

視覚障害者の自律移動支援を目的とした測位のための環境マップ管理手法の検討

羽生田浩貴¹ 森信一郎¹

概要: 今日において、点字ブロック等の視覚障害者の移動支援のための設備の導入が広く行われている。その一方で、大学構内のように、事情によりそのような設備を設置できない場所における支援の仕組みは不十分である。そこで、この問題を解決するために、私たちは遠隔でオペレータが補助を行う自律移動支援サービスを検討している。このサービスの実現には、オペレータが安心かつ簡単に補助を行える仕組みを構築することが不可欠である。この補助の仕組みを実現するための重要な要素の一つに、利用者の位置と向きを把握する測位技術がある。Visual SLAM等の測位技術には、測位のためにその場所の画像や電波等の環境マップを用いるものがある。本研究では構築した Visual SLAM を用いた測位システムをもとに、広域化及び環境変化を考慮した環境マップ管理手法の検討を行った。

キーワード: 環境地図, 屋内測位, Visual SLAM, 視覚障害者

A Study of Environmental Map Management Method for Positioning to Support Autonomous Mobility of Visually Impaired People

HIROKI HANYUDA^{†1} SHINICHIRO MORI^{†1}

Abstract: Today, Braille blocks and other equipment to assist the mobility of the visually impaired are widely installed. On the other hand, there are insufficient support systems in places where such facilities cannot be installed due to circumstances, such as university campuses. To solve this problem, we are considering an autonomous mobility support service in which a human operator provides assistance remotely. To realize this service, it is essential to establish a mechanism that allows human operators to provide assistance safely and easily. One of the key elements to realize this assistance mechanism is a positioning technology to determine the user's position and orientation. In this study, based on the positioning system using Visual SLAM, we investigated an environmental map management method that takes into account wide-area coverage and changes in the environment.

Keywords: Environmental map, Indoor positioning, Visual SLAM, Visually impaired

1. 背景

日本において、18歳以上の視覚障害者は31万人いるとされている。視覚障害者は白杖を用いた、周囲の地形や障害物等の環境の認知を主に頼りにして歩行を行っている。視覚障害者の歩行に対する支援としては、駅構内や一部の歩道に設置される点字ブロックがある。しかし、大学構内のような様々な理由により点字ブロックが設置されていない場所がある。そのような場所では、視覚障害者は自律行動が基本的には行なえず、補助者や盲導犬を用いた補助等の別の仕組みが必要である。しかし、現地での補助者による支援はコストが高く、盲導犬は頭数が大きく不足している。

この問題の解決策として、視覚障害者に随伴して支援を行うロボットの開発が行われている。しかし、補助者や盲導犬は、視覚障害者の状態を随時確認して視覚障害者を主体とした歩行補助の調整を行っているため、視覚障害者は大きな安心感を得ることができている。したがって、補

助システムには視覚障害者の状態を反映し、視覚障害者を主体とした制御が求められ、この制御をロボットがAIで行うのは現時点では難しいと考えられる。このことから、私たちは視覚障害者の移動支援には人が寄り添う仕組みが必要であると考え、遠隔のオペレータが視覚障害者に支援を行う手法について検討を行った。この手法では、クラウドを介して視覚障害者の周辺状況を把握したオペレータが、遠隔から視覚障害者に対し歩行支援を行う。オペレータが支援を行うために必要な視覚障害者の周辺状況には、周囲画像、位置と向き、近辺の段差等の危険情報が挙げられるが、その中でも利用者の位置と向きの情報は重要である。

今日ではGPSが測位手法として一般に広く用いられている。しかし、これは屋内での利用が困難であるため、屋内ではその他の測位手法が様々検討されている。最近では画像情報を活用したVisual SLAM(以下VSLAM)技術を使った測位技術が多く提案されている。この技術はカメラ画像から抽出された特徴点を用いて環境マップを生成し、その

¹ 千葉工業大学
Chiba Institute of Technology.

環境マップ情報と取得した現在のカメラ画像の特徴点を比較して現在位置を推定するというものである。本論文では、この仕組みを視覚障害者支援にどのように適用していけばよいかの検討を行う。

2. 関連研究

2.1 大規模環境向けのメモリ管理を備えた Visual SLAM

Fu Li (2018)らは、最新の SLAM システムでは探索範囲の増加に連れてマップのサイズが無制限に大きくなり、メモリの消費量が無制限に増加する問題を指摘している[1]。この問題を解決する手法として、メモリ管理を備えたメモリ消費効率の高い SLAM システムの構築によるアプローチが提案されている[1]。この手法では SLAM フロントエンドとデータベースサーバエンドが連携することにより、サーバ上のグローバルマップの一部をフロントエンドのメモリ上にローカルマップとして展開することによって VSLAM 実行時のメモリ消費を削減している。

この関連研究では大規模な環境マップを作成する VSLAM の実行を目的としていると考えられ、既存の大規模な環境マップから位置の初期化を行うことについての検討がされていない。既存環境マップを用いた SLAM システムの位置の初期化は *relocalization* と呼ばれる。この *relocalization* では VSLAM の場合、現在カメラが捉えている画像と類似するキーフレームの検索を、マップ上の全てのキーフレーム画像から Bags of Visual Words (BoW)を用いて行う。環境マップのデータ量が増えた際に、この BoW 類似画像検索にかかる時間と環境マップの読み込みにかかる時間は増加する [2]。したがって、大規模な環境マップにおける位置の初期化については別の手法を検討する必要があると考える。

2.2 大規模な屋内外環境における SLAM のためのマップ管理手法の検討

ほとんどの SLAM アルゴリズムは、指定されたセンサーデータとパラメーター構成に基づいてマップを生成し、これらは事前に人間の監督者が指定する必要がある[3]。このパラメーター構成は特定の環境に適したものであるが、マッピング中に環境が変化すると SLAM アルゴリズムが最善の結果を生成しない可能性があるとされる[3]。このことから、Simon F. G. Ehlers (2020)らは、空港や病院など、大小の部屋、廊下、屋外エリアがある非常に大きな建物で動作する移動ロボットは、1 つの特定のセンサーとパラメーター構成で単一のマップを作成することは合理的ではないと主張している[3]。加えて、エレベータで接続された複数のフロアをナビゲートすることは、単一のマップアプローチでは解決が困難であると主張している[3]。

この問題を解決する手法に、下記のマッピングアプローチによって作成された SLAM マップを、トポロジカル・メトリックマップ形式のマップとして自律的に整理及び配置

するアルゴリズムが提案されている[3]。そのマッピングアプローチ手法は、距離センサーデータを評価してドア等の出入り口を認識することにより、新しい部屋または屋内・屋外の変化を自動的に検出するというものである。このマッピング手法では、ロボットが新しい部屋・環境に入ると、それに適した SLAM 構成が自動的に選択され新しいマップが作成される。

この関連研究ではマップの分割により、個別の環境に適したシステム構成を用いて SLAM を実行することを主な目的としていると考えられる。よって、未知の SLAM 入力データから、この分割された SLAM マップ群上の位置を推定するためには、全ての SLAM マップについて *relocalization* を実行する必要があると考えられる。しかし、全ての SLAM マップについて SLAM を実行するのは現実的ではないため、*relocalization* に使用する SLAM マップを絞り込む手法の検討が必要であると考えられる。

3. 提案手法

3.1 別の環境情報を用いて SLAM 環境マップ候補の検索を行う手法

関連研究から、大規模な単一の環境マップを用いるのは難しいとされている。そこで、私たちは環境マップを自由に分割しながら、複数の環境マップから正しく位置を推定する手法を提案する。この手法では、まず、SLAM 環境マップのエリアと Wi-Fi 等の別の環境情報を紐づける。これにより、取得した Wi-Fi 等の別の環境情報から対象となる SLAM 環境マップファイル群を動的に構築して検索することができる。そして、検索された対象となる全ての環境マップファイルについて SLAM の *relocalization* を実行する。本手法を用いた環境マップ検索システムを図 3.1 で示す。本手法を適用することで、大規模な環境においても、検索された小規模な環境マップを複数実行することになるため、大規模な環境における SLAM の各種問題は起こらないと考えられる。また、検索された複数の環境マップに対して SLAM を実行したときに、複数の環境マップで *relocalization* が成功した場合は作成日時がより新しい環境マップの結果を優先して使用する。

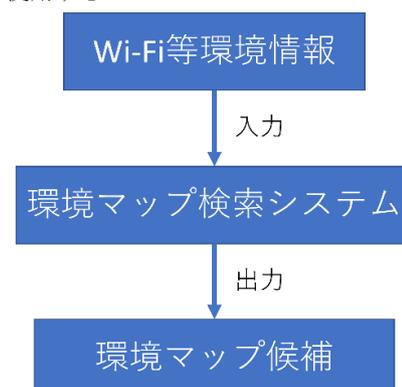


図 3.1 環境マップ検索システムの概要

3.2 最新の環境情報を利用する VSLAM を用いた測位手法

環境は時間が経つに連れて変化するため、事前に測定した環境マップと利用時点の環境との差異が大きくなると、測位が行えなくなるといった問題がある。この問題を解決するために、既存の環境マップを初期化のみに利用し、そこで得られる位置やスケール等の初期値を用いて新規に VSLAM を実行し、その結果を測位に用いる手法を提案する。この手法では、現在の環境とは少なからず差異がある既存の環境マップは初期化時のみに使用するため、初期化が完了してしまえば、最新の環境のみを用いて測位を行うことができる。また、新規に実行される VSLAM において作成される環境マップは、次以降の利用で初期化に用いられるように既存環境マップ群に登録される。このように既存環境マップ群の更新を行うことで、初期化についてもできる限り最新の環境に適応できると考える。

本提案手法による VSLAM を用いた測位システムの概要を図 3.2 で示す。カメラ画像を新規の環境マップを作成する VSLAM(以下 VSLAM-A)と既存の環境マップを用いる VSLAM(以下 VSLAM-B)の両方に入力する。図 3.2 の座標変換プログラムでは VSLAM-A の環境マップ上における姿勢を VSLAM-B で得られた初期化結果を用いて、2次元現実地図上の位置と向きに変換する。VSLAM-B は初期化結果を得られたら時点で停止させる。

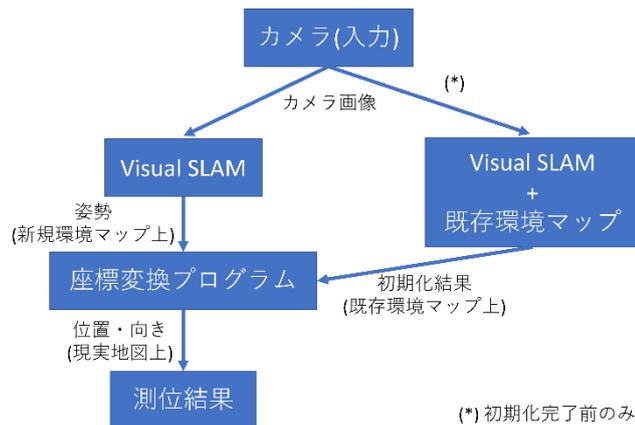


図 3.2 最新の環境情報を利用する VSLAM を用いた測位システムの概要

3.3 システムの実装

本研究では環境マップを用いた測位として *relocalization*(再局在化)の機能を持つ VSLAM を選択し、その環境マップの候補を特定する別の環境情報としては Wi-Fi アクセスポイントのスキャン結果を選択した。

3.3.1 VSLAM による環境マップを用いた測位システム

カメラ画像と既存環境マップから、2次元現実地図上の位置と向きを得る VSLAM を用いた測位システムを図 3.3 に示す。このシステムではまず、カメラ画像と環境マップ群から検索された環境マップを用いて VSLAM の

relocalization を実行し、その環境マップ上の姿勢を得る。次に、その姿勢と後述する座標変換用ファイルを図 3.3 の座標変換プログラムに入力することで、カメラの 2次元現実地図における、位置と向きを得る。

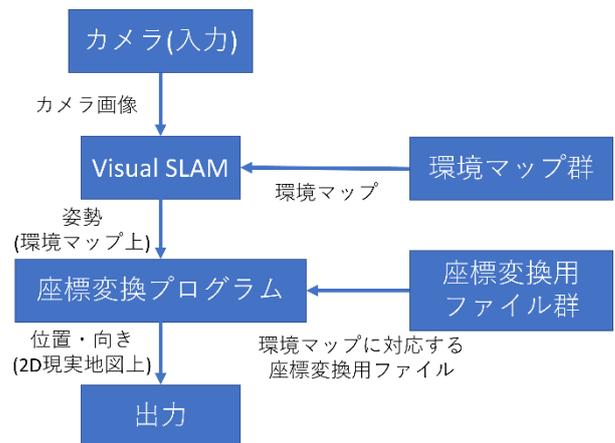


図 3.3 VSLAM を用いた測位システム

本研究では VSLAM の実装に OpenVSLAM[4]を用いた。この実装には *relocalization* という初期状態(ロスト状態)から既存マップ上の姿勢に復帰する機能が搭載されている。この機能を用いることで、入力したカメラ画像に対応する、事前に作成した環境マップ上の姿勢を得ることができる。この姿勢は環境マップ固有のものとなっているため、この姿勢を人が理解可能な 2次元現実地図上の位置と向きへと変換する必要がある。この座標変換には環境マップと 2次元現実地図を対応付ける座標変換用ファイルが必要となる。

その座標変換用ファイル作成の流れを図 3.4 で示す。本論文の座標変換用ファイル作成手順では、環境マップ上のカメラの移動軌跡である *keyframes* から作成されるトポロジが、変換先の現実地図における道路ネットワークと一致していることを前提としている。そのため、本論文では環境のマップ作成に、道路ネットワーク上を歩くように収集したカメラ画像を入力として用いている。座標変換用ファイル作成には、まず、環境マップから *keyframes* の点群の抽出を行う。この 3次元点群を用いて、最小二乗法による平面フィッティング処理を行い、それらすべての点の距離の和が最小となるような平面を求める。そして、この求めた平面の法線ベクトルと環境マップ座標系の XY 平面の法線ベクトルが一致するような 3次元回転行列 M を作成する。この回転行列 M を用いた座標変換後の 3次元空間の Z 軸成分を除去することで 3次元から 2次元平面への変換を行う。次に、この変換で得られた *keyframes* の 2次元点群のトポロジ化を行い、このトポロジと現実地図と道路ネットワークのトポロジの対応付けを行う。最後に、平面フィッティングの結果である 3次元回転行列 M とトポロジの各エッジの対応関係を座標変換用ファイルとして出力する。

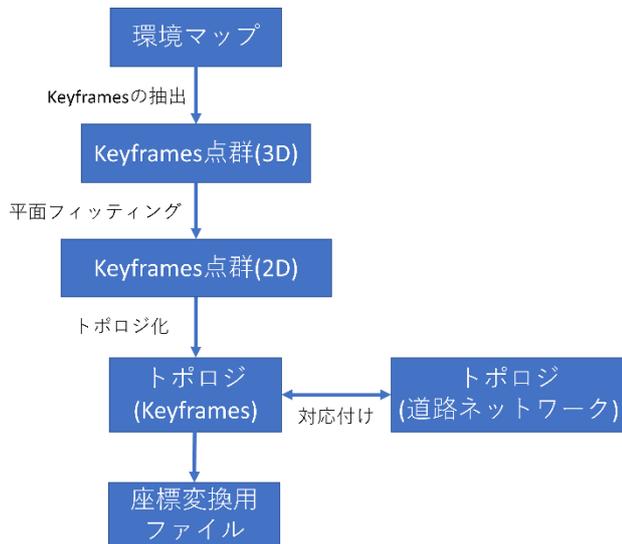


図 3.4 座標変換用ファイル作成の流れ

図 3.4 の手順で作成された座標変換用ファイルを用いて、座標変換を行った例を図 3.5 に示す。この例では、実際に道路ネットワーク上を歩くようにして作成した VSLAM 環境マップから抽出した keyframes 点群を用いて行った。図 3.5 では道路ネットワークのトポロジのノードに A から L の記号を振っており、同じ記号のノード同士は対応関係にある。図 3.5(a) の keyframes をトポロジ化したもの(以下トポロジ X)と図 3.5(b) の道路ネットワーク(以下トポロジ Y)の対応付けを行った結果を同図で示している。このトポロジ X とトポロジ Y のノード同士の対応関係を用いて、図 3.5(a) の keyframe 点群を図 3.5(b) の現実地図上に座標変換を行った結果を図 3.5(c) に示す。図 3.5(c) から、現実地図の壁の外にはみ出ることなく座標変換が行われていることがわかる。

ここで、この座標変換に用いるプログラムの概要の説明を行う。図 3.5(a) の任意の keyframe である点 p_1 を図 3.5(c) の点 p_2 に座標変換を行うとする。まず、点と線分の距離により、点 p_1 と最も近いトポロジ X 内のエッジ e_1 を求める。このエッジ e_1 と対応するトポロジ Y 内のエッジをエッジ e_2 とする。この点 p_1 とエッジ e_1 のスケールを含む位置関係が点 p_2 とエッジ e_2 のものと同じであると仮定してベクトル等の計算を行い、変換後の点 p_2 の座標を求める。

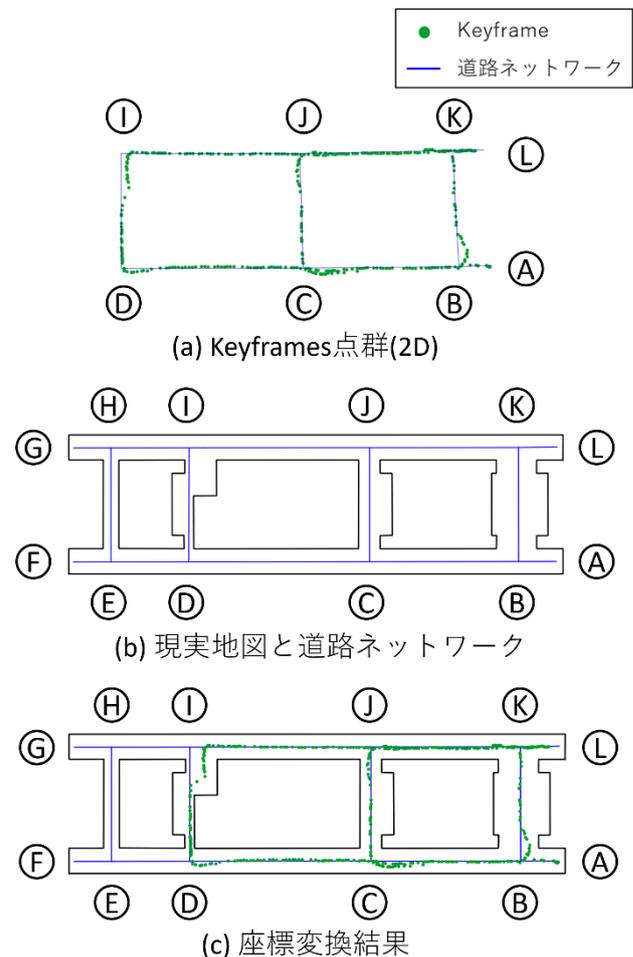


図 3.5 道路トポロジを用いた環境マップの対応付けの例

3.3.2 Wi-Fi 環境情報による VSLAM 環境マップの検索システム

本研究では環境マップファイルの候補を検索する環境情報として Wi-Fi アクセスポイント(AP)の MAC アドレスを用いた。各環境マップファイルにはその環境マップファイル作成に用いた、画像データ収集中に検出された AP の MAC アドレスの情報が関係づけられている。

検索時に用いる Wi-Fi スキャンデータを

$$s = [a_0, a_1, \dots, a_k, \dots, a_K]$$

とする。 a_k はアクセスポイントの MAC アドレスで、 K はスキャンで観測されたアクセスポイントの数である。また、アクセスポイント a_k が観測される環境マップファイルのリストを次式で表す。

$$L(a_k) = \{l_0, l_1, \dots, l_n, \dots, l_{N(a_k)}\}$$

ここで、 l_n はアクセスポイント a_k が観測される第 n 番目のマップファイルを表す。 $N(a_k)$ はアクセスポイント a_k が観測されるマップファイルの総数を表す。このとき、Wi-Fi のスキャンデータ s が観測したときの環境マップファイル候補の集合は

$$B(s) = \{b_0, b_1, \dots, b_m, \dots, b_M\} = \bigcup_{k=0}^K L(a_k)$$

となる。 b_m は $B(s)$ の第 m 番目の環境マップファイル候補

である。

つまり、Wi-Fi 環境情報であるスキャンデータ s から、環境マップファイルの候補 $B(s)$ を得るのが本検索システムである。

4. 実験

4.1 実験目的

3.1 節の提案手法において、環境情報として Wi-Fi の MAC アドレスを用いた場合に適切な環境マップ候補が得られることを確認する。

4.2 環境マップのエリアサイズの設定

提案手法では VSLAM の負荷を測定するプレ実験を行い、PC の負荷の観点からどの程度のエリアサイズが適切かを調べた。本プレ実験を行った PC スペックを表 4.1 で示す。本プレ実験用いる VSLAM の実装には OpenVSLAM を用いた。本プレ実験の結果、 $36.60 \times 12.00 [m^2]$ のエリアを持つ環境マップであれば 4 プロセスの VSLAM で *relocalization* (再局在化) を平均 10 [fps] 程度で実行できることが分かった。また、フロア間は階段により接続はされているが、視覚障害者の支援という用途においては階段を利用することは考えにくく、階段を用いて複数のフロアを 1 マップファイルに納める必要性ないと考えられる。よって、システムリソースと実際の利用用途から、今回は 1 フロアを 1 エリアとして設定を行った。

表 4.1 負荷実験の PC スペック

OS	Ubuntu 20.04
CPU	Intel(R) Xeon(R) E5-1620 v3
定格 CPU クロック	3.50 GHz
メモリ	32 GB

4.3 実験方法

実験場所とデータ収集端末を表 4.2 で示す。また、実験場所 12F における地図を図 4.1 で示す。実験場所の 10F から 14F までの 5 階層の各フロアをそれぞれエリアとし、各エリアのエリア名を f10, f11, ..., f14 とする。Wi-Fi の AP のスキャンを行いながら、エリア内を 1 週歩行しデータを収集する。図 4.1 に示すように歩行経路上の曲がり角(ノード)に記号を割り当て、12F の場合は A を歩行開始地点として、A-B-C-D-A の経路で収集を行う。この際、歩行は道路ネットワーク上である通路の中央を歩き、ノードとノードを直線で結ぶように行う。これをその他の階についても同様に行う。スキャン間隔は 1[s] とし、エリアに対応付ける AP の MAC アドレスは電波強度が $-70 [dBm]$ 以上のものに限り用いて行った。

対象エリアの候補の検索に用いるスキャンデータはこのデータ収集中に得たものから各フロアで 2 つ選出して行う。この選出したスキャンデータにおいて AP の電波強度

は $-70 [dBm]$ 以上のものが含まれていればそれらを用いて、そうでなければ上位 5 つを用いて検証を行う。

表 4.2 実験環境

実験場所	千葉工業大学津田沼キャンパス 2 号館 10F~14F
データ収集端末	Pixel 3a (Android OS)

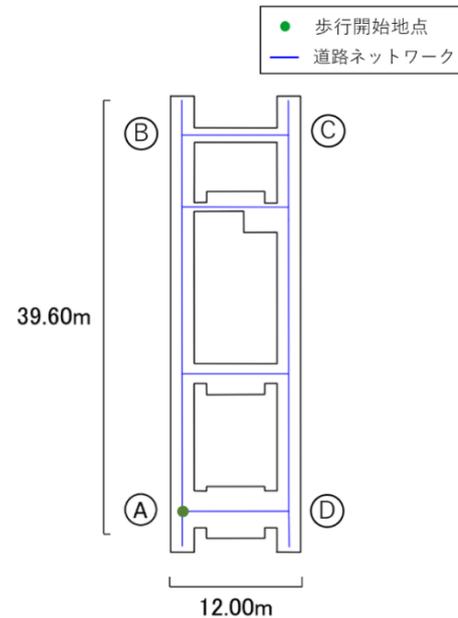


図 4.1 実験場所の一部地図(12F)とその道路ネットワーク

4.4 実験結果

表 4.3 各エリアと対応付けられている AP 数

エリア名	AP数
f10	32
f11	57
f12	45
f13	62
f14	35

表 4.4 各スキャンデータのエリア候補の検索結果

スキャンデータID	検知データ数	一致データ数(エリア名毎)					検索エリア数
		f10	f11	f12	f13	f14	
f10-a	6	6	1	0	0	0	2
f10-b	11	11	2	0	0	0	2
f11-a	23	1	23	1	1	1	5
f11-b	17	0	17	0	0	0	1
f12-a	15	0	0	15	0	0	1
f12-b	20	0	1	20	0	0	2
f13-a	33	1	1	7	33	5	5
f13-b	22	0	0	5	22	4	3
f14-a	7	1	1	1	1	7	5
f14-b	13	0	0	1	2	13	3

各エリアで検知され対応付けられている AP の数を表 4.3 で示す. 各スキャンデータのエリア候補の検索結果を表 4.4 で示す. スキャンデータ ID は「エリア名-データ名」で構成されている. 検知データ数は各スキャンデータ ID で検知された AP の数である. 一致データ数は各スキャンデータ ID でエリア名毎にそのエリアに対応付けられている AP と一致した AP の数を示している. 「一致データ数」の列における, 背景が灰色の結果はスキャンを行ったエリアと検出したエリアが一致しているものである. 検索エリア数はそのスキャンデータによって検索されたエリア候補の数を示している. また, スキャンデータ全てにおいて電波強度が $-70[\text{dBm}]$ 以上の AP が含まれていた.

この実験結果から全てのスキャンデータ ID において正しい環境マップ候補を検索できることがわかる. また, 全ての場合において正解のエリアは一致データ数がもっとも大きいものになっており, 正解のエリアから遠ざかるに連れて, 一致データ数が減少していることがわかる. また, 検索されたエリア数は最小で 1, 最大で 5 となっている. つまり, 最大で全てのエリアが候補となっているため, 実験環境を拡大して建築物全体とした場合は 5 つ以上のエリアが候補となる可能性があることがわかる.

5. 考察

エリアの候補が多く検索される問題については, 今回は環境マップのエリアの重複がないものとして実験を行ったが, 利用時のデータを用いた環境マップファイル群の更新を考えるとエリアの重複が起こることは前提となるので, エリアの重複を許容するとエリアの候補は本実験よりも増加することが考えられる. この問題の解決策としては, MAC アドレス以外に電波強度である RSSI も用いて, 検索の詳細度を上げることが考えられる. 環境マップ候補の検索に Wi-Fi アクセスポイントの RSSI を用いる場合の Wi-Fi のスキャンデータ s は次のようになる.

$$s = [r(a_0), r(a_1), \dots, r(a_k), \dots, r(a_K)]$$

a_k はアクセスポイントの MAC アドレス, $r(a_k)$ はアクセスポイント a_k の RSSI である. このスキャンデータ s が観測される確率が, ある閾値より高いマップ候補のみを検索することで, 検索されるマップファイルの候補数を削減できると考えられる.

また, 実験結果において正解のエリアに近づくに連れて, 一致する AP の数が増加していることから, 上位数個のみのエリアを候補として用いることも考えられる. また, 検索されたエリア候補に優先度を設定し, その優先度が高い順に VSLAM を実行時の負荷を割り当てることで, マップ候補が多い場合でもシステムを動かせるようにするというシステム面での対策も考えられる.

6. まとめ

視覚障害者の移動を人材ペレータが支援するためには利用者の位置と向き情報が重要である. 本紙ではこの情報を提供することを目的とした, 大規模な環境における環境マップを用いて測位を行うための環境マップ管理手法についての検討を行った. その結果, 環境マップ群から Wi-Fi の MAC アドレスを用いて環境マップの候補を検索できることがわかった. しかし, 環境マップの候補が最大で 5 つ全てを検索してしまったため, これについての検討を行う必要があると考えている.

今後の展望として, Wi-Fi を用いた環境マップ候補を検索する手法において, マップエリアの重複を許容した場合に環境マップファイル候補は増加することが考えられ, この場合のような状況でも, 本手法が適用できることを示していきたい. また, 本紙では 3.2 節の提案手法に関する検討が行えていないので, 図 3.2 の測位システムの実装を行い, それを用いた検証を行っていく予定である. また, 提案手法 2 では新規 VSLAM で作成した環境マップを次以降の測位時に利用できるようにすることを提案している. このためには別途, 新規環境マップと現実地図との対応付けを自動的に行うシステムが求められるため, このシステムの実装についても検討を進めていきたいと考えている. とここで, 本紙では適切な環境マップ検索後に VSLAM による *relocalization* が成功することで最終的な測位が行われることを前提として述べてきた. 私たちはこの前提についても検討を行う必要があると考えており, *relocalization* が成功する場合や, 誤って *relocalization* が完了する場合の条件や確率についての検証を行っていきたいと考えている.

参考文献

- [1] Fu Li, Shaowu Yang, Xiaodong Yi, Xuejun Yang : Towards Visual SLAM with Memory Management for Large-Scale Environments, *Advances in Multimedia Information Processing – PCM 2017*, PCM 2017, pp. 776-786, 2018
- [2] 山口 真弘, 森 尚平, 斎藤 英雄, 谷内田 尚司, 柴田 剛志 : 環境地図のスケールに合わせた Visual Odometry, *画像電子学会誌*, 50 巻, 2 号, pp.254-264, 2021
- [3] Simon F. G. Ehlers, Marvin Stuede, Kathrin Nuelle, Tobias Ortmaier : Map Management Approach for SLAM in Large-Scale Indoor and Outdoor Areas, *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020
- [4] Shinya Sumikura, Mikiya Shibuya, Ken Sakurada : OpenVSLAM: A Versatile Visual SLAM Framework, *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*, pp. 2292-2295, 2019