

修士論文

清掃工場における 磁気フィンガープリンティングパスマッチングによる 屋内測位手法の性能評価

奥村 嶺

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 藤川 和利 教授

(情報科学領域)

令和4年1月24日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

奥村 嶺

審査委員：

藤川 和利 教授 (主指導教員, 情報科学領域)

安本 慶一 教授 (副指導教員, 情報科学領域)

新井 イスマイル 准教授 (副指導教員, 情報科学領域)

清掃工場における 磁気フィンガープリンティングパスマッチングによる 屋内測位手法の性能評価*

奥村 嶺

内容梗概

清掃工場の炉室における機器の点検や清掃には熱中症の危険が伴うため、複数人での実施が望ましい一方で、実際には人員不足により作業員が炉室に一人で赴くことが多く、熱中症などで身動きが取れなくなった場合に救助が遅れてしまう。そのため、身動きが取れなくなった作業員を迅速に発見するために、作業員の位置を追跡する屋内測位システムが必要である。清掃工場における屋内測位の方法として、本研究ではインフラ整備不要な磁気フィンガープリンティングに着目する。位置と磁気データを紐付けた磁気指紋を用いる磁気フィンガープリンティングによる測位では、測位精度が磁気指紋の特異性に依存している。清掃工場には、帯磁した金属、大型モーターや発電機が広範囲にわたって存在しており、様々な場所で磁気の特異性が観測でき、磁気フィンガープリンティングが有効だと期待できる。本研究では清掃工場を対象とした磁気フィンガープリンティングを用いた屋内測位システムの開発を目的とし、実際の清掃工場から磁気データを収集して、解析を進めている。本稿では、測位精度向上を目的として、磁気の特徴をより詳細に捉えるために、空間磁界の鉛直方向成分と水平方向成分の2つの成分をスカラ射影によって分離し、磁気指紋として扱うことを提案する。この磁気指紋を元に、隣り合う磁気指紋を結合した時系列データとして扱う磁気フィンガープリンティングパスマッチング手法に対して測位精度を評価した。評価では、この磁気

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和4年1月24日.

指紋を用いる提案手法の測位性能が、空間磁界の合成スカラ値を指紋とする既存手法の測位性能よりも高くなる仮説を元に、清掃工場から取得したデータを用いて測位誤差を算出する実験を実施し、清掃工場における屋内測位システムを想定した提案手法の性能を評価した。その結果、測定用台車を用いて測位端末の位置、高さ、姿勢を固定できる状態でデータを収集し、オフラインフェーズと推定フェーズの双方で全く同じ位置の指紋が取得できる検証実験において、既存手法の測位誤差平均値が 0.07 m であったのに対し、提案手法のそれは 0.05 m となり、仮説通りの結果となった。

キーワード

磁気, フィンガープリンティング, 屋内測位, DTW, 清掃工場

Performance Evaluation of Indoor Positioning Method Using Magnetic Fingerprinting Path Matching in a Cleaning Plant*

Rei Okumura

Abstract

More than one operator should carry out the inspection and cleaning of equipments in a cleaning plant because of the risk of heatstroke. However, due to the shortage of operators, most inspections are often done by only a single operator. Moreover, clean the equipments alone. Therefore, an indoor positioning system to track the location of operators is needed to detect accidents as soon as possible. This study focuses on magnetic fingerprinting, which does not require infrastructure deployment, as a method for the indoor positioning system in a cleaning plant. Magnetic singularity is observed at different points because many magnetized metals, large motors, and generators are in the cleaning plant. This study aims to develop an indoor positioning system using magnetic fingerprinting for a cleaning plant, and magnetic data is collected from an actual cleaning plant for analysis. This paper proposes to separate the vertical and horizontal components of the spatial magnetic field by scalar projection and treat them as magnetic fingerprints to capture the magnetic features in more detail to improve positioning accuracy. We evaluate the positioning accuracy of a magnetic fingerprinting path matching method that treats neighboring magnetic fingerprints as

*Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, January 24, 2022.

a combined time series data based on this magnetic fingerprint. In the evaluation, we experimented with calculating the positioning error using the data obtained from a cleaning plant. This experiment is based on the hypothesis that the positioning performance of the proposed method using the magnetic fingerprint is higher than that of the existing method using the composite scalar of the spatial magnetic field as the fingerprint. We evaluated the performance of the proposed method assuming an indoor positioning system in a cleaning plant. The results show that the proposed method can be applied to the indoor positioning system in a cleaning plant. As a result, in the verification experiment where data was collected using a measurement cart that allowed the position, height, and orientation of the positioning terminal to be fixed, the fingerprints of the same position were acquired in both the offline and estimation phases, the average positioning error of the existing method was 0.07 m, while that of the proposed method was 0.05 m. This result is consistent with the hypothesis.

Keywords:

Magnetism, Fingerprinting, Indoor Positioning, DTW, Cleaning Plant

目次

1. はじめに	1
2. 研究背景	3
2.1 清掃工場の概要	3
2.2 清掃工場に屋内測位が必要な理由	4
2.3 測位の概要	7
2.3.1 屋外測位技術	7
2.3.2 屋内測位技術	8
2.4 作業員を追跡するシステムに要求される項目	8
3. 関連研究	9
3.1 インフラ整備を必要とする屋内測位	9
3.2 インフラ整備が不要な屋内測位	10
3.3 関連研究の考察と比較	11
4. 磁気 FP を用いた屋内測位手法	14
4.1 利用する基礎技術	14
4.1.1 フィンガープリンティング (Finger Printing; FP)	14
4.1.2 磁気	15
4.1.3 Dynamic Time Warping (DTW)	16
4.2 磁気データの前処理	19
4.3 予備実験	22
4.4 提案手法	28
5. 評価	30
5.1 実験のために収集したデータについて	30
5.2 計算実験環境	34
5.3 評価結果	35
5.3.1 単純な測位性能の評価結果	36

5.3.2 実践的な測位性能の評価結果	40
6. 考察	49
6.1 提案手法の優位性について	49
6.2 実運用に近い環境で発生する測位誤差について	50
6.3 今後の展望	53
7. おわりに	54
謝辞	55
参考文献	57

目 次

1	石川北部 RDF センターの炉室内	4
2	炉室内で調査する筆者	4
3	複数作業員でメンテナンス業務を実施する場合の救助体制	5
4	単独作業員でメンテナンス業務を実施する場合の救助体制	6
5	磁気フィンガープリントを用いた屋内測位のオフラインフェーズ	15
6	磁気フィンガープリントを用いた屋内測位の推定フェーズ	15
7	磁界にスマートフォン (磁気センサ内蔵) を配置する例	20
8	磁気ベクトルの分解	21
9	既存研究の評価実験における, 計測機器を持ちながら廊下を歩いた際の磁気合成値 M の変化 (抜粋)	22
10	調査フィールドにて, 計測機器を持ちながら廊下を歩いた際の磁気合成値 M の変化	22
11	磁気 FP 点マッチングによる測位誤差	25
12	磁気 FP 点マッチングによる測位結果のヒートマップ	26
13	磁気 FP 点マッチングによる測位した基準点と正解の基準点の関係	26
14	推定フェーズ用データの M_h, M_v	27
15	推定フェーズ用データの取得位置	27
16	メイン画面のユーザインタフェース	32
17	座標位置を選択するユーザインタフェース	32
18	環境データ測定用台車の構成部品と外観	34
19	ターンテーブルと車輪の回転検出	34
20	評価データの取得箇所	37
21	パス長と測位精度の関係	39
22	パス長と測位精度の関係 (拡大)	40
23	検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較	43
23	検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較	44
23	検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較	45
23	検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較	46

23	検証方法2における指紋パスごとの測位結果比較	47
23	検証方法2における指紋パスごとの測位結果比較	48

表 目 次

1	各屋内測位手法における測位精度とそれらを屋内測位システムに 導入する際にかかるコストの比較	13
2	図 11 の詳細値	25
3	環境データ一覧	31
4	パス長と測位誤差の詳細 (検証方法1)	38
5	処理速度の比較 (検証方法1)	39
6	測位性能の比較 (検証方法2)	42
7	処理速度の比較 (検証方法2)	42
8	M_v を正規化した際の測位性能 (検証方法2)	52

1. はじめに

我々は生活を営む上で、様々なごみを排出する。日本において、ごみの大部分は直接焼却処理されており、文献 [1] によると 2019 年度における直接焼却処理量はごみ総処理量の約 79% を占めている。また、ごみの直接焼却処理を受け持つ施設は一般的に清掃工場と呼ばれ、全国各地で稼働している。したがって清掃工場は、日本人の生活を支える重要な社会インフラだと言える。

清掃工場には、焼却設備等が存在する炉室と呼ばれる空間がある。炉室内は焼却設備から発せられる熱によって高温なため、清掃工場の作業員が作業する上では危険な環境である。清掃工場が平常稼働している場合、作業員は集中管理室から遠隔でごみ処理システム全体を監視および操作できるため、炉室に入る必要はない。しかし、炉室内の設備に対する点検や清掃が必要な場合は、作業員は炉室に入る必要がある。危険な炉室内で作業する際の安全対策として、現状では作業員を複数人で行動させる対処が実施されている。

その一方で清掃工場では、作業員数は不足しがちであり、常に複数人で行動するのは困難な現状もある。そのため、作業員が少人数な体制でも作業員の安全確保を可能とするために、高温な炉室内で熱中症や転倒といったトラブルにより身動きが取れなくなった要救助者を、早期に救助する仕組みが求められている。

以上のような現状に対して、本研究では、要救助者の元までいち早く到達可能とする、清掃工場内において作業員を追跡するシステムの開発に取り組んでいる。作業員を追跡する手段としては屋内測位技術が有用だと考えるが、Wi-Fi アクセスポイントや Bluetooth ビーコンを利用する既存の屋内測位技術は導入コストの観点から利用が難しい。清掃工場の炉室内では帯磁した金属、大型モータや発電機が広範囲にわたって存在しており、様々な場所で磁気の特異性を観測できる点から、磁気を用いた測位手法が有効だと期待できる。

関連研究として清掃工場における測位に磁気を用いた前例は無いため、まずは磁気を用いた測位手法が広い炉室内において測位可能であるかを調査する。この事前実験では、実際に清掃工場の炉室から磁気を収集して、点マッチング測位手法を利用して実際に測位を実施した。調査の結果、磁気を用いる測位手法が清掃

工場にも適用できる可能性が明らかとなった一方、測位誤差¹の最大値が 45.45 m となり作業員の追跡に使用するには精度不足なことも明らかとなった。

そこで、本稿では清掃工場における屋内測位手法の精度向上を目指して、炉室の特徴を考慮した磁気フィンガープリンティングパスマッチングを提案する。本手法では磁気の特徴をより詳細に捉えるために、空間磁界の鉛直方向成分と水平方向成分の2つの成分をスカラ射影によって分離し、磁気指紋として扱う。提案手法の評価として、清掃工場から取得したデータを用いた測位実験を実施し、単純な測位性能と実践的な測位性能の2つの観点から評価した。評価の比較基準として、磁気フィンガープリンティングを用いる屋内測位の既存手法を用い、提案手法と測位誤差を比較した。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では、清掃工場に屋内測位システムが必要となる背景について説明する。第3章では、屋内測位に関する関連研究とその問題点について述べる。第4章では、本稿で提案する屋内測位手法について述べる。第5章では、提案手法の測位精度を評価する。第6章では、評価結果を元に提案手法の特性を考察する。第7章には、本稿のまとめを記述する。

¹測位結果から得られた位置と実際の位置とのずれ

2. 研究背景

本章では、本研究の背景として清掃工場の概要および、清掃工場における屋内測位システムの必要性について説明する。その後、清掃工場が必要とする測位の概要と、清掃工場における屋内測位システムとして要求される項目について説明する。

2.1 清掃工場の概要

日本国における廃棄物処理施設は、その施設で処理される対象物によって「ごみ処理施設」と「し尿処理施設」に大別され、前者は焼却施設、後者は下水処理場が例として挙げられる [1]。ごみ処理施設の分類は以下の通りであり、本研究が対象としている清掃工場は、この分類における焼却施設を指す。

- 焼却施設
- 粗大ごみ処理施設
- 資源化等を行う施設
- ごみ燃料化施設
- その他の施設
(ごみの中間処理施設)
- 保管施設
- 最終処分場

清掃工場とは、可燃ごみや不燃ごみを加熱し、それらの体積、重量を削減する施設である。清掃工場は、炉室と呼ばれる密閉空間に立体的に配置した設備を利用して、被処理物を焼却処理する。例えば、図 1 に示す石川北部 RDF² センター³ の炉室は、水平方向 32 m × 40 m、鉛直方向 25 m 以上の空間であり、流動床ガス化炉、熔融炉といった設備が配置されている。また、炉室内では焼却後の灰がベルトコンベアを用いて運搬されているために、人体に有害な塵が舞っており、外部との接続には気密ドアが使用されている。このような炉室内は、配置された設備が焼却処理時に発する熱により高温となっており、特に上層階では 40°C 付近になることも珍しくない。実際に、2021 年 8 月 23 日に石川北部 RDF センター

²Refuse Derived Fuel (RDF): 廃棄物から生成される燃料

³石川北部 RDF センターホームページ: <http://www.scnet.tv/~rdf/>

において、TR-73U データロガー⁴ を用いて炉室最上階の室温を計測したところ、38.6°C であった。

炉室内の業務に当たる作業員は、図 2 に示すように、有害な塵による健康被害を防ぐために防塵マスクを着用することが義務付けられており、低酸素状態になりやすい状態だと言える。加えて前述の通り、炉室は高気温な場所も多い。したがって、炉室内は人間が長時間作業するには過酷な環境である。



図 1: 石川北部 RDF センターの炉室内



図 2: 炉室内で調査する筆者

2.2 清掃工場に屋内測位が必要な理由

清掃工場における、ごみの加熱処理といった通常の運転業務は、半自動運転となっていることが多く、平常時では、作業員らは集中管理室からの遠隔操作のみで清掃工場を稼働させられる。しかし、炉室内の設備の点検や清掃といった、メンテナンス業務の自動化は実現できていないため、このメンテナンス業務は作業

⁴データロガー おんどとり TR-73U 製品ページ: <https://www.tandd.co.jp/product/ondotori/tr7ui-series/tr73u/>

員が手作業で実施している。メンテナンス業務の対象となる設備は前述した炉室内にあるため、メンテナンス業務を実施する作業員は、常に熱中症による行き倒れの危険にさらされている。このようなメンテナンス業務は、安全確保の観点から複数作業員で対応することが望ましい。図3に示すように、広大な工場内に対して十分な数の作業員が配置できる場合は、作業員が身動きを取れない状況にも迅速に救助活動ができる。

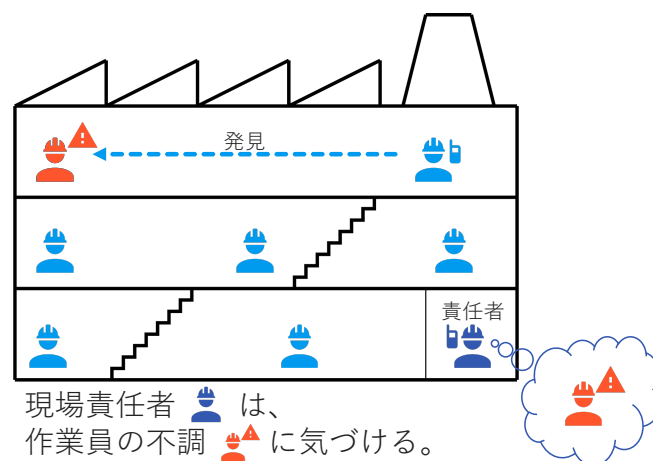


図3: 複数作業員でメンテナンス業務を実施する場合の救助体制

しかし、環境省が公開する日本の廃棄物処理に関する統計集 [1] から分かる通り、作業員の人数確保は盤石とは言い難い。統計集によると、2019 年度に清掃工場における現場作業員として従事した作業員数は 6484 人⁵、同年のごみ焼却施設の施設数は 1067 施設⁶である。つまり、各施設に配置される作業員は平均で $6484 \div 1067 \approx 6$ 名となる。この 6 名の作業員が毎日 24 時間稼働し続ける清掃工場に 1 週間従事すると仮定した場合、一週間の清掃工場の稼働時間は $24 \times 7 = 168$ 時間であるのに対して、各作業員が均等に 40 時間従事した場合の労働時間は $6 \times 40 = 240$ 時間となる。したがって計算上は、各施設では平均して $240 \div 168 \approx 1.43$ 人の作業員が従事していたこととなる。

⁵文献 [1] 50 頁 (1) の表より、一般廃棄物処理事業、技能職 (中間処理) 人員として従事していた人員数。調査時にこの人員としてカウントされるのは、クレーン操作者、ピット係員、焼却作業員等中間処理に携わる技能士、作業員である。これが文意に最も近いと判断した。

⁶文献 [1] 16 頁 (3) の表より

作業員が不足した際に起こる問題は、熱中症に代表される体調悪化による行き倒れの際に、救助が遅れることである。図4は、メンテナンス業務時に作業員が不足した場合に起こりうるシナリオを示しており、身動きが取れない作業員は他の誰にも発見されず、行き倒れとなってしまう。

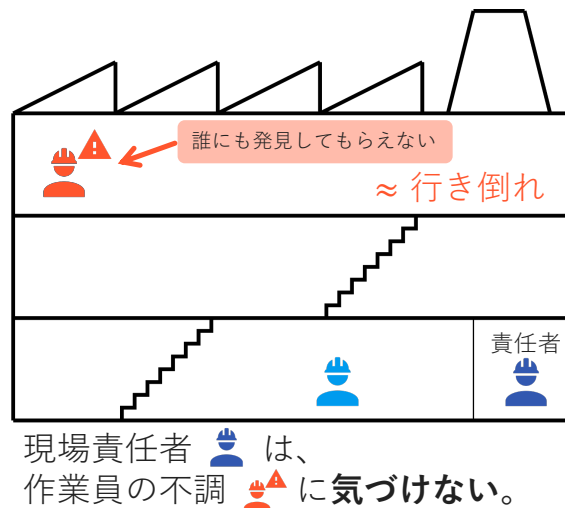


図4: 単独作業員でメンテナンス業務を実施する場合の救助体制

このような現状に対し本研究では、屋内測位技術によって作業員を追跡することで、炉室内にて単独で作業する作業員の安全を確保できると考える。作業員を追跡するシステムは以下の場面で良い効果をもたらす。

- 巡回点検といった、1人でも遂行可能な業務における作業員安全性の向上。足場からの転落、転倒、不自然な停止（熱中症や行き倒れ等）の緊急事態を検知。
- 誤操作（1号ボイラと2号ボイラを間違える等）の防止。
- 窒素ガス放出装置といった機械を操作する際に、影響がある危険区域に作業員がいないかを確認し、労働災害を予防する。

2.3 測位の概要

測位とは、位置を知りたい物体 (被測位物体) の現在地を何らかの手法で測定することである。本節では、屋外・屋内双方の測位技術をそれぞれ説明する。

2.3.1 屋外測位技術

屋外測位技術としては、Global Navigation Satellite System (GNSS) が、自動車のナビゲーションシステムや地図アプリケーションの道案内機能といった様々な場面で利用されている。GNSS は人工衛星 (測位衛星とも呼ばれる) を利用した全世界測位システムであり、複数の国家で運用されている。その例として米国による Global Positioning System (GPS)、ロシアによる GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) が挙げられる。日本では、みちびきの愛称で知られる準天頂衛星システム Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) が運用されている。

GNSS は、4 基以上の測位衛星を用いて現在地を割り出す。以下に GNSS の測位手順を示す。

1. 測位衛星のうちいずれかの 1 基を用いて、正確な時刻を取得する。
2. 手順 1. で取得した時刻と残り 3 基以上の測位衛星が発する電波を用いて、各測位衛星と被測位物体の距離を割り出す。
3. 3 つの測位衛星を中心とする 3 つ以上の球の交点座標を推定し、これを現在地とする。

したがって、移動する被測位物体を GNSS で測位する際は、原理的に被測位物体と複数の測位衛星が障害物に遮られることなく、常に電波通信できる環境が前提となる。

GNSS の応用例としては、自動車に搭載されるナビゲーションシステム (カーナビ) が挙げられる。カーナビは自車を測位し、予め保持している地図情報と組み合わせて、自車の現在地から目的地までを道案内する。自動車が路上を走行する主な場所は屋外であり、多くの場所で前述の前提は満たされる。つまり、トン

ネルや高層ビルが密集する地区といった、比較的まれな場面では GNSS による測位の問題は起きないと言える。

2.3.2 屋内測位技術

屋内測位手法は、電波が遮られて測位衛星と電波通信ができないような屋内で用いられる測位手法である。屋内測位手法は測位範囲や測位環境、測位するために最低限必要なコストといった、多くの要因から適用できる環境が限定的であり、今日の屋外測位技術で一般的となった GNSS に匹敵する手法は確立されていない。

清掃工場の炉室内は屋内であり、測位衛星からの電波受信が困難であるため、GNSS による測位は不可能である。したがって、炉室に特化して測位可能な屋内測位手法が必要となる。

2.4 作業員を追跡するシステムに要求される項目

本研究の対象である清掃工場に求められる測位システムは、清掃工場内で作業中の作業員に何らかの異常が発生して身動きが取れなくなった際に、迅速な救助を補助することを主な目的としている。清掃工場は屋内であるため、測位システムが作業員を追跡するには、屋内測位技術が必要となる。

その一方で、清掃工場の運営に潤沢な資金が投入されることは難しい。筆者が調査のために赴いた清掃工場の管理者と測位システムについて議論した結果、システムの測位誤差は最大 10 m 程度を要件としつつも、システムの導入時にかかるコストは可能な限り少額に抑えたいとのことであった。

したがって、作業員を追跡するシステムのための屋内測位技術は、導入コストと測位精度の両方を考慮する必要がある。前者は測位技術を導入する際に発生するコスト、後者はその測位手法が持つ清掃工場内における測位精度である。

3. 関連研究

本章では，屋内測位の研究に関連する先行研究を示す．まず，屋内測位する際にインフラ環境が必要である手法，そうでない手法をそれぞれ紹介し，次に，測位精度と導入コストの観点からこれらの手法を比較・考察する．

3.1 インフラ整備を必要とする屋内測位

インフラ整備を必要とする屋内測位手法では，Wi-Fi アクセスポイント (以下 Wi-Fi AP と記述) や Bluetooth Low Energy ビーコン (以下 BLE ビーコン と記述) といった基地局を設置する．本節では，これらのインフラ機器の導入が必須となる先行研究を紹介する．

Wi-Fi を用いた屋内測位手法の研究として，Sadowski ら [2] と Sen ら [3] の研究がある．Sadowski らは，Wi-Fi の信号強度である Received Signal Strength Indicator (RSSI) を用いる手法を提案した [2]．屋内の研究室と教室の2つの環境において，Wi-Fi AP から 1 m ~ 5 m 離れた複数の地点に対して3点測位法を用いて測位しており，平均測位誤差 0.664 m を達成している．一方で同文献では，RSSI の値は，Wi-Fi AP と受信端末の距離が遠くなるにつれて，変化が緩慢になることも示されている．つまり，応用可能な屋内環境としては，小規模な会議室といった小さい部屋が望ましいと考えられる．また，Sen らは，Wi-Fi の Channel State Information (CSI) を用いる方法を提案した [3]．CSI はチャネルの状態情報であり，Wi-Fi AP と通信端末の間で使用中のチャネル情報等を含む．彼らは，60 m × 76 m のオフィスフロアに Wi-Fi AP が5個あるフィールドで測位しており，5つの AP すべてを利用した場合の測位誤差が 4 m 以内となっている．

BLE ビーコンを用いた屋内測位の関連研究としては，Zhuang ら [4] の研究がある．Zhuang らは BLE ビーコンとスマートフォンを用いる屋内測位のアルゴリズムを提案した [4]．彼らは，チャネル分離型多項式回帰モデル，チャネル分離型フィンガープリンティング，外れ値検出，拡張カルマンフィルタリングを組み合わせて使用するアルゴリズムを提案し，60 m × 40 m のオフィスフロアで測

位精度の検証をしている。この検証によると、BLE ビーコンを 9 m あたり 1 つずつ配置した場合の測位誤差が 90 % の確率で 2.56 m 以下であることが示されている。

3.2 インフラ整備が不要な屋内測位

本節では 3.1 節との対比として、インフラ整備が不要な屋内測位の関連研究を紹介する。インフラ整備が不要な屋内測位手法としては、Pedestrian Dead Reckoning (PDR) や磁気を使用する手法が挙げられる。

PDR[5] は人間が歩行する際の歩数や方向を逐次検出し、ある場所から移動した方向と距離を求める手法である。一般的に PDR は、移動した方向と距離を、加速度センサ や ジャイロスコープ (電子コンパス) を用いて求める。PDR は前述の Wi-Fi を用いる際に必須であったインフラ整備が不要である一方で、原理的に測位誤差が累積する欠点もある。そのため、大きい室内空間に PDR を適用する際には、累積誤差を修正するために絶対座標を修正する他技術を併用したり [6]、マップマッチング手法で強制的に位置を修正する方法が用いられる [7]。

屋内測位に磁気を利用する手法として、Ashraf ら [8] と Subbu ら [9] の研究がある。Ashraf らは、スマートフォンで取得した磁気を Convolutional Neural Network (CNN) で分類する手法を提案した [8]。彼らは、磁気フィンガープリンティング⁷ (以下 磁気 FP と記述) をベースとした独自の検出アルゴリズムにより、測位誤差の最大を 3 m 以下に抑えている。他にも、マップマッチングと Dynamic Time Warping (DTW) を組み合わせるものが挙げられる [9]。

磁気 FP を利用した屋内測位の困難な点は、複数の基準点で類似する磁気が観測されることである。これは測位範囲が広がるほど起こりやすいため、測位範囲をいかに限定するかが高精度に測位する上で重要となる。このような磁気測位の問題を補う研究として、東ら [10] と武島ら [11] の研究がある。東らは Wi-Fi と磁気を組み合わせて精度を上げる調査を実施し、上記の測位範囲限定手法として有効であることを示している [10]。また、武島らは、回転磁石マーカを空間に設

⁷フィンガープリンティング (Finger Printing; FP) については、4.1 節でより具体的に述べる。

置してランドマーク化する手法を考案している [11]。しかし、両者とも整備コストの問題により、清掃工場への適用は難しい。

3.3 関連研究の考察と比較

屋内測位を高精度に実施するためには、3.1 節に示したインフラ整備の必要な屋内測位手法が適切だが、これらは Wi-Fi AP もしくは BLE ビーコンを必要とする。この場合、これらのインフラ整備が必須となる。地下街やショッピングモールでは、既に利用者向けに施設内公共 Wi-Fi が整備されることもあり、それら既存の Wi-Fi AP を利用することで整備コストを削減できると考える。一方、清掃工場では Wi-Fi AP や BLE ビーコン 導入は稀であるため、コストをかけて新規にインフラを整備する必要がある。実際に石川北部 RDF センターでは、Wi-Fi AP は作業員の食堂や休憩スペースといった特定区域のみに導入され炉室全体はカバーせず、BLE ビーコンは未導入、という状況であった。ここで、清掃工場におけるインフラ整備にかかるコストに関する定量的議論のために、インフラが未導入な清掃工場⁸ である石川北部 RDF センターと同規模の清掃工場を想定して、インフラ整備時にかかるコストを試算する。試算に必要な具体的な数値はある程度の測位精度を考慮して以下の通りに定める。

- Wi-Fi AP は炉室全域 (32 m × 40 m × 25 m) に対して 5 m 立方格子状に整備する。
- Wi-Fi AP 1 基 あたりの設置費用は 3 万円とする。⁹
- 電源共有用の PoE ハブ 1 基 あたりの設置費用は 5 万円 とする。¹⁰

⁸工場の新設時に同時作業して、ケーブルの配線・AP 設置棟はプラント電気工事と合わせて整備したと仮定する。既設の清掃工場の場合は、ケーブルラックを剥がす作業が別途必要となり、工事費がより高額になる。

⁹内訳は以下の通り。

AP 設置時: 部材費用・配線作業費 合計 12 千円

イーサネット LAN 布設時: 部材費用・配線作業費・試験費合計 15 千円

その他: 監督費・安全対策費・諸経費 合計 3 千円

¹⁰内訳: 部材 (収納箱加工含む) 費用・電源 (ブレーカ, アース工事) 配線作業費 合計 5 万円

- Wi-Fi AP 5基ごとに PoE ハブを 1基 設置する.

これらを元に試算すると、Wi-Fi AP 設置数は $32/5 \times 40/5 \times 25/5 = 256$ 基、PoE ハブ設置数は $256/5 \approx 52$ 基 となり、設置費用は $256 \times 3 + 52 \times 5 = 1028$ 万円となる。このように、石川北部 RDF センターと同規模の清掃工場においては、Wi-Fi AP の整備に 1000 万円規模の出費が必要だと言える。BLE ビーコンの整備についても、同様の試算により 100 万円規模の出資が必要だと判明した。

一方で、清掃工場の管理者と議論したところ、設備投資はできるだけ少額にしておきたいという希望があり、インフラの点検費用も継続的に必要なことも考慮すると、屋内測位のためだけにこの規模の投資は難しく、Wi-Fi AP や BLE ビーコンの整備は現実的でないと結論になった。また、図 1 にも確認できるように、炉室には金属製の大きな設備や鉄製のパイプ、何層にも重ねられたグレーチングが存在し、Wi-Fi AP と測位デバイス間の通信が、一般的な地下街やオフィスビルと比較して困難である懸念もある。

次に、屋内測位する際に、インフラ整備が不要な手法を用いる場合を考える。この場合は、前述した測位範囲に Wi-Fi AP 等を設置するインフラ整備が不要であり、システムの導入に必要な投資は測位端末の購入と後述するデータマップの作成費用等による 10 万円規模で十分なため、清掃工場の炉室においても導入可能だと考えられる。清掃工場の炉室には、前述の通りグレーチングの足場を含む多くの金属がある。これらが持つ残留磁気により、一般的な地下街やオフィスビルと比較して磁気 FP を用いる測位が容易であると考えられる。

最後に、Wi-Fi AP、BLE ビーコン、磁気を用いる手法それぞれにおいて、屋内測位システムに用いる際の測位精度と、必要なコストの比較を表 1 に示す。この表からも、インフラ整備コストの観点では、磁気 FP を用いる既存の測位手法が本研究の目指す屋内測位システムにふさわしいと言える。しかし、測位精度の観点では測位誤差が大きく、清掃工場を対象にした磁気を用いる測位手法の先行研究は存在しないため、調査が必要である。

表 1: 各屋内測位手法における測位精度とそれらを屋内測位システムに導入する際にかかるコストの比較

測位に用いる基盤	BLE ビーコン	Wi-Fi AP	磁気
測位精度	◎ 1 cm ~ 10 m	◎ 1 cm ~ 10 m	○ 5 m ~ 60 m
システム導入にかかるコスト	△ 100 万円単位	△ 1000 万円単位	○ 10 万円単位

4. 磁気FPを用いた屋内測位手法

本章ではまず、提案手法に用いる基礎技術と提案手法の重要なアイデアである、磁気データの前処理について述べる。次に、提案手法の考案へ至る前に実施した予備実験の結果を示し、最後に提案手法について説明する。

4.1 利用する基礎技術

本節では、提案手法に必要なフィンガープリンティング (Finger Printing; FP), 磁気, Dynamic Time Warping (DTW) について説明する。

4.1.1 フィンガープリンティング (Finger Printing; FP)

フィンガープリンティング (Finger Printing; FP) は屋内測位によく用いられる手法であり、オフラインフェーズ, 推定フェーズの2段階で処理される。オフラインフェーズでは、図5に示すように基準点¹¹と呼ばれる測位範囲内の位置と、指紋と呼ばれるその位置特有の値を共に収集して、データマップを作成する。収集に用いるデバイスは任意だが、本研究ではスマートフォンを用いる。推定フェーズでは、図6に示すように測位範囲内の任意の位置で指紋を改めて取得し、オフラインフェーズで得た指紋と任意の比較方法で算出した尤度を元に測位する。尤度の算出方法に関しては、一般的には基準点の指紋からノルムを計算し、最小あるいは複数の基準点の重心を測位結果とするといった比較方法が用いられる。

FPは指紋に用いる値、および尤度の算出方法に制限が無く、幅広い事例に適用できる柔軟性が利点である。一方で、測位精度は指紋のばらつきに大きく影響されるため、異なる基準点で似た指紋が存在する場合は測位精度が低下する。また、オフラインフェーズにおける指紋の取得は自動化が難しく、測位範囲が広い場合はオフラインフェーズに多くの時間が必要なことも、欠点として挙げられる。

¹¹リファレンスポイントと呼ばれる場合もあるが、本稿では基準点と記述する。

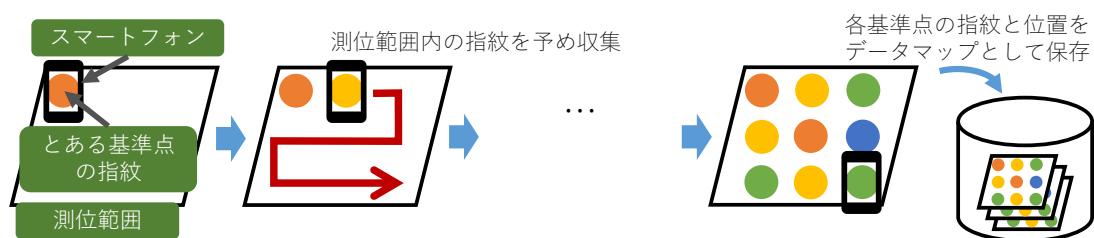


図 5: 磁気フィンガープリントを用いた屋内測位のオフラインフェーズ

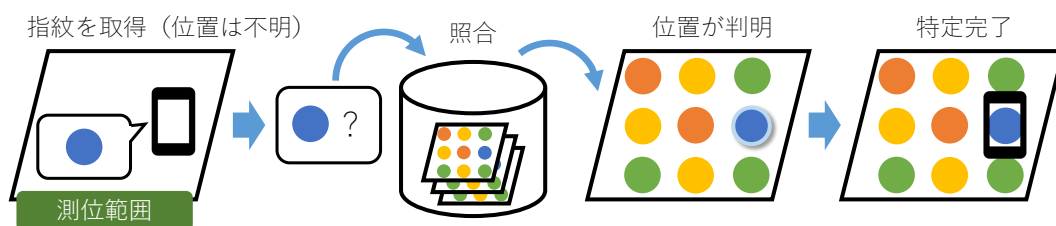


図 6: 磁気フィンガープリントを用いた屋内測位の推定フェーズ

4.1.2 磁気

磁気とは、磁石の相互作用の源である。磁界¹²は、空間上における磁気を表現する概念であり、大きさと方向を持つベクトルで表される。磁界を取得するには、ホール素子や電気抵抗素子などを利用する磁気センサが用いられ、空間上の磁気ベクトルを XYZ 3 軸成分のスカラー値として検知する。

この磁界の元となる磁気は、主に地磁気、残留磁気、電磁気の 3 種類に分類できる。地磁気は、地球そのものが大きな磁石である性質により発生する磁界であり、方位を知る手がかりとしてコンパスに活用されている。残留磁気は付近に存在する保磁力の高い磁性体に磁力が残り続け、その磁力が空間に影響を及ぼすことを指す。電磁気はアンペールの法則に則り、導線に電流が流れた際の短期的な磁界の変化によって現れる。このように、磁界の発生源 3 種類はそれぞれ異なる現象から生じている。

屋内空間では、この残留磁気による磁界の局所性が見られる。磁界の局所性とは、空間において位置ごとに異なる局所的な磁界が存在する状態を指し、この性

¹²磁場と呼ばれる場合もあるが、本稿では磁界と呼称する。

質により位置と磁界の対応付けが可能となる。前述の通り、残留磁気は付近の構造物からもたらされるため、屋内では位置ごとに異なる磁界が存在している。例えば、鉄製の扉とエレベータが併設された廊下を磁気センサを保持しながら歩いた場合、鉄製の扉とエレベータの近くでは磁気センサの値が異なる。補足として、屋外では地磁気の影響が支配的であるため、磁界の局所性が観測されづらい。磁界が常に磁北を向いているため、屋外ではコンパスが利用できる。この磁界の局所性より、保磁力の高い鉄製の機器が多く存在する炉室内において、磁気がFPの指紋として有用であると考えた。

4.1.3 Dynamic Time Warping (DTW)

Dynamic Time Warping (DTW) は、2つの時系列データの幾何学的な不一致度を計算するアルゴリズム [12] の1つである。この不一致度は0以上のスカラ値で表され、値が0の時は2つの時系列データが一致していることを示している。つまり、2つの時系列データから得られたDTWの値は、それぞれのデータの近しさの指標として利用できる。最も単純な例として、2つの時系列データの各要素がスカラ値の場合は、時系列データは波形として表示でき、2つの波形の形状が似ているほど、DTWの計算で得られる不一致度が小さくなる。2つの系列データの不一致度を計算する他の手法としては、ノルム距離の合計を不一致度とする方法がある。

次に、DTWの計算方法を説明する。式(1), (2)に示すように、 P と Q で表される2つの時系列データがあり、それぞれの要素数が N と M 、各要素の次元数が K である場合を考える。

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_N) \quad N \in \mathbb{N} \quad (1)$$

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_M) \quad M \in \mathbb{N} \quad (2)$$

P, Q の各要素は以下の通りである.

$$\begin{aligned}
p_1 &= [p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1K}] & q_1 &= [q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1K}] \\
p_2 &= [p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2K}] & q_2 &= [q_{21}, q_{22}, \dots, q_{2K}] \\
&\vdots & & \vdots \\
p_N &= [p_{N1}, p_{N2}, \dots, p_{NK}] & q_M &= [q_{M1}, q_{M2}, \dots, q_{MK}] & K \in \mathbb{N}
\end{aligned}$$

DTW は, 式 (3) に示されるコスト $c(p_i, q_j)$ の合計が最小になる組み合わせを計算し, その合計を不一致度とする.

$$c(p_i, q_j) = \|p_i - q_j\| \quad i \in [1 : N], \quad j \in [1 : M] \quad (3)$$

ここで, $\|p_i - q_j\|$ は p_i と q_j のノルム計算を表しており, 任意のノルム計算が利用可能である. 代表的なノルム計算であるユークリッドノルムを用いる場合, コスト $c_{i,j}$ は式 (4) より得られる.

$$c(p_i, q_j) = \|p_i - q_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^K (p_{ik} - q_{jk})^2} \quad (4)$$

不一致度の計算には, $N \times M$ の大きさであるコスト行列 C が用いられる. コスト行列の各セル $C[i, j]$ に対して, 次を示す手順で計算することで, 不一致度 $\text{DTW}(P, Q)$ が $\text{DTW}(P, Q) = C[N, M]$ として求められる.

1. 先頭行を式 (5) によって求める.

$$C[1, j] = \sum_{l=1}^j c(p_1, q_l) \quad j \in [1 : M] \quad (5)$$

2. 先頭列を式 (6) によって求める.

$$C[i, 1] = \sum_{l=1}^i c(p_l, q_1) \quad i \in [2 : N] \quad (6)$$

3. 上記以外を式 (7) によって求める.

$$\begin{aligned}
C[i, j] &= \min \{C[i-1, j-1], C[i-1, j], C[i, j-1]\} \\
&\quad + c(p_i, q_j) \quad i \in [2 : N], \quad j \in [2 : M] \quad (7)
\end{aligned}$$

この計算をアルゴリズムとして記述したものを Algorithm 1 に示す.

Algorithm 1 DTW(P, Q) を求めるアルゴリズム

Input:

- $P = p_0, p_1, \dots, p_{N-1}$
- $Q = q_0, q_1, \dots, q_{N-1}$

Output:

- 不一致度 DTW(P, Q)

```
1:  $N \leftarrow \text{Length}(P)$ 
2:  $M \leftarrow \text{Length}(Q)$ 
3:  $C_M \leftarrow \text{new Array2D}[N, M]$  ▷  $N \times M$  の行列を新規作成する
4:  $C_M[0, 0] \leftarrow c(P[0], Q[0])$ 
5: for  $i \leftarrow 1$  to  $N - 1$  do
6:    $C_M[i, 0] \leftarrow c(P[i], Q[0]) + C_M[i - 1, 0]$ 
7: for  $j \leftarrow 1$  to  $M - 1$  do
8:    $C_M[0, j] \leftarrow c(P[0], Q[j]) + C_M[0, j - 1]$ 
9: for  $i \leftarrow 1$  to  $N - 1$  do
10:  for  $j \leftarrow 1$  to  $M - 1$  do
11:     $C_M[i, j] \leftarrow c(P[i], Q[j]) + \min(C_M[i - 1, j], C_M[i, j - 1], C_M[i - 1, j - 1])$ 
12: return  $C_M[N - 1, M - 1]$ 
```

DTW の特徴としてはまず、比較する 2 つの時系列データに対し、時間方向の平行移動や伸縮に頑健であることが挙げられる。これは、測定周波数の異なる時系列データ同士でも比較可能なことを意味しており、磁気 FP において近しさの指標を計算する際に重要な特徴となる。前項で述べた通り、磁気 FP ではオフラインフェーズと推定フェーズが存在するが、それぞれのフェーズにおいて、測定周波数が異なることを考慮する必要がある。これは時系列データの収集効率を考慮し、時系列データの収集方法が各フェーズで異なることに起因する。後述する提

案手法を作業員追跡システムの測位手法として用いる際には、オフラインフェーズにおける指紋の測定周波数は、推定フェーズにおける指紋の測定周波数よりも低く、DTWが持つこの特徴は提案手法にとって重要である。一方で、Algorithm 1よりDTWの時間計算量は $O(NM)$ であり、前述のノルム距離の合計の時間計算量 $O(N)$ と比較すると、大きいことがわかる。これは、DTWの計算に時間を要することを意味しており、作業員を救助する際の時間に影響を及ぼす欠点として考えられる。

4.2 磁気データの前処理

本節では、屋内で磁気FPを実施する際に必要となる、磁気センサの値に対する前処理について説明する。まず、前処理が必要な理由を示し、その後具体的な処理を明記する。

磁気FPでは、磁気データを指紋として用いる。炉室内で作業する作業員を追跡する場合、磁気データを収集する磁気センサ内蔵スマートフォンは作業員が保持することになる。この時、作業員の体勢やスマートフォンの保持位置によって、スマートフォンの姿勢は変化し、その変化はそのまま収集している磁気データに影響を及ぼす。一方で、4.1.1項で説明した通り、FPの精度は指紋に大きく依存するため、高品質な指紋が求められる。ここにおける高品質とは、FPにおけるオフラインフェーズと推定フェーズの両方で、スマートフォンを同じ基準点に配置した際、同じ指紋が得られることを意味している。したがって、高精度な測位のために、スマートフォンで取得した磁気データから、スマートフォンの姿勢変化による影響を除外する補正が必要となる。

ここで、スマートフォンの姿勢変化が磁気データに影響を及ぼす例を示す。空間磁界が固定されている場合は、地球から見た視点(地球座標軸)では大きさも向きも変化せず、指紋として使用できる。しかし、この磁界をスマートフォンで取得する場合、内蔵されている磁気センサが観測する磁界は、当然ながらその磁気センサから見た視点(スマートフォン座標軸)となる。つまり、取得に用いるスマートフォンの姿勢が変化すると、地球座標軸上では固定している磁界が、変化している磁界として取得される。図7は、方向も大きさも同じ $1\mu\text{T}$ の磁界にス

スマートフォンを縦置き、横置きした状態をそれぞれ示している。磁気センサ XYZ の3軸成分は、図中のスマートフォン画面上の軸に沿って検出される。この時、磁気センサから得られる値は、縦置きの場合 $(x, y, z) = (0, 0, 1)$ 、横置きの場合 $(x, y, z) = (0, 1, 0)$ となる。このように、磁気センサから得られた XYZ の値は、上記の高品質な指紋とは言えない。

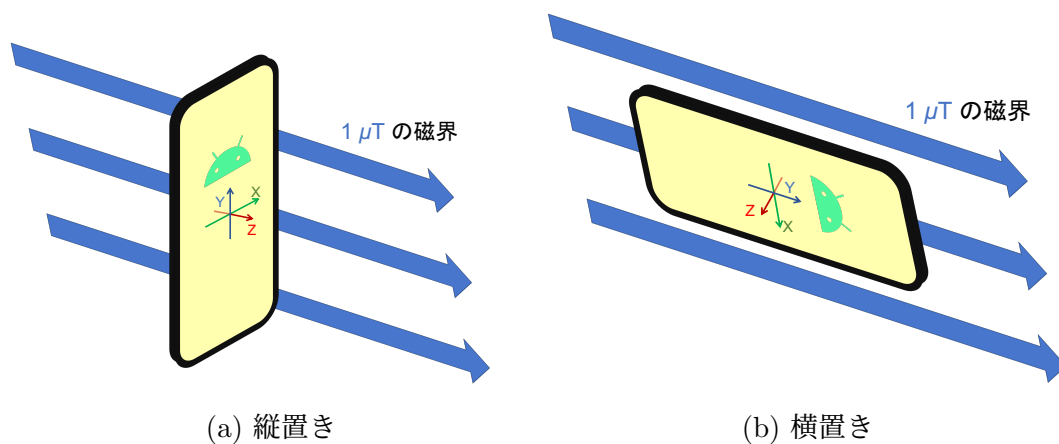


図 7: 磁界にスマートフォン (磁気センサ内蔵) を配置する例

計測した磁気データを、計測機器の姿勢を考慮して補正するために、磁気センサが出力する XYZ の値に対して座標変換を実施する。図 8 に示すように、加速度センサから得られる重力方向を頼りに、磁気センサが出力する磁界のベクトル \mathbf{M} を、鉛直方向成分 M_v と水平方向成分 \mathbf{M}_h に変換し、鉛直方向下向きを正とする座標軸における値 M_v と、 \mathbf{M}_h の長さ M_h を抽出する。こうして得られた M_v, M_h を、計測機器の姿勢によらない値として採用する。計測機器の磁気センサと加速度センサが出力する XYZ 軸それぞれの値を $m_x, m_y, m_z, a_x, a_y, a_z$ とおくと、 M_v と M_h はそれぞれ式 (8), (9) から得られる。

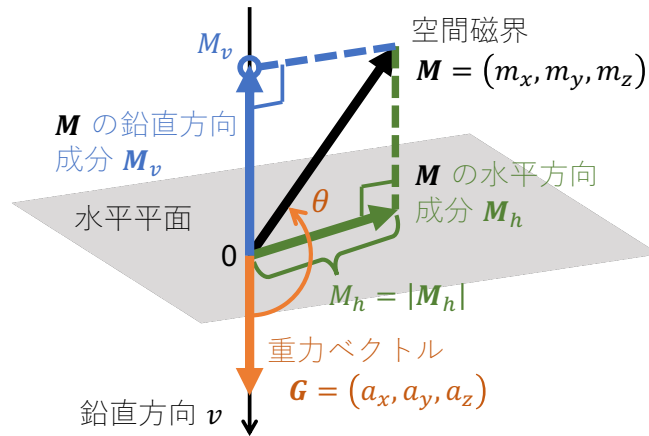


図 8: 磁気ベクトルの分解

$$\begin{aligned}
 M_v &= |\mathbf{M}| \cos \theta \\
 &= |\mathbf{M}| \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{G}}{|\mathbf{M}| |\mathbf{G}|} \quad \because \mathbf{M} \cdot \mathbf{G} = |\mathbf{M}| |\mathbf{G}| \cos \theta \Leftrightarrow \cos \theta = \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{G}}{|\mathbf{M}| |\mathbf{G}|} \\
 &= \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{G}}{|\mathbf{G}|} = \frac{m_x a_x + m_y a_y + m_z a_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$M_h = \sqrt{|\mathbf{M}|^2 - M_v^2} \quad \because |\mathbf{M}|^2 = M_v^2 + M_h^2 \quad (9)$$

既存研究 [9] では、磁気センサが出力する XYZ 軸成分を合成した磁気合成値 M を用いることで、上記の座標変換無しに指紋を得る。大学構内の廊下で取得したデータに対して、 M を用いて測位する評価実験を実施しており、図 9 はその際の磁気変動を示している。この図中の矢印は、磁気変動のピークを指し示しており、既存研究 [9] の手法ではこのピークを頼りに測位する。一方で、図 10 は本研究の調査フィールドで取得した磁気変動を示しており、図 9 と比較して、磁気変動のピークが観測されていないことがわかる。これより、本研究の調査フィールドでは、屋内測位のためにより細かな磁気変動を捉えるべきであり、磁気合成値 M だけを用いるのではなく、磁気鉛直成分 M_v と磁気水平成分 M_h を用いる必要があると考えた。

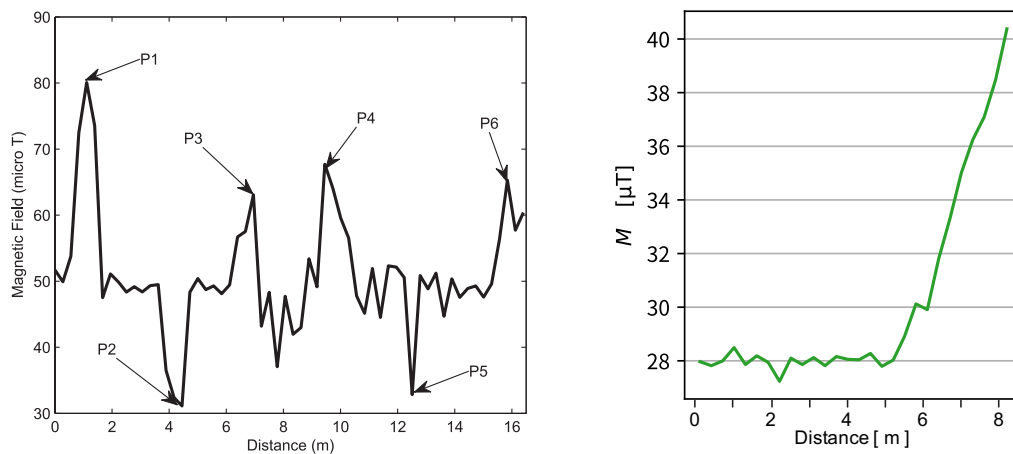


図 9: 既存研究 [9] の評価実験における、図 10: 調査フィールドにて、計測機器
計測機器を持ちながら廊下を歩いた際の磁気合成 計測機器を持ちながら廊下を歩いた際の磁気合成
磁気合成値 M の変化 (抜粋) 値 M の変化

4.3 予備実験

本節では、実際に清掃工場から磁気を収集し、炉室の広い範囲を対象に測位可能かどうかを調査した予備実験について述べる。

この予備実験では、作業員のメンテナンス業務中を想定し、測位システムに追跡される作業員が移動するのは歩行可能な通路上のみとする。これを踏まえて、基準点の位置は清掃工場の平面図上の座標データマップとして保存した。清掃工場の平面図は数枚存在し、各平面図は清掃工場内を複数フロアに層分割した1フロアを示している。

予備実験には、2020年12月24日と2020年12月25日の2日間で、石川北部RDFセンターの1フロアにて2台のスマートフォン¹³を用いて収集したデータを使用した。片方のデバイスと5.1節で後述する測定用台車を用いてオフラインフェーズ用のデータを、もう一方のデバイスを手持ちして推定フェーズ用のデータを収集し、得られたすべての基準点ごとに4.2節で示した前処理を施した。こうして得られた基準点はオフラインフェーズ用で1843点、推定フェーズ用で68点だった。

¹³Google 社製 スマートフォン Pixel 4a 2 台

測位処理としては Algorithm 2 に示すアルゴリズムを使用した。この処理では、オフライン・推定フェーズそれぞれで得られた基準点ごとの前処理済み指紋を比較し、得られた指紋が最も近いと思われる基準点を測位結果とする。

指紋が最も近い基準としては、ユークリッド距離 D を用いた。 D は2つの指紋から計算され、それぞれの指紋の値が数値的に近ければ0に近づく。すなわち、得られた D が小さいほど2つの指紋は近いと考えられる。ユークリッド距離 D は、オフライン・推定フェーズそれぞれで取得した、任意の基準点の前処理済み指紋を式 (10), (11) と置くと、(12) で計算される。

$$\text{Reference}(M_v, M_h) = (M_v^{\text{Ref}}, M_h^{\text{Ref}}) \quad (10)$$

$$\text{Target}(M_v, M_h) = (M_v^{\text{Tar}}, M_h^{\text{Tar}}) \quad (11)$$

$$D(M_v^{\text{Ref}}, M_h^{\text{Ref}}, M_v^{\text{Tar}}, M_h^{\text{Tar}}) = \sqrt{(M_v^{\text{Ref}} - M_v^{\text{Tar}})^2 + (M_h^{\text{Ref}} - M_h^{\text{Tar}})^2} \quad (12)$$

Algorithm 2 では、オフラインフェーズで得られたすべての指紋点群 RefFPs と、推定フェーズで得られた任意の基準点の指紋 TarFP から D を計算し、得られた D が最小の時の指紋を測位結果とする。Algorithm 2 を、推定フェーズで得られたすべての指紋に対して適用した結果を表 2, 図 11, 12, 13 に示す。図 11 は、測位誤差の分布を箱ひげ図で示したグラフであり、5数要約および平均値は表 2 に示した。この図表より、測位誤差の中央値は 15.99 m、誤差の最大値は 45.45 m となっており、2.2 節で述べた目標値の 10 m に満たない。測位誤差の要因としては、磁気データ収集の際に、異なる位置で似通った指紋を検出したことが挙げられる。

4.1.1 項に述べた通り、磁気 FP による屋内測位では、基準点ごとに異なる指紋の値が得られることを前提とするが、実際には異なる位置で同様の指紋が取得されることも少なくない。図 14 は推定フェーズ用の基準点の指紋を示しており、Point ID 44 と 66 における M_h, M_v の値は近い事がわかる。さらに、図 15 は推定フェーズ用の基準点の位置を示しており、Point ID 44 と 66 の位置は離れていることが見て取れる。つまり、Algorithm 2 のような単純な磁気 FP による屋内測位手法では、このような指紋を見分けることが困難である。

また、図 12, 13 は測位結果に空間的な偏りがないかを調べる目的で作成した。

Algorithm 2 点マッチングするアルゴリズム

Input:

- RefFPs = $(M_{v_1}^{\text{Ref}}, M_{h_1}^{\text{Ref}}), \dots, (M_{v_N}^{\text{Ref}}, M_{h_N}^{\text{Ref}})$
オフラインフェーズで得られた基準点の指紋の点群
- TarFP = $(M_v^{\text{Tar}}, M_h^{\text{Tar}})$
(推定フェーズで得られた) マッチング対象の基準点の指紋

Output:

- AnsRefFP
測位結果

```
1:  $minScore \leftarrow 1000000000$  ▷ 巨大な数
2:  $M_v^{\text{Tar}}, M_h^{\text{Tar}} \leftarrow \text{TarFP}$ 
3:  $\text{AnsRefFP} \leftarrow (\text{null}, \text{null})$ 
4: for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
5:    $M_{v_i}^{\text{Ref}}, M_{h_i}^{\text{Ref}} \leftarrow \text{RefFPs}[i]$ 
6:    $score \leftarrow D(M_{v_i}^{\text{Ref}}, M_{h_i}^{\text{Ref}}, M_v^{\text{Tar}}, M_h^{\text{Tar}})$ 
7:   if  $score < minScore$  then
8:      $\text{AnsRefFP} \leftarrow (M_{v_i}^{\text{Ref}}, M_{h_i}^{\text{Ref}})$ 
9: return  $\text{AnsRefFP}$ 
```

図 12 は各基準点を測位した際の誤差ごとに 5 段階で色分けしたヒートマップである。これらの図では、図中の点の位置と色によって測位の精度を表しており、各点の位置は基準点の正解位置を表している。各点の色は Algorithm 2 によって測位された基準点と、正解の基準点との距離 D によって色分けしており、例えば青色は測位誤差が 0~10 m であることを示す。つまり、このヒートマップでは、図中の青点が多いほど測位精度が良いことを表す。また、図 13 は正解の基準点と測位された基準点を表すグラフである。このグラフでは、対応する正解と測位の基準点をそれぞれ星と円で表し、線分で接続している。線分の色は図 12 と同じく色分けしており、図 12, 13 からは、測位誤差が発生する規則性は見られ

ない。したがって、異なる位置で同様の指紋が取得されることは測位誤差の要因であると言える。

表 2: 図 11 の詳細値

5数要約	測位誤差 [m]
最大値	45.45
75 %	26.20
中央値	15.99
25 %	5.92
最小値	0.58
平均値	16.70

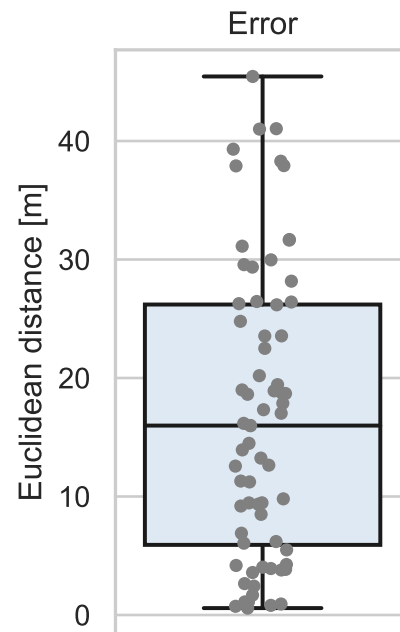


図 11: 磁気FP点マッチングによる測位誤差

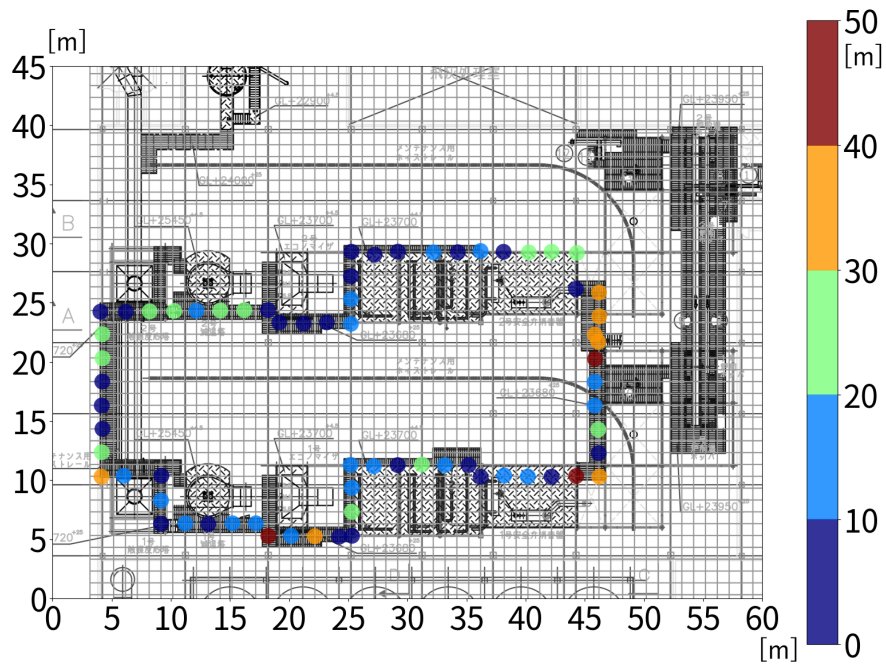


図 12: 磁気FP点マッチングによる測位結果のヒートマップ

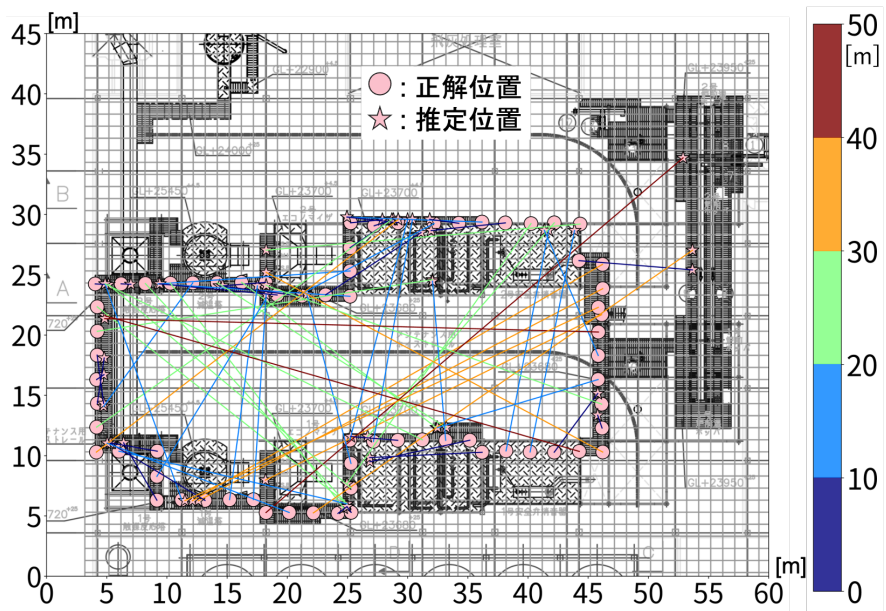


図 13: 磁気FP点マッチングによる測位した基準点と正解の基準点の関係

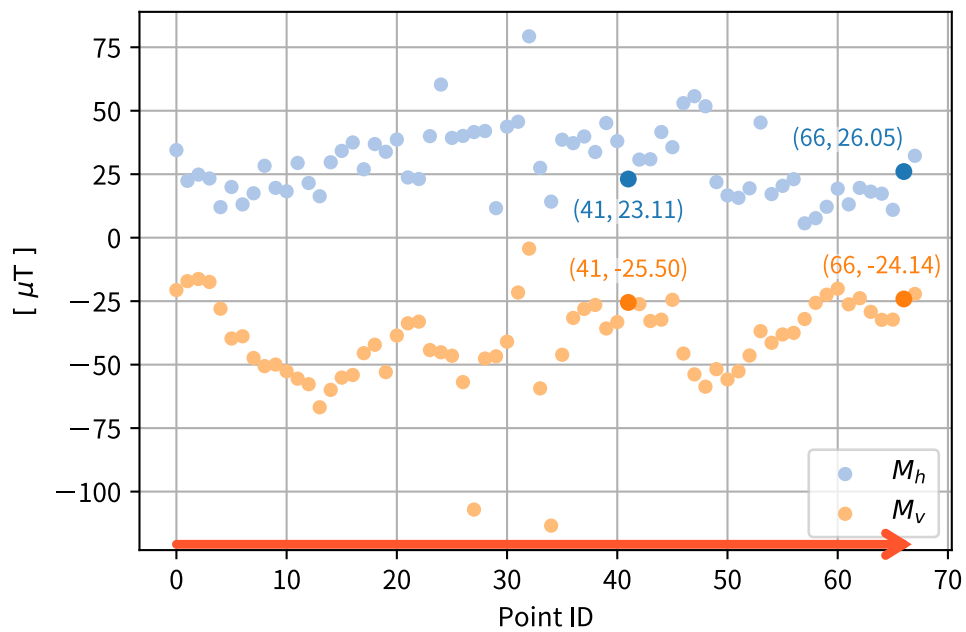


図 14: 推定フェーズ用データの M_h, M_v

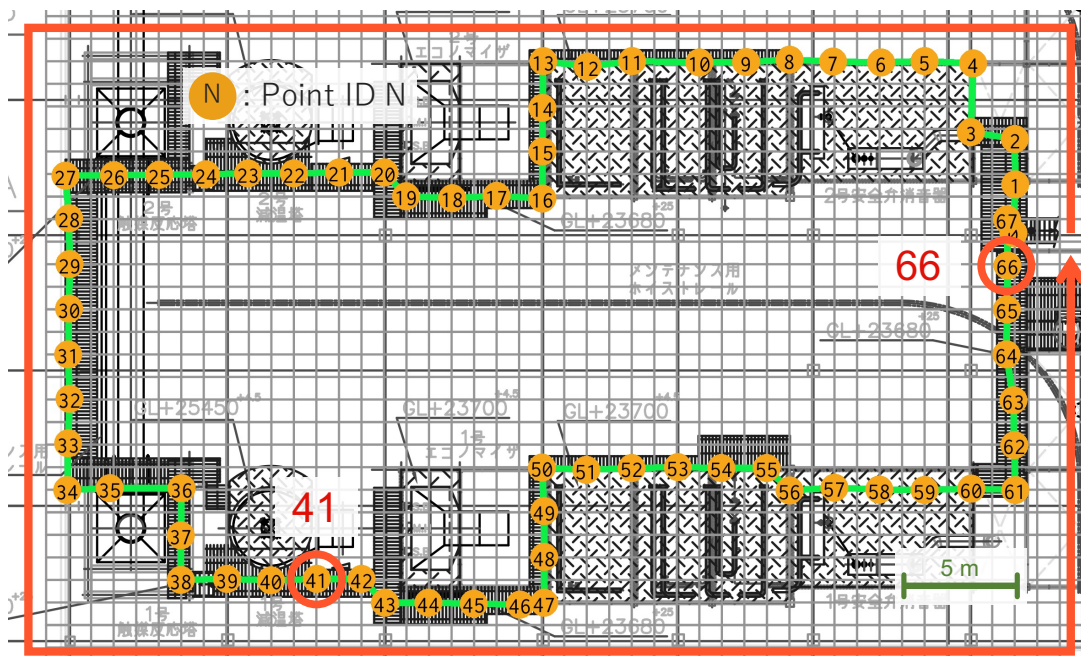


図 15: 推定フェーズ用データの取得位置

4.4 提案手法

本節では、清掃工場の作業員を追跡するシステムが用いるべき屋内測位技術として、4.2節に示した磁気データの前処理とDTWによる磁気FPパスマッチングを組み合わせた、磁気FPパスマッチングを提案する。この提案手法を用いることで、4.3節で示した、類似の指紋が異なる位置で検出される問題を解消し、炉室内における磁気FPの測位精度を向上させる。

清掃工場では歩行可能な経路が限定されており、メンテナンス業務中の作業員はその経路に沿って移動する。この前提により、経路上に沿うように収集した基準点に対して、隣り合う複数の基準点を順に並べることで、作業員の通る指紋パスを表すことができる。

提案手法の基礎となるアイデアは、作業員が移動する経路に沿って順に得られる、磁気の時系列データである指紋パスを採用することである。これにより、磁気FPで比較する指紋は2つの点データではなく、2つの時系列データとなる。時系列指紋データ同士の比較では、単体の指紋情報に加え指紋の順序情報も考慮できる。そのため、4.3節で示した、類似の指紋が異なる位置で複数検出された際にも、それぞれの指紋を適切に測位できると考えた。

提案手法のアルゴリズムをAlgorithm 3に示す。このアルゴリズムは、測位対象となる指紋パス TarFpLine, このデータが収集された際に測定用端末が移動した距離 TarFpDistance, オフラインフェーズで予め収集した指紋の点群 RefFps, 指紋の点群同士の関係を表すグラフ Graph を入力とし、測位結果の指紋パスである AnsRefFpLine を返す。アルゴリズムの処理としてはまず、測位対象の指紋パスと対応する指紋パスの候補を抽出する。Graph には、測位範囲内にある基準点の指紋と位置を保持する Vertex と、隣り合う Vertex の関係が保存されており、任意の Vertex から指定距離で到達可能な指紋パスを検索できる。この検索を用いて、TarFpLine と TarFpDistance から、指紋パスの候補である AnsRefFpLines を得る。次に、得られた指紋パスの候補すべてと測位対象となる指紋パスに対して、4.1節に示したDTWを用いて不一致度を計算し、最小のときの指紋パスの末尾を測位結果とする。

Algorithm 3 提案手法の測位アルゴリズム

Input:

- $\text{TarFpLine}[] = [(M_{v_1}^{\text{Tar}}, M_{h_1}^{\text{Tar}}), \dots, (M_{v_M}^{\text{Tar}}, M_{h_M}^{\text{Tar}})]$
測位対象となる指紋パス
- TarFpDistance
測位対象時系列データが収集された際に測定用端末が移動した距離
- $\text{RefFPs} = (M_{v_1}^{\text{Ref}}, M_{h_1}^{\text{Ref}}), \dots, (M_{v_N}^{\text{Ref}}, M_{h_N}^{\text{Ref}})$
オフラインフェーズで収集した指紋の点群
- Graph
指紋の点群同士の関係を表すグラフ

Output:

- AnsRefFp
測位結果
- 1: $\text{Graph.load}(\text{RefFPs})$
 - 2: $\text{RefFpLines}[][] \leftarrow \text{Graph.search}(\text{TarFpDistance})$
 - 3: $\text{minScore} \leftarrow 10000000000$ ▷ 巨大な数
 - 4: **for all** $\text{RefFpLine}[] \in \text{RefFpLines}[][]$ **do**
 - 5: $\text{scoreDtw} \leftarrow \text{DTW}(\text{RefFpLine}[], \text{TarFpLine}[])$
 - 6: **if** $\text{scoreDtw} < \text{minScore}$ **then**
 - 7: $\text{AnsRefFpLine}[] \leftarrow \text{RefFpLine}[]$
 - 8: $\text{AnsRefFp} \leftarrow \text{AnsRefFpLine}[-1]$ ▷ 末尾を取得
 - 9: **return** AnsRefFp
-

5. 評価

本章では、提案手法の測位精度を評価する。評価のために、実際に清掃工場へ赴いて収集したデータに対して、提案手法を用いた測位実験を実施した。以下ではまず、清掃工場で収集した磁気データや加速度データといった、環境データについて述べる。次に、測位の計算を実施する計算リソースについても言及し、最後に、評価の結果を述べる。

5.1 実験のために収集したデータについて

本節では、本研究の調査でデータ収集場所として利用している、石川北部 RDF センターの概要と、収集の際に使用した Android アプリケーションや測定用台車について述べる。

調査フィールドと環境データ

石川北部 RDF センターは石川県羽咋郡志賀町に所在している。この清掃工場では、他の処理工場で廃棄物から生成された RDF (Refuse Derived Fuel) を融解処理し、発生する熱エネルギーを蒸気タービン発電機で回収している。

調査フィールドで収集している環境データを表 3 に示す。データの収集は石川北部 RDF センターの炉室を中心に、同施設内にある電気室や蒸気タービン発電機室といった施設の稼働に必要な各部屋で実施した。

表 3: 環境データ一覧

センサ名 収集項目	要素数 (軸) データ内容	収集理由	備考
磁気	3 (XYZ)	本手法の軸となる情報	サンプリング周波数は約 100 Hz
加速度	3 (XYZ)	収集端末の姿勢推定	サンプリング周波数は約 430 Hz
ジャイロ	3 (XYZ)	収集端末の姿勢推定	サンプリング周波数は約 430 Hz
気圧	1	鉛直方向 (フロア) 推定	サンプリング周波数は約 25 Hz
セルラー	ASU Level, RSSI 等	測位補助	Android API で取得可能な全項目を取得
Wi-Fi	BSSID, RSSI 等	測位補助	Android API で取得可能な全項目を取得
Bluetooth	State, RSSI 等	測位補助	Android API で取得可能な全項目を取得
環境音	音声データ	測位補助	.flac で保存
時刻	測位端末が保持する時刻	評価データの アノテーションに使用	マイクロ秒単位で保存

※セルラー, Wi-Fi, Bluetooth は Android の仕様上収集に 30 秒程度かかるため, 含まれない基準点もある

データ収集用 Android アプリケーション

本研究では, スマートフォンに搭載されたセンサを利用して環境データを収集している. センサから得られる値と, 測位範囲内の基準点を紐付けるために, Android 用環境データ収集アプリケーションを開発した. 図 16 はこのアプリケーションのメインユーザインタフェースを示している. このユーザインタフェースにおいて, 画面上部は測定したセンサの値やセンサの動作状況を知らせるログが表示され, 画面下部には操作ボタンが配置されている. アプリケーションの主な機能は以下の通りである.

機能 (1) 各種センサや取得可能な要素の値を時刻とともに保存する機能

機能 (2) 清掃工場内の位置を時刻とともに保存する機能

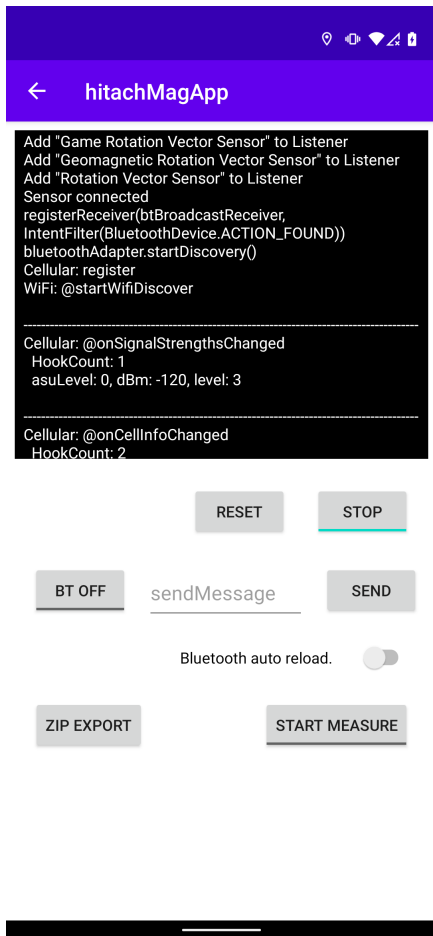


図 16: メイン画面の
ユーザインタフェース

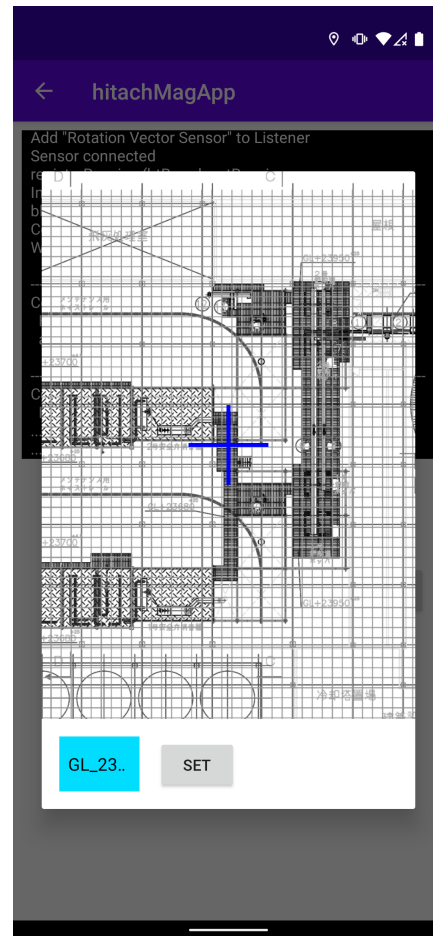


図 17: 座標位置を選択する
ユーザインタフェース

機能 (3) 測定用台車と Bluetooth で接続し、Android を遠隔操作する機能

各機能についてより詳細を説明する。まず、機能 (1) について、収集したデータや各種センサの内容は、表 3 に示した通りである。次に、機能 (2) について、屋内測位のための基準データには、環境データに加えてそのデータの位置情報、すなわち、そのデータは清掃工場内のどこから取得されたのかという情報が必要となる。本研究では、開発した Android アプリケーションに予め清掃工場の全フロアの平面図を登録しておき、現地調査の際にフロアと図面上の XY 座標位置を保存することで情報を収集した。座標位置を選択するユーザインタフェースを

図 17 に示す。このユーザインタフェースでは、図中央に図面が表示されている区域はスクロールでき、中央の十字を現在データ取得中の位置に合わせて SET ボタンを押すことで、座標と時間をデータベースに保存できる。左下の水色のボタンはフロアを変更する際に使用する。最後に、機能 (3) について、後述する環境データ測定用台車を用いる際に、台車側のシステムと連携する機構が必要となる。そこで、Bluetooth を用いて、遠隔操作が可能となるように Android アプリケーションを調整した。調査が円滑に進むよう、Bluetooth の通信が遮断された際に自動的に再接続モードへ移行する機能を盛り込んでいる。

清掃工場内における計測時には、この Android アプリケーションを Google 社製 Pixel 4, Pixel 4a, Pixel 5 にインストールして使用した。計測時の Android バージョンはすべて Android 11 である。

測定用台車

清掃工場内を短時間で効率的に、広範囲にわたって収集するために、環境データ測定用台車を開発して併用した。図 18 に台車の外観を示す。

台車運用時には、Android スマートフォンは画面が上になるように、ターンテーブルに地面から 1.44 m の位置に固定されている。これにより、スマートフォンを回転させながら、環境データを取得することが可能となっている。スマートフォンを回転させながら磁気計測することで、磁気センサが校正不足でも、原点とのズレを確認できる可能性があり、正しい磁気データに修正できると期待している。また、地面からスマートフォンまでの距離は、成人男性の胸ポケットの位置を考慮している。台車上の Arduino¹⁴ は、前述したターンテーブルを回転させるモータの制御や、ターンテーブルと車輪の回転角の監視を担当している。ラップトップ PC は、Arduino を通じて得られるターンテーブルと車輪の回転角のデータを保存する役割と、スマートフォンとの Bluetooth 通信を担当している。

ターンテーブルでは、白黒のテープとフォトリフレクタを用いて回転角を検出している。ターンテーブルの裏には、内外と 2 つのフォトリフレクタが配置されており、外側のフォトリフレクタで相対的な回転角を検知し、内側のフォトリフ

¹⁴Arduino - Home: <https://www.arduino.cc/>

レクタで絶対的な回転角を検知する。また、外側の白黒テープはそれぞれ6枚ずつ、 360° を12分割するように貼り付けている。さらに、ターンテーブルは必ず1回転以上時計回りに回転させる制約を課す。以上の機構により、台車とスマートフォンの相対角度を 30° の分解能で求めることができる。一方で、車輪では、磁石とホールセンサを用いて回転角を検出している。こちらは相対的な回転角度(回転量)のみ求めれば十分であるため、ホールセンサは1つのみ取り付けている。車輪の外直径が 0.35 m 、磁石が8個であることから、台車の移動距離の分解能は $0.35 \times 3.14 / 8 \approx 0.14\text{ m}$ である。それぞれの検出方法を図19に示す。

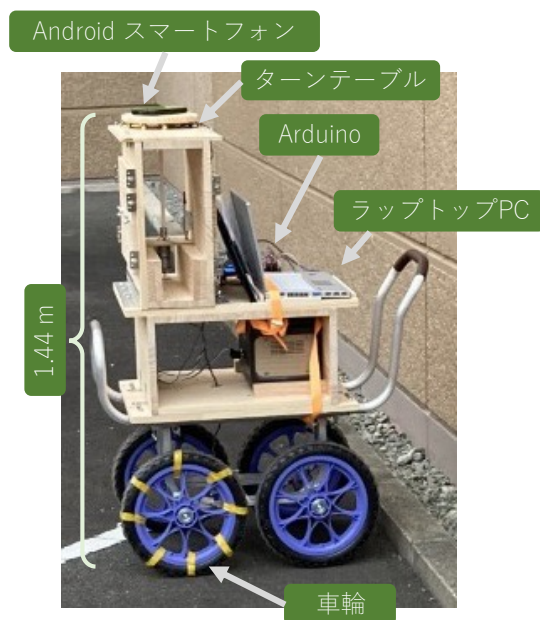


図 18: 環境データ測定用台車の構成部品と外観

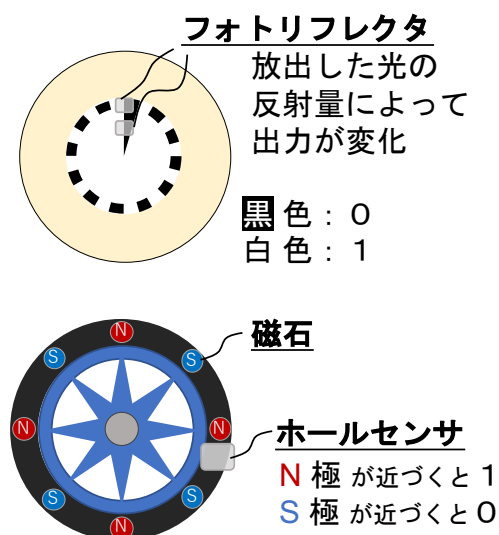


図 19: ターンテーブルと車輪の回転検出

5.2 計算実験環境

測位の計算に使用したコンピュータは Apple 社製 Mac Pro (Late 2013) である。アルゴリズムの実装にあたっては、Python¹⁵ Ver. 3.8.12 を用い、行列計算と

¹⁵Welcome to Python.org: <https://www.python.org/>

表計算にはそれぞれ Numpy¹⁶ Ver. 1.21.2 と Pandas¹⁷ Ver. 1.3.4 を利用した。

5.3 評価結果

本節では5.1節に示したデータに対して、4.4節で説明した提案手法を適用した際の結果について述べる。ここでは、提案手法が清掃工場における屋内測位システムの測位技術として優れた測位性能を発揮するか検証するため、測位にDTWを用いる既存手法[9]と比較する。

評価指標としては、測位結果から導かれたパス (XY座標のリスト) と、正解のパス同士の測位誤差を用いる。本稿の評価では、測位誤差として、パスの先頭同士と末尾同士のユークリッド距離を計算し、1:2の割合で平均したものと定義する。測位結果から導かれたパスを PredictedPath、正解のパスを AnswerPath と定義した時、位置ずれ度合いである測位誤差 Error は式 (13) から導出される。

$$\begin{aligned} \text{PredictedPath} &= [(x_1^P, y_1^P), (x_2^P, y_2^P), \dots, (x_N^P, y_N^P)] \\ \text{AnswerPath} &= [(x_1^A, y_1^A), (x_2^A, y_2^A), \dots, (x_M^A, y_M^A)] \\ \text{ErrorHead} &= \sqrt{(x_1^P - x_1^A)^2 + (y_1^P - y_1^A)^2} \\ \text{ErrorTail} &= \sqrt{(x_N^P - x_M^A)^2 + (y_N^P - y_M^A)^2} \\ \text{Error} &= \frac{\text{ErrorHead} + 2 \cdot \text{ErrorTail}}{3} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで評価する測位手法は、清掃工場で作業員を追跡するために用いられることを想定している。測位結果における作業員の位置は、測位結果から得られたパスの末尾の座標であるため、この座標と正解の座標のユークリッド距離 ErrorTail を測位誤差のパラメータに含める。また、測位結果から導かれたパスが、いかに忠実に正解のパスをトレースしているかも評価に取り入れるため測位結果から得られたパスの先頭と正解の座標のユークリッド距離 ErrorHead も、測位誤差のパラメータに含めた。ただし、前述の想定上 ErrorTailの方が重要であるため、ErrorHead と ErrorTail の割合を 2:1 とした。補足として、正解のパスと測位結果

¹⁶NumPy: <https://numpy.org/>

¹⁷pandas - Python Data Analysis Library: <https://pandas.pydata.org/>

から導かれたパスの長さが異なる場合も考えられるが、式(13)では問題なく計算可能である。

2つの測位手法の特徴を知るために、単純な測位性能と実践的な測位性能の2つの観点から評価する。これに際し、評価時に使用するデータを以下の2パターン用意する。

検証方法1 単純な測位性能の評価

位置と磁気指紋を収集する際に、オフライン・推定フェーズともに測定用台車を用いた。

検証方法2 実践的な測位性能の評価

位置と磁気指紋を収集する際に、オフラインフェーズでは測定用台車を、推定フェーズではスマートフォン(測定用端末)を手に持ち歩いた。

検証方法1では、オフライン・推定フェーズ両方において同じ位置で指紋を取得できる。これにより、オフライン・推定フェーズ両方から抽出した指紋パスにおいて、各指紋が収集された間隔は一定であるため、測位する際のノイズは少ない。また、推定フェーズにおけるスマートフォンが振動しないことも、低ノイズであることに寄与する。したがって、測位の難易度は低く、時系列指紋データに対する、測位手法の単純な測位能力を測位誤差から判別できると考えた。対して検証方法2では、前者よりも屋内測位システムの実運用に近い環境を模しており、各測位手法をシステムへ組み込む際に発生する影響を観測できると考えた。

5.3.1 単純な測位性能の評価結果

本項の評価で使用するデータは、2021年9月13日に石川北部RDFセンターの炉室の1フロアを対象とし、図20に示す矢印ごとの直線を30cmの間隔で取得したものである。これらは1フロアにおける広範囲のデータを効率よく収集するために、直進移動のみできる測定用台車を用いて、可能な限り長い直線を取得することで得られた。24本の直線上にある基準点の個数は異なっており、最小はNo.10の20点、最大でNo.22の50点である。各直線のすべての基準点で2

回ずつ磁気を計測し、それぞれをオフラインフェーズ用データ、推定フェーズ用データとして扱う。

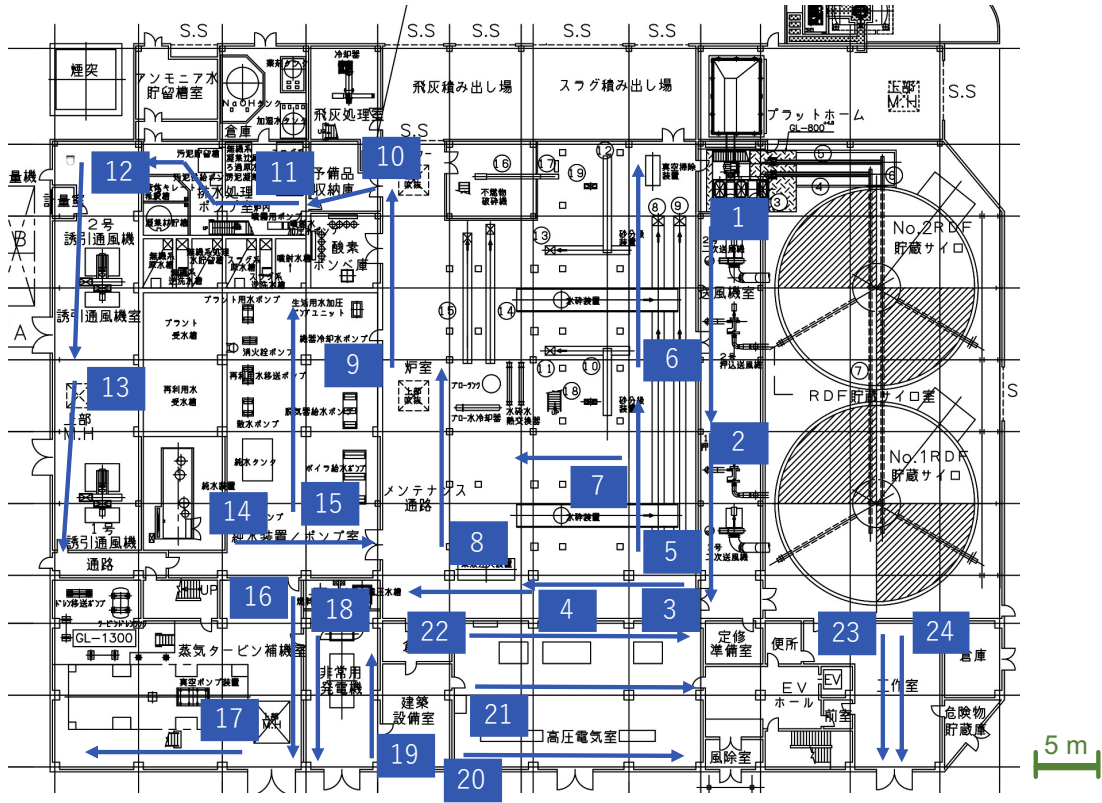


図 20: 評価データの取得箇所

本評価では、清掃工場内の作業員を追跡する場面において、作業員は任意の基準点から同一直線上で一定のパス長 (測位距離) だけ離れた基準点まで等速移動する。パス長としては、1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, 6.0 m, 7.5 m, 9.0 m, 10.5 m の 7 通りで検証し、移動中に引き返すことは考慮しない。

各パス長に対して、オフライン・推定フェーズそれぞれの指紋パスを抽出し、測位した場合の測位誤差を図 21 と 22, 表 4 に示す。図 21 は結果全体のグラフ、22 は測位誤差の表示範囲を 0.0 m ~ 0.8 m に拡大したグラフである。このグラフにおいて、測位誤差の平均値の推移に注目すると、パス長が 1.5 m から 4.5 m までは減少し、それ以上のパス長ではほぼ変わらないことがわかる。また、表 4 より、どのパス長においても、提案手法の方が既存手法よりも測位誤差の平均値

が小さい。さらに、表 5 は測位にかかる所要時間を示しており、既存手法よりも提案手法が測位に時間を要しているが、時間増加は最長で 4.61 秒であるので、測位時間としては許容範囲と言える。

表 4: パス長と測位誤差の詳細 (検証方法 1)

パス長 [m]	測位誤差 [m]						
	手法	最大値	75%	中央値	25%	最小値	平均値
1.5	既存手法	55.25	0.19	0.00	0.00	0.00	2.58
	提案手法	50.55	0.06	0.00	0.00	0.00	0.13
3.0	既存手法	50.35	0.11	0.00	0.00	0.00	0.27
	提案手法	0.67	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05
4.5	既存手法	0.96	0.10	0.00	0.00	0.00	0.07
	提案手法	0.62	0.08	0.00	0.00	0.00	0.05
6.0	既存手法	0.76	0.11	0.00	0.00	0.00	0.07
	提案手法	0.68	0.11	0.00	0.00	0.00	0.06
7.5	既存手法	1.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.08
	提案手法	0.67	0.10	0.00	0.00	0.00	0.06
9.0	既存手法	2.92	0.16	0.00	0.00	0.00	0.09
	提案手法	2.92	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07
10.5	既存手法	0.58	0.15	0.00	0.00	0.00	0.08
	提案手法	0.58	0.10	0.00	0.00	0.00	0.07

表 5: 処理速度の比較 (検証方法 1)

パス長 [m]	測位の所要時間 [s]	
	既存手法	提案手法
1.5	48.90	53.51
3.0	43.38	47.28
4.5	43.50	45.15
6.0	32.90	35.82
7.5	26.04	27.70
9.0	17.81	19.70
10.5	12.58	13.04

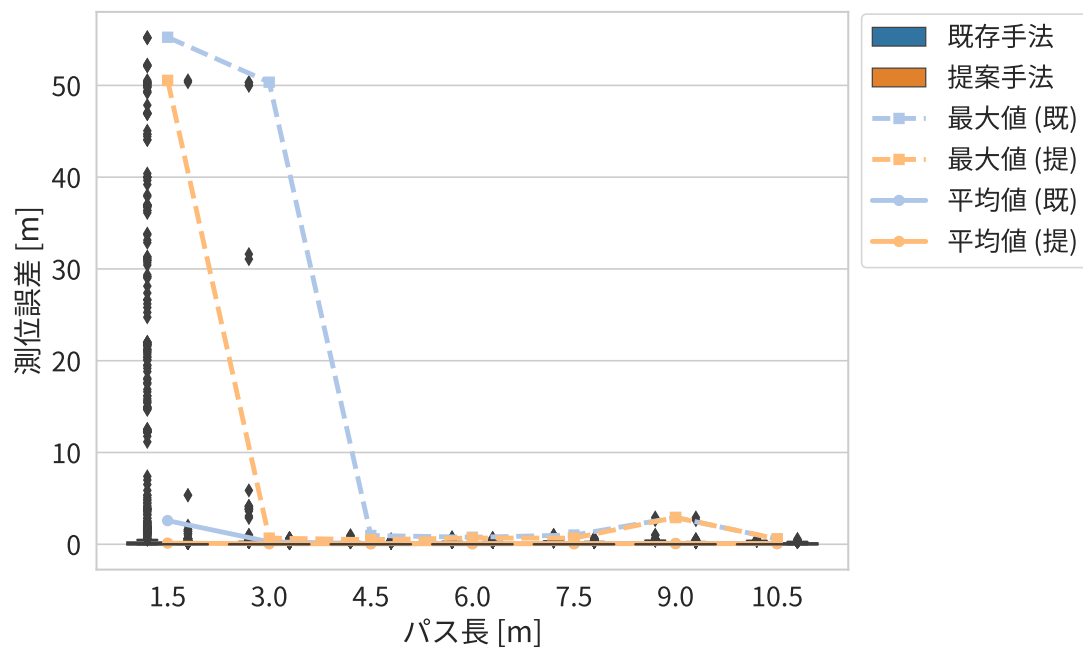


図 21: パス長と測位精度の関係

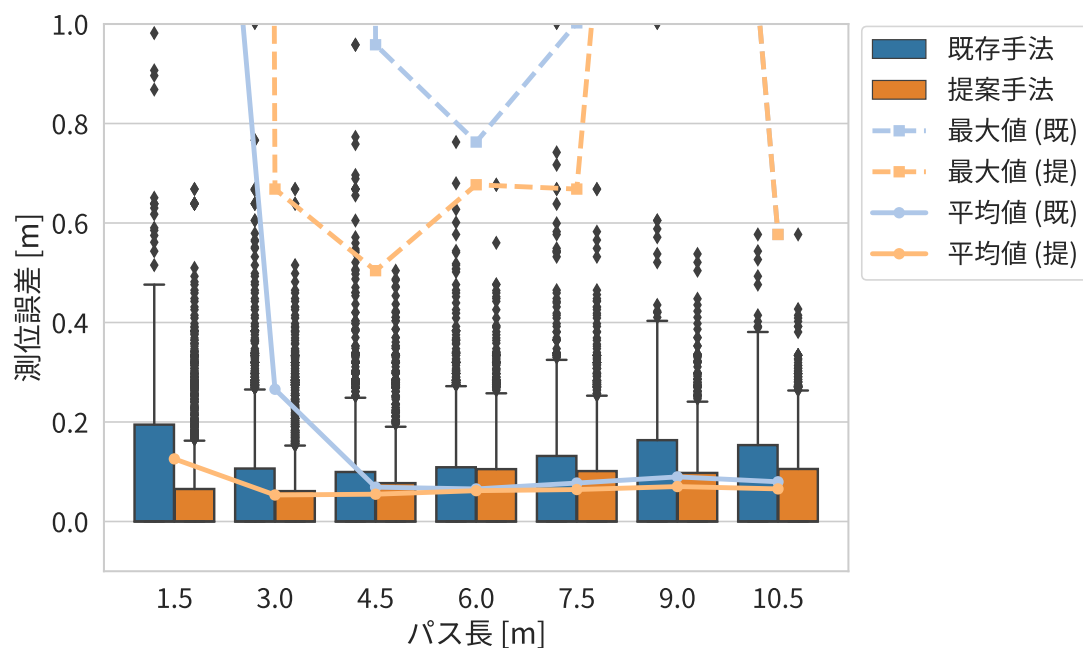


図 22: パス長と測位精度の関係 (拡大)

5.3.2 実践的な測位性能の評価結果

本項の評価で使用するデータについて、取得した場所は5.3.1と同じ石川北部RDFセンターである一方で、収集した日時と取得方法が異なる。これは、石川北部RDFセンターでの現地調査では様々な目的で実験データを収集しており、本評価に必要なデータは別日に収集したものしか無かったためである。オフラインフェーズには2020年12月24日と同月25日に測定用台車で収集したデータを用い、推定フェーズには2021年8月25日にスマートフォンを手に持ち¹⁸歩きながら収集したデータを用いる。

推定フェーズ用のデータには基準点情報が含まれないため、以下の手順で指紋パスを11本抽出した。これらの指紋パスは順に0~11の数値でIDを付与する。

1. データを収集の様子を撮影した動画を参考に移動開始完了時刻を求める
2. 求めた時刻から、移動中の時系列データを得る。この時系列データの各要

¹⁸地面からスマートフォンの高さは約 1.17 m である。

素は表 3 に示した内容を保持している。

3. 時系列データに対して 4.2 節に示した前処理を実施し、指紋パスを得る。

また、各指紋パスにおいてスマートフォンが移動した距離は、合成加速度から歩いた歩数を推定し、その歩数と筆者の歩幅¹⁹ を乗算した値を用いた。

表 6 に既存手法と提案手法それぞれで測位した際の測位誤差を示し、図 23 に、測位の対象とする指紋パスと正解・測位結果の指紋パスを示す。各図には、1 本の点線と濃淡の異なる 2 本の実線を表記しており、これらは測位対象の指紋パス (入力指紋パス)、測位結果の指紋パス (出力指紋パス)、正解指紋パスを表している。まず、表 6 より、測位誤差が 10 m 以下の指紋パスの本数は、既存手法が 2 本、提案手法が 4 本である。また、表 7 より、測位にかかる所要時間については、既存手法よりも提案手法が測位に時間を要しているが、時間増加は最長 3.20 秒であるので、測位時間としては許容範囲と言える。

¹⁹筆者の 1 歩は 0.625 m である。

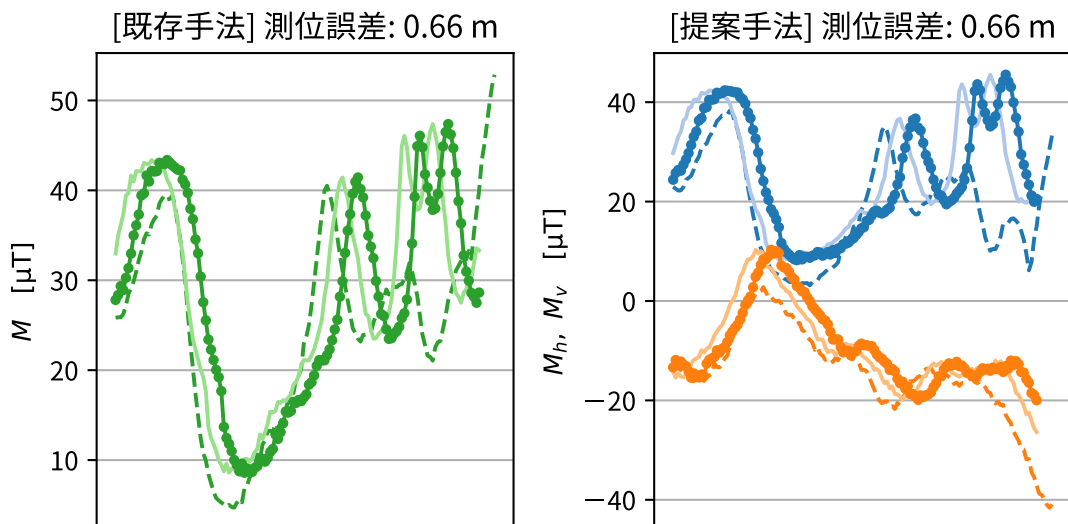
表 6: 測位性能の比較 (検証方法 2)

指紋パス ID	測位誤差 [m]	
	既存手法	提案手法
0	0.66	0.66
1	33.27	1.47
2	18.28	19.38
3	69.11	116.69
4	17.11	79.13
5	11.23	67.71
6	2.62	2.69
7	28.55	4.09
8	18.30	37.10
9	21.59	33.78
10	50.28	49.26
平均値	24.64	37.45

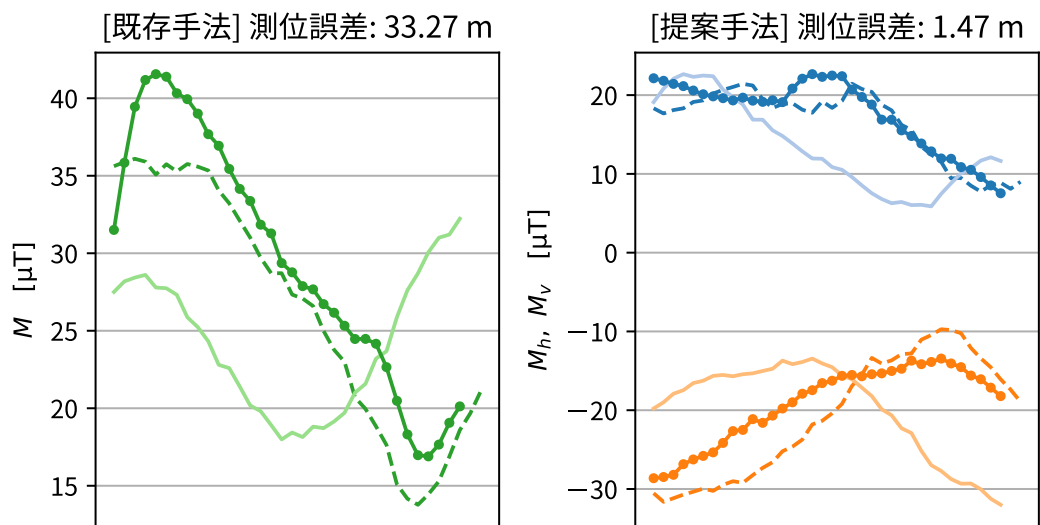
表 7: 処理速度の比較 (検証方法 2)

指紋パス ID	測位の所要時間 [s]	
	既存手法	提案手法
0	10.92	10.32
1	3.85	5.72
2	4.22	6.40
3	4.36	7.31
4	8.95	11.17
5	8.97	11.16
6	1.74	3.83
7	3.14	5.86
8	2.95	6.15
9	2.55	4.76
10	2.61	3.43

指紋パス: ID 0



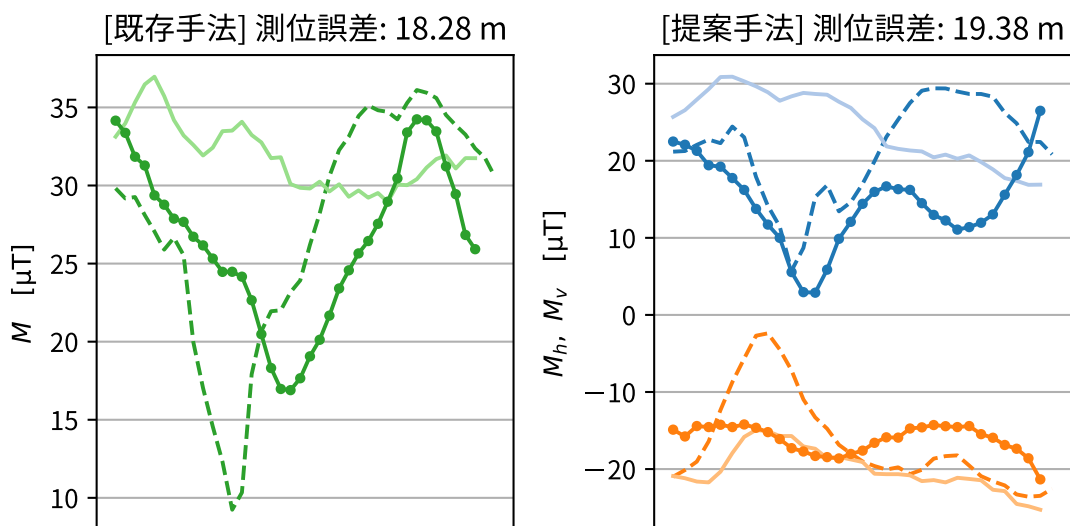
指紋パス: ID 1



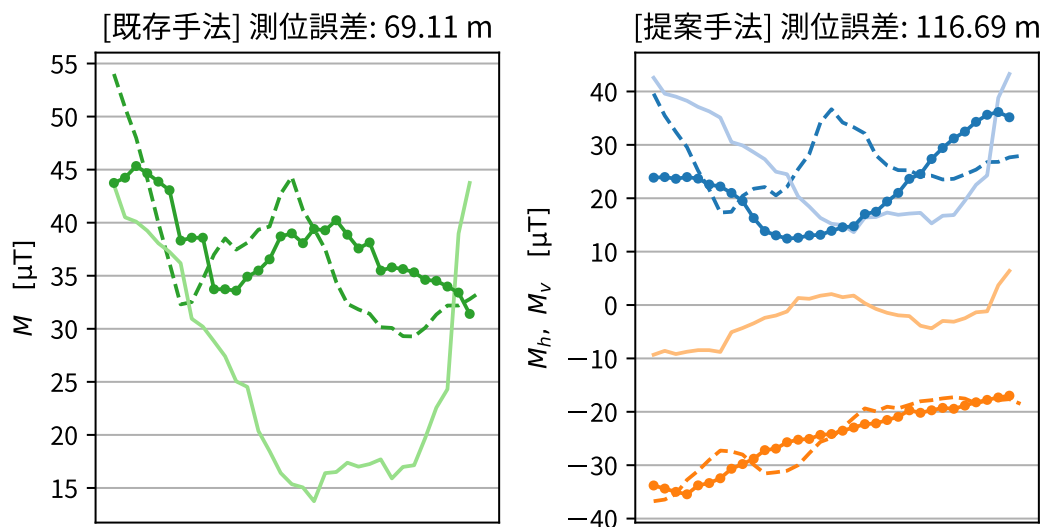
(a) 検証方法 2 における指紋パス ID: 0, 1 の測位結果比較

図 23: 検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較

指紋パス: ID 2



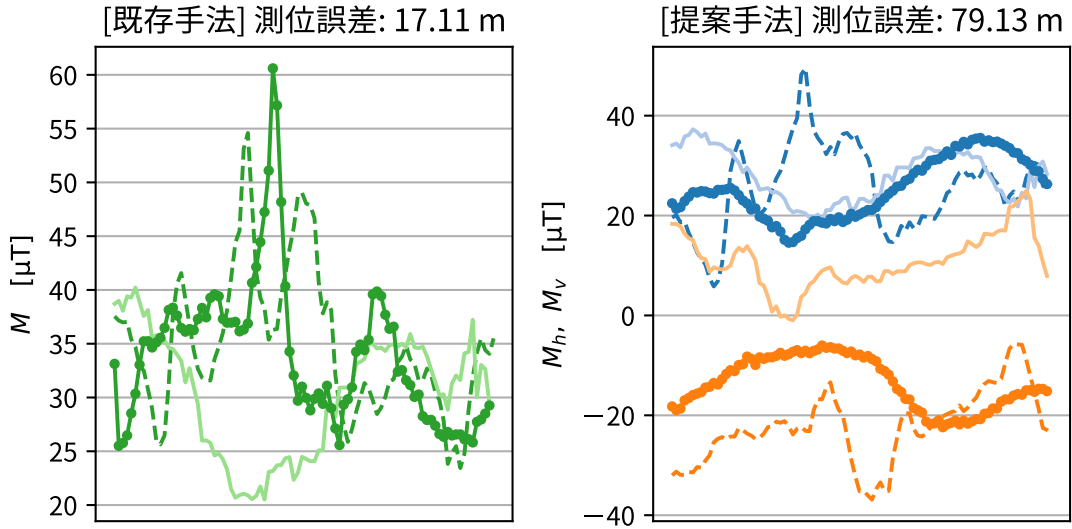
指紋パス: ID 3



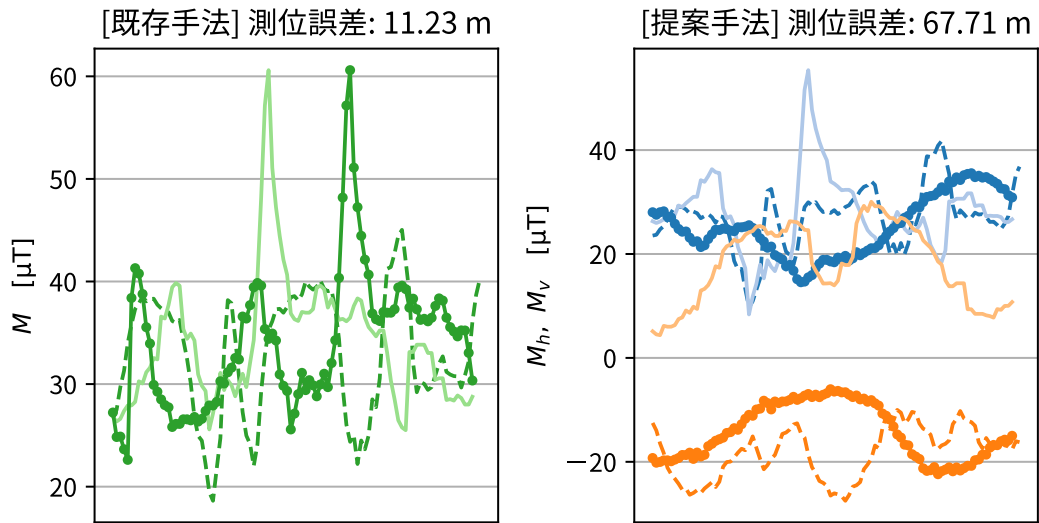
(b) 検証方法 2 における指紋パス ID: 2, 3 の測位結果比較

図 23: 検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較

指紋パス: ID 4



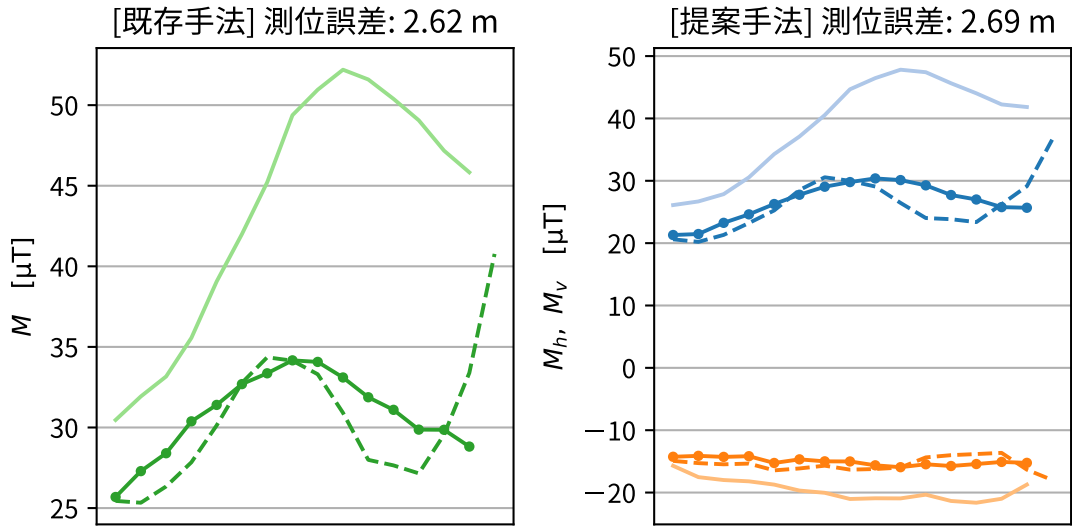
指紋パス: ID 5



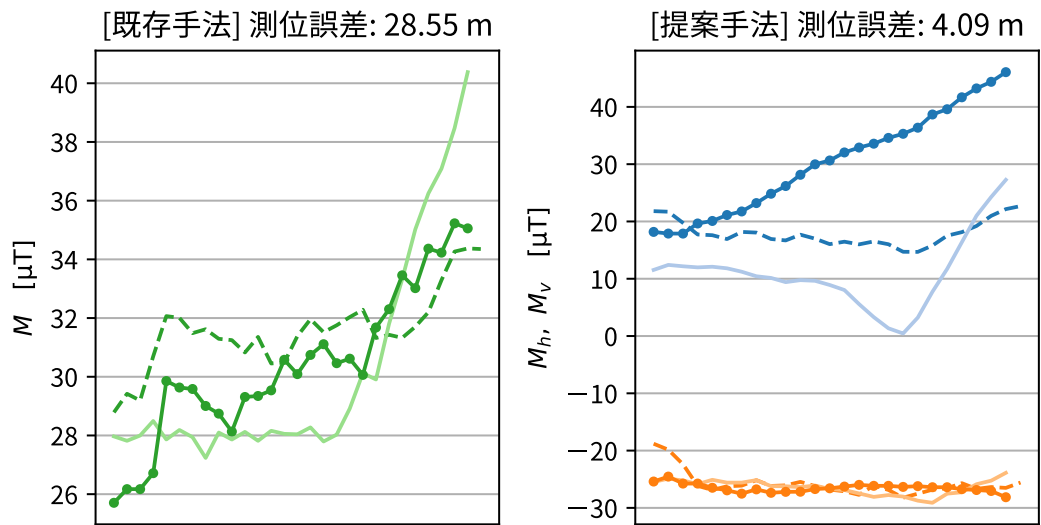
(c) 検証方法 2 における指紋パス ID: 4, 5 の測位結果比較

図 23: 検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較

指紋パス: ID 6



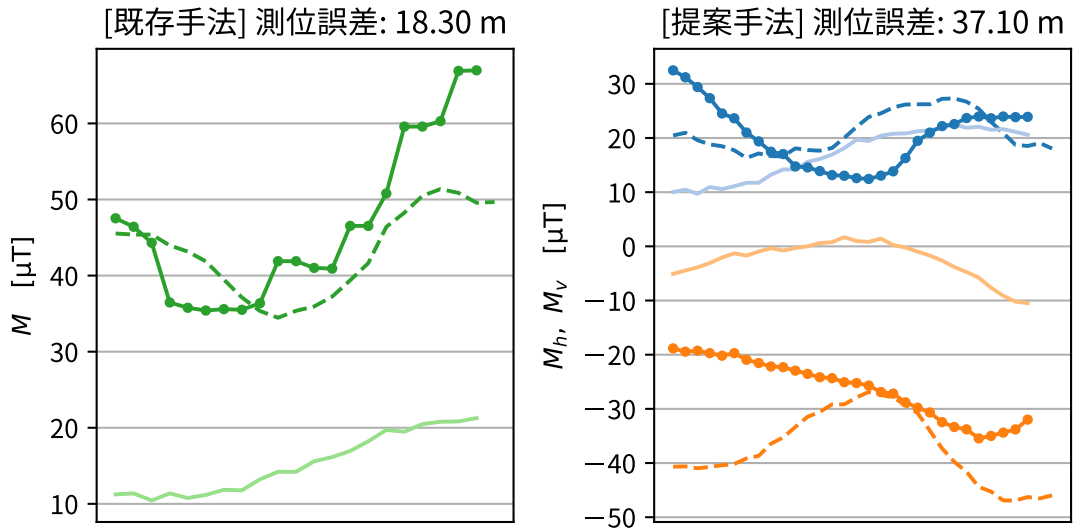
指紋パス: ID 7



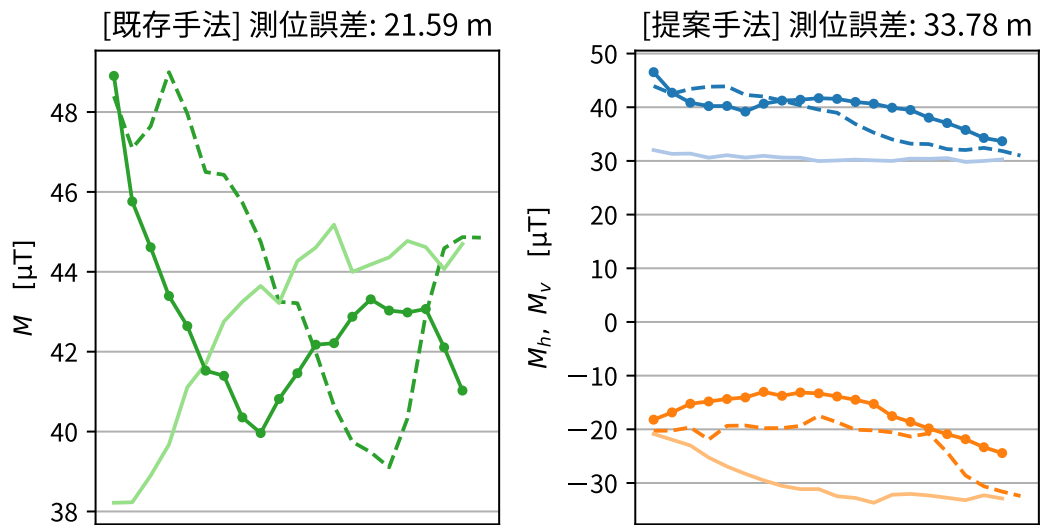
(d) 検証方法 2 における指紋パス ID: 6, 7 の測位結果比較

図 23: 検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較

指紋パス: ID 8



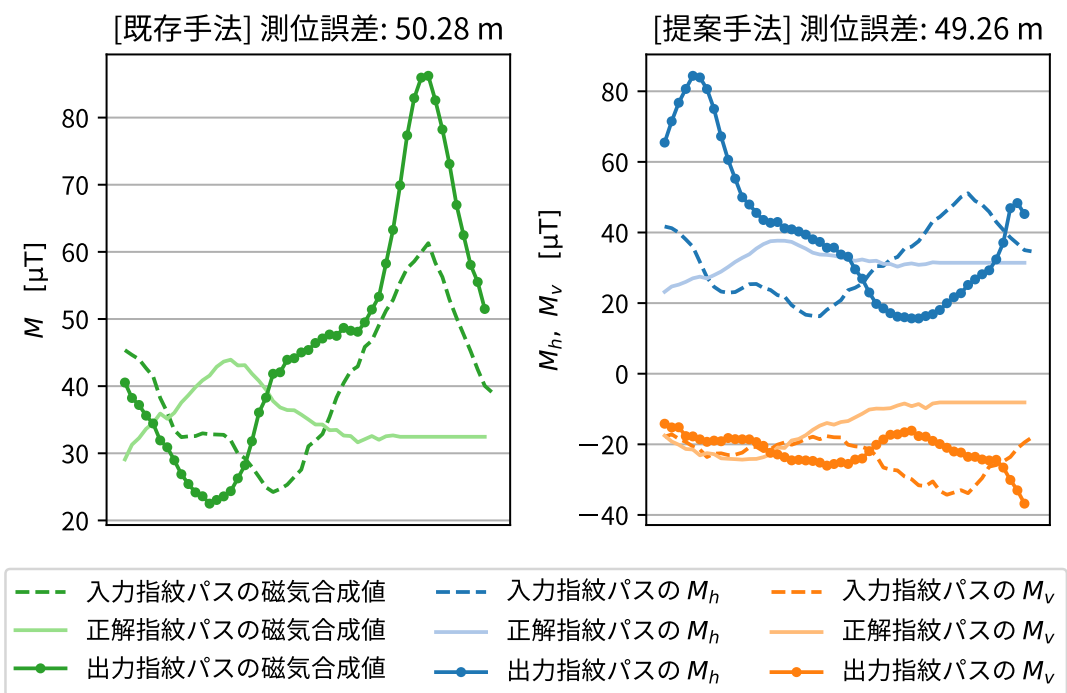
指紋パス: ID 9



(e) 検証方法 2 における指紋パス ID: 8, 9 の測位結果比較

図 23: 検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較

指紋パス: ID 10



(f) 検証方法 2 における指紋パス ID: 10 の測位結果比較

図 23: 検証方法 2 における指紋パスごとの測位結果比較

6. 考察

本章では5章で評価した結果に基づき、提案手法の優位性と実運用上で発生する測位誤差を考察する。また、この考察を踏まえ、清掃工場で作業員を追跡する屋内測位システムの実現にむけた今後の展望を述べる。

6.1 提案手法の優位性について

本節では、5.3節で示した検証方法1と検証方法2の評価結果において測位精度の観点から、既存手法[9]と比較した際の提案手法の優位性について考察する。

まず、既存手法と提案手法の単純な測位性能を考察する。検証方法1では、磁気FPにおけるオフライン・推定フェーズそれぞれに用いる指紋パスの基準点が既知である。そのため、測位対象の指紋パスと比較される指紋パスを測位処理する際のノイズは少なく、測位が比較的容易な状況を再現した。表4において、測位誤差の最大値と平均値に注目すると、すべてのパス長で既存手法よりも提案手法の測位誤差が小さい。これより、単純な測位性能の観点から、提案手法は既存手法よりも優位であると言える。

次に、既存手法と提案手法の実践的な測位性能を考察する。検証方法2では、磁気FPにおける推定フェーズに用いる指紋パスは、スマートフォンを手に持ち歩きながら収集したデータから生成されている。つまり、測位対象の指紋パスの基準点が未知であり、測位の際に必須となる指紋パスの長さ(データ収集端末の移動距離)を、何らかの方法で求める必要がある。この評価では、指紋パスの長さをデータ収集時に歩いた歩数と、データ収集者の歩幅から求めている。加えて、磁気FPにおけるオフラインフェーズ用のデータ収集日は2020年12月24日と同日25日である一方、推定フェーズ用のデータ収集日は2021年8月25日であり、オフラインフェーズから約8ヶ月後に推定フェーズが実施された場合と捉えられる。このため、清掃工場で作業員を追跡する屋内測位システムの実運用に近い状況を再現した。検証方法2の結果である表6において、11本ある測位パスの測位誤差は、既存手法と提案手法の双方ともに検証方法1の結果よりも大きい。このことから、実運用を考慮した際の測位難易度は検証方法1と比べ高いと言える。

ここで、2.4 節に示した、清掃工場で作業員を追跡する屋内測位システムに必要な測位精度である、測位誤差が 10 m 以内を満たす指紋パスの本数を確認すると、既存手法は 2 本であるのに対し、提案手法は 4 本となっており、提案手法の方が 2 本多く実運用レベルの測位を実現している。その一方で、測位誤差の平均値を確認すると、既存手法が 23.90 m なのに対し提案手法は 36.92 m と悪化している。

したがって、提案手法は単純な測位性能では既存手法よりも優位であると言えるが、実践的な測位性能については提案手法が優位とは言い難い。

6.2 実運用に近い環境で発生する測位誤差について

本節では、5.3 節で示した測位誤差の平均値が検証方法 1 と検証方法 2 で異なる点について、図 23 を参考に、その原因を考察する。

測位誤差の原因として考えられるのは、指紋パスのノイズである。図 23 において、指紋パス ID 1 から 11 の磁気合成値 M 、磁気の水平方向成分 M_v 、磁気の鉛直方向成分 M_h それぞれの推移を確認すると、入力指紋パス (破線) と正解指紋パス (薄い実線) のパス形状が、程度差はあるものの一致していないことがわかる。形状の不一致が大きいほど、指紋パスに含まれるノイズが大きいと解釈する。既存手法と提案手法では、測位の基礎となる磁気 FP の原理上、入力指紋パスと似た形状のパスを抽出して測位結果とする。また、磁気 FP における尤度の計算にはユークリッド距離を用いることから、磁気指紋の値自体 (グラフの Y 軸の値) も考慮される。したがって、各指紋パスをグラフ表示したとき、測位対象の波形と正解の波形に対して、形状と Y 軸方向オフセットが異なる場合、正常な測位は困難となる。実際に、図 23 (b) に示す指紋パス ID 3 では、指紋パスのノイズが大きく見受けられ、測位誤差は既存手法が 69.11 m、提案手法が 116.86 m と 11 本の指紋パスの測位結果のうち両手法とも最大の誤差となっている。対して、図 23 (a) に示す指紋パス ID 0 では、指紋パスのノイズはほぼ見られず、測位誤差は既存手法が 0.661 m、提案手法が 0.33 m と 11 本の指紋パスの測位結果のうち両手法とも最小の誤差となっている。

このような指紋パスのノイズが発生する原因としては、オフラインフェーズと推定フェーズそれぞれに使用するデータを取得する際に、データ取得用端末であ

るスマートフォンの位置がずれ、想定と異なる位置として扱われることが考えられる。検証方法2においては、オフラインフェーズ用のデータは測定用台車を用いて収集しているのに対し、推定フェーズ用のデータは手に持ったスマートフォンで歩きながら収集している。後者の収集時には、前者で収集した位置を可能な限りトレースするよう努めたが、実際には測位用台車に取り付けられたスマートフォンと、手に持ったスマートフォンの、収集時の位置を完全にトレースすることは困難である。したがって、このトレースのずれが指紋パスのノイズを発生させていると考えられる。

また、前述の Y 軸方向オフセットが異なる場合に対処するため、測位対象の波形を 0-1 正規化する場合も試行した。図 23 の各波形から、 M_v の Y 軸方向オフセットが顕著なため、 M_v の指紋パスのみを正規化した。具体的にはアルゴリズム 3 の 4 行目と 5 行目の間に、`RefFpLine[]` が持つ M_v と `TarFpLine[]` が持つ M_v をそれぞれ個別に正規化処理する手続きを追加した。表 8 はこの試行の各指紋パスにおける結果を示しており、特に M_v の Y 軸オフセットが顕著である指紋パス ID 3, 4, 5 の測位誤差について提案手法と正規化処理したものを比較すると、 $116.69 - 57.34 = 59.35$ m, $79.13 - 44.80 = 34.33$ m, $67.71 - 12.27 = 55.44$ m と測位性能の悪化が抑えられた一方で、測位誤差の平均値は提案手法が 37.45 m に対して正規化処理したものは 38.30 m と悪化した。

表 8: M_v を正規化した際の測位性能 (検証方法 2)

指紋パス ID	測位誤差 [m]		
	既存手法	提案手法	M_v 正規化
0	0.66	0.66	17.72
1	33.27	1.47	8.09
2	18.28	19.38	18.05
3	69.11	116.69	57.34
4	17.11	79.13	44.80
5	11.23	67.71	12.27
6	2.62	2.69	77.63
7	28.55	4.09	23.74
8	18.30	37.10	103.12
9	21.59	33.78	48.10
10	50.28	49.26	10.48
平均値	24.64	37.45	38.30

6.3 今後の展望

本稿では、異なる環境を想定した2つの評価から、提案手法は既存手法と比較して、単純な測位性能に優位性があることを示した。その一方で、実践的な測位性能としては課題が残り、提案手法を2.2節で挙げた清掃工場内の作業員を追跡する屋内測位システムの測位技術として採用するには、さらなる測位精度の向上が必要だと考える。

測位精度の低下の原因は、磁気FPにおけるオフライン・推定フェーズの双方において、基準点が同じにも関わらず指紋が異なることにある。この原因の根本解決は、清掃工場内の作業員を追跡する屋内測位システムにおける推定フェーズの環境から困難である。

一方で、清掃工場内の作業員を追跡する屋内測位システムの構築のためには、被追跡者が身につける端末と、管理者等の追跡するデバイスの通信が必要となる。したがって、導入コストを抑えつつも、清掃工場内で通信できる最低限のインフラは用意する必要がある。現状では、Low Power Wide Area (LPWA) が候補としてあり、石川北部 RDF センターの炉室内において、LPWA の基地局を数台配置し、炉室内の通信品質を調査する必要がある。この LPWA の基地局が発信する RSSI 情報を元に、磁気 FP による測位範囲を分割し、測位精度を向上させることも考えられる。

本稿では清掃工場内の階層(フロア)は特定されている前提で、提案手法の測位精度を評価した。しかし、実際に清掃工場内の作業員を追跡する屋内測位システムでは、被追跡者のフロア上の座標だけでなく、階層も特定する必要がある。フロアの特定には、地上階と各階層の気圧差、および前述の LPWA 信号の RSSI 情報を用いて推定する手法が考えられる。

7. おわりに

本研究では、作業員の救助に必要な最大測位誤差が 10 m であるという要件を満たす、清掃工場における磁気フィンガープリンティングを用いた屋内測位手法の実現を目指している。本稿では、単純な磁気フィンガープリンティング手法だけでなく、測位精度向上を目的とした、隣り合う磁気指紋を結合した時系列データとして扱う磁気フィンガープリンティングパスマッチング手法を提案した。提案手法ではさらに、磁気の特徴をより詳細に捉えるために、空間磁界の鉛直方向成分と水平方向成分の 2 つの成分を磁気指紋として用いた。評価では、石川北部 RDF センターにて取得したデータを入力として、提案手法による測位実験を実施し、単純な測位性能と実践的な測位性能の 2 つの観点から評価した。評価の結果、単純な測位性能として、測位に使用するパス長が異なる 7 通りの測位誤差の最大値と平均値すべてにおいて、提案手法の測位誤差が既存手法のそれよりも小さい値となった。実践的な測位性能としては、上記の屋内測位システムに必要な測位精度を満たす測位結果の個数が、既存手法は 2 個であるのに対し提案手法は 4 個であった。しかし、測位誤差の平均値は既存手法が 23.90 m であるのに対し提案手法は 36.92 m であった。以上の評価より、提案手法は単純な測位性能では既存手法よりも優位であるが、実践的な測位性能については改善が必要である。

謝辞

主指導教員であり、研究の独自性や実用性の観点を中心に、研究指導をいただきました、本学情報基盤システム学研究室の藤川和利教授に心から感謝いたします。副指導教員であり、研究の方向性や取得するデータの特徴についての的確な助言をいただきました、本学ユビキタスコンピューティングシステム研究室の安本慶一教授に心から感謝いたします。副指導教員であり、本学情報基盤システム学研究室の新井イスマイル准教授には、実際に研究を進めていく上で必要な、様々なサポートをしていただきました。清掃工場における現地調査、国内・国際学会へ提出する論文添削といった、長く時間のかかる事柄に対して補助いただき、心から感謝いたします。休日や深夜の時間帯でも添削をしていただき、深く感謝いたします。学内システムの利用や提案手法の実装で躓いた際に、具体例を交えたわかりやすいアドバイスをいただきました、本学情報基盤システム学研究室の垣内正年助教に心から感謝いたします。研究活動の際の目的意識や研究の新規性の観点を重点的に指導いただきました、本学情報基盤システム学研究室の遠藤新助教に心から感謝いたします。フィールドワークにかかる出張や学会発表で必要となる経費手続きといった、研究活動で必須となる事務手続きを中心に支援をいただきました、本学総合情報基盤センター辻元理恵女史、中野彩子女史に心から感謝いたします。

日立造船株式会社の川端馨様には、フィールドワーク実施地の選定や先方とのスケジュールのすり合わせなど、研究活動に必要なデータを収集するにあたって、表立った対応をしていただきました。同社の新佑太郎様には、測定用台車の製作やその台車を用いたデータ収集を積極的に実施していただきました。お二方に心より感謝申し上げます。石川北部 RDF センターにおけるフィールドワークの際には、複数回赴いたことに加え、マナーやモラルの面で何かとご迷惑をおかけしたかと存じますが、従業員の皆様にご配慮いただき、問題なく作業できました。石川北部 RDF センターの従業員の皆様に心より感謝申し上げます。

研究活動を切磋琢磨し、2年間の博士前期課程を共に過ごした本学情報基盤システム学研究室同期の桂さん、川島くん、小松くんに心より感謝申し上げます。同研究室後輩の松永くんには、フィールドワークの参加や個人的な開発活動にも

積極的に協力していただきました。心より感謝申し上げます。最後に、私が工業高等専門学校、同専攻科、博士前期課程への進学にあたり、多大なる経済的・心理的援助とともに、9年間見守ってくれた家族に、最大限の感謝を。
ありがとう。

参考文献

- [1] 環境省環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課. 日本の廃棄物処理令和元年度版. https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/data/disposal.pdf, March 2021. (2021/12/31 参照).
- [2] Sebastian Sadowski and Petros Spachos. RSSI-based indoor localization with the internet of things. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 30149–30161, 2018.
- [3] Souvik Sen, Jeongkeun Lee, Kyu-Han Kim, and Paul Congdon. Avoiding multipath to revive inbuilding wifi localization. *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'13)*, pp. 249–262, June 2013.
- [4] Yuan Zhuang, Jun Yang, You Li, Longning Qi, and Naser El-Sheimy. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. *Sensors*, Vol. 16, No. 5, 2016.
- [5] Stéphane Beauregard and Harald Haas. Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning. *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06)*, pp. 27–35, January 2006.
- [6] Guoliang Chen, Xiaolin Meng, Yunjia Wang, Yanzhe Zhang, Peng Tian, and Huachao Yang. Integrated wifi/pdr/smartphone using an unscented kalman filter algorithm for 3d indoor localization. *Sensors*, Vol. 15, No. 9, pp. 24595–24614, 2015.
- [7] Fei Liu, Jian Wang, Jixian Zhang, and Houzeng Han. An indoor localization method for pedestrians base on combined uwb/pdr/floor map. *Sensors*, Vol. 19, No. 11, 2019.
- [8] Imran Ashraf, Mingyu Kang, Soojung Hur, and Yongwan Park. MINLOC: Magnetic field patterns-based indoor localization using convolutional neural networks. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 66213–66227, 2020.

- [9] Kalyan Pathapati Subbu, Brandon Gozick, and Ram Dantu. LocateMe: Magnetic-fields-based indoor localization using smartphones. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, Vol. 4, No. 4, October 2013.
- [10] 東 和樹, 新井 イスマイル. 相互補完型 Wi-Fi・地磁気フィンガープリンティング手法の評価. *情報処理学会論文誌*, Vol. 58, No. 2, pp. 384–395, February 2017.
- [11] 武島 知勲, 梶 克彦, 廣井 慧, 河口 信夫, 神山 剛, 太田 賢, 稲村 浩. 回転磁石マーカに基づくスマートフォン位置推定. *情報処理学会論文誌*, Vol. 59, No. 1, pp. 138–149, January 2018.
- [12] Pavel Senin. Dynamic time warping algorithm review. *Information and Computer Science Department University of Hawaii at Manoa Honolulu, USA*, Vol. 855, pp. 1–23, 2008.

発表リスト

国際会議

Rei Okumura, Ismail Arai, Yutaro Atarashi, Kaoru Kawabata, and Kazutoshi Fujikawa. Feasibility study of magnetism-based indoor positioning methods in an incineration plant. In PerFlow 2022: 2022 International Workshop on Pervasive Information Flow, Pisa, Italy, March 2022.

国内会議

奥村 嶺, 新 佑太郎, 新井 イスマイル, 川端 馨, 藤川 和利. 清掃工場における磁気と気圧を用いた屋内測位可能性の現地調査. Technical Report 27, May 2021.