	目的地までの道順がわかりやすい経路だったのはどちらですか？

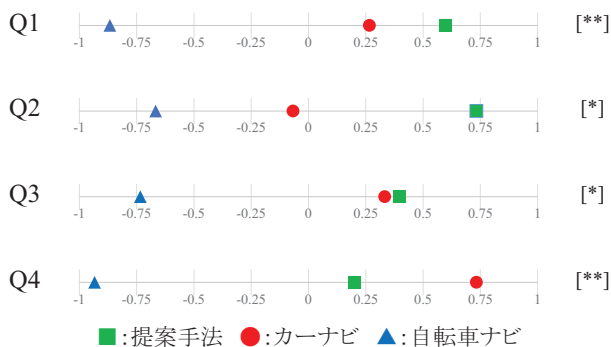


図 12 各ナビゲーションシステムから提示された経路に対するアンケートの三者比較結果。

路の分かりやすさ)に関して、提案手法よりも市販カーナビの方が好まれるという結果となった。この理由として、市販カーナビで提示された経路は、道幅が広く、曲がり角が分かりやすい経路であったのに対し、提案手法ではイヴにとって走りやすい経路を提示するため、細街路を通る機会が多く、曲がり角が分かりにくかったことなどが挙げられる。

6. むすび

本稿では、SV 用ナビゲーションシステムの実現に向けて、SV プローブデータにもとづくリンク重みの計算法を提案した。まず、収集済みの SV プローブデータについて、制限速度、幅員区分、車線数および中央線の有無、歩道の有無、勾配、信号設置密度、交差点密度、1km あたりの右左折回数の観点で解析を行い、イヴ、自転車、普通自動車での走行頻度の違いを示した。次に、解析結果にもとづき、リンク重みの算出式を示した。具体的には、制限速度、幅員区分、車線数および中央線の有無、歩道の有無、勾配の各要素を係数として、その総乗をリンク長に乗ずることで算出した。最後に、提案手法によって算出された経路の有効性を評価するため、提案手法、既存手法(市販カーナビゲーションシステム、自転車用ナビゲーションアプリ)のそれぞれで提示された 3 種類の経路に対して、実車走行を行い、走りやすさなどの観点でアンケートによる三者比較を行った。その結果、経路の分かりやすさについては、市販のカーナビゲーションシステムに劣るものの、走りやすさ、ストレスの少なさ、最短性については最も好まれるという結果が得られた。

今後の課題として、リンク重みの算出に用いる要素の拡充、広範な道路ネットワークにおける経路計算と評価実験、SV 用ナビゲーションシステムのスマートフォンアプリへの実装などが挙げられる。

謝辞 本研究は、一般財団法人日本デジタル道路地図協会 全国デジタル道路地図研究用データ(さいたま市)の提供を受けて実施されたものである。ここに深謝する。

文 献

- [1] 長谷川孝明, 間邊哲也, 久保田尚, 小嶋 文, “P/SV/V の 3 モード交通社会実現について,” 2016 信学総大, no.A-14-21, p.207, March 2016.
- [2] 土井健司, 紀伊雅敦, 佐々木昭恵, “高齢者の外出とまちなかの回遊性を促進するためのスローモビリティとコモビリティに関する研究,” IATSS Review, vol.36, no.3, pp.6-15, March 2012.
- [3] 蝶野大地, 長谷川孝明, “レーン分離混合交通流シミュレータ MMTS の構築とそれをを用いた混合交通の特性評価,” 信学技報 ITS2014-54, pp.161-166, Feb. 2015.
- [4] 石井 豪, 長谷川孝明, 間邊哲也, “P/SV/V 3 モード交通社会におけるモーダルシフトが交通流に与える影響について,” 信学技報 ITS2015-99, pp.69-78, March 2016.
- [5] 石井 豪, 長谷川孝明, “P/SV/V の 3 モード交通社会においてモーダルシフトが交通流に与える影響,” 第 14 回 ITS シンポジウム 2016, Nov. 2016.
- [6] 間邊哲也, 長谷川孝明, “SV プローブデータの収集・解析基盤について,” 信学技報 ITS2016-3, pp.13-18, May 2016.
- [7] 今井 武, 柘植正邦, 菅原愛子, “インターナビ・フローティングカーシステムと渋滞予測について,” IATSS Review, vol.31, no.1, pp.39-45, June 2006.
- [8] 菅原愛子, “走行車が道路センサーに—「インターナビ」による走行データの収集と活用—,” 土木学会誌, vol.102, no.5, pp.18-19, May 2017.
- [9] 藤 琳, “ファジィ AHP を用いたドライブ最適経路探索に関する研究,” PhD thesis, 日本大学, Sept. 2013.
- [10] 鈴木弘司, 堀 将誌, “利用者属性に着目した自転車の経路選択意識に関する基礎的研究,” 交通工学論文集, vol.1, no.2, pp.A.142-A.148, Feb. 2015.
- [11] 長谷川孝明, “システム創成論とその応用としての超小型電気自動車「イヴ」,” IATSS Review, vol.36, no.3, pp.16-26, March 2012.