

# 経路案内における道路ネットワークの密度を考慮した地図提示手法

諏訪 海晴<sup>†</sup> 藤田 秀之<sup>††</sup> 大森 匡<sup>††</sup> 新谷 隆彦<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布市調布ヶ丘1-5-1

<sup>††</sup> 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布市調布ヶ丘1-5-1

E-mail: <sup>†</sup>suwa.kaisei@uec.ac.jp, <sup>††</sup>{fujita,omori,shintani}@is.uec.ac.jp

**あらまし** 歩行者や自転車向けの経路案内サービスにおいて、利用者の現在位置と経路に応じて、自動的に適切なスケールの地図を提示する手法を提案する。まず、経路案内サービス利用時に、周囲の環境と地図との照合を行うために適切な地図のスケールは、道の複雑さに対応付けられると仮定し、その指標を、道路ネットワークデータを用い、経路案内に特化した道路ネットワーク密度として提案する。本指標では、経路案内において、現在地周辺の進行方向の情報が特に重要であることを考慮する。続いて、経路上の各地点におけるズームレベルを、地図アプリケーションのズーム操作ログと、道路ネットワーク密度の関係に基づき決定する手法を提案する。提案手法を定量的に評価し、特に、郊外と住宅街の境目などの、道の複雑さが大きく変化する地点において、提案手法が有効であることを確認した。また、提案手法を経路案内アプリケーションとして実装して動作を検証し、経路上での利用者の移動に合わせて、自然なズームレベルの変更が行なわれることを確認した。

**キーワード** 可視化、情報可視化、UI・UX、地図、ナビゲーションシステム、モバイルアプリケーション

## 1 背景と目的

近年、都市化の進展に伴う諸問題に対応する持続可能な交通手段として、自転車による移動が世界的に注目されており、自転車の効率的な利用を支援するために情報技術を活用する研究が盛んに行なわれている[1]。国内でも、自転車活用推進法が2017年に施行、第2次自転車活用推進計画が2021年に閣議決定され、自転車の活用の推進は、国家的な取り組みとなっている。同計画の目標として、自転車交通の役割拡大による良好な都市環境の形成、サイクルスポーツの振興等による活力ある健康新社会の実現、サイクルツーリズムの推進による観光立国への実現、自転車事故のない安全で安心な社会の実現が挙げられているが、国内の交通事故件数に占める自転車関連事故の割合は増加傾向にある[2]。

スマートフォンによる自転車や歩行者向けの経路案内では、小さな画面上で、適切なスケール（ズームの度合い）の地図により情報提示を行う必要がある。自転車や歩行者向けの経路案内サービスを利用する際、地図上に表示された現在位置を基準に、現地で見えている環境と地図とを照合し、確認しながら移動することは自然である。その際、しばしば地図のズーム操作が行われるが、これは、周囲の環境と地図との照合を行なう際に適切な地図のスケールが、場所ごとに異なるためだと考えられる。例えば、図1で示すように、道路や建物が密集し、細かい道が入り組む市街地では、地図をより拡大し、田畠や森林が広がり、道も単純な郊外では、地図をより縮小することが自然である。

ズーム操作を含めて、移動中のスマートフォンの操作回数を減らすことは、利便性や安全性の観点で重要である[3]。本研究では、利用者が周囲の環境と地図との照合を行なう際に適切な地

図のスケールは、道の複雑さに対応付けられると仮定し、まず、指定された地点の道の複雑さの指標として、指定された地点周囲の道路ネットワークの密度を提案する。提案した指標に基づき、経路上の各地点において、適切な地図のスケールを決定する。経路上を移動する利用者の現在位置に応じて、経路上の地点ごとに決定した適切なスケールに切り替えることで、経路案内を行なう。



図1: 市街地と郊外での、地図（上）と現地で見えている風景（下）。地図（OpenStreetMap）上の赤色の線が経路で、黄色の五角形のアイコンが現在位置（アイコンの尖った部分の指す方向が進行方向）。風景はGoogleストリートビュー。

本研究の貢献は以下のとおりである。

- 経路案内サービス利用時に、現在位置に応じた地図のズームレベルを決定するための指標を、道路ネットワークデータに基づき提案する
- 利用者による地図ズーム操作と道の複雑さとの関係を、利用者実験により分析する
- 提案手法を経路案内アプリケーションとして実装し、有用性を確認する

本稿の構成は次のとおりである。2章で関連研究と本研究の位置付けをまとめる。3章で先行研究の手法を用いた予備実験

についてまとめる。4章で本研究の提案手法を説明し、5章で提案手法を実装したアプリケーションについて述べる。6章で提案手法の評価をまとめ、7章で結論と今後の課題を述べる。

## 2 関連研究

自転車利用の促進に関する研究は盛んである。持続可能な交通システムとしての自転車利用に関する体系的な調査[1]では、スマートフォンアプリや各種センサーデバイスと通信ネットワークを用いた技術的な取り組みや、制度やインフラ整備等の社会的な取り組みとして、経路選択や配達の効率化、安全性向上、シェアサイクル、環境センシング、健康増進等といった、さまざまな目的の研究をまとめている。自転車利用時の安全性向上に関しては、その体系的な調査[3]において、現状の経路案内サービスは、一般にスマートフォンを利用するため、できるだけ画面を注視させないことが重要と指摘されている。

地図操作のユーザインタフェースの研究として、地図上で注目する場所を指定すると、自動的にパンやズーム操作を行うことで、利用者による操作を省力化する手法が複数提案されている[4][5][6][7]。これらの手法は、地図や経路の探索的な閲覧を効率化することを目的としており、本研究とは目的が異なる。これらの手法は、目的や内容に基づき、あらかじめ地図上に複数の範囲を入れ子状に定め、各範囲の表示スケールを決定しておくことで実現されている。これに対し、経路案内サービスにおける地図表示では、経路上の任意の地点において、適切な表示スケールを決定する必要がある。

歩行者向けの経路案内サービス利用中に、視野内の各要素が、スマートフォン上の地図で利用者が指定するズームレベルに与える影響に関する空間認知的な実証研究がなされている[8]。現在地から見えるランドマーク群までの距離、現在地から方向転換が必要な次の交差点までの距離[9]と、現在地からの視野内の可視領域の平面的な形状[10]等の要素の影響が検討されており、視野内にあれば次の交差点の影響が強い[8]といった条件も含めて議論されている。

経路案内サービス利用時に、表示される地図のスケールを自動で決定する研究は、筆者らの知る限り、すべて自動車を対象としている。多くの手法が、基本的に自動車の移動速度により地図のスケールを決定している[11][12][13]。これらの手法を、自転車や歩行者向けの経路案内サービスにそのまま適用することは困難である。理由として、自転車や歩行者の移動では、自動車よりも頻繁に速度変更や停止・発進が行なわれ、その速度変更は、自動車と比較して、より局所的な交通状況（歩道上に存在する他の歩行者や障害物等）による影響を大きく受けるためである。加えて、自動車の経路案内の場合、主に信号の交差点名標識や道路の案内標識といった目印が利用できるのに対し、より細かい道が利用される歩行者や自転車の経路案内の場合、利用者は、建物名や種類、道の形状など、さまざまな目印を利用が必要があり、方向転換する交差点以外でも、周囲の環境と地図との照合を行なう必要がある、という大きな違いがある。

直接的な先行研究として、Yan らは、指定された場所の地

図を表示する際のスケールを、道路ネットワークの空間分布に基づき決定する方法を提案している[14][15]。同手法は、道路ネットワークの空間分布は、その場所の地図の複雑さを反映するという仮定に基づいている。本研究は、3章の予備実験により同手法の有用性を確認した上で、同手法を改変した手法を提案するが、目的が異なる。Yan らの手法は、地図検索等の結果として指定された場所の地図を、最初に表示する際のスケール(Initial Scale)の決定を目的としており、経路案内サービスでの利用は考慮していない。本研究では、経路案内サービスに特化した地図表示を目的としており、利用者が、経路上を移動しながら、サイズが限られたスマートフォンの表示画面から、現在位置周辺の地図と経路を読み取ることを考慮している。

## 3 道の複雑さの指標に関する予備実験

先行研究[14][15]で提案された道路ネットワークの複雑さの指標について、経路上での遷移を、直感的な指標と比較し、道の複雑さの指標としての有用性を確認する。

### 3.1 定義

本研究では、経路上の各地点における道の複雑さの指標を、道路ネットワークを用いて定める。道路ネットワーク  $G = (V, E)$  とは、ノード集合  $V$  とエッジ集合  $E$  で構成されるグラフ構造のデータであり、道路の形状、位置、接続関係を示す。ノードは交差点または道路の端点であり、位置座標（経度、緯度）をもつ。エッジはノード間の道路であり、その長さの情報をもつ。経路案内の対象を、道路ネットワーク上の経路とする。経路の最初および最後のノードを出発地点および目的地点と呼ぶ。方向転換を行う交差点のような、経路案内において強調するノードを案内地点と呼ぶ。

以上を用いて、指定した注目地点  $i$  周辺の道の複雑さの度合いとして、直感的な指標である周辺ノード密度および周辺エッジ密度と、先行研究で提案された指標である隣接ノード密度を、以降で定義する。

#### 周辺ノード密度

地点  $i$  を中心とした辺長  $2r$  の正方形領域  $R_{r,i}$  内における周辺ノード密度  $d_{i,r}^{\text{vertex}}$  を式(1)で定める。

$$d_{i,r}^{\text{vertex}} = |V_{i,r}| / S_r \quad (1)$$

ここで、 $V_{i,r}$  は、 $R_{r,i}$  に含まれるノード  $v \in V$  の集合であり、 $S_r$  は、 $R_{r,i}$  の面積であり、 $S_r = 4r^2$  である。本指標は、正方形で定義した  $i$  の周辺領域内におけるノード密度に相当する。

#### 周辺エッジ密度

$R_{r,i}$  内における周辺エッジ密度  $d_{i,r}^{\text{edge}}$  を式(2)で定める。

$$d_{i,r}^{\text{edge}} = \text{length}(E_{i,r}) / S_r \quad (2)$$

ここで、 $E_{i,r}$  は、両端のノードが  $R_{r,i}$  に含まれるエッジ  $e \in E$  の集合であり、 $\text{length}(A)$  は、エッジの集合  $A$  に含まれるエッジの長さの和を表す。

#### 隣接ノード密度

Yan らの研究[14][15]で用いられた手法であり、周辺の領域

を定めるパラメータ  $r$  が不要である。地点  $i$  周辺の隣接ノード密度  $d_i^{\text{delaunay}}$  を式 (3) で定める。

$$d_i^{\text{delaunay}} = |D_i|/\text{area}(D_i) \quad (3)$$

図 2 のような、 $V$  に道路ネットワークの密度を求める地点  $i$  を加えたノード集合のドローネー図において、 $i$  とドローネー辺で結ばれたノードの集合を、ドローネー隣接ノード集合  $D_i$  と定義する。 $D_i$  は、ドローネー図の性質から多角形領域を構成する。

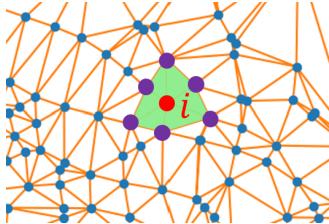


図 2: 地点  $i$  (赤色の丸) 周辺のドローネー図。青色の丸が道路ネットワークのノードで、オレンジ色の線がドローネー辺。紫色の丸がドローネー隣接ノードで、緑色の領域がドローネー隣接ノード集合  $D_i$  が構成する多角形領域。

### 3.2 各指標の有効性の比較

定義した 3 種類の指標について、道の複雑さを示す指標としての有効性を、実データにより確認する。道路ネットワークデータを、OpenStreetMap より取得した。道路ネットワーク上の経路を、経路探索 API (Mapbox Directions API) に出発地点、目的地点、移動手段として自転車を指定して取得した。これらを図 3 に示す。パラメータ  $r$  を変えて求めた、周辺ノード密度、および、周辺エッジ密度の経路上の遷移をそれぞれ図 4, 5 に示す。隣接ノード密度の経路上の遷移を図 6 に示す。

次に、経路上の各地点における道の複雑さの度合いを、各地点の周囲の風景 (Google ストリートビューの写真) と、地図上の道路ネットワークの目視により、主観的に確認した。図 3 の案内地点番号 0 番から 4 番までは駅周辺の市街地で、比較的道の複雑さの度合いが高く、7 番から 12 番までは住居と田畠が混在する郊外で、比較的道の複雑さの度合いが低く、14 番から 17 番までは再び駅周辺の市街地で、比較的道の複雑さの度合いが高い。

周辺ノード密度、周辺エッジ密度については、 $r=100, 200, 400\text{m}$  の場合に道の複雑さの遷移が反映された結果となっている。しかし、 $r$  が小さすぎると、計算対象のノード数やエッジ長の総和が小さくなることで値が不安定になる。 $r$  が大きすぎると、一定値に近づいてしまう。つまり、周辺ノード密度、周辺エッジ密度を求める際には、パラメータ  $r$  の適切な値を何らかの方法で決定する必要がある。

隣接ノード密度については、パラメータ  $r$  を設定することなく、経路に沿った道の複雑さの遷移が反映された結果が得られており、指定された地点に対する周囲の道の複雑さを示す指標として有用と考えられる。

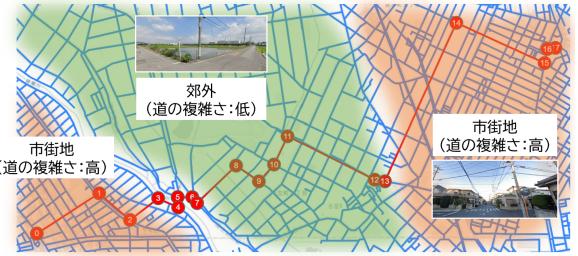


図 3: 実験に用いた経路と道路ネットワーク。赤線は埼玉県東川口駅 (左下 0 番) から越谷駅 (右上 17 番) までの自転車向け経路。番号の付いた赤丸は案内地点。青線は道路ネットワーク。図中の写真は Google ストリートビューで確認した経路周辺の風景。

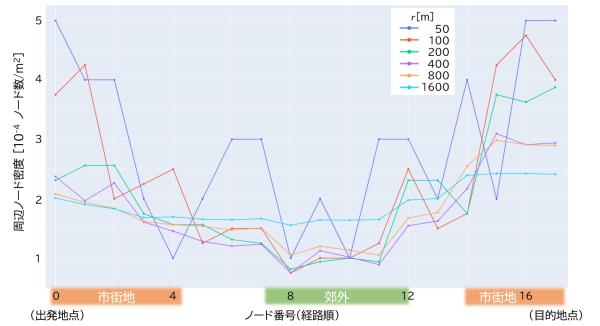


図 4: 周辺ノード密度 (ノード番号は図 3 に対応)

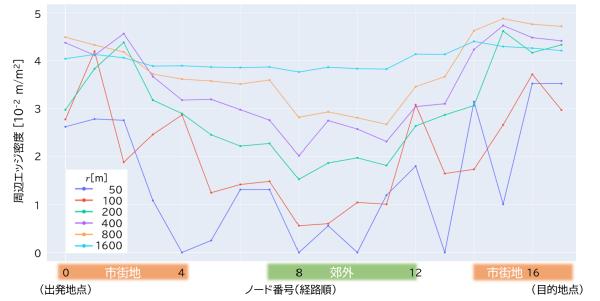


図 5: 周辺エッジ密度 (ノード番号は図 3 に対応)

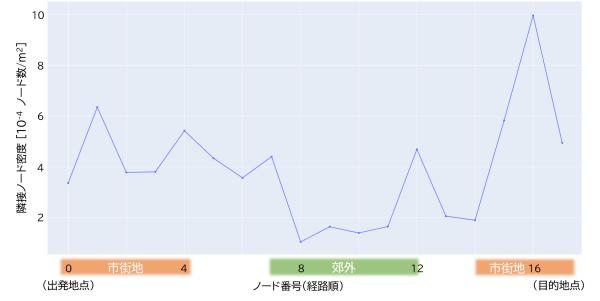


図 6: 隣接ノード密度 (ノード番号は図 3 に対応)

## 4 提案手法

経路案内における地図提示に特化した道の複雑さの指標である、道路ネットワーク密度を、予備実験の結果に基づき、隣接ノード密度を拡張した新しい手法として提案する。

#### 4.1 道路ネットワーク密度の算出

Web 地図を用いた自転車・歩行者向け経路案内サービスの利用者の関心が主に進行方向の領域に向いている考慮することで、経路案内に特化した指標を提案する。進行方向の領域を重視するために、式 4 に示すドロネー隣接ノード  $v \in D_i$  の重み  $w_v$  を用いる。

$$w_v = \frac{1}{1 + e^{0.2(\theta_v - 90)}} \quad (0^\circ \leq \theta_v \leq 180^\circ) \quad (4)$$

$\theta_v$  は、 $i$  における、進行方向と  $v$  の方向とのなす角（単位は°）である。 $w_v (0 \leq w_v \leq 1)$  は、 $v$  が進行方向にあるほど大きい値をとる。

以降で、進行方向の領域を重視した、3 種類の道路ネットワーク密度を定義する。

##### 面積加重隣接ノード密度

$i$  における進行方向の領域の面積に重みをつけて隣接ノード密度を求める。地点  $i$  周辺の面積加重隣接ノード密度  $d_i^{\text{area}}$  を、式 (5) で定める。

$$d_i^{\text{area}} = |D_i| / \text{area}(D_i') \quad (5)$$

$D_i'$  は、 $i$  における進行方向の領域の面積に重みをつけるように  $D_i$  の地理的座標を変換したノード集合である。図 7 で示すように、 $i$  と  $D_i$  の距離の、重み  $w_v$  による加重平均を求め、 $w_v$  が小さい  $v$  ほど  $i$  との距離を加重平均に近づけるよう、 $D_i$  の座標を変換する。 $i$  と  $v$  との距離を  $l_v$  として、 $i$  と  $v' \in D_i'$  との距離  $l'_v$  を式 6 で定める。

$$l'_v = l_v + \left( \frac{\sum_{v \in D_i} w_v l_v}{\sum_{v \in D_i} w_v} - l_v \right) (1 - w_v) \quad (6)$$

##### ノード加重隣接ノード密度

図 8 のように、 $i$  における進行方向の領域にあるノードに重みをつけて隣接ノード密度を求める。地点  $i$  周辺のノード加重隣接ノード密度  $d_i^{\text{node}}$  を、式 (7) で定める。

$$d_i^{\text{node}} = \sum_{v \in D_i} w_v / \text{area}(D_i) \quad (7)$$

##### 前方・後方分割隣接ノード密度

進行方向に垂直な線  $m$  で、 $i$  周辺を進行方向側・進行方向反対側の 2 領域に分割する。進行方向側・進行方向反対側それぞれ密度を算出し、その線形和をとりパラメータを調整することで、進行方向側に重みをつけた隣接ノード密度を求める。地点  $i$  周辺の前方・後方分割隣接ポリゴン密度  $d_{i,\alpha}^{\text{split}}$  を式 8 で定める。

$$d_{i,\alpha}^{\text{split}} = \alpha(|D_i^{\text{front}}| / \text{area}(D_i^{\text{front}})) + (1 - \alpha)(|D_i^{\text{back}}| / \text{area}(D_i^{\text{back}})) \quad (8)$$

$\alpha$  は  $0 \leq \alpha \leq 1$  のパラメータである。図 9 で示すように、 $D_i^{\text{front}}$  は、 $D_i$  のうち  $m$  より進行方向側にあるノードに  $m$  と  $D_i$  を結ぶドロネー辺との交点 2 点を加えたノード集合で、 $D_i^{\text{back}}$  は、 $D_i$  のうち  $m$  より進行方向反対側にあるノードに  $m$  と  $D_i$  を結ぶドロネー辺との交点 2 点を加えたノード集合である。

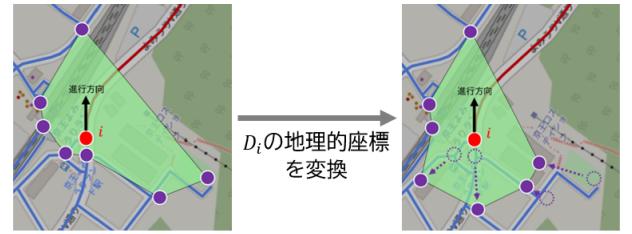


図 7:  $D_i$  の地理的座標の変換。赤色の丸が  $i$ 、紫色の丸が  $D_i$ 。緑色の領域が、 $D_i$  が構成する多角形領域。

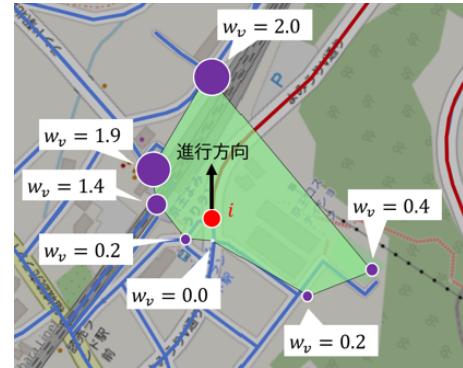


図 8: ノード重み付けの概念図。赤色の丸が  $i$ 、紫色の丸が  $D_i$ 。緑色の領域が、 $D_i$  が構成する多角形領域。

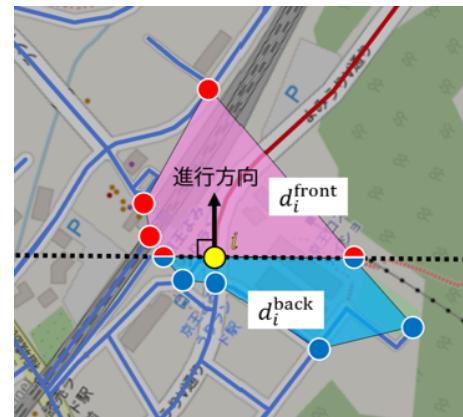


図 9: 前方・後方分割の概念図。黄色の丸が  $i$ 。赤色の丸が  $D_i^{\text{front}}$  で、ピンク色の領域が、 $D_i^{\text{front}}$  が構成する多角形領域。青色の丸が  $D_i^{\text{back}}$  で、水色の領域が、 $D_i^{\text{back}}$  が構成する多角形領域。

#### 4.2 地理的条件の考慮

提案手法で道路ネットワーク密度を算出する際には、道路ネットワークデータのノードからなるドロネー図を用いるが、丘周囲の崖沿いや線路・川沿いの地点では、現地から見えない丘や線路・川の反対側の地点がドロネー隣接ノードとなり、算出される密度に大きく影響する場合がある。そこで、以下の方法で、このような地理的条件を考慮した道路ネットワーク密度を算出する。

地点  $i$  におけるドロネー隣接ノード集合  $D_i$  からなる多角形を生成する際に、条件式 9 を満たすノード  $p$  を  $D_i$  から除外する。

$$ip \text{ 間の経路距離} / ip \text{ 間の直線距離} > \sigma \quad (9)$$

ここで、経路距離は、道路ネットワーク上の最短経路の距離である。 $\sigma$  は定数で、1 以上の実数である。

#### 4.3 ズームレベルの決定

現状の主要な経路案内サービスでは、ズームレベルの自動操作は行われず、必要に応じてユーザがズーム操作を行っている。本研究では、この経路案内サービス利用時のズーム操作のログデータを用い、ログにない経路を含む、任意の経路上の各地点を表示する際のズームレベルを決定する。ここで、地図のズームレベルとは、Web 地図サービスで用いられる地図のズームの度合いで、値が 1 増えると、地図内の要素が縦横各 2 倍の長さで表示されるよう拡大される。また、各利用者のズーム操作ログデータは、経路上の各地点でその利用者が指定したズームレベル（ユーザ指定ズームレベルと呼ぶ）と、その地点における道路ネットワーク密度の組の集合とする。

任意の経路上の地点  $i$  におけるズームレベル  $z_i$  を、その地点の道路ネットワーク密度  $d_i$  を用い、式 10 で算出する。

$$z_i = c_1 \ln d_i + c_2 \quad (10)$$

$c_1, c_2$  は実数の定数であり、以降に示す方法でアップサンプリングしたズーム操作ログデータにおける、ズームレベルと道路ネットワーク密度の分布から対数近似曲線を求めて決定する。ズーム操作ログデータ中で、ユーザ指定ズームレベルが相対的に小さい地点の数は、大きい地点の数より、経験的にかなり少ないため、ログデータをそのまま用いて式 10 のパラメータを決定すると、相対的に小さなズームレベルが算出されにくくなる。よって、地点数の偏りの影響を除いて、ユーザ指定ズームレベルとネットワーク密度の関係を求めるため、ユーザ指定ズームレベルの分布が均等になるように、入力データをアップサンプリングしておく。

具体的には、図 10 で示すように、ユーザ指定ズームレベルを、最小値から最大値まで等間隔に 10 ブロックに分割し、各ブロックにおいて、データ数が全ブロックのデータ数の最小公倍数になるよう、ブロック内のデータ全体を複製する。

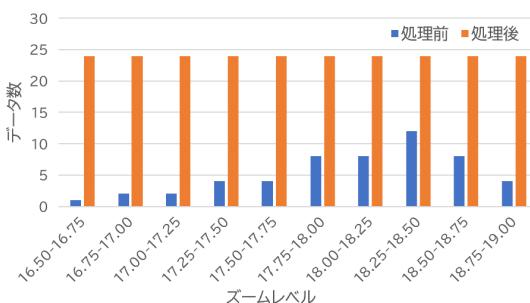


図 10: データ数調整処理の例。処理前データのズームレベルの最小値が 16.50、最大値が 19.00 であった場合。

## 5 経路案内アプリケーション

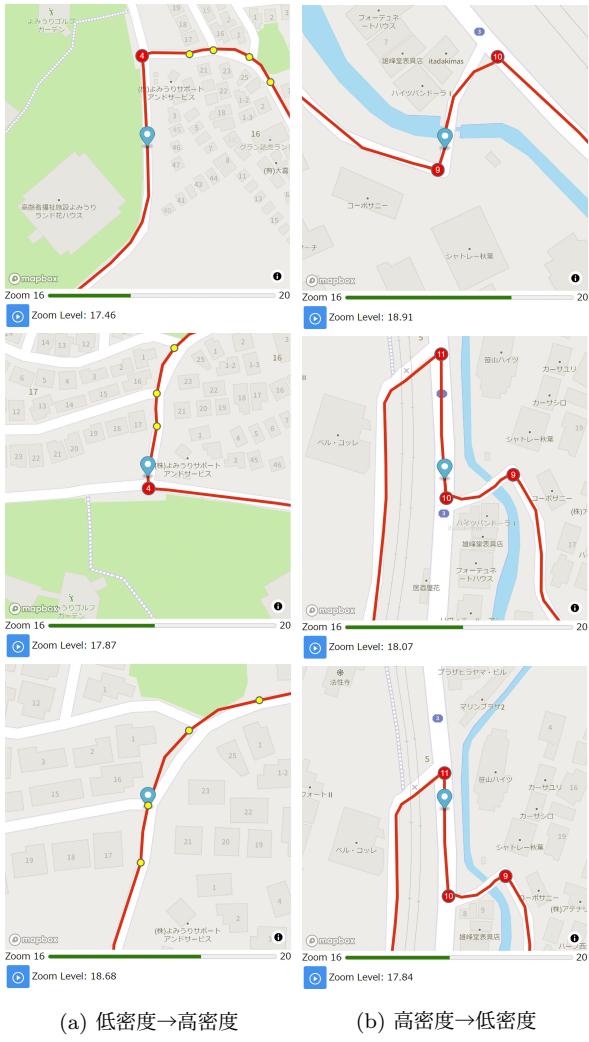
提案手法により算出した道路ネットワークの密度を用いて、経路上を移動するユーザの、現在位置周辺の道路ネットワーク密度に応じたスケールで地図を提示するアプリケーションを実装した。

Web アプリケーション (JavaScript) 上で出発地点と目的地点を指定すると、サーバ (Python Flask) で以降に示す処理を行なう。まず、経路探索 API (Mapbox Directions API) に出発地点、目的地点、移動手段として自転車を指定し、経路データを取得する。次に、経路周辺の道路ネットワークを、OpenStreetMap の地理空間情報の取得、可視化、分析を行なう Python パッケージ OSMnx を利用し取得する。経路データのノードを道路ネットワークデータのノードにフィッティングさせ、ノードごとに面積加重隣接ノード密度を算出し、提案手法により各ノードのズームレベルを決定する。

各ノードにズームレベルを付与した経路データを用いて、Web アプリケーション上で地図を提示する。Web 地図 (Mapbox GL JS) 上に、経路を線で、現在位置を画面中央のアイコンで表示する。ユーザの移動（地図表示領域の移動）に合わせて、ズームレベルが自動で切り替わる。現在位置におけるズームレベルは、現在位置のある経路辺の 2 頂点間で、現在位置が進んだ割合に応じて、2 頂点に指定されたズームレベルの間で線形に変化するよう定める。本実装では、経路上を等速で移動するユーザを想定して、地図の表示領域を移動（パン）するアニメーションを表示する。

アプリケーションの画面キャプチャを、図 11 に示す。図 11(a) は、経路の進行方向左側が遊園地に面している、周辺の道路ネットワーク密度が低い領域から、戸建て住宅が立ち並ぶ、周辺の道路ネットワーク密度が高い領域へ移動している場面である。周辺の道路ネットワーク密度の変化に応じて、自動でズームインが行なわれている。図 11(b) は、(a) とは逆に、住宅地（道路ネットワーク密度が高い）から水路と線路に挟まれた道路（道路ネットワーク密度が低い）に出た場面で、自動でズームアウトが行なわれている。

アプリケーション実行時、一連のプロセスのうち最も処理時間が掛かったのは、経路周辺の道路ネットワークデータ取得する処理であった。出発地点と目的地点を利用者が入力し、GPS 等で取得したユーザの現在地に応じてリアルタイムの経路案内を行なうような、実利用向けのアプリケーションを実装する際には、利用する可能性の高い領域（例えば、現在地の周辺や、過去に検索した経路の周辺等）の道路ネットワークデータをキャッシュするなどの工夫が有効であると考えられる。



(a) 低密度→高密度

(b) 高密度→低密度

図 11: 地図提示アプリケーションの画面（アニメーションのキャプチャ）. 経路（赤色の線）上のユーザーの現在位置（画面中央にある青色のアイコン）の移動に合わせて、図の上から下の順でズームレベルが自動で切り替わる. (a) は道路ネットワーク密度が低い領域から高い領域へ移動している場面、(b) は道路ネットワーク密度が高い領域から低い領域へ移動している場面. 数字が書かれている赤色の丸は案内地点（方向転換する交差点など、経路案内上重要な地点）となるノードで、黄丸は案内地点以外のノード. 地図下部のゲージおよび数字は、その場面での地図のズームレベルを表す.

## 6 評 価

本研究では、経路案内の利用者実験を実施し、ユーザー指定ズームレベルのデータを取得した. 実験は、Web 地図上で経路のノード上をユーザーの現在地表示が移動するもので、参加者は経路のノードごとにズーム操作を行ない、適切なズームレベルを決定する. 4 種類の経路（経路 A, B, C, D とする）、4 人の参加者（参加者 1, 2, 3, 4 とする）で実施し、ユーザー指定ズームレベルのデータを計 16 種類取得した.

利用者実験で取得したユーザー指定ズームレベルと、隣接ノード密度 [14] [15]、面積加重隣接ノード密度、ノード加重隣接ノード密度

密度、前方・後方分割隣接ノード密度の 4 種類の道路ネットワーク密度を用いて、ズームレベルを決定した. まず、同一経路、同一参加者のデータを適用した場合の、道路ネットワーク密度とユーザー指定ズームレベルの関係、および式 10 の曲線を、図 12 に示す. 利用者実験では、道路ネットワーク密度が高いほど、ユーザー指定ズームレベルが高くなる傾向が得られた. 4 種類の道路ネットワーク密度いずれを適用した場合でも、決定係数  $R^2$  は十分高い値となっており、式 10 によるズームレベルの決定は妥当であると考えられる.

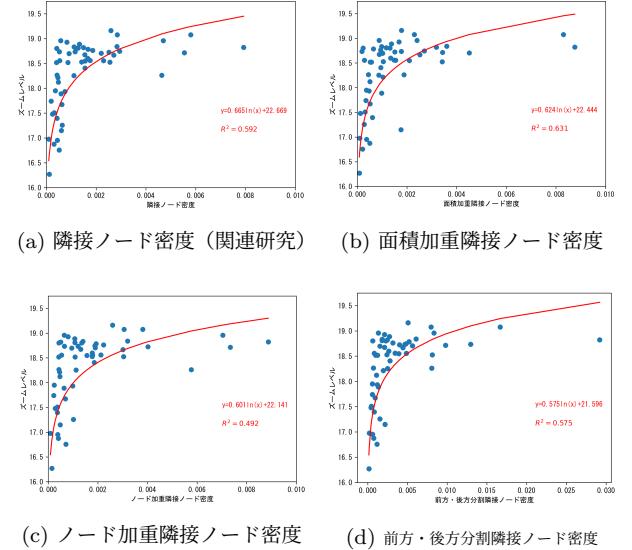


図 12: 同一経路（経路 B）、同一参加者（参加者 1）での、道路ネットワーク密度  $x$  とユーザー指定ズームレベル  $y$  の関係. 各グラフ中に記載した数式は、上段が近似曲線の式、下段が決定係数. 前方・後方分割隣接ノード密度のパラメータは  $\alpha = 0.8$ . 前方・後方分割隣接ノード密度のみ横軸の目盛りが異なる.

次に、適用経路を変更した同一参加者のユーザー指定ズームレベルと、道路ネットワーク密度として面積加重隣接ノード密度を用いた場合の、面積加重隣接ノード密度とユーザー指定ズームレベルの関係、および式 10 の曲線を、図 13 で示す. 4 経路それぞれの式 10 の曲線と、4 経路すべてのデータを利用した場合の式 10 の曲線を、図 14 で示す. 同一参加者では、経路を変更した場合でも概ね同様のズームレベル算出式となっており、特に、経路 D を除く 3 経路については、取りうる面積加重隣接ノード密度の値の範囲において、ほとんど等しいズームレベルが導出できる関数となっている. 本研究では 4 種類の経路について実施した利用者実験のデータを用いたが、より多経路のズーム操作ログを取得すれば、算出式は収束すると考えられる.

次に、同一経路で、異なる参加者のユーザー指定ズームレベルと、道路ネットワーク密度として面積加重隣接ノード密度を用いた場合の、面積加重隣接ノード密度とユーザー指定ズームレベルの関係、および式 10 の曲線を、図 15 で示す. 道路ネットワーク密度が高いほどズームレベルが高くなる傾向は参加者に共通していたが、参加者によって道路ネットワーク密度-ユーザー指定ズームレベルデータの分布が大きく異なるため、式 10 の

係数が異なる。

以上のことから、ズームレベル算出式 10 は利用者ごとに定まり、同じ利用者では任意の経路に適用可能であると考えられる。

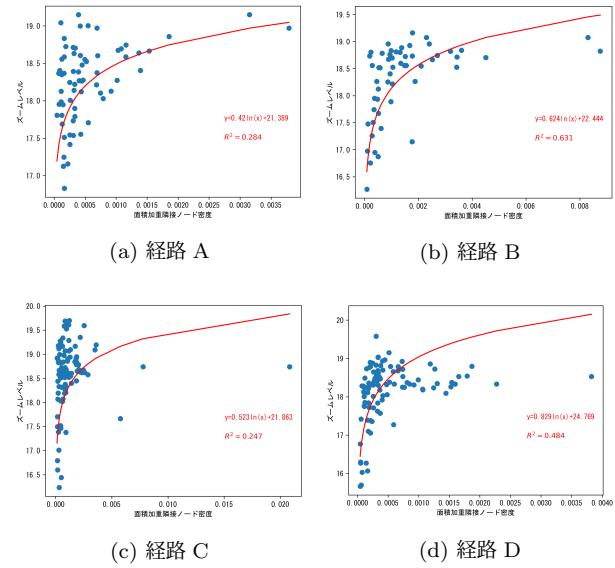


図 13: 同一参加者（参加者 1）で、異なる経路での、面積加重隣接ノード密度  $x$  とユーザ指定ズームレベル  $y$  の関係。各グラフ中に記載した数式は、上段が近似曲線の式、下段が決定係数。

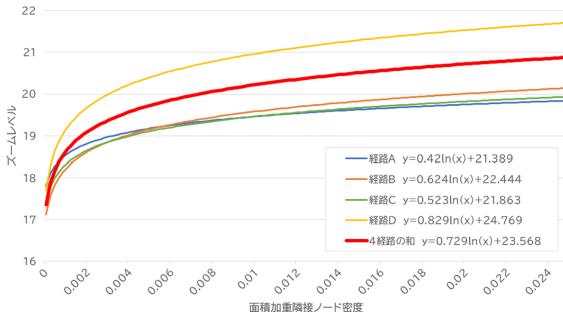


図 14: 同一参加者で、異なる経路での、面積加重隣接ノード密度  $x$  とユーザ指定ズームレベル  $y$  の曲線（式 10）。「4 経路の和」は、経路 A, B, C, D すべてのデータを用いた場合。

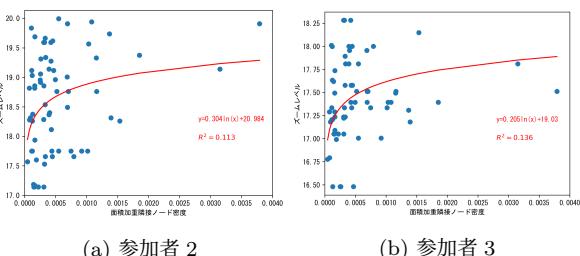


図 15: 同一経路（経路 A），異なる参加者での、面積加重隣接ノード密度  $x$  とユーザ指定ズームレベル  $y$  の関係。各グラフ中に記載した数式は、上段が近似曲線の式、下段が決定係数。

ユーザ指定ズームレベルと、提案した道路ネットワーク密度

から算出したズームレベルを、経路の出発地点から目的地点への順で並べた遷移を図 18 に示す。4 種類の道路ネットワーク密度いずれを用いても、ある程度利用者の求めるズームレベルを算出できた。特に、面積加重隣接ノード密度 [14] [15] を用いて算出したズームレベルが、隣接ノード密度 [14] [15] と比較してユーザ指定ズームレベルにより近い値を示しているノードが 13 点あり、例えば図 18 中のノード  $P$  では、図 16 で示すように道の複雑さの度合いが高くなる場所で、進行方向の領域の面積に重みをつけたことにより、適切なズームレベルが算出できた。



(a) 隣接ノード密度（先行研究） (b) 面積加重隣接ノード密度

図 16: 経路上の地点  $P$  の密度を算出する多角形領域。黄色の五角形のアイコンが  $P$  の位置、アイコンの尖った部分の指す方向（左下）が  $P$  での進行方向。緑色の領域が、 $P$  のドロネー隣接ノード集合が構成する多角形領域。背景地図（OpenStreetMap）の赤色の線が経路。経路上で、赤色の丸が案内地点、黄色の丸が案内地点以外のノード。青色の線が道路ネットワーク。

最後に、地理的条件を考慮した効果について評価する。図 18 中の地点  $Q, R$  周辺の、ドロネー隣接ノード集合からなる多角形領域を地図上に可視化した様子を、図 17 に示す。地理的条件を考慮しない場合は、 $Q, R$  からは見えないような、丘（背景地図で緑色の森林領域）や川に隔てられた反対側の地点がドロネー隣接ノードとなることで、密度の値が小さくなっているのに対し、地理的条件を考慮した場合は、 $Q, R$  が位置している市街地内のドロネー隣接ノードにより密度が計算され、密度の値が大きくなっている。



(a) 地理的条件を考慮しない (b) 地理的条件を考慮する

図 17: 経路上の地点  $Q, R$  での、面積加重隣接ノード密度を算出する際のドロネー隣接ノード集合からなる多角形領域。領域の色は算出された密度を表す。背景地図は OpenStreetMap。赤色の線が経路、黄色の丸が経路のノード。青色の線が道路ネットワーク。

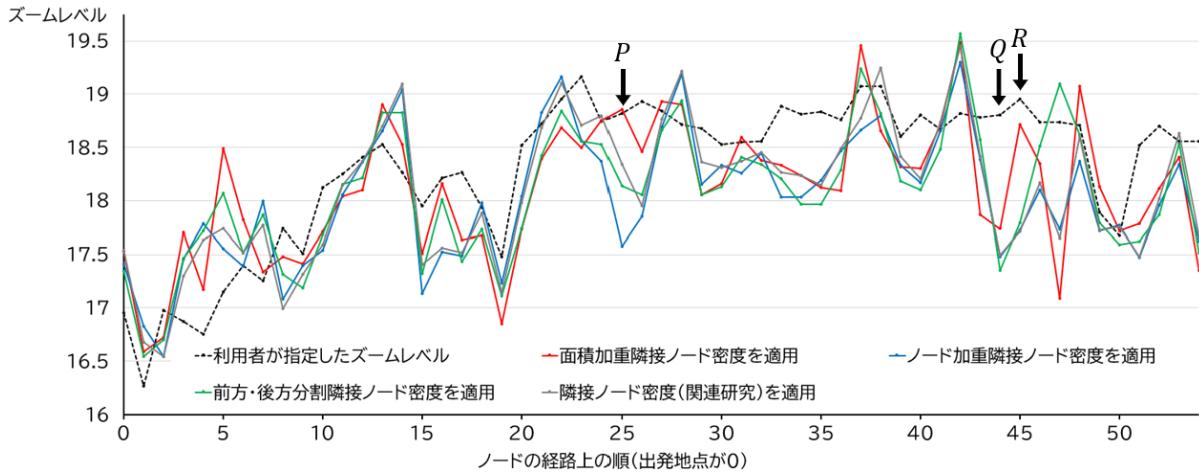


図 18: ユーザ指定ズームレベルと、算出したズームレベルの遷移。面積加重隣接ノード密度を適用時ののみ、地理的条件を考慮したドロネー隣接ノードの除外を行なっている。横軸は、出発地点を 0 として経路上を移動する際のノードの訪問順。図中  $P, Q, R$  は説明のための記号。

## 7 まとめ

本研究では、地点周辺の道の複雑さの指標として、経路案内に特化した道路ネットワーク密度を提案した。経路上の各地点における適切なズームレベルを、地図アプリケーションによる経路案内のユーザ実験により取得し、経路上の各地点の道路ネットワーク密度から、その地点に適切なズームレベルを決定する手法を提案した。道路ネットワークデータを用いて提案手法を定量的に評価し、特に、郊外と住宅街の境目などの、道の複雑さが大きく変化する地点において、提案手法が有効であることを確認した。提案手法を経路案内アプリケーションとして実装し、動作を検証した。経路上での利用者の移動に合わせて、自然なズームレベルの変更が行なわれ、経路案内に適切なズームレベルで地図が提示されていることが確認できた。

今後の課題としては、道路ネットワークデータの地理的特徴に起因して、道路ネットワーク密度が適切に算出できない場合がある点、道路ネットワーク密度からズームレベルを算出する閾値を、少ない地点数でのユーザ指定ズームレベルの取得によって利用者個人に最適化する必要がある点が挙げられる。

## 文 献

- [1] Oliveira, F., Nery, D., Costa, D.G., Silva, I. and Lima, L.: A Survey of Technologies and Recent Developments for Sustainable Smart Cycling, *Sustainability* 2021, 13, 3422 (2021).
- [2] 吉田長裕:自転車利用促進の動き, *交通政策研究*, 2022, pp.66-67 (2022).
- [3] Kapousizis, G., Ulak, M.B., Geurs, K. and Havinga, P.J.M.: A review of state-of-the-art bicycle technologies affecting cycling safety: level of smartness and technology readiness, *Transport Reviews* (2022).
- [4] Wang, F., Yang, L., Sakamoto, D. and Igarashi, T.: Hierarchical route maps for efficient navigation, Proc. 19th international conference on Intelligent User Interfaces, 169-178 (2014).
- [5] Javed, W., Ghani, S. and Elmqvist, N.: Polyzoom: multi-scale and multifocus exploration in 2d visual spaces, Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 287-296 (2012).
- [6] Otten, H., Hildebrand, L., Nagel, T., Dörk, M. and Müller, B.: Shifted Maps: Revealing spatio-temporal topologies in movement data, Proc. 2018 IEEE VIS Arts Program (VISAP), 1-10 (2018).
- [7] Karnick, P., Cline, D., Jeschke, S., Razdan, A. and Wonka, P.: Route Visualization Using Detail Lenses, in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, no. 2, 235-247 (2010).
- [8] Wei, B. and Schiewe, J.: Influence of Viewing Field on Zoom Levels in Pedestrian Orientation Task Using Smartphones, Proc. International Cartographic Association, 2, 144, pp.1-9 (2019).
- [9] Wu, A. and Zhang, X.: Identifying Proper Scales on Digital Maps for In-Vehicle Navigation Systems. In Proc. International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, Lecture Notes In Computer Science, 5616, pp.262-270 (2009).
- [10] Hermer, L. and Spelke, E. S.: A Geometric Process of Spatial Reorientation in Young Children. *Nature* 370, 6484, pp.57-59 (1994).
- [11] Kratz, S., Brodien, I. and Rohs, M.: Semi-automatic zooming for mobile map navigation, Proc. 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '10), 63-72 (2010).
- [12] Partala, T., Luimula, M. and Saukko, O.: Automatic rotation and zooming in mobile roadmaps, Proc. 8th international conference on Human-computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '06), 255-258 (2006).
- [13] Sheleiby, M., Malek, M.R., Alesheikh, A. and Amirian, P.: Automatic Map Scaling in Car Navigation Systems Using Context-aware Computing, *World Applied Sciences Journal* 3, 101-106 (2008).
- [14] Yan, C., Yang, L., Gartner, G., Zhu, Q. and Liu, X.: Intelligent initial map scale generation based on rough-set rules, *Arabian Journal of Geosciences* 12, 1-12 (2019).
- [15] Yang, L., Yan, C., Zhu, Q., Wang, S., Guo, W.: A Smart Initial Map Scale Model Based on Distribution of Road Network, *Principle and Application Progress in Location-Based Services, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (2014).