

点と線と面のランドマークによる 道に迷いにくいナビゲーション・システムとその評価

森永 寛紀^{1,a)} 若宮 翔子^{2,b)} 谷山 友規^{1,c)} 赤木 康宏^{3,d)}
小野 智司^{1,e)} 河合 由起子^{4,f)} 川崎 洋^{1,g)}

受付日 2015年6月30日, 採録日 2016年1月12日

概要: 自動車に限らず, 二輪車や歩行による移動時に, スマートフォンなど携帯端末によるルート・ナビゲーション・システムを利用するユーザが増加している. しかし, 二輪車による移動や歩行中に小さな画面で経路を確認することは危険をとまなうほか, 音声などによる案内も難しい. その解決方法として, 経路や自己位置をなるべく確認しないで済むように, 人が記憶しやすく視認性の高いランドマークを用いたナビゲーション・システムが提案されている. それらのシステムで主に用いられているランドマークは, 1) 近くまで行かなければ視認できないが, ユーザの現在位置を高精度で同定できる, 局所的 (点の) ランドマーク (郵便局やコンビニエンスストアなど) か, 2) 遠方からでも視認できるが, 現在位置をおおまかにしか同定できない, 広域的 (面の) ランドマーク (電波塔や高層ビルなど) の2種類であった. この2種類のランドマークは, その性質の違いから同時に使用することが難しく, これまでのシステムではいずれか一方を用いていた. そこで, 我々は, 3) すぐ近くまで行かなければ視認できないが, その範囲が線状に広がりを持つもの (電車通りや河川など) を線のランドマークとして定義し, 従来困難であった複数種類のランドマークの同時使用を実現する. これにより, 従来のナビゲーション・システム (最短経路や Google Directions) に比べ, 現在位置や案内地図の参照回数を減らすことや, 目的地まで短い時間で到達可能な経路を探索することができ, GPS が利用できない状況においても道に迷いにくいナビゲーションを実現した. さらに, 提案手法の有効性を確認するために, 仮想空間での Google Street View を用いた移動と現地での実空間移動による評価を行い, 一定の効果を確認した.

キーワード: 可視性, ナビゲーション, ランドマーク, 記憶に残る, 地図参照不要, 安全性, 二輪車, 歩行者

An Evaluation of Lost-free Navigation System Using Point, Line and Area Based Landmarks

HIROKI MORINAGA^{1,a)} SHOKO WAKAMIYA^{2,b)} TOMOKI TANIYAMA^{1,c)} YASUHIRO AKAGI^{3,d)}
SATOSHI ONO^{1,e)} YUKIKO KAWAI^{4,f)} HIROSHI KAWASAKI^{1,g)}

Received: June 30, 2015, Accepted: January 12, 2016

Abstract: Recently, the number of people who use navigation systems with mobile devices on the streets is rapidly increasing. As the increase of the number of the user of these systems, concerns on safety is arisen because it makes people to frequently reconfirm the route on small screens of mobile devices. Therefore, navigation systems using highly visible and recognizable landmarks have been proposed. The landmarks are 1) buildings that can help users identify own location accurately but cannot be recognized from far (local landmarks) and 2) tall buildings that are highly visible from a long distance but give users only rough information (global landmarks). In this paper, we define three types of landmarks according to their properties, “point landmarks” for the above 1), “area landmarks” for the above 2), and “linear landmarks” which are not visible from far but users can easily follow along. We propose a navigation system to generate route directions by exploiting several types of landmarks at the same time, which is difficult by other conventional methods. In the experiment, we tested the system with both virtual and real environments and confirmed that users of our system could reach the destination using a small number of landmarks, which means users need to check screens less than other systems.

Keywords: visibility, navigation, landmark, memorable, mapless, safety, motorbike, pedestrian

1. はじめに

従来のナビゲーション・システムは主に自動車を対象としていたが、最近ではスマートフォンなどの携帯機器上のサービスとして、二輪車や歩行者にまで一般化しつつある。その結果、移動中にナビゲーション画面を注視することで周辺への警戒が疎かになり、事故を引き起こしかねないとの懸念が指摘されている。その解決策として、音声ガイドによる方法や、記憶しやすい地物（ランドマーク）を用いる方法が提案されている。

前者の方法は、音声聞き取りやすい自動車内などでの利用時に効果を発揮するが、歩行者および二輪車での利用時には、周囲の音声情報を遮断することになり安全性に問題がある。さらに、GPSなどの位置認識機能が使えないときや道に迷ってしまったときなど、ユーザの位置を特定することが困難な場合には利用できない。後者の方法は、記憶しやすく視認性の高い地物をランドマークとして記憶することで経路案内を行う方法であり、太古より人が地図を使わずに道案内をする際に用いられてきた。現在でも、郵便局、コンビニエンスストアや神社などをランドマークとして利用した店舗などの案内地図が多く見受けられる。さらに周辺を観察しながら進路確認を行うため危険回避にも役立つ。しかし、ユーザはランドマークを記憶する必要があるため、視認性の高い少数のランドマークを示す必要がある。このため、経路の提示に有効な複数のランドマークの組合せを、経路自体と同時に探索することが求められる。そこで、本論文では、より少ない数のランドマークを組み合わせ、効率の良いルート・ナビゲーションを実現するシステムを提案する。

従来よりランドマークを用いたルート・ナビゲーション・システムは、数多く提案されてきた。それらのシステムでは2種類のランドマークが主に用いられてきた。本研究では視認可能な範囲や位置同定能力に基づき、これらのランドマークを以下のように定義する。

1) 点のランドマーク（局所的ランドマーク） 郵便局や

- 1 鹿児島大学
Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan
 - 2 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara 630-0192, Japan
 - 3 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan
 - 4 京都産業大学
Kyoto Sangyo University, Kyoto 603-8555, Japan
- a) sc110080@ibe.kagoshima-u.ac.jp
 b) wakamiya@is.naist.jp
 c) sc110042@ibe.kagoshima-u.ac.jp
 d) akagi-y@cc.tuat.ac.jp
 e) ono@ibe.kagoshima-u.ac.jp
 f) kawai@cc.kyoto-su.ac.jp
 g) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

コンビニエンスストアのように、近くまでいかないと視認できないが、確認することでユーザの現在位置を高い精度で同定できる地物。

2) 面のランドマーク（広域的ランドマーク） 電波塔や高層ビルなどのように、遠方からでも視認できるが、現在位置をおおまかにしか同定できない地物。

これら点と面のランドマークは、その性質の違いからナビゲーションの際に同時に使用することが難しい。たとえば、「東京タワーに向かって直進する」という面のランドマークを用いた経路案内があった場合、ユーザが選択可能なルートは複数あるため、続く案内で「途中でコンビニエンスストアに到達したら左に曲がる」のように点のランドマークを用いることが難しい。また、面のランドマークのみを用いる場合でも、「東京タワーに向かって途中、スカイツリーが見えたらそちらに進む」といった案内しかできないため、使用するランドマークを切り替えるタイミングをユーザが判断することが難しい。このような問題を解消するため、著者らは、点と面のランドマークに加え、新たなランドマークを定義した [18] (図 1)。

3) 線のランドマーク（線形的ランドマーク） 電車通りや河川のようにすぐ近くまで行かなければ視認できないが、その範囲が線状に広がりを持つ地物。

線のランドマークの導入により、たとえば「東京タワーに向かって進み、山手線に出たらそれに沿って進み、コンビニエンスストア周辺で左に曲がる」という面と点のランドマークをとともに用いた案内が可能となる。この例では、面のランドマークである東京タワーに向かう際、各ユーザで異なる経路を選択しても到達可能な山手線を線のランドマークとして用いることで、面と点のランドマークを合わせて利用できる。なお、以降の説明では直感的に理解しや

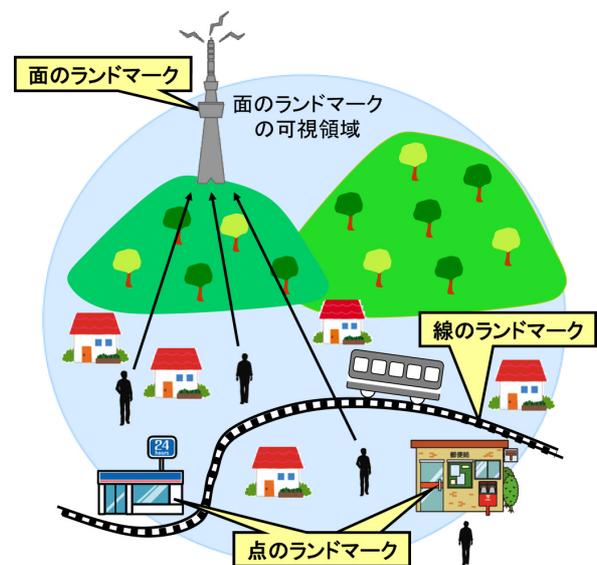


図 1 点と線と面のランドマークの例
Fig. 1 Examples of point, line, and area landmarks.

すいように、点と面のランドマークのことをそれぞれ局所的ランドマークおよび広域的ランドマークと記述する場合がある。

具体的なシステム構築にあたり、点と線のランドマークは Google Maps API や GIS データから情報を取得できる。さらに、Twitter や Flickr などのソーシャルネットワークサイトに GPS ベースの位置情報付きで投稿されたデータの発信頻度に基づき、点と線のランドマークを抽出することも可能である。面のランドマークは 3 次元 GIS データを用いて視認性の高い高層構造物を検出することにより抽出できる。そのために、各構造物が見える道路や交差点をあらかじめ計算しておき、可視マップとして保存しておく。次に、実際の道路ネットワークとは独立した、点と線と面のランドマークを用いた新たな経路グラフを生成して経路を探索する。このグラフは元の道路ネットワークよりも大幅に小さいため、大幅に探索時間を短縮できる。道に迷いにくい経路を探索するためには、経路長だけでなく、利用するランドマークの数や可視領域を考慮する必要がある。しかし、これら複数の条件を満たすような経路探索にかかる評価コストは複雑化してしまうため、本論文では、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて、経路長が短く、利用するランドマークの数が少ない経路を抽出する。

提案システムの効果を検証するため、実在する都市の GIS データを用いて点と線と面のランドマークを決定し、提案手法によるランドマークに基づく経路を既存の道路ネットワーク上での最短経路や Google Directions による経路と比較し、アルゴリズムの妥当性を評価する実験を行った。さらに、被験者に Google Street View を用いた仮想空間での移動と現地での実空間移動により各経路をたどってもらい実験を行い、地図上での自己位置および提示された案内経路の参照回数と経過時間に関して比較評価を行った。その結果、提案手法によって頻繁に自己位置や案内経路を参照することなく、かつ短い時間で目的地に到達可能な、道に迷いにくいルート・ナビゲーションを実現できることを確認した。

本論文の貢献は以下のとおりである。

- 従来の点の (局所的) ランドマークおよび面の (広域的) ランドマークに加え、新たに線の (線形的) ランドマークを提案し、異なる種類のランドマークを合わせて用いた経路案内の生成を可能とした点
- 面の (広域的) ランドマークの可視領域を考慮して 3 種類のランドマークに基づく経路グラフを新たに生成し、より短い経路長でかつより少ない数のランドマークを利用するといった複数条件を考慮した道に迷いにくいルートを探査可能としている点
- 被験者による評価実験により、提案システムによる 3 種類のランドマークを用いたルート・ナビゲーションが、最短経路ルートに対しては、自己位置および案内

経路の参照回数において、Google Directions に対しては、経過時間において有意差を持つことを示した点

2. 関連研究

ランドマークを用いた経路案内方法は、土地勘のある人間が訪問者に道案内をする際によく用いられてきた。これを、個人の知識によらず、システムにより自動化するための方法として、ランドマークの評価方法やランドマークに重点を置いた経路探索手法が提案されている [4]。中澤らの研究では、より象徴性の高いランドマークを発見するための調査方法を提案している [17]。藤井らの研究では、システムがランドマークの 3 次元形状を提示することで、案内を受ける者の経路情報に関する理解を高めることができると報告しており [13], [14]、視認性の高いランドマークを案内に用いることの有用性が示されている。しかし、ランドマークをその視認範囲や位置同定能力から区別した例はなく、その特性を利用した経路案内手法も提案されていない。

局所的ランドマークを用いた経路案内システムは数多く提案され、商品化されている。特に搭載されているナビゲーション・システムの多くには、通常導入されている。しかし、音声の補助がなければ何度も携帯端末を見直すことになり、危険をともなう。Drager らは、スマートフォンにランドマーク画像を表示しながら、その画像と実際のシーンとをユーザが比較・確認しながら目的地にたどり着くためのシステムを提案している [3]。しかし、これも頻繁に携帯端末を見直す必要があるため安全性が高いとはいえない。さらに、GPS が利用可能な状況を前提としているため、GPS が使えないときや道に迷ったときのようにナビゲーションが必要とされる場合において、ユーザの位置特定ができず利用できないという欠点がある。

一方で、広域的ランドマークにのみ注目した手法も数多く提案されている。たとえば、中澤らの研究では、ランドマークとして用いる店舗などの昼夜による外観の違いを配慮し、案内時刻により利用するランドマークを切り替える工夫を行っている [12]。また、多賀らは、広域的ランドマークによる経路案内において問題となるランドマークの切替えを、携帯端末の GPS を用いて音を出して知らせることで解消する手法を提案している [16]。しかし、この手法には GPS が利用できない状況や音が聞き取りにくい環境での使用が困難であるという課題がある。また、Furukawa らの研究では、ランドマークとなる建物が継続して見ることが、歩行者の安心につながることを報告している [5]。これに基づき、我々は面のランドマークの視認性が連続するよう考慮しながら、経路案内に必要なランドマーク数を少なくすることを目指したナビゲーションシステムの開発に取り組んできた [8]。このシステムでは、ランドマークの可視率が高く、かつ案内に使用するランドマークを減らすことで、覚えやすい経路を案内し、ユーザが携帯端末を確

認する回数を減らすことに成功している。しかし、ランドマークの切替え方法が考慮されておらず、実用上の問題がある。

他にも、視認性を考慮した経路探索手法として、河野らが景観の可視性を考慮した経路探索システムを提案している [10]。これは、経路からの景観の可視性を計測し、同じ景観（たとえば富士山など）が連続的に見える経路のランク付けを行うことで、ドライブに適した経路を決定するというものである。同様の考え方による経路案内をクラウド・ソーシングにより実現した例も提案されている [7]。

これらの研究に対し、本研究では点と面のランドマークに加え、線のランドマークを定義することにより、異なる種類のランドマークを組み合わせた経路探索を提案している点に新規性がある。さらに、道に迷いにくいナビゲーション・システムを実現するために、経路長だけでなくランドマークの数や可視性を考慮している点に特徴がある。

3. 提案システムの概要

本論文で生成する経路案内の概要を図 2 を用いて説明する。まずシステムは、点（局所的）・線（線形的）・面（広域的）のランドマークを抽出する。桃色の小円はスタート（左上）とゴール（中央下）を表す。コンビニエンスストアは点のランドマークを、赤色の折れ線で示した大通り 1 と大通り 2 は線のランドマークを、タワーと緑のビルは面のランドマークを、大円は面のランドマークの可視領域を表している。面のランドマークの可視領域は、道路ネットワークと 3 次元 GIS データを用いてあらかじめ算出しておく。そして、既存の道路ネットワークではなく、これらのランドマークに基づく経路グラフを生成し、経路探索を行う。

探索される経路の案内例を以下に示す。

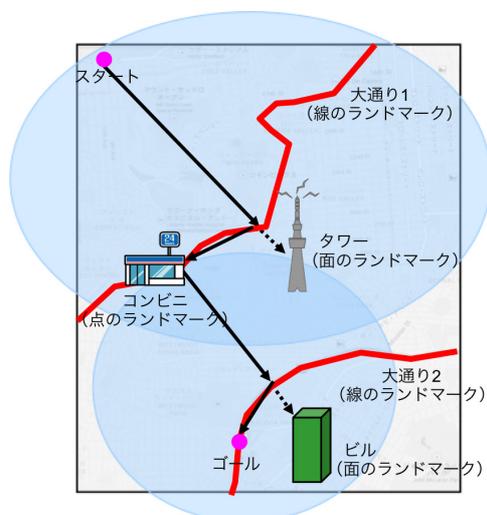


図 2 3 種類のランドマークを用いた経路案内の例

Fig. 2 An example of a route using three types of landmarks.

- (1) 大通り 1 に出るまでタワーに向かって進む。
- (2) 大通り 1 に沿って進む。
- (3) コンビニエンスストアを見つけたら、大通り 2 に出るまでビルに向かって進む。
- (4) 大通り 2 に沿って進む。

このような経路は、最短経路と比べて、経路長は長くなる可能性がある。しかし、ユーザは線のランドマークに出るまで面のランドマークに向かって進む経路を自由に選択でき、詳細な経路を覚えておく必要がなく、5 つの特徴的なランドマーク（タワー、大通り 1、コンビニエンスストア、ビル、大通り 2）を記憶しておけば、目的地に到達することが可能であることから、記憶しやすい経路となりうる。

3 種類のランドマークの抽出手法は 4.1 節および 4.2 節で述べる。ランドマークに基づく経路グラフの具体的な生成方法は 4.3 節で、生成した経路グラフ上での経路探索手法に関しては 4.4 節で説明する。

4. ナビゲーション・システムの詳細

本章では、点・線・面のランドマークの抽出方法、面のランドマークの可視マップの自動生成、および点・線・面のランドマークを利用した経路グラフの生成と経路探索について具体的に説明する。

4.1 視認性および意味に基づくランドマークの分類

一般に、ランドマークは、記憶しやすく、視認性が高い構造物であると定義される [17]。そのようなランドマークは具体的には、幾何的なランドマークと意味的なランドマークに分類できる (表 1)。幾何的なランドマークとは、文字どおりその形や色などが特異的であるものを指し、画像処理などで検出可能である。一方で、意味的なランドマークとは、形や色合いなどに特に目立つ特徴はないものの、話題になっているカフェや混雑している店など、人間にはすぐに発見できるものを指し、Twitter や Flickr などでも共有されているソーシャルデータから取得可能である。以下、本研究において定義した点・線・面のランドマークの抽出方法について説明する。

4.1.1 点のランドマークの抽出方法

点のランドマークは、郵便局、コンビニエンスストア、

表 1 3 種類のランドマークの例

Table 1 Examples of three types of landmarks.

	幾何的	意味的
点	郵便局, コンビニ, ガソリンスタンド	話題のカフェ, 待ち合わせスポット
線	大通り, 電車通り, 河川沿いの道路	人通りの多い商店街, 渋滞している道路
面	電波塔や高層ビルなど可視範囲の広い建築物	寺社など, 地域内で存在位置が容易に分かるもの

ガソリンスタンドや曲がり角に存在する店舗のような、既存のカーナビゲーション・システムなどで使用されている局所的ランドマークのことを指す。これらの情報は、既存の GIS データや Google Maps API など取得することが可能である。本論文では、Google Maps API により上記キーワードでカテゴリ検索し、見つかった地物を点のランドマークとして利用した。このため、幾何的ランドマークと意味的ランドマークの両方が含まれているといえる。また、Twitter のような位置基盤 SNS に投稿されているツイートの地理的分布に基づく混雑度推定やトピック解析に基づく話題性推定などにより、意味的ランドマークを抽出することも可能であり、今後取り入れていく予定である。

4.1.2 線のランドマークの抽出方法

線のランドマークは、高速道路、線路沿いの道路、河川や海岸沿いの道路などのいわゆる“大通り”を指す。経路案内では、線のランドマークに1度到達すれば、その後はそれに沿って進むことになるため、道に迷いにくいというメリットがある。これら大通りの情報に関して、GIS データから取得可能である。今回は、GIS から、道幅一定以上のものを選択し、多少不連続な箇所は接続し、さらに曲率が一定値より小さいものは同じ道路が続いているとして自動抽出した。これにより、国道や電車通りなどはほぼすべて抽出できたが、並木道といった幅は狭いが視認性の高い道路が含まれていない。このため、Twitter のような位置基盤 SNS に投稿されているツイートを地図上にプロットし、その頻度が高い交差点が続くパスも線のランドマークとした。

4.1.3 面のランドマークの抽出方法

面のランドマークとは、地理的に広い範囲から認識可能な広域的ランドマークを指す。面のランドマークには、「東京タワー」のように視認性に基づく幾何的なものだけでなく、「浅草寺」といったように、見えなくてもその近隣の情報（浅草寺まで直進0.5km）といった案内看板などからその地物が存在するおおよかな位置や方向を推測できる意味的なものも含まれる。本論文では、前者のみを対象とし、視認性の高い面のランドマークを自動的に抽出し、その可視マップを生成した。詳細を次節で述べる。後者については今後の研究テーマである。

4.2 面のランドマークの抽出と可視マップの自動生成

4.2.1 面のランドマーク候補の選定

面のランドマークの候補として、地理的に広い範囲から視認される背の高い建物や高い地点に立つ建物などがあげられる。これらを面のランドマークと見なし、街全体を対象として建物の高さが上位の建物を選択すると、街の中心部にばかり集中してしまう。このような偏りを防ぐために、まず、対象となる都市の矩形領域を一定サイズブロックに分割し、各ブロックに含まれる建物のうち、高さ上位

n 件の建物を面のランドマーク候補として選択する。

4.2.2 面のランドマークの可視マップの生成

面のランドマークの可視率は、3次元コンピュータグラフィクス（3DCG）により建物データなどを用いて街全体の3次元モデルを構築し、それぞれの点のランドマークから全周を見渡した景観画像を描画することで求めている。このとき求まる可視率は、描画した画像に写っている各面ランドマークのピクセル数となる。建物・道路・地形などのデータは、3次元 GIS で用いられている電子地図（DEM や建物ポリゴンなど）から入手可能である。3次元 GIS と面のランドマークを用いた可視率計算のためのレンダリング結果を図 3 に示す。また、面のランドマークである鹿児島県庁と桜島の可視マップを図 4(a) と図 4(b) に示す。図 4 では、点のランドマークにおいてのみ可視率を計算しているため、可視率に基づき着色された点の数は少ないが、実際の視認性に近い結果が得られている。

4.3 ランドマークに基づく経路グラフの生成

経路グラフの生成アルゴリズムを図 5 を用いて説明する。まず、出発地と目的地を設定し（図 5 では S および G ）、この2地点を含む Bounding Box を生成する。そして、システムは Bounding Box に含まれる点のランドマー

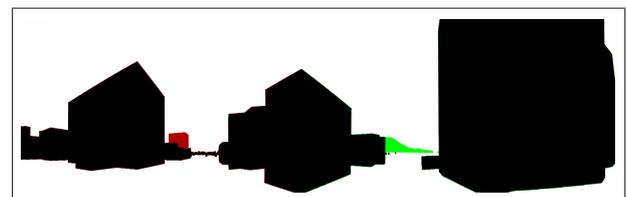


図 3 鹿児島市における描画例。ある交差点における全景を示している。面のランドマークである桜島（緑色）や鹿児島県庁（赤色）が視認できる

Fig. 3 Examples of rendering in Kagoshima.

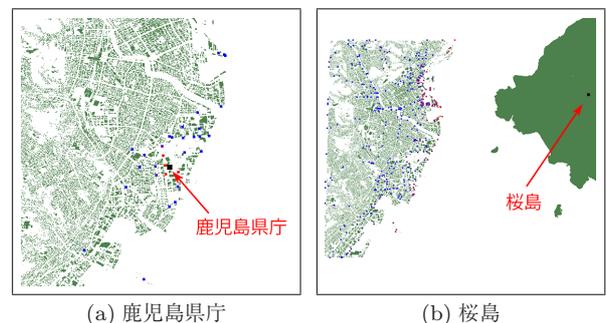


図 4 面のランドマークの可視マップ例。黒い点は面のランドマークである。可視率は高いほど赤色に近く、低いほど青い。可視率が 0 の場合は緑色で描画

Fig. 4 Examples of visible area maps of area landmarks. A black point shows an area landmark. The higher (/lower) the visibility of the area landmark is from an intersection, the more red (/more blue) the intersection is.

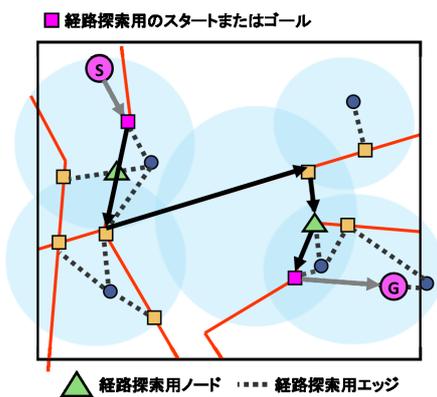
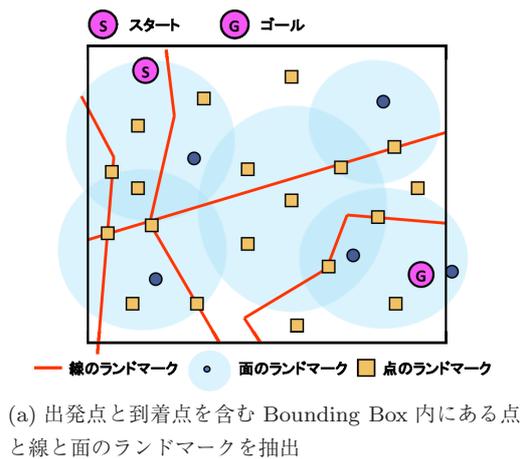


図 5 経路グラフの生成プロセスと経路探索

Fig. 5 A process of generation of a route graph.

ク (橙色の四角), 線のランドマーク (太い実線) および面のランドマーク (青色の小円) をデータベースから抽出する (図 5(a)). このとき, 出発地と目的地に最も近い点のランドマークを, 以降の探索における出発地と目的地とし (図 5(a) の桃色の四角), 実際のナビゲーションでは, 本来の出発地から出発時の点のランドマークまで移動し, 探索によって得られた経路 (図 5(b) の黒色の矢印) に従い目的地の点のランドマークまで案内する. これは, 本システムでは主に歩行者や二輪車を対象としているためである. ここで示される水色の大きな円は, 面のランドマークの可視領域であり, 実際には前節で得られるような複雑な形状をしている. ただしこの際, 円内の点のランドマークであっても, 可視率が低い点からは面のランドマークを視認することが困難であると考えられるため, 経路グラフ作成において可視領域から除いている. 次に, 点と面のランドマークから新しい経路探索用のノードとエッジを生成する. 新しい経路探索用のエッジとは, ユーザーが選択する可能性のある複数の経路を 1 本にまとめた仮想的なパスであり, 面のランドマークの可視領域内に存在する点のランドマークから面のランドマークに向かう有向辺である (図 5(b) の破線). 新しい経路探索用のエッジとは, ユーザーが選択する可能性のある複数の経路を 1 本にまとめた仮想的なパスで

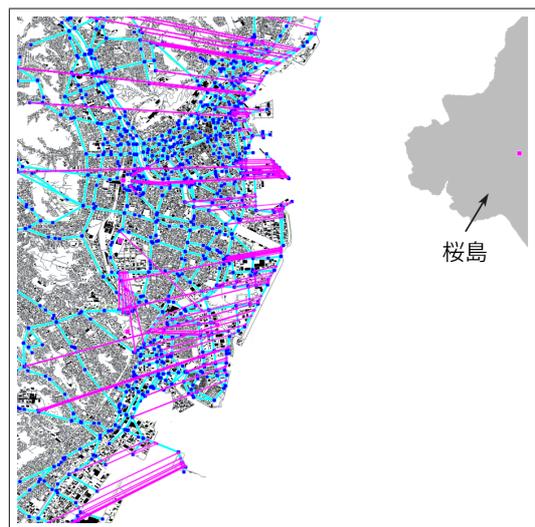


図 6 GIS データからの都市景観に経路グラフを重ねて描画した例 (鹿児島市中心部). 青色の点が点のランドマーク, 水色の線が線のランドマーク, そして桃色の点が面のランドマークの位置を表している

Fig. 6 Drawing urban scenery using GIS data in Kagoshima, Japan.

あり, 面のランドマークと, その可視領域内に存在する点のランドマークとを線でつなぐことで生成される (図 5(b) の破線). 新しい経路探索用のエッジと, 既存のランドマークが交わるとき, これを新たな経路探索用のノードとする (図 5(b) の三角). この新しい経路探索用のノードは, 既存の点のランドマークとは異なり, 目印としては使用できないが, 経路探索では使用される. 図 6 に, 鹿児島市において実際に作成した経路グラフ例を示す.

4.4 ランドマーク数を最小化する最適経路探索

前節で 3 種類のランドマークをベースに生成された経路グラフ上で経路探索を行う. 一般的に, 経路探索は Dijkstra 法 [2] や遺伝的アルゴリズム (GA) [6] を用いて解くことができる. 本論文では, 経路長を短くしながら, 利用するランドマーク数を減らし, かつ面のランドマークの可視率を考慮するという複数の条件を満たす経路を探索するために, Wook らが提案した遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた [1]. 本論文では, スタート S からゴール G までの経路 $T = \{S, \dots, T_p, \dots, G\}$ を, 経由する N 点のノードのリストにより表現する. すなわち, 可変長の染色体を利用することとなる. また, その評価関数 $Cost(T)$ を以下のように定義し, $Cost(T)$ を最小にする T を求める.

$$Cost(T) = \sum_{p=1}^{N-1} \delta(V(p-1, p), V(p, p+1)) + \lambda \sum_{p=0}^{N-1} Dist(T_p, T_{p+1}) \quad (1)$$

なお, $V(p, p+1)$ はノード $p, p+1$ 間において使用され

るランドマークの ID を表し、 δ は 2 つのランドマーク ID が異なっていれば 1、等しければ 0 を返す関数であり、 $Dist(p, p+1)$ は隣接する 2 つのノード $p, p+1$ 間のユークリッド距離を表す。この評価関数により、同じランドマークを使い続けながら、経路長ができるだけ短い経路を選ぶことができるため、移動距離が短く、記憶しやすい経路を選択できる。また、重み λ を変更することで、経路長とランドマーク数のいずれを重視するかのバランスを調整することができる。

GA を用いた経路探索は計算コストが高いが、既存の道路ネットワークと比べて、提案手法により新たに生成したランドマークに基づく経路グラフは大幅にコンパクトであるため、複雑な評価コストを用いても短時間で最適経路を見つけることができる (図 5(b) の太い実線矢印)。

5. システムの評価

本章では、提案手法により実際に生成した経路グラフ上で探索された経路を評価する。

5.1 実験データ

本システムを評価するにあたり、我々は 2 種類のデータを用いた。以下にそれぞれのデータの詳細および使用したランドマークや生成した経路グラフについて説明する。

5.1.1 実験データ 1

提案システムが実用的な規模の都市 GIS データに対して適用可能であることを示すために、DataSF が公開しているサンフランシスコ市の全域の GIS データ [9] を用いて、面のランドマークの可視マップを作成した。本 GIS データには、都市にあるほぼすべての建物および経路の情報が含まれている。具体的には、85,116 件の建物の 3 次元形状情報と 12,188 件の道路ネットワーク情報から構成されている。

点のランドマークは、Google Maps において施設カテゴリを表すキーワード (“gas station”, “police office”, “hospital”, “department store”, “church”, “station”) を用いて検索し、交差点にある地物のみを採用した。線のランドマークは、道路ネットワーク情報には道路の特徴に関する情報 (道幅など) が含まれていなかったため、Google Maps 上で太く示されている高速道路や大通りに加えて、Twitter から取得した位置情報付きツイートが地理的に密集しているパスを人手により選択した。面のランドマークは、事前実験により 1km 四方のグリッドからそれぞれ上位 10 件の建物を候補として選択し、それらの可視率を算出することにより抽出した。表 2 に抽出した点、線、面のランドマークの総数を示す。括弧内の数値は人手により抽出したランドマークの数である。

5.1.2 実験データ 2

国内 (鹿児島市) の GIS データを用いた実験を行うために株式会社ゼンリンが整備している住宅地図データベース

表 2 抽出したランドマークの総数 (() は追加した数)

Table 2 The number of extracted landmarks (The number of landmarks added manually).

	実験データ 1 サンフランシスコ	実験データ 2 鹿児島
点のランドマーク	76 (0)	349 (0)
線のランドマーク	60 (60)	759 (24)
面のランドマーク	76 (0)	5 (4)

Zmap-TOWNII [11] の建物形状データと国土地理院が整備している数値地図 (国土基本情報) [15] の道路中心線を用いた。これらの GIS データには、鹿児島市内および周辺のすべての建物の形状 (階高情報を含む) および道路の情報が含まれている。今回は、主要な道路が集中し、建物が密集している鹿児島市内中心部の縦 10km、横 5km を切り出し実験対象領域とした。この実験対象領域中には、66,189 件の建物と 18,293 件の道路情報が含まれている。

点のランドマークは、建物形状データが持つ施設名において、コンビニエンスストア、ガソリンスタンド、病院、郵便局、警察署や小中学校などに一致する施設の建物形状を抽出し、その重心を求め、道路からの距離が特定の閾値以下のものを採用した。線のランドマークは、道路中心線データが持つ道路幅が 5.5m 以上の道路を自動的に抽出した。また、データには含まれていないが線のランドマークとして抽出すべき川沿いの道路やその他の主要道路などを人手により追加した。面のランドマークは、提案手法により自動的に抽出した建物に加え、桜島、鹿児島県庁、観覧車、市街地の山の上に位置する建物の 4 つの地物を用いた。これは、建物形状データとして用いた住宅地図データベースに、本来であれば面のランドマークとして判定されるべきこれら地物のデータが含まれていなかったための措置である。表 2 に抽出した点、線、面のランドマークの総数を示す。括弧内の数値は人手により抽出したランドマークの数である。

5.2 評価方法

Google Street View を用いて仮想空間を移動するシミュレーション評価と、実空間を移動する現地評価を行った。

5.2.1 仮想空間での Google Street View を用いた評価

提案システムにより探索された経路を評価する際、実際にユーザに道案内を提示し、記憶した経路をもとにゴールまで徒歩や二輪車でたどってもらい、地図の参照回数や経過時間などを調査する方法が望ましい。しかしながら、様々な都市を対象に提案手法を適用して探索した経路を評価するとき、すべての都市において多くの被験者に実際に複数の経路をたどってもらうことは難しい。さらに、1 度使用したルートは被験者が学習してしまうため、似たような経路で同じ被験者に繰り返しテストすることも避ける必

要がある．このような条件で，実地によるテストを行うことは現実的には容易ではない．そこで，本論文では1つの評価方法として Google Street View を使用し，実際にスタートからゴールまで被験者にブラウザ上でたどってもらい，経路案内をもとに仮想空間で移動体験してもらうシミュレーション実験を採用した．

被験者には最初に，スタートの位置情報，ゴールの位置情報および経路情報の記載された案内地図（ランドマークに基づく経路の場合にはランドマークの写真を含む）を印刷した資料を与える．本実験では，歩行者や二輪車のユーザを想定しており，被験者には出発前にできるだけ案内地図の情報を覚えるように指示し，出発後は Google Street View 上での自己位置や案内地図はできるだけ参照しないように指示した．ただし，途中で自己位置が分からなくなったり，経路を失念したりして，ゴールまでたどりつけない可能性があるため，被験者は必要に応じて自己位置や案内地図を参照できるものとし，それらの参照回数を記録した．

5.2.2 実空間での評価方法

実際の経路案内では，信号待ちや横断歩道の有無など，前述の Google Street View を用いた仮想空間では考慮できない要因が多数存在する．そこで，被験者に実際に街中を徒歩で移動してもらい，実空間での有効性の評価および仮想空間でのシミュレーション実験の結果との差を調査した．

被験者には，仮想空間での評価の場合と同様に，スタート位置情報，ゴール位置情報，および経路情報の記載された案内地図を印刷した資料を与え，出発前にできるだけ案内地図の情報を覚え，移動中はできるだけ地図を参照しないように指示した．経路を失念した場合は案内地図を取り出して参照し，自己位置が分からなくなった場合は携帯電話の GPS などを利用して自己位置を参照できるようにし，それらの参照回数を記録した．

5.3 評価実験結果

実験データ 1 について仮想空間での Google Street View を用いた評価実験を行い，実験データ 2 については仮想空間における実験に加えて現地での実空間移動による評価を行った．評価基準として，スタートからゴールに到達するまでの (a) 案内地図，Google Street View や GPS での自己位置の合計参照回数（単位長あたりの平均参照回数），(b) 経過時間の 2 つの項目を設定した．また，各被験者の結果に個人の方向認知能力や Google Street View 操作の熟練度が影響する可能性があるため，被験者にはそれぞれ異なる経路を複数与え，それぞれを提案手法によるランドマークに基づく経路 (LP)，最短経路 (SP) および Google Directions による経路 (DP) で試行させた．その際，同じ被験者が同じ経路をたどることはないようにした．なお， SP は経路長のみを考慮して探索される経路であることか

ら，提案手法との比較によりランドマークを使用することの効果の評価することになる．また， DP は経路長よりも移動にかかる時間や実際の道路の特徴（道幅など）を考慮して探索される経路であるため，より実際的なルートに対して，ランドマークを使用することの効果の評価したことになる．

5.3.1 データ 1（サンフランシスコ市）に対する仮想空間での評価

サンフランシスコ市を対象としたシミュレーション実験では，サンフランシスコを訪問したことのない被験者 10 名に対し，3 つのスタートとゴールの組 (S, G) を設定し，3 つの手法 (LP, SP および DP) により探索された計 9 経路の中から 2 経路ずつを割り当てて試行を行った．図 7 にサンフランシスコ市のシミュレーション実験で用いた経路例を示す．なお，図 7 において，提案手法によるランドマークに基づく経路 LP （赤線）の方が最短経路 SP （緑線）よりも短く見えるが， LP に面のランドマークを指す経路を直線で示した仮想的なパスが含まれているためであり，実際にこのような直線ルートが存在しているわけではない．

結果を図 8 に示す．なお，今回はデータのばらつきが大きかったため，各手法による実験結果の傾向を直感的に理解しやすいように箱ひげ図を用いている．最短経路探索により得られた経路と比較して，提案手法によるランドマークに基づく経路では自己位置および案内経路参照回数が減少し，さらにスタートからゴールに到達するまでの所要時間が短くなった．また，最短経路の場合には，参照回数や経過時間の分散が大きいことも分かる．Google Directions との比較においても，提案手法の経路の方が自己位置および案内経路参照回数が減少し，目的地までの所要時間も短い傾向にあることが分かる．ただし，提案手法と最短経路，

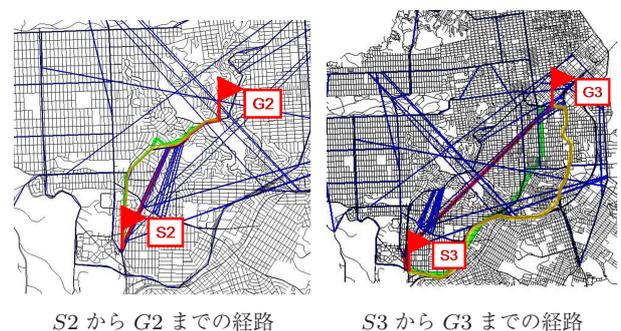


図 7 データ 1（サンフランシスコ市）に対する評価で用いた経路例．赤線が提案手法による経路グラフ（青線）上で探索された経路 LP ，緑線が最短経路 SP ，黄線が Google Directions による経路 DP である

Fig. 7 Examples of paths in San Francisco. Red line shows a landmark-based path searched on the route graph represented by blue lines, green line is a shortest path, and yellow line is a path by Google Directions.

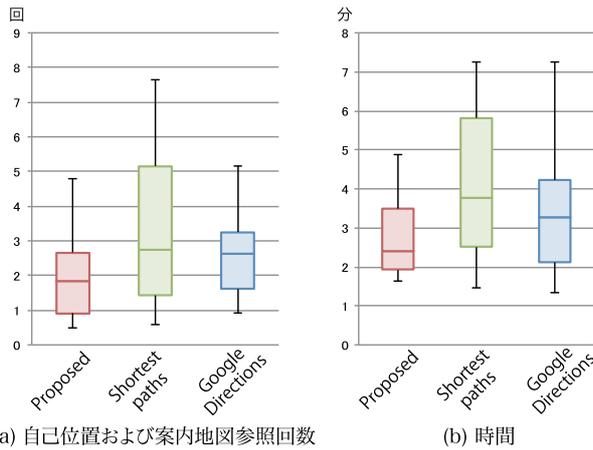


図 8 データ 1 (サンフランシスコ市) に対する仮想空間での評価結果

Fig. 8 Evaluation results of simulated experiments using experimental data 1 (San Francisco).

提案手法と Google Directions について、t 検定により検証したところ、参照回数、所要時間ともに有意差は認められなかった。総じて、土地勘のない都市を対象としたシミュレーション実験においては、提案手法は他の 2 手法よりも自己位置や案内地図を頻繁に参照することなく、同程度かそれより短い時間でゴールまで到達できる経路を抽出できたといえる。

5.3.2 データ 2 (鹿児島市) に対する仮想空間での評価

実験データ 2 (鹿児島市) を対象としたシミュレーション実験では、鹿児島市在住の被験者 7 名に対し、6 つのスタートとゴールの組 (S, G) を設定し、3 つの手法 (LP, SP および DP) により探索された計 18 経路の中から 2 経路ずつを割り当てて試行を行った。図 9 に実験で用いた経路例を示す。実験結果を図 10 に示す。

前項の結果と同様に、提案手法によるランドマークに基づく経路は、最短経路探索と比較して、自己位置および案内経路参照回数が少なく、スタートからゴールに到達するまでの所要時間が短い傾向にあることが分かる。提案手法と最短経路の値を t 検定により検証したところ、自己位置および案内経路参照回数に関しては有意差が認められた ($p < 0.05$) が、サンプル数が少なかったために経過時間に関しては有意差は認められなかった。Google Directions による経路との比較では、参照回数および所要時間ともに同程度の結果となったことが分かる。t 検定により検証したところ、自己位置および案内経路参照回数、経過時間ともに有意差は認められなかった。

5.3.3 データ 2 (鹿児島市) に対する実空間での評価

鹿児島市を対象とした現地実験では、鹿児島市在住の被験者 29 名に対し、前項と同じ 18 経路の中から 2 経路ずつを割り当てて試行を行った。実験結果を図 11 に示す。

提案手法と最短経路との間には、自己位置および案内経

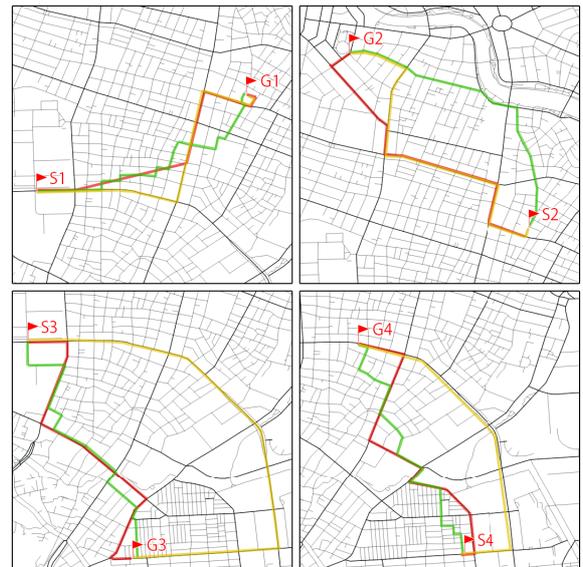


図 9 データ 2 (鹿児島市) に対する評価で使用した経路例。S はスタート、G はゴールを表す。赤線が提案手法による経路グラフ上で探索された経路 LP、緑線が最短経路 SP、黄線が Google Directions による経路 DP である

Fig. 9 Examples of paths in Kagoshima. Red line shows a landmark-based path searched on the route graph, green line is a shortest path, and yellow line is a path by Google Directions.

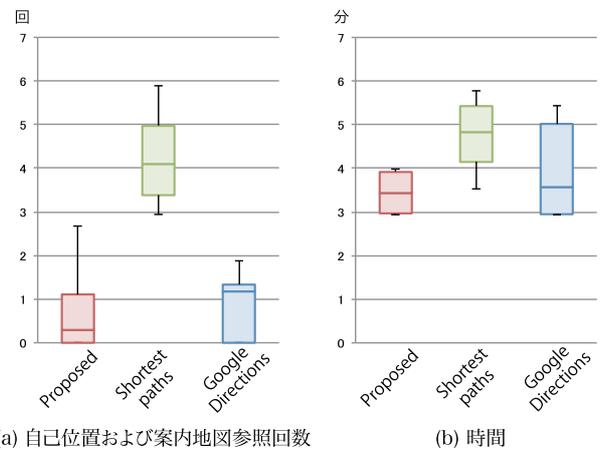


図 10 データ 2 (鹿児島市) に対する仮想空間での評価結果
Fig. 10 Evaluation results of simulated experiments in Kagoshima.

路参照回数について大きな差が見られた*1。これは、提案手法では、少ないランドマークを記憶するだけで目的地までたどりつけるため、自己位置や案内地図を参照する回数が少なく済む一方、最短経路の場合、必然的に細かい道を複数回曲がりながら進む経路となり、何度も地図を見直す必要性が生じたためと考えられる。また、提案手法と Google Directions の間では、参照回数には大きな差が見られなかった。これは、Google Directions は道幅が広い大通

*1 5%水準 t 検定により、自己位置および案内地図参照回数において有意差があることを確認した。

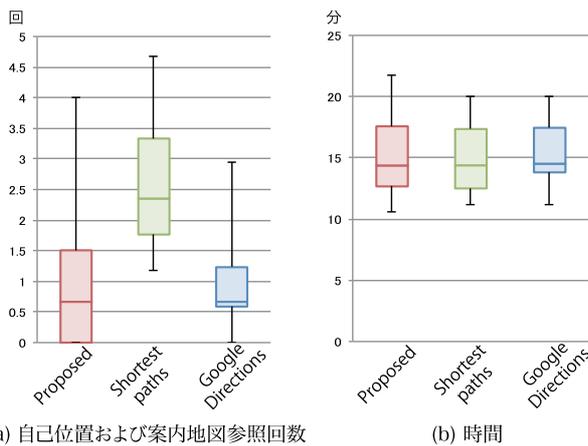


図 11 データ 2 (鹿児島市) に対する実空間での評価結果
 Fig. 11 Evaluation results of field experiments in Kagoshima.

りを選択するアルゴリズムとなっているため、本実験で設定したような短距離の経路においては、曲がり角が少なくなりがちであり、記憶すべき交差点が減ったためと考えられる。ただし、目的地までの所要時間は、提案手法の方が平均で 5%ほど短かった。これは、実際に提示された経路(図 9)を見ると、Google Directions では車での経路を想定しているため、多少遠回りでも大通りを選択していた。その結果、経路長が提案手法より平均 5%程度長くなったためであると考えられる。今後、より長い経路や、土地勘のない旅行者などを対象とした実地実験が望まれる。

5.4 考察

実験データ 1 と 2 を用いて行った仮想空間での Google Street View 移動と現地での実空間移動による評価結果より、提案手法は比較対象とした最短経路と Google Directions に対し、同等に短い所要時間でかつ自己位置および案内地図の参照回数が少ない経路を提示できることが分かった。また、仮想空間における一部の実験では、提案手法により発見した経路が、最短経路よりも所要時間を短縮する可能性を示すこともできた。ただし、鹿児島市では提案手法と最短経路との間に検定による有意差が認められたのに対し、サンフランシスコ市では有意差は認められなかった。これは、サンフランシスコ市では抽出された面のランドマークと見間違えるような高層の建物が多く存在するのに対し、鹿児島市では他と見間違えるような地物が少なく、提案手法がより有効に働いたためと考えられる。このような都市の特徴の違いを考慮した面のランドマーク抽出手法については、さらに検討する余地がある。また、現在のシステムでは、面のランドマークに切り替える際に、ユーザから見てどちらの方向に面のランドマークがあるのかは考慮していないため、場合によってはそれまでの進行方向と逆側にあることも起こりうる。ただし、ランドマークを切り替える位置は点のランドマークとなっているため、それ

を見落とさなければ、進行方向にランドマークがなくても問題はないといえる。一方で、進行方向に面のランドマークがあれば、点のランドマークを見落とした場合でも、正しい経路に復帰できる可能性が高まるため、ユーザが進む方向に応じて選択する面のランドマークの優先度を設定することで、より良い経路案内をできる可能性がある。この点については今後の課題として検討する予定である。

さらに、鹿児島市での仮想空間と実空間で同じ経路を用いた評価結果を比較したところ、同様の傾向が認められた。このことから、Google Street View を用いたシミュレーション実験を、現地実験が難しい場合の代替手段として利用できる可能性が示されたといえる。

その他、実験後のインタビューにより、国外(サンフランシスコ市)の都市を対象にした仮想空間では、各都市の特徴(建物密度の違いなど)や標識言語の違いなどから、国内よりも難しく感じられるとのことであった。また、いずれの手法でも特異的に好成績をおさめた被験者が少数存在したが、彼らは自らランドマークを設定しているとのことであった。

6. おわりに

本研究では、点のランドマーク・線のランドマーク・面のランドマークという 3 種類のランドマークを定義し、これらに基づく経路グラフを生成して経路探索を行うことで、ランドマークに基づく道に迷いにくいナビゲーション・システムを実現した。システムの構築にあたり、点・線・面のランドマークの抽出手法、面のランドマークの可視マップの生成手法、経路グラフの生成および経路探索手法を提案した。提案手法により、実在する道路ネットワークにおける最短経路探索や Google Directions の経路に比べ、少ない自己位置や案内地図の参照回数でかつ短い時間で目的地まで到達可能な記憶に残るランドマーク・ナビゲーションを実現できたことが確認された。これは、二輪車による移動中や歩行中、GPS を利用できない状況、道に迷ってしまったときや災害などで目的地に向かっている間に自己位置や案内地図を確認することが困難な場合などに特に有効であるといえる。

今後の課題としては、建物密度や地理的形状が異なる(あるいは類似する)複数の都市を対象として実験を行い、提案するランドマーク・ナビゲーション・システムの有効性について検証予定である。さらに、SNS のデータを活用した意味的ランドマークの自動抽出手法の検討および実装を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、総務省 SCOPE (ICT イノベーション創出型研究開発)、JSPS 科研費基盤研究 (B) (26280042) および基盤研究 (C) (15K00162) の助成を受けて実施された。

参考文献

- [1] Ahn, C.W. and Ramakrishna, R.S.: A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol.6, No.6, pp.566-579 (2002).
- [2] Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, No.1, pp.269-271 (1959).
- [3] Drager, M. and Koller, A.: Generation of landmark-based navigation instructions from open-source data, *EACL '12*, pp.757-766 (2012).
- [4] Duckham, M., Winter, S. and Robinson, M.: Including landmarks in routing instructions, *Journal of Location Based Services*, Vol.4, No.1, pp.28-52 (2010).
- [5] Furukawa, H. and Uto, H.: A quantitative evaluation method of landmark effectiveness for pedestrian navigation, *2012 UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)* pp.265-270 (2012).
- [6] Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, USA (1992).
- [7] Quercia, D., Schifanella, R. and Aiello, L.M.: The shortest path to happiness: Recommending beautiful, quiet, and happy routes in the city, *Proc. 25th ACM Conference on Hypertext and Social Media, HT '14*, pp.116-125 (2014).
- [8] Yonekura, R., Akagi, Y., Ono, S., Kawai, Y. and Kawasaki, H.: Navigation system which uses visibility map of landmarks to reduce reference count of the map, *IEVC2014 4B-06* (2006).
- [9] SFGOV: San Francisco Data, 2014, available from <https://data.sfgov.org/>.
- [10] 河野亜希, 谷村孟紀, 崔 楊, 河合由起子, 川崎 洋: 景観の可視性を考慮したルート探索システムの提案, *情報科学技術レターズ*, Vol.6, No.LK-005, pp.351-354 (2007).
- [11] 株式会社ゼンリン: 住宅地図データベース zmap-townii, 入手先 <http://www.zenrin.co.jp/product/gis/zmap/zmaptown.html>.
- [12] 中澤啓介, 岡田謙一: ランドマークの視認性に基づいた動的な案内地図作成, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.1 (2008).
- [13] 藤井憲作, 東 正造, 荒川賢一: 経路案内情報がナビゲーションに及ぼす影響, *電子情報通信学会論文誌 A, 基礎・境界*, Vol.J87-A, No.1, pp.40-49, 2004-01-01 (2004).
- [14] 藤井憲作, 杉山和弘: 携帯端末向け案内地図生成システムの開発, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.9, pp.2394-2403 (2000).
- [15] 国土地理院: 数値地図 (国土基本情報), 入手先 <http://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho40027.html>.
- [16] 多賀大泰, 高橋直久: ランドマークの視認状況に基づく歩行者の位置特定システム, *DBSJ Letters*, Vol.5, No.1 (2006).
- [17] 中澤優一郎, 山本隆徳, 細川宜秀: 象徴性と相対的场所性に基づく強いランドマーク検索システムの実現方式, *DEIM Forum 2012 B2-4* (2012).
- [18] 米倉梨葉, 森永寛紀, 若宮翔子, 赤木康宏, 小野智司, 河合由起子, 川崎 洋: 点と線と面のランドマークによる道路地図に頼らないナビゲーション・システム, *インタラクティブ 2015* (2015).



森永 寛紀

2014年3月鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻、現在に至る。コンピュータビジョンの研究に従事。



若宮 翔子 (正会員)

奈良先端科学技術大学院大学研究推進機構博士研究員。2011年兵庫県立大学大学院環境人間学研究科博士前期課程修了。2013年同大学院環境人間学研究科博士後期課程修了。2014年京都産業大学コンピュータ理工学部研究員を経て、2015年より現職。博士(環境人間学)。ソーシャルメディアコンテンツ分析とその応用に関する研究に従事。日本データベース学会会員。



谷山 友規

2014年3月鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻、現在に至る。コンピュータビジョンの研究に従事。



赤木 康宏 (正会員)

2006年東京農工大学大学院電子情報工学専攻修了。2006~2012年同大学助教、2012年鹿児島大学特任講師、2013年同大学特任准教授、2014年東京農工大学特任准教授、現在に至る。高度運転支援に関する研究に従事。博士(工学)。



小野 智司 (正会員)

2002年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。2003年鹿児島大学工学部情報工学科助手。2010年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻准教授、現在に至る。進化計算とその応用の研究に従事。博士(工学)。



河合 由起子 (正会員)

京都産業大学コンピュータ理工学部准教授。2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学博士後期課程修了。同年独立行政法人情報通信研究機構(現、国立研究開発法人情報通信研究機構)、2006年京都産業大学理学部コンピュータ科学科講師を経て、2008年より現職。博士(工学)。情報推薦、Webマイニング、信憑性分析の研究に従事。電子情報通信学会、日本データベース学会各会員。



川崎 洋 (正会員)

2003年東京大学大学院工学研究科博士課程後期修了。2008年埼玉大学工学部情報システム工学科准教授、2009年INRIA フランス国立研究所客員教授、現在に至る。2010年鹿児島大学理工学研究科情報生体システム工学専攻教授。博士(工学)。