

画像認識を活用した都市部の洞道における位置推定技術に関する検討

福田脩希¹ 森信一郎¹

概要：都市部の地下には洞道と呼ばれる地下トンネルが存在する。これは地上の建物へ電力や熱・ガスなどのエネルギーを供給する役割を持ち、定期的に作業者が点検作業を行っている。このとき作業者自身や管理者が作業者の位置情報を把握することが重要である。そこで本論文では洞道における作業者の位置推定を目的とする。現在、トンネルにおける位置推定技術として無線 LAN や Wi-Fi などの電波を用いた技術が存在する。しかし、これらはトンネル内部の環境が変化するとデータを再収集しなければならず環境の変化に弱く、機器を内部に大量に設置する必要がある。そのため環境の変化に強く機器の設置も必要としない技術が必要である。そこで自律航法と VSLAM により得られた情報を元に位置推定を行う手法を提案する。この手法の評価実験を行い、得られた結果から考察を述べる。

キーワード：屋内測位, パターンマッチング, 自律航法, 全天球カメラ, VSLAM

A Study on Location Estimation Technology for Urban Cave Roads Using Image Recognition

SHUKI FUKUDA¹ SHINICHIRO MORI¹

Abstract: Underground tunnels, called tunnels, exist in urban areas. These tunnels supply energy, such as electricity, heat, and gas, to buildings above ground, and are periodically inspected by workers. In this case, it is important for the operator or the manager to know the location of the operator. Therefore, the purpose of this paper is to estimate the position of workers in the tunnel. Currently, there are several techniques for estimating the location of workers in tunnels using radio waves such as wireless LAN and Wi-Fi. However, these technologies are vulnerable to changes in the environment because they must collect data again when the environment inside the tunnel changes, and they require a large number of devices to be installed inside the tunnel. Therefore, a technology that is resistant to changes in the environment and does not require the installation of a large number of devices is needed. To solve this problem, we propose a method of position estimation based on information obtained by autonomous navigation and VSLAM. An evaluation experiment of this method is conducted and the results are discussed.

Keywords: Indoor Positioning, Pattern Matching, Dead Reckoning

1. はじめに

オフィスビルや銀行、ホテルなどが立ち並ぶビジネス地域の地下には「洞道」と呼ばれる地下トンネルが敷設されている。これは地上の建物に電力や熱・ガスなどのエネルギーを供給する重要なインフラ設備であり、内部にはそれらエネルギーを供給するための通信ケーブルや管が設置され、一人が通れるほどの狭い通路となっている(右図 1)。このような洞道がビジネス地域一体をカバーするように地下に敷設されている。そのカバー範囲は広いところで約 250 万 [m²] (東京ドーム約 116 個分)、狭いところで約 7.5 万 [m²] (東京ドーム約 4 個分) である。通常、1つの洞道につき1つのプラントだが 250 万 [m²]の範囲をカバーするその洞道には8つのプラントが存在する。プラントの数からいかに広範囲の洞道なのかがわかる。大小様々な洞道が日本各地に敷設されている(東京都だけで少なくとも 66 箇所の地域に敷設されている)。この洞道で働く作業者の位置推定を行うことを考えた。



図 1 洞道の内部

洞道では定期的に通信ケーブルや管などの保守作業(点検・修理)が行われている。その際、作業者は一度中に入ると多くの作業をまとめて行うため作業者は複数の場所へと頻りに移動を行う。その時、管理者がその作業状況を管理する上でも作業者の位置情報をリアルタイムで常に確認することが重要である。現在、作業者の位置情報を確認す

¹ 千葉工業大学

る方法としてはセンサーを用いたものがある。センサーを起動することで自身の現在位置を把握することができる。しかし、これは作業者が任意のタイミングでセンサーを起動したときのみ位置情報を確認することができるもので常に位置情報を確認することはできない。本論文では作業者の位置情報をリアルタイムで常に確認する位置推定技術の開発を目的とする。

2. 関連研究

三輪らによる位置推定研究がある[1]。これは、トンネル施工現場における人と重機の位置推定を無線 LAN を用いて行う研究である。通常、無線 LAN のような電波を用いた位置推定は事前にトンネル内部の電波状況を収集し、収集したデータを元に位置推定を行う。しかし、電波状況はトンネル内部の環境が変化（新たなトンネルを追加したり新たなオブジェクトを設置したり）すると変わってしまう。環境が変化する度にトンネル内部の電波状況を収集(更新)しなければ位置推定の精度が維持できない。無線 LAN のような電波で位置推定を行う研究は環境の変化に弱いという課題がある。また、トンネルのような空洞の環境下では電波が飛びすぎてしまい、電波同士が干渉して位置推定が難しくなる。これを解決するには電波同士が干渉しないように電波強度を弱めた機器をトンネル内部に大量に設置する必要がある。しかし、トンネル内部の環境が変化すると電波状況の更新が必要となり、大量に設置した結果保守工数が増大する。他にも、トンネルにおける位置推定研究として[2][3]がある。しかし、[1]と同様に無線 LAN を用いたり、Wi-Fi（電波）を用いていたりと環境の変化に弱く保守工数が増大する。環境の変化に影響を受けず、保守工数の少ない位置推定技術が必要である。その技術として福田らによる自律航法を用いた技術が存在する[4]。

これは「歩行軌跡の形と限りなく類似する場所が作業者の現在位置である」という原理に基づいた位置推定研究である（下記図2）。具体的には歩行軌跡の「形」を「旋回数・右左折・角度」の3つと捉え、その3つが限りなく類似する場所を探索する手法である。しかし、この手法では作業者の位置推定が成功しない場合があるとわかった。この課題を解決する手法を提案する。

3. 提案手法

上記課題を解決する手法として、「旋回数・右左折・角度」に「長さの比」を加えた手法を提案する（これらと歩行軌跡の対応を下記図3に示す）。初めに「長さの比」を加えた理由を下記図4を例に説明する。図4は[4]の手法で推定した現在位置(中)と本来の現在位置(右)、元の歩行軌跡(左)を示す。これらの長さの比に着目すると歩行軌跡は推定された現在位置とは類似せず、本来の現在位置と類似している。このことから長さの比を考慮すると本来の現在位置が作業者の現在位置として推定されたと考え、新たに長さの比を加えた「旋回数・右左折・角度・長さの比」の4つが限りなく類似する場所を探索する手法を考えた。次に、その手法の具体的な手順について説明する。本論文では4つの手順で位置推定を行う。「手順1：旋回数と右左折を用いた候補抽出」、「手順2：長さの比を用いた候補の類似度計算」、「手順3：類似度の高い上位候補を抽出」、「手順4：角度を用いた上位候補の類似度計算」の4つである。

3.1 旋回数と右左折を用いた候補抽出

初めに自律航法データから旋回数と右左折の取得を行う。まず方位データから値が横ばいの区間を求める。次にその区間を歩行軌跡に適用し、適用した区間のデータを最小二乗法で直線近似する。そして近似直線の総数から一つ引いた数を「旋回数」、近似直線の外積を求めて「右左折」を取

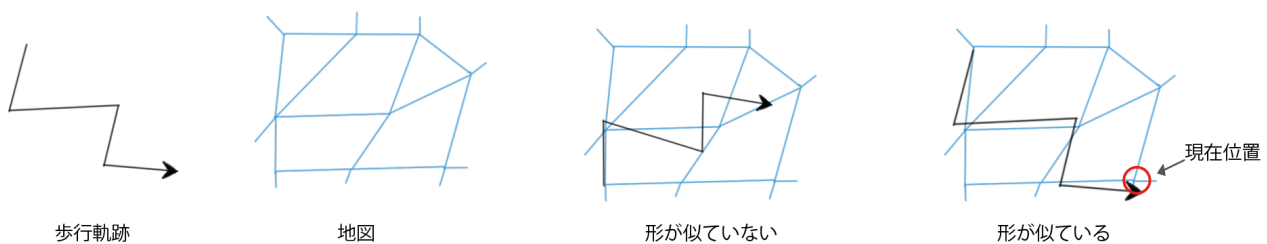


図2 原理：歩行軌跡の形と類似する場所が現在位置

	説明
旋回数	角（コーナー）の数 → ①
右左折	コーナーの方向 → ②
角度	コーナーの内角
長さの比	曲がる前の長さ：曲がった後の長さ → ③：④

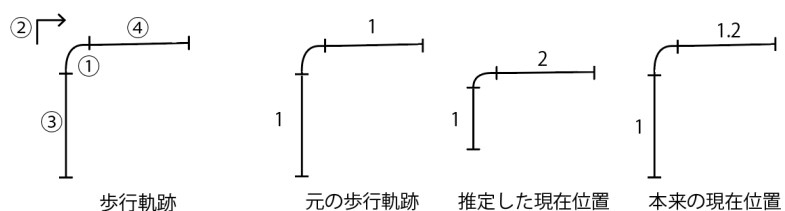


図3 「旋回数・右左折・角度・長さの比」について

図4 「長さの比」を考えた理由

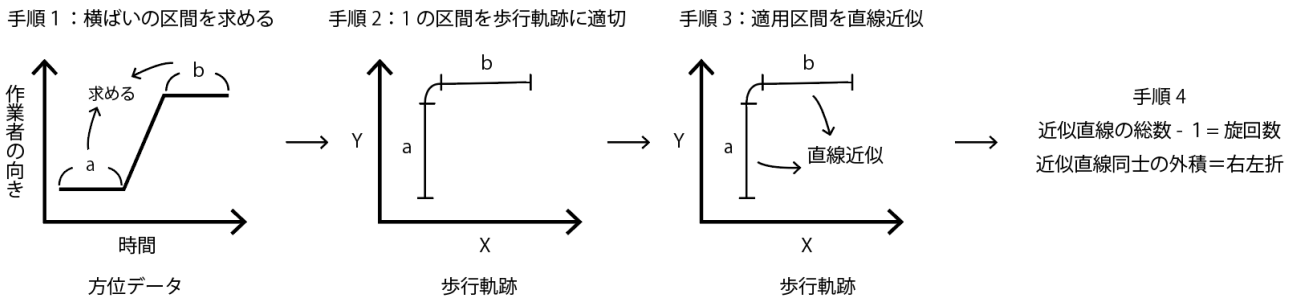


図 5 旋回数と右左折を求める手順

得する。これらを図示すると上記図 5 になる。この求めた旋回数と右左折が一致するようなルートを地図から探すことで候補の抽出を行う。例えば旋回数が 1 回で右左折が右折ならば、地図の中で 1 回だけ右折するようなルートをすべて抽出する。これにより得られたルートを作業者の現在位置候補として抽出し、長さの比を用いて各候補の類似度を計算する。

3.2 長さの比を用いた候補の類似度計算

前節で得られた候補の類似度を長さの比を元に計算する。そのためには長さの比を算出する必要があり、その方法として VSLAM で生成される歩行軌跡を用いる。

3.2.1 VSLAM とは

Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) という SLAM 技術の一種である。SLAM 技術とはセンサーから周辺環境の情報（特徴点）を取得し、歩行軌跡の生成（自己位置推定）と周辺環境の 3 次元地図を生成する技術である。この周辺環境の特徴点を取得するセンサーをカメラにしたものが VSLAM である。カメラで撮影した映像から周辺環境の特徴点を取得し、その特徴点の移動で歩行軌跡を生成、特徴点の位置で周辺環境の 3 次元地図を生成する。その例を右図 6 に示す。左上の小窓は撮影した映像とその特徴点、下の無数の点が特徴点から生成した 3 次元地図、少し下降する軌跡が歩行軌跡である。この歩行軌跡から長さの比を算出することを考えた。VSLAM が生成する歩行軌跡は自律航法が計測する歩行軌跡よりも誤差が少なく、より正確な長さの比を算出できると考えたからだ。しかし、VSLAM から歩行軌跡を生成するには周辺環境を取得するカメラが必要となる。そのカメラとしてスマートフォンのカメラを考え、それで撮影した映像から歩行軌跡が生成できるかプレ実験を行った。

3.2.2 スマートフォンカメラ映像で歩行軌跡が生成可能か

本論文の利用環境が洞道であることからスマートフォンで撮影した洞道内部の映像を Open-VSLAM (オープンソースの VSLAM) にかけて歩行軌跡が生成できるか検証を行った。結果、スマートフォンで撮影した映像からは歩行軌跡が生成できなかった。原因は特徴点を取得できなくなった（ロストした）ことが原因である。そのため別のカメラの検討を行った。その際、ロストの原因はカメラの画角に

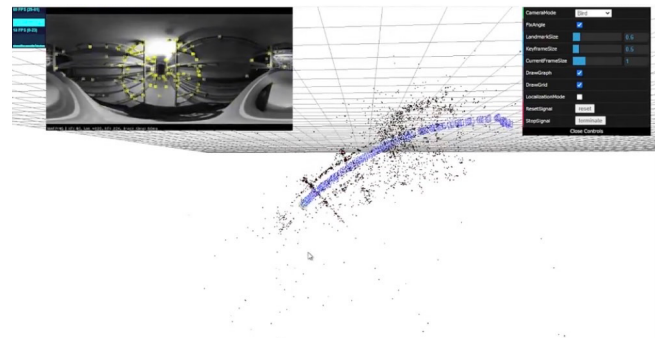


図 6 VSLAM のイメージ図

あると考え[5]、画角の広い全天球カメラを新たに考えた。全天球カメラで再度洞道を撮影し、その映像を Open-VSLAM にかけて歩行軌跡が生成できるか検証を行った。結果、ロストすることなく歩行軌跡が生成できた。しかし、生成する歩行軌跡が急に後ろに戻る問題が見つかり、それを解決するプレ実験を行った。

3.2.3 VSLAM が生成する歩行軌跡が後ろに戻る問題

この問題の原因は撮影者が進んでいないと VSLAM が判断したためと考える。VSLAM には現在の映像と何フレーム前の映像とを比較する処理が存在する。この時、その 2 つの映像が似ていると VSLAM は撮影者が進んでいないと判断して歩行軌跡を後ろに戻す。この現象が洞道の映像で起きたと考えた（洞道は中の構造上、どこにいても似た景色が撮影されてしまうため）。この問題が発生した場合、正確な歩行軌跡が生成できず正確な長さの比の算出も難しくなる。そのためこの問題を解決する必要がある。その方法として Open-VSLAM 内のパラメータ「min_continuity」の数値を 10 万に設定した。このパラメータは何フレーム前の映像と比較するかを決めるもので、10 万フレーム前には映像が存在しないため比較できないようにした（比較する映像がなくてもエラーは起きなかった）。本論文では全天球カメラで撮影した映像を Open-VSLAM にかけて生成された歩行軌跡から長さの比を求める。

3.2.4 歩行軌跡から長さの比を求めるには

生成した歩行軌跡にとって「最適な平面」を求める必要がある。その理由を次ページ図 7 を例に説明する。まず VSLAM が生成する歩行軌跡は 3 次元である。例えば図 7

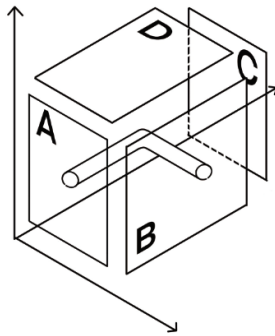


図 7 3次元の歩行軌跡を2次元にする理由

のように3次元上でL字のような形をしていると仮定する。この時、平面A,B,Cの向きから歩行軌跡を見ると点や棒のように見えて正確な長さの比が求められない。しかし平面DからだとL字に見えて正確な長さの比を求めることができる。したがって平面Dのような「最適な平面（歩行軌跡の形が正確になる面）」を求める必要がある。その方法として3次元の点群に対して最適な面を求める特異値分解を利用した。これを行うと右上図8のように3次元の歩行軌跡（左）を2次元の歩行軌跡（右）に変換できる。この変化した歩行軌跡から曲がる前と曲がった後の長さを測定して長さの比を求める。

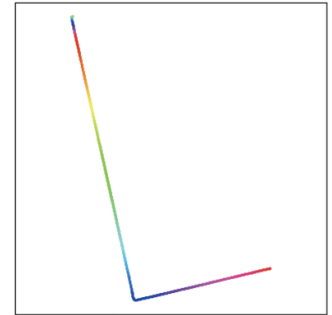
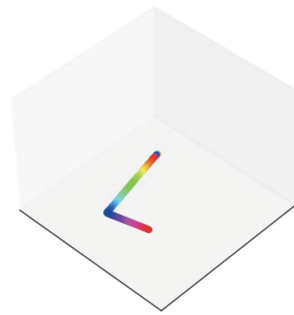


図 8 特異値分解の結果

表 1 上位候補の範囲を決めるプレ実験

	トップとの差		トップとの差
データ 1	0.02	データ 7	0
データ 2	0	データ 8	0.65
データ 3	0.02	データ 9	0.05
データ 4	0	データ 10	0
データ 5	0.07	データ 11	0.11
データ 6	0.01		

在位置)が必ず含まれると考えたからである。まず、上位候補を抽出する際は正解候補が必ず含まれるように範囲を指定する必要がある。しかし、正解候補が5番目であったり20番目であったりとはばらつくため「10番目までを残す」などの範囲指定は難しい。そこでトップと正解候補の類似度の差がどの程度かをいくつかのデータで調査し、最も大きい差を範囲にすれば良いと考えた。例えば、データ1の正解候補とトップの差が0.4、データ2の差が0.2、データ3の差が0.8の場合、+0.8の範囲にするとデータ1,2,3共に正解候補が含まれる。このような調査を行い、その結果を上記表1に示す。表1は計11個のデータで正解候補とトップの類似度の差をまとめたものである。この表1より最も大きい差の0.65を上位候補を抽出する範囲とした。

3.2.5 長さの比を用いた類似度の計算

回転数と右左折を元に抽出した候補に対して長さの比を使って類似度を求める。まずVSLAMが生成した歩行軌跡と候補の長さの比を算出する。例として歩行軌跡の比を1:1.2、候補Aの比を1:0.5、Bの比を1:1.5とする。次に歩行軌跡の比と各候補の比の差分を取り、絶対値にする。例えば歩行軌跡と候補Aの差分は0.7、候補Bとの差分は0.3となる。この数値が各候補の類似度となり、これをすべての候補に対して行い抽出した候補の類似度を計算する。これらを図示すると下記図9になる。また、類似度は差分なため値が小さいほど類似する。

3.3 類似度の高い上位候補を抽出

前節で類似度を計算した各候補の中から、上位いくつかの候補（上位候補）を抽出する。方法は、まず類似度を基準に各候補を昇順に並べる。そしてトップの類似度から+0.65の類似度を持つ候補を上位候補として抽出する。+0.65とした理由は、その範囲ならば正解候補（作業者の現

3.4 角度を用いた上位候補の類似度計算

上位候補に対して角度を用いて類似度を計算する。初めに自律航法のデータから角度を算出する。まず方位データから値が横ばいの区間を見つける。次にその区間を歩行軌跡に適用し最小二乗法で直線近似をする。そして近似直線の内積を計算して「角度」を算出する。続いて算出した角

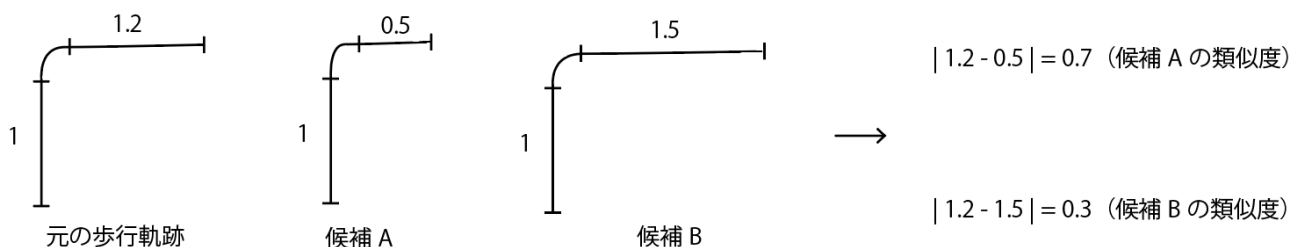


図 9 長さの比を用いた類似度計算のイメージ図

に示す。1回だけ曲がる計6箇所のルートを選び、各ルートを行きと帰りでそれぞれ計測するため計12個のデータを計測する。1回だけ曲がるルートを選んだ理由は、本提案手法は歩行軌跡の形が単調なほど(あまり歩かないほど)位置推定が難しくなるため1回曲がるという単調な歩行軌跡でも位置推定が可能か検証するためである。

4.1 実験環境

・実験用具

本実験で使用する用具は自律航法アプリをインストールしたスマートフォン Google Pixel 4a と、リコー社が発売している全天球カメラ THETA V である。これらをハンズフリーを考慮して右図 14 左に示す形で実験者に取り付けた。Google Pixel 4a は胸の前で固定し、THETA V はヘルメットに取り付けている。また THETA V は洞道の壁や天井にぶつけないよう寝かせて取り付け、かつヘルメット前部のライトで視野を狭めないよう後ろ寄り取り付け(図 14 右)。

・データの計測方法

まず計測開始地点についたら THETA V の録画ボタンを押し、映像の撮影を開始する。ただし、この時点ではまだ歩かない。次に胸の前の Google Pixel 4a にインストールした自律航法アプリを起動し、自律航法を開始する。そして自律航法が開始したことを確認して歩き始める。この手順でデータの計測を行い、終了する場合は全天球カメラの録画を停止し、自律航法の計測も停止する。

4.2 実験方法

まず計測したデータから「回転数・右左折・角度・長さの比」を取得する。次に回転数と右左折が一致する候補をすべて抽出する。そして長さの比で各候補の類似度(差分)を計算する。かつトップの類似度から+0.65 の範囲の上位候補を抽出する。最後に角度で上位候補の類似度(確率)を計算して最も類似度が高くなる候補が現在位置(データを計測したルート)か評価を行う。

表 2 計測したデータの回転数・右左折・角度・長さの比

	回転数	右左折	角度	長さの比
データ 1	1	右	100	1:0.48
データ 2	1	左	86	1:2.3
データ 3	1	右	63	1:0.11
データ 4	1	右	84	1:1.61
データ 5	1	左	81	1:0.56
データ 6	1	右	95	1:0.35
データ 7	1	左	101	1:3.16
データ 8	1	右	95	1:4.6
データ 9	1	左	100	1:0.21
データ 10	1	右	101	1:0.97
データ 11	1	左	105	1:1.24



図 14 実験用具の取り付け位置

4.3 実験結果

初めに計測したデータの「回転数・右左・角度・長さの比」を下記表 2 に示す。なお、データに1つ計測ミスがあり計11個のデータとなっている。次に、表 2 の内容を元に位置推定を行った結果を表 3 に示す。まず各データに対して回転数と右左折が一致する候補を抽出した(手順 1 の結果欄)。結果、すべてのデータで一致する候補が 32 個抽出された。次に抽出した各候補の類似度(差分)を計算して上位候補を選び、その中で現在位置が何番目かを出力した(手順 2 の結果欄)。例えばデータ 1 は上位候補が全部で 20 個あり、その中で現在位置が 2 番目であることを示す。最後に上位候補に対して新たに類似度(確率)を求め、最終的に現在位置が何番目になるかを出力した(手順 3 の結果欄)。その結果、現在位置が 1 番目になったのは 11 個中 4 個だった(同率で 1 番になったデータ 4 個を除いて)。さらに類似度(確率)を求めた結果順位が下がったデータが 3 個確認できた。例えばデータ 1 は 1 回目の類似度(差分)によると現在位置は 2 番目である。しかし、2 回目の類似度(確率)では 7 番目に下がっている。これらの結果から、本論文で提案した手法では必ずしも位置推定が行えない場合があるとわかった。

5. 考察

本章では、位置推定をすべて VSLAM のデータで行った結果を考察として述べる。方法はまず VSLAM の歩行軌跡から「回転数・右左折・角度・長さの比」を取得する。次

表 3 位置推定結果

	手順1の結果	手順2の結果	手順3の結果
データ 1	32	2/20	7/20
データ 2	32	1/8	1/8(同率)
データ 3	32	3/17	1/17
データ 4	32	1/10	1/10(同率)
データ 5	32	3/17	1/17(同率)
データ 6	32	2/18	3/18
データ 7	32	1/6	1/6
データ 8	32	3/3	1/3
データ 9	32	4/13	1/13
データ 10	32	1/17	2/17
データ 11	32	4/13	1/13(同率)

表 4 考察：使用データの情報

	回数	右左折	角度	長さの比
データ 1	1	右	90	1:0.48
データ 2	1	左	92	1:2.3
データ 3	1	右	61	1:0.11
データ 4	1	右	80	1:1.61
データ 5	1	左	80	1:0.56
データ 6	1	右	100	1:0.35
データ 7	1	左	101	1:3.16
データ 8	1	右	100	1:4.6
データ 9	1	左	95	1:0.21
データ 10	1	右	97	1:0.97
データ 11	1	左	98	1:1.24

表 5 考察：結果

	候補の抽出	現在位置の順位
データ 1	32	3/32
データ 2	32	1/32
データ 3	32	2/32
データ 4	32	1/32
データ 5	32	2/32
データ 6	32	1/32
データ 7	32	1/32
データ 8	32	3/32
データ 9	32	4/32
データ 10	32	4/33
データ 11	32	1/32

に「回数・右左折」が一致する候補を抽出する。そして、「角度・長さの比」を特徴量に各候補とのコサイン類似度を計算する。この値が最も大きい候補が作業者の現在位置となるか検証を行った。使用したデータは 4 章の評価実験で使用した計 11 個のデータである。表 4 に各データの「回数・右左折・角度・長さの比」を示す。この情報を元に行った結果を次ページ表 5 に示す。

表 5 は抽出した候補の数とコサイン類似度の結果現在位置が何番目に位置したかを示している。表 5 より分かることは、現在位置が一番目になったデータが 11 個中 5 個であること。11 個すべてで現在位置が 4 番目以内に位置したこと。同率で同じコサイン類似度となる結果がないことの 3 つである。これらのことから、自律航法と組み合わせずとも VSLAM から取得した歩行軌跡のみで十分な精度を得られると考える。ただし、VSLAM はロストすることがあるため自律航法との併用は必要である。

6. まとめと今後の展望

本論文では洞道における作業者の位置推定を目的にトンネルにおける既存の位置推定研究を関連研究で述べた。その際、自律航法の歩行軌跡から求めた「回数・右左折・角度」を用いる位置推定手法があった。しかし、その手法では位置推定が成功しない場合があるという課題があり、それを解決する手法を本論文で提案した。その手法は自律航法と VSLAM を組み合わせたものである。自律航法の歩行軌跡から「回数・右左折・角度」を取得し、VSLAM の歩行軌跡から「長さの比」を取得。それらを用いた手法を提案した。具体的には「回数・右左折」を元に候補の抽出を行い、「長さの比」を元に候補の類似度(差分)を計算。その際に最も高い類似度から特定の範囲の候補を上位候補として抽出し、「角度」を元に上位候補の類似度(確率)を計算する。そして類似度が最も高い候補を作業者の現在位置として推定する手法を提案した。この手法の評価を実際の洞道で行い、結果として必ずしも位置推定が行えるとは

限らない結果を得た。また、考察として VSLAM のみを用いた位置推定に関する検証を行い、結果としては VSLAM 単体でも必ずしも位置推定が行えるとは限らないとわかった。

今後の展望は位置推定の精度向上に必要な手法の検討を行う。例えば今回の結果では現在位置が同率で 1 番目になることがわかり、同じ類似度を持つ候補の中から現在位置だけ一意にする方法の検討を行う。

参考文献

- [1] 三輪直樹, 田頭茂明, 荒川豊, 福田晃, 松田浩朗, 筒井隆親: トンネル施工現場における無線 LAM 位置推定のための精度改善手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告
- [2] 松田浩朗, 藤本克郎, 瀧岡優作: 建設機械 無線 LAN 測位技術によるトンネル坑内の建設機械接触災害に対する安全監視システム ICT 建設機械接近警告システム
- [3] トンネル内管理 | Lumada : 日立
https://www.hitachi.co.jp/products/it/lumada/usecase/case/lumada_uc_00776.html
- [4] 福田脩希, 森信一郎: 都市部の洞道における位置推定技術, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム(CDS), 2021-CDS-30(28),1-8(2021-01-18)
- [5] 友納正裕, 原 SLAM の現状と今後の展望, システム/制御/情報, Vol. 64, No.2, pp.45-50, (2020)