

# 都市部の洞道における位置推定技術

福田脩希<sup>1</sup> 森信一郎<sup>1</sup>

**概要:** 都市部の地下で複雑に展開される洞道では、歩行者が自身の位置情報を把握することが難しい。それは、中の景色が単調かつ、現在位置を示す記号が随所にしか設けられていないことに起因する。そこで、洞道に限らない屋内位置推定技術として、Wi-Fi や音波などのインフラを用いた技術が存在する。しかし、地震や火災などの災害により停電が起きると機能しなくなる。そこで本論文では、Wi-Fi や音波などのインフラ設備を使用せず、端末のみで測位が可能である位置推定技術として、自律航法で計測した歩行軌跡を地図とパターンマッチングさせる手法を提案するとともに、その評価と考察を述べる。

**キーワード:** 屋内測位, パターンマッチング, 自律航法

## Location estimation techniques in urban cable tunnel

SHUKI FUKUDA<sup>1</sup> SHINICHIRO MORI<sup>1</sup>

**Abstract:** It is difficult for workers to know their location in the complex underground cable tunnel of urban areas. This is due to the monotony of the interior landscape and the fact that there are only a few symbols to indicate the current location. Therefore, indoor location estimation techniques that are not limited to caves are available using infrastructure such as Wi-Fi and sound waves. However, these technologies cease to function when power outages occur due to disasters such as earthquakes and fires. In this paper, we propose a method of estimation by pattern-matching a walking trail measured by autonomous navigation with a map to enable location estimation without using infrastructure such as Wi-Fi or sound waves.

**Keywords:** Indoor Positioning, Pattern Matching, Dead Reckoning

### 1. はじめに

オフィスビルやホテル、銀行、情報通信機関などの建物が多くひしめき合う日々の日本経済を支えるビジネス地域は、普段我々が意識しない地下によって支えられている。その地域で使う電力や冷暖房設備などのエネルギー源（電気や熱、ガス）を地下のトンネルが供給しているからである。このエネルギー源を供給する地下トンネルは洞道と呼ばれ、現在の日本経済を支える重要なインフラである。

洞道とは、前述のようにエネルギーを供給する地下トンネルで内部は通信ケーブルや熱・ガス管が存在する。この内部は人が入ることもでき、定期的に作業者がケーブルや管の点検業務を行っている。しかし、作業者は業務中の自身の位置情報を把握することが困難である。たとえば、東京の大手町と丸の内の一部のエリアでは約41万 haの建物へと洞道が延びている[1]。その洞道の総延長は3,062mで高低差や洞道が交わる交差点、ジグザグと連続で曲がる場所が存在する複雑な構造になっている。さらに、現在位置を示す記号や地図が設けられてはいるものの、設置場所がまばらなために作業者が自身の位置情報を把握するのは困難である。

洞道は現在の日本経済を支える重要なインフラで定期的に作業者が内部の点検業務を行っている。しかし、洞道の構造が複雑かつ現在位置を示す記号や地図が少ないため

に、作業者は自身の位置情報を把握できない。地震や台風による災害で停電が起きると、より位置情報の把握が困難となる。一方で、作業者の位置情報の把握は効率的な作業や災害時の効率的な避難に繋がる。したがって、停電時にも作業者の位置情報が測れる位置推定技術が必要である。本論文では外部電源を用いない位置推定技術として高精度な自律航法による位置推定を検討する。

### 2. 関連研究

地下街や駅構内における位置推定の研究として音波やWi-Fi, BLE, 歩行者自律航法がある[2],[3],[4],[5],[6]。音波とWi-Fiを用いた研究は、電源に接続したスピーカーやルーターから出る信号をもとに位置を推定する。しかし、停電で電源が停止すると信号が出ず機能しない。また、音波やWi-Fiは屋内の人・物の数や動きが精度に影響する。BLEを用いた研究は、バッテリー駆動のビーコンから出る信号をもとに位置を推定する。しかし、定期的なバッテリーの確認や交換の点検業務が必要である。歩行者自律航法は、端末で計測した人の歩行軌跡をマップマッチングという方法で地図に当てはめ位置を推定する。しかし、歩行軌跡には誤差が生じ、マップマッチングが正しく機能しない場合がある。たとえば、地点Aから直線上に角1,2があり、角1までは20m、角2までは15mとする。歩行者がこの角1を曲がって歩行軌跡を計測すると角1までの歩行距離が

<sup>1</sup> 千葉工業大学

15m

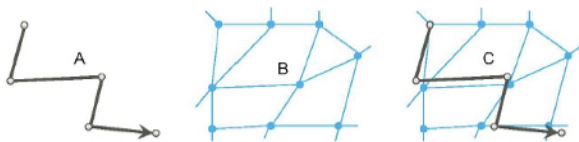


図 1 歩行軌跡を歩行空間ネットワークから探索する原理  
(出典: 歩行軌跡形状を歩行者用道路トポロジ情報から検索する屋内歩行者位置推定法)

となった。この歩行軌跡でマップマッチングをすると本来曲がっていない角 2 のルートに歩行軌跡が当てはまり、マップマッチングが正しく機能しない。この例のように、歩行者自律航法単体では誤差によりマップマッチングが機能しない。この誤差を Wi-Fi や音波、BLE で補正する研究がある。しかし、いずれもインフラ設備を使用するため停電時に機能せず、バッテリーの確認や交換の点検業務が必要である。したがって、洞道内でインフラ設備を使用しない位置推定技術の開発が必要である。

### 3. 提案手法

本論文では、インフラ設備を必要としない洞道内位置推定技術を提案する。

#### 3.1 原理

本提案手法の原理を図 1 に示す。なお、本提案手法は森による先行研究[7]がベースである。[7]は、歩行軌跡(図 1 の A)の形状と類似するルートを歩行空間ネットワーク(図 1 の B)から探し、そのルート(図 1 の C)を歩行者の現在位置とする研究である。しかし、形状と類似するルートの具体的な探索方法を述べていない。本論文ではその具体的な探索方法としてパターンマッチングを提案する。パターンマッチングで検出したルートを現在位置として推定する。

#### 3.2 パターンマッチング

パターンマッチングとは、対象のパターンと類似する物や場所を検出する手法である。迷惑メールの検出や大勢が写る写真から特定の人物の検出に使われる。本論文では歩行軌跡の形状をパターンと捉え、このパターンと類似するルートを検出する。しかし、迷惑メールや特定の人物などのパターンを検出するアルゴリズムが多く、本提案手法に適切なアルゴリズムを選ぶ必要がある。そこで、形状が類似するルートを探索するという本論文の原理からテンプレートマッチングが適切だと考えた。

##### 3.2.1 テンプレートマッチング

テンプレートマッチングとは、テンプレート画像のパターン(形)と類似する場所を原画像から検出するアルゴリズムである。テンプレート画像が原画像上を移動し、移動先で順次類似度を計算して類似場所を検出する。類似度の



図 2 事前調査のための原画像とテンプレート画像

計算は SSD (Sum of Squared Difference), SAD (Sum of Absolute Difference), NCC (Normalized Cross Correlation), ZNCC (Zero means Normalized Cross Correlation) の 4 つの手法がある。SSD と SAD は類似度が 0 に近いほど類似する。NCC と ZNCC は類似度が -1 から 1 の値をとり、1 に近いほど類似する。このテンプレートマッチングが提案手法に適切か調査を実施する。

##### 3.2.2 テンプレートマッチングの事前調査

テンプレートマッチングが本提案手法に適切か調査を実施した。調査は、図 2 に示す歩行空間ネットワーク(原画像)および歩行軌跡(テンプレート画像)を用いる。歩行空間ネットワークの赤線は歩行軌跡を計測したルートを表す。類似度の計算は ZNCC を使用する。また、マッチングの際は閾値を設ける。閾値は、0.7 以上だと歩行軌跡の計測場所を検出しない例が存在したため閾値を 0.7 とした。マッチングの際はテンプレート画像の大きさを原画像内の赤線部の大きさと揃え、テンプレート画像を 10 度ずつ回転した。テンプレートマッチングが回転や拡大、縮小に弱いからである。

##### 3.2.3 テンプレートマッチングの調査結果

テンプレートマッチングの結果を図 3 に示す。図 3 のピンクが歩行軌跡と類似した場所である。図 3 より、テンプレートマッチングは赤枠で囲んだ歩行軌跡の計測場所(現在位置)を検出する。しかし、歩行軌跡と明らかに類似しない場所を多く検出している。その場所の一例を図 4 の赤枠で示す。図 4 は、2 回曲がった歩行軌跡に対して 1 回曲がるルートを検出している。この図 4 より、テンプレートマッチングは歩行軌跡のパターンを考慮した検出ができず、適切でないかと判断する。テンプレートマッチングに代わるパターンマッチングを考案する。



図3 テンプレートマッチング結果



図4 パターンが類似しないテンプレートマッチング結果

### 3.2.4 別のパターンマッチングの考案

テンプレートマッチングに代わるパターンマッチングとして、歩行軌跡の巡回パターンが一致するルートを探査する方法を考える。巡回パターンとは歩行軌跡の巡回（曲がり）に関する情報で、本論文では巡回回数と巡回方向を巡回パターンと定義する。提案する方法のイメージを図5に示す。この方法は、巡回パターンが一致するルートを検出するため図4のルートを検出しない。そのため、テンプレートマッチングの問題を解決する方法である。しかし、この手法には考慮すべき事柄が1つある。それは、複数のルートが検出されるため現在位置が特定できないことである。そこで、2つのステップを新たに考えた。「ステップ1. 絞り込み」、「ステップ2. 尤度」である。ステップ1は、検出するルートの数を絞り込むために歩行空間ネットワーク内の特定の地点からルートを探査する。ステップ2は、ステップ1で絞り込んだルートの中から歩行軌跡と尤もしいルートを尤度で推定し最終的に現在位置を推定する。この2つのステップをあわせたパターンマッチングで現在位置を推定する。

### 3.3 全体構成

本提案手法の構成を図6に示す。構成は、ルートの探索始点を指定する「始点ノード取得」と、歩行軌跡を計測する「歩行軌跡計測」、歩行軌跡の巡回パターンを抽出する「巡回パターン抽出」、巡回パターンをもとにルートを探査する「ルート探索」、尤度で現在位置を推定する「尤度による位置推定」の5つで構成する。

#### 3.3.1 始点ノードの取得方法

始点ノードはQRコードを読み取り取得する。QRコードはURLやメールアドレスなどのテキストデータを組み

#### 歩行軌跡の巡回パターン

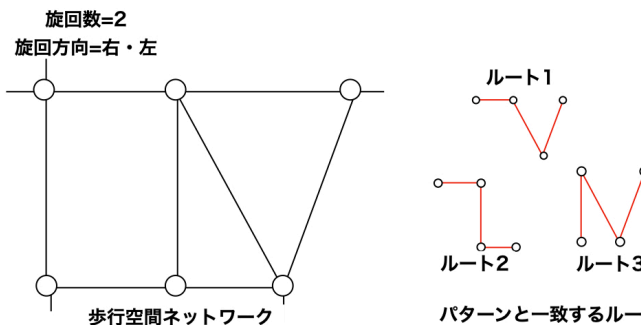


図5 歩行軌跡の巡回パターンと一致するルート探索

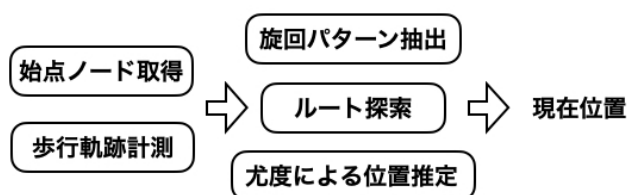


図6 提案手法の全体構成

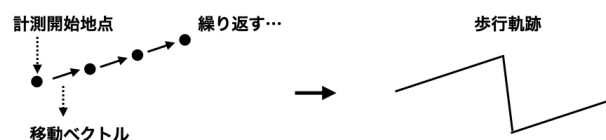


図7 移動ベクトルから歩行軌跡を計測する例

込める。このテキストデータとしてQRコードを貼った地点の座標を与え、読み取ることで始点ノードを取得する。また、QRコードの読み取りはスマートフォンやタブレットなどの携帯端末のカメラで読み取る。このように、QRコードは与えた座標情報を携帯端末のカメラで読み取れるため始点ノードの取得に適切である。ここで、QRコードを洞道内に多く設置すると本提案手法を使用せずに位置が推定できる。しかし、インフラ設備と同様にQRコードの点検・確認が必要となる。

#### 3.3.2 歩行軌跡の計測方法

歩行者の速度データと方位データから歩行軌跡を計測する。まず、速度データは携帯端末内の加速度センサで算出する。加速度センサで計測した歩行時の振動データをFFT変換し歩行周波数を求め、この歩行周波数に歩行者の身長をあわせ速度データを算出する。次に、方位データは携帯端末内の加速度センサと角速度センサで算出する。加速度センサで計測した携帯端末の姿勢情報を角速度センサの積分値で更新し方位データを算出する。そして、速度データと方位データから移動ベクトルを作成し、移動ベクトルを用いて歩行軌跡を計測する。具体的には、計測開始地点から移動ベクトルの点を逐次記録して歩行軌跡を計測する。図7に移動ベクトルから歩行軌跡を計測する様子を示す。

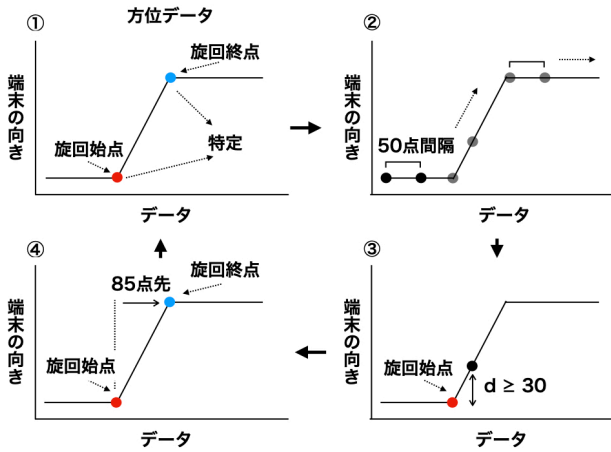


図8 旋回始点・終点の特定手順

表1 歩行空間ネットワークが持つ情報の一例

| 情報  | 情報の種類 | 説明  |
|-----|-------|---|
| ノード | ノードID | 各ノードの識別番号   |
|     | 座標    | 緯度経度(地理座標系)<br>X,Y座標(投影座標系)                                   |
| リンク | リンクID | 各リンクの識別番号   |
|     | 構成ノード | どのノードから構成されるか<br>始点(fromキー)と終点(toキー)を持つ<br>from, toにはノードIDが格納 |
|     | 長さ    | 各リンクの長さ   |

### 3.3.3 旋回パターンの抽出方法

旋回パターンは方位データから旋回部を特定して抽出する。旋回部とは方位データの中で歩行者の向きが継続的に増加・減少しているデータである。旋回始点(旋回し始める点)と旋回終点(旋回し終える点)を探して旋回部を特定する。まず、方位データを50点間隔で順次差を求め、差が30度以上になる方位データを旋回始点とする。次に、その旋回始点から85点先の方位データを旋回終点とする。この85点は旋回始点から旋回終点までの旋回時間が1.7秒(85×サンプリングレート20ms)という想定である。この手順を図8と式1に示す。式1の各変数は、 $N$ を方位データのデータ数、 $i$ をデータ番号、 $r_i$ を $i$ 番目の方位データ、 $r_{i+50}$ および $r_{i+85}$ を $i+50, i+85$ 番目の方位データ、 $P_s$ を旋回始点、 $P_f$ が旋回終点である。

$$d = |r_i - r_{i+50}| \quad (i = 1, 2, 3 \dots N - 50)$$

$$\text{if } d \geq 30$$

$$r_i = P_s, \quad r_{i+85} = P_f, \quad P_f = r_i \quad (1)$$

この手順で得た旋回始点と旋回終点の間を1つの旋回部として全体の旋回部の数を「旋回数」とする。そして、旋回終点から旋回始点を引いた値が正なら右折、負なら左折と「旋回方向」を決定する。

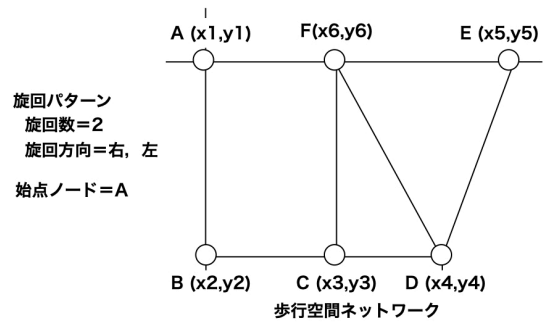


図9 旋回パターンと歩行空間ネットワークの例

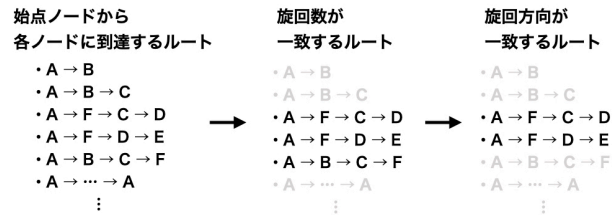


図10 ルート探索の手順

### 3.3.4 ルートの探索方法

歩行空間ネットワークから3つの手順でルートを探索する。初めに、歩行空間ネットワークが持つ情報の一例を表1に示す。歩行空間ネットワークはノードとリンクで構成し、ノードはノードIDと座標を持ち、リンクはリンクIDと構成ノード(ノードの繋がり)、長さの情報を持つ。次に、ルート探索の説明のために簡略化した歩行空間ネットワークと旋回パターン、始点ノードを図9に示す。旋回数が2回、旋回方向が右、左、始点ノードをAとしてルートを探索する。手順1: Aから行けるすべてのルートを取り出す。たとえば、図9のAからBに到達するルートは「A→B」「A→F→C→B」「A→F→D→C→B」などがある。これをAからCに到達するルート、Dに到達するルートのように到達先を各ノードにする。手順2: 1で取り出したルートの中で2回旋回するルートを取り出す。手順1のルートは座標を持つため内積を行い角度が2回取れたルートを取り出す。手順3: 2で取り出した旋回数が一致するルートの中で、右、左の順番に旋回するルートを取り出す。内積と同様に外積を行い右左折を求め、旋回方向が一致するルートを取り出す。以上の3つの手順で探索する過程を図10に示す。なお、手順3で検出したルートを歩行者の現在位置とし、複数のルートを検出した場合は現在位置となるルートを推定する。

### 3.3.5 尤度を使った位置推定の方法

検出した複数のルートから現在位置を推定する方法を述べる。方法は、観測された角度から尤もらしい角度を推定することで検出したルートを最終的に1つに絞り込む。具体的には、実際の角度に対して観測した角度の確率密度関数を抽出し、観測した角度の発生確率を求める。この発生



表 2 実験協力者のプロフィール

| 協力者 | 身長[cm] | 年齢 | 性別 |
|-----|--------|----|----|
| A   | 175    | 24 | 男  |
| B   | 170    | 23 | 男  |

表 3 調査した角度の分析結果

|       | 平均    | 標準偏差 | 最大値   | 最小値   | データ数 |
|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 60度_A | 55.95 | 1.62 | 60.51 | 51.74 | 67   |
| 60度_B | 58.78 | 1.75 | 62.77 | 54.56 | 99   |
| 90度_A | 90.57 | 1.49 | 97.46 | 86.13 | 100  |
| 90度_B | 90.03 | 1.56 | 93.51 | 85.73 | 100  |

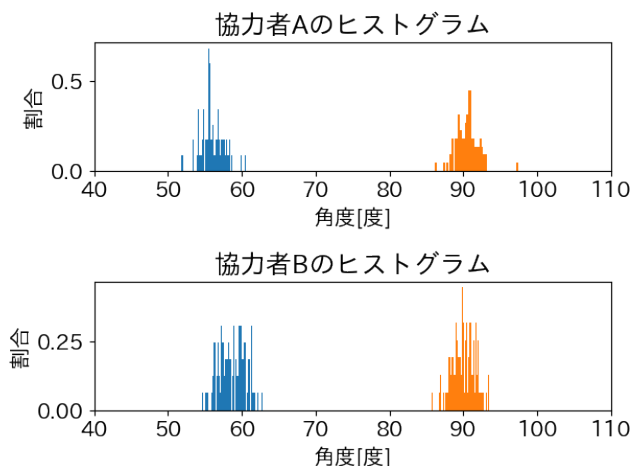


図 11 協力者 A,B における 60 度と 90 度のヒストグラム

確率が最も高くなる実際の角度を現在位置とする。ここで、実際の角度とはルートの曲がり角の角度を指し、観測した角度は歩行軌跡の角度（歩行者が曲がり角を曲がったときの角度）を指す。つまり、「歩行軌跡の角度を計測する尤もらしいルートの角度はどれか」を確率より推定し、確率が最も高いルートを現在位置とする。しかし、この確率を求めるにはルートの角度の確率密度関数が必要である。そこで、ルートの角度で計測される角度がどのような確率密度関数になるか事前調査を実施した。

### 3.3.6 調査：確率密度関数の抽出

事前調査では、ルートの角度を 60 度と 90 度とし、これらの角度で計測される角度の確率密度関数を抽出する。調査は、60 度と 90 度の曲がり角を 2 名の実験協力者が曲がり調査した。表 2 に実験協力者のプロフィールを示す。協力者はすべて千葉工業大学の学生で、携帯端末を水平に持ちながら自然に角を曲がり調査した。60 度と 90 度の調査結果を図 11 にヒストグラムで示す。図 11 の上が協力者 A、下が協力者 B、青が 60 度のヒストグラム、オレンジが 90 度のヒストグラムである。図 11 より、各協力者ともに 60 度と 90 度のヒストグラムは正規分布に従うとわかる。つまり、60 度と 90 度の確率密度関数は正規分布である。表 3 に各ヒストグラムの分析結果を示す。この結果から、60 度と 90 度の角度に対して歩行軌跡の角度が計測される確率は、式 2 に示す正規分布の確率密度関数より算出する。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (2)$$

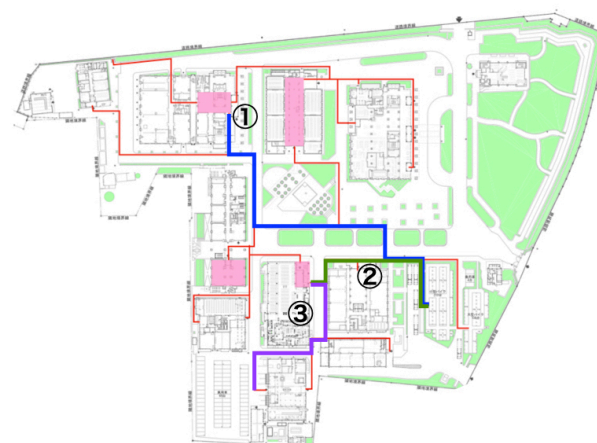


図 12 作成した歩行空間ネットワークと計測場所

式 2 の各変数は、 $\mu$  を 60 度と 90 度それぞれの平均角度、 $\sigma$  は 60 度と 90 度の各標準偏差の平均値、 $X$  が歩行軌跡の角度である。

### 3.4 提案手法のまとめ

洞道内における位置推定手法として、まず歩行軌跡の旋回パターンを式 1 より抽出する。次に、旋回パターンと一致するルートを検出する。そして、検出したルートが複数の場合は式 2 より各ルートの角度に対して歩行軌跡の角度が計測される確率を求めて現在位置を推定する。

## 4. 評価実験

本章では、実際に計測した歩行軌跡と歩行空間ネットワークを用意し、これらをパターンマッチングさせて洞道内作業者の位置推定手法として本提案手法が適切か実験を実施する。実験場所は、千葉工業大学津田沼キャンパス内である。この津田沼キャンパスを洞道と見立てた歩行空間ネットワークを作成し、3 箇所のルートで歩行軌跡を計測した。作成した歩行空間ネットワークと計測場所を図 12 に示す。図 12 のピンクの領域は実際の洞道に存在するプラントを表し、赤線が洞道を表す。色のついた 3 箇所のルートで計測した歩行軌跡を図 13 に示す。歩行軌跡は図 13 の赤い点の方向に歩いて計測した。また、歩行軌跡を計測する際は壁面に貼った QR コードを読み取ってから計測した。これは始点ノードを取得するための動作である。加えて、角を自然に曲がるよう意識した。

実験は 3 つの手順で実施した。手順 1：式 1 で旋回部を特定し旋回パターンを抽出する。手順 2：抽出した旋回パ

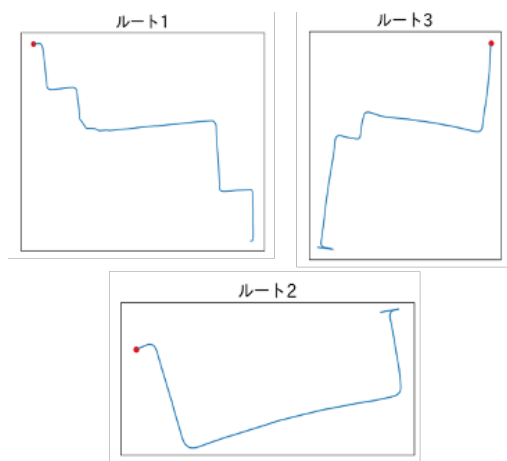


図 13 各ルートで計測した歩行軌跡

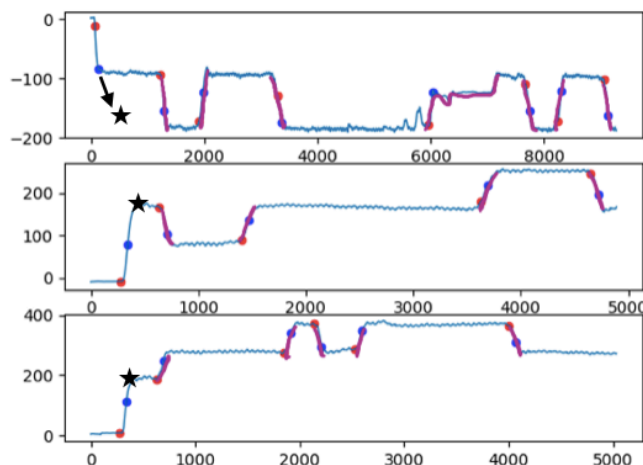


図 15 式 1 が特定した旋回部

表 4 歩行軌跡の各旋回部の旋回時間 [秒]

|       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 歩行軌跡1 | 2.54 | 3.3  | 3.7  | 24   | 3.32 | 3.26 | 2.76 |
| 歩行軌跡2 | 3.28 | 2.38 | 2.87 | 2.36 |      |      |      |
| 歩行軌跡3 | 2.02 | 2.66 | 1.54 | 2.02 | 2.44 |      |      |

表 5 各歩行軌跡の旋回パターン

|       | 旋回数 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| 歩行軌跡1 | 7   | 左折 | 右折 | 左折 | 右折 | 左折 | 右折 | 左折 |
| 歩行軌跡2 | 4   | 左折 | 右折 | 右折 | 左折 |    |    |    |
| 歩行軌跡3 | 5   | 右折 | 右折 | 左折 | 右折 | 左折 |    |    |

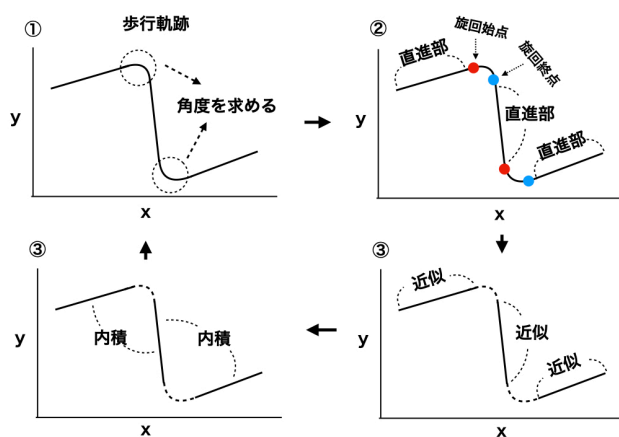


図 14 歩行軌跡の角度を求める手順

ターンと一致するルートを始点ノードから検出する。なお、始点ノードは QR コードから取得するが本実験では直接指定した。手順 3：複数のルートを検出した際に、ルートの角度に対して歩行軌跡の角度が計測される確率を式 2 より求め、現在位置を推定する。また、ルートの角度は内積で算出する。歩行軌跡の角度は、まず式 1 で特定した旋回始点と旋回終点から歩行軌跡の直進部を抽出し、正確な角度を求めるためにこの直進部を近似する。そして、近似直線同士で内積を求め角度を算出する。図 14 に歩行軌跡の角度を算出する様子を示す。以上 3 つの手順で実験を実施し、各手順で実験結果を示す。

## 4.1 実験結果

### 4.1.1 手順 1 の結果

まず式 1 が特定した旋回部を図 15 に示す。上から順にルート 1,2,3 の結果である。赤い点（旋回始点）と青い点（旋回終点）の間を式 1 が特定した旋回部、紫色の部分が実際の旋回部である。星印は QR コードを読み取る動作の後に歩き始めた場所を示す。図 15 より、式 1 が特定した旋回部は実際の旋回部上に位置するとわかる。しかし、青い点は実際の旋回部の終わりとは比べて早く特定している。これは、式 1 の旋回時間と実際の旋回時間の差が原因と考え

る。表 4 に各歩行軌跡の実際の旋回時間を示す。歩行軌跡の実際の旋回時間はおよそ 2 秒から 4 秒である。一方、式 1 の旋回時間は 1.7 秒と実際の旋回時間よりも短い。そのため、青い点が早く特定された。また、星印よりも前に旋回部を特定している。これは、QR コードを読み取る動作を携帯端末が旋回と検出したことが原因である。次に、各歩行軌跡の旋回パターンをまとめたものを表 5 に示す。なお、星印よりも前の旋回部は旋回パターンに考慮していない。各歩行軌跡の旋回数は、歩行軌跡 1 が 7 回、歩行軌跡 2 が 4 回、歩行軌跡 3 が 5 回と各歩行軌跡の実際の旋回数と同じである。また、旋回方向も実際の旋回方向と同じである。

### 4.1.2 手順 2 の結果

表 5 の旋回パターンと一致するルートを検出した結果を図 16 に示す。まず、歩行軌跡 3 は旋回パターンと一致するルートが 1 つのみで、そのルートが歩行軌跡の計測場所であることから位置推定が成功した。一方、歩行軌跡 1,2 は一致するルートを複数検出し、角度の尤度より現在位置を推定する。表 6 に歩行軌跡 1 および検出したルートの角度を示し、表 7 に歩行軌跡 2 における同様の角度を示す。表 6,7 より、各歩行軌跡で検出したルートの角度はいずれも 90 度である。



図 16 各歩行軌跡の巡回パターンと一致したルート

表 6 歩行軌跡 1 および検出したルートの角度 [度]

|       | 1  | 2  | 3  | 4   | 5  | 6  | 7  |
|-------|----|----|----|-----|----|----|----|
| 歩行軌跡1 | 88 | 91 | 89 | 100 | 98 | 91 | 94 |
| ルート1  | 90 | 90 | 90 | 90  | 90 | 90 | 90 |
| ルート2  | 90 | 90 | 90 | 90  | 90 | 90 | 90 |

表 7 歩行軌跡 2 および検出したルートの角度 [度]

|       | 1  | 2  | 3  | 4  |
|-------|----|----|----|----|
| 歩行軌跡2 | 91 | 93 | 95 | 90 |
| ルート1  | 90 | 90 | 90 | 90 |
| ルート2  | 90 | 90 | 90 | 90 |

表 8 ルート 1,2 の角度に対する歩行軌跡 1 の角度の計測確率

|      | 1    | 2    | 3    | 4     | 5        | 6    | 7    |
|------|------|------|------|-------|----------|------|------|
| ルート1 | 0.23 | 0.41 | 0.41 | 1E-09 | 1.50E-06 | 0.41 | 0.02 |
| ルート2 | 0.23 | 0.41 | 0.41 | 1E-09 | 1.50E-06 | 1.41 | 0.02 |

表 9 ルート 1,2 の角度に対する歩行軌跡 2 の角度の計測確率

|      | 1   | 2    | 3     | 4   |
|------|-----|------|-------|-----|
| ルート1 | 0.4 | 0.08 | 0.003 | 0.5 |
| ルート2 | 0.4 | 0.08 | 0.003 | 0.5 |

#### 4.1.3 手順 3 の結果

表 6,7 の角度をもとに歩行軌跡 1,2 の角度が計測される確率を式 2 より求める。その際、式 2 の平均： $\mu$  は検出したルートの角度 90 度とし、標準偏差： $\sigma$  は 1.5 (表 3 の 90 度\_AB の標準偏差の平均) とする。計算した歩行軌跡 1,2 の角度の確率を表 8,9 に示す。表 8 より、歩行軌跡 1 の確率は検出したルート 1,2 において同じ値となり、ルート 1,2 のどちらが現在位置であるか推定できなかつた。表 9 より歩行軌跡 2 も同様の結果となった。これは、ルート 1,2 の角度がすべて 90 度であることが原因と考える。このことから、尤度を用いた形状の類似だけでは現在位置を推定できない。

#### 4.1.4 各実験結果のまとめ

手順 1 の結果より、式 1 は実際の巡回部上で巡回部が特定でき巡回パターンが抽出できる。しかし、式 1 で設定した巡回時間が実際の巡回時間と比べて短いために巡回部を正確に特定できない。手順 2 の結果より、巡回パターンを用いたルート探索は歩行軌跡の計測場所を検出することがわかった。しかし、同じ巡回パターンを持つルートを複数検出した。手順 3 の結果より、複数のルートに対して角度の尤度を用いて確率を計算するが、どちらの確率も同じ値となり、現在位置を推定できない。これは、各ルートが持つ角度がすべて同じ値で形状が完全に類似したからだと考えられる。

## 5. 考察

本提案手法は巡回部を特定する式 1 より巡回パターンが抽出でき、その後のルート探索や尤度を使った確率が計算できる。しかし、式 1 で設定した巡回時間は実際の歩行者の巡回時間よりも短く、巡回部を正確に特定できなかつた。巡回部の正確な特定には歩行者の巡回時間を推定し、その巡回時間をもとに巡回部を特定する必要がある。

歩行者の巡回時間の推定は歩行者の曲がり方を特定すると求まると考えた。たとえば、外側の角に沿って大きく曲がる場合と内側の角に沿って小さく曲がる場合では、後者の方が曲がる時間は短くなる。このことから、歩行者の曲がり方を特定すると巡回時間が推定できると考えた。しかし、「歩行者が道のどの辺りから曲がってどこで曲がり終えたか」などの情報が取れず、歩行者の曲がり方は特定できない。そこで、角を曲がる時間が最も長い曲がり方と時間が最も短い曲がり方の 2 つで巡回時間を推定することを考えた。たとえば、曲がる時間が最も長い曲がり方は、図 17 の赤に示す「アウト・イン・アウト」と呼ばれる、道の外側から内側の角を通り再び道の外側を通る曲がり方である。一方、曲がる時間が最も短い曲がり方は同様に言うところ図 17 青で示す「イン・イン・イン」である。

この 2 つの曲がり方で巡回時間を推定する方法を考える。また、以下では時間が最も長い曲がり方を最長巡回軌跡、時間が最も短い曲がり方を最短巡回軌跡と置く。2 つの巡回軌跡から巡回時間を推定する方法は、巡回軌跡の長さを



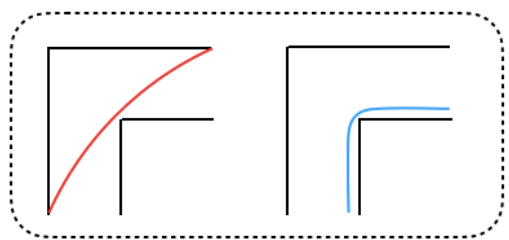


図 17 「アウト・イン・アウト」と「イン・イン・イン」

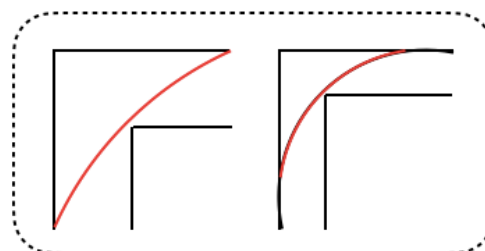


図 18 道路幅と弧の関係

歩行速度で割る方法である。歩行速度は携帯端末の加速度センサから求め、旋回軌跡の長さは次の方法で求めると考える。まず、最長旋回軌跡の長さは道路幅から計算した弧の長さで求まる。たとえば、最長旋回軌跡は図 17 の赤線で示した弧を描く軌跡である。つまり、弧の長さが最長旋回軌跡の長さとなる。そして、弧の長さは図 18 に示した道路幅と比例するため、道路幅から弧の長さは計算できる。したがって、最長旋回軌跡の長さは道路幅から計算した弧の長さで求まると考える。次に、最短旋回軌跡の長さは減速区間の長さから求まると考える。それは、図 17 青のように直角に曲がるには、曲がり始めて減速し曲がり終わると元の速度に戻ると考えるからである。したがって、速度が減速してから元の速度に戻るまでの減速区間の長さから求まると考えた。この 2 つの方法で最長・最短旋回軌跡の長さを求め、それを歩行速度で割って旋回時間を推定する。

推定した 2 つの旋回時間を用いた旋回部の特定方法を考える。その方法は、2 つの旋回時間幅を用意し 2 つの幅で旋回部を探索する方法である。説明のために最長旋回軌跡の旋回時間幅を  $T_{max}$ 、最短旋回軌跡の旋回時間を  $T_{min}$  とおく。まず、 $T_{max}$  がデータを走査し旋回部を特定する。次に、 $T_{max}$  が特定した旋回部の中を  $T_{min}$  が走査し、さらに旋回部を特定する。つまり、 $T_{max}$  が特定した旋回部の中に複数の旋回部が含まれていないかを  $T_{min}$  が確認する方法である。この方法は、 $T_{min}$  が詳細に旋回部を特定するため、旋回部の見落としがなくなる。つまり、実際の旋回パターンと抽出する旋回パターンに齟齬がなくなり、歩行軌跡の計測場所（現在位置）を必ず検出できると考える。

以上の考察をまとめる。まず、旋回時間の推定方法として最長旋回軌跡と最短旋回軌跡それぞれの長さを歩行速度で割る方法を考えた。各旋回軌跡の長さは前者が道路幅から求めた弧の長さとし、後者は減速区間の長さとする。そして、推定した 2 つの旋回時間をもとに正確に旋回部を特定する方法を考えた。それは大小 2 つの時間幅が旋回部を特定する方法である

## 6. まとめと今後の展望

本論文のまとめは、現在の日本経済を支える重要なインフラとして洞道を取り上げ、その洞道では作業者の位置情報を把握することが難しい課題を提示した。この課題を解

決する方法として、洞道内におけるインフラ設備を使わない位置推定手法を提案した。その手法は、携帯端末で計測した歩行軌跡と歩行空間ネットワークのパターンマッチングである。そして、実際に歩行軌跡を計測して提案手法の評価実験を実施した。

実験の結果、本提案手法のパターンマッチングでは複数のルート（現在位置）を検出した。そこで、複数のルートに対して角度で尤度を求め現在位置を推定した。しかし、3 つの歩行軌跡のうち 2 つの歩行軌跡は現在位置が推定できなかった。これは検出したルートの形状が完全に同じなことが原因である。つまり、本提案手法では同じ形状のルートに対しては現在位置が推定できないことを表す。

今後の展望として、考察で述べた道路幅と減速区間から歩行者の旋回時間を推定する具体的な方法を考える。また、推定した旋回時間を用いた旋回部の特定方法の開発も目指す。加えて、歩行軌跡と検出したルートの「形状」の類似を図る角度を用いた尤度では、現在位置が推定できない。そのため、直進距離を用いた「スケール」の類似を図ることを今後の展望として述べる。

## 参考文献

- [1] “丸の内熱供給株式会社”  
[https://www.marunetu.co.jp/business\\_otemachi.html](https://www.marunetu.co.jp/business_otemachi.html)
- [2] 中村村成, 秋山尚之, 杉本雅則, 橋爪宏達: 音響信号を用いたスマートフォンの高速・高精度屋内 3 次元位置認識手法, 情報処理学会論文誌, Vol.57, pp.2489-2500 (Nov. 2016)
- [3] Borriello, G., Liu, A., Offer, T., Palistrant, C. and Sharp, R.: WALRUS: Wireless Acoustic Location with Room-Level Resolution using Ultrasound, Proc. ACM MobiSys 2005, pp.191-203 (2005).
- [4] 花田雄一, 肥田一生, 森信一郎: 個人向け屋内外シームレス測位に向けた Wi-Fi を使用した屋内測位技術の屋外への適用検討, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム Vol.5 No.4 132-143(Oct. 2015)
- [5] 浦野健太, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫: 配布型 BLE タグとタンドムスキャナを用いた屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1 58-75 (Jan. 2019)
- [6] L. Fang, P. J. Antsaklis, L. A. Montestruque, M. B. McMickell, M. Lemmon, Y. Sun, H. Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, M. Xie and X. Xie: Design of a Wireless Assisted Pedestrian Dead Reckoning System—The NavMote Experience, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 54-6, 2342/2358 (2005)
- [7] 沢田健介, 花田雄一, 森信一郎, 佐々木重信: 歩行軌跡形状を歩行者用道路トポロジ情報から検索する屋内歩行者位置推定法, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1 237-248(Jan. 2013)