

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

奥村 嶺^{1,a)} 新 佑太郎^{2,b)} 新井 イスマイル^{1,c)} 川端 馨^{2,d)} 藤川 和利^{1,e)}

概要: 清掃工場では、現在、集中管理室からの遠隔運転が可能となっているが、機器の点検や清掃は、依然として現場に作業員が赴く必要がある。運用費の削減によって人員を極限に減らした場合、現場に1人で赴くことが一般的になるが、不慮の事故を迅速に発見するために、リアルタイムに作業員の位置をモニタリングする必要がある。既存手法として、Wi-Fi や Bluetooth 等電波を利用するものがあるが、清掃工場では通信設備の需要が乏しく、また広大であることから、測位のためだけに Wi-Fi 基地局や Bluetooth のビーコンを設置するコストは負担できない。そこで、我々は磁気に注目している。磁気による屋内測位手法では、インフラ整備は不要でありコスト削減が見込まれる。さらに清掃工場には、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、各地点で磁気の特異性が観測できるのではと考えた。このような仮定のもと、我々は清掃工場における屋内測位システムの開発を目的とし、現場でのデータ収集と解析を進めている。本稿では、清掃工場内の空間的な測位に対して、気圧を用いてフロアを特定する鉛直方向の推定と、1フロア中の場所を特定する水平方向の推定の2項目について検証した結果を示している。前者は10フロアから1フロアを推定するタスクとして正解率 0.895 を得ており、後者は、フロアの特定および端末の姿勢が把握された上で、測位誤差の中央値が 9.16 [m] であった。

1. はじめに

近年、生産工場にとどまらず、清掃工場でも運用システム自動化による稼働効率の向上や、人件費の削減が図られている。通常運転では、集中管理室から遠隔で監視や機器の操作を行えるため、少人数かつ安全な運用が可能となっている。しかし、工場内の機器や設備は定期的な点検や清掃が必要であり、これを遠隔で行うことは困難である。それゆえ、作業員が現場に赴く必要があり、作業員の安全確保と人件費削減の両立に課題が残っている。このような課題に対して、我々は作業員の位置をリアルタイムで監視できるシステムの開発に取り組んでいる。具体的には以下のような例に役立つと思われる。

- 巡回点検など、1人でも遂行可能な業務を支援
- 誤操作（1号ボイラと2号ボイラを間違える等）防止技術

- 足場からの転落、転倒、不自然な停止（熱中症や行き倒れ等）の緊急事態を検知する
- 機械を操作する際に、影響がある危険区域に人がいないかを確認でき、災害予防となる

これらの具体例では、1つでも間違いが起きたり発見が遅れた際には、死亡事故につながる可能性があるため、人身災害に対する管理強化は省人化のための重要な要件となっている。

本研究では、フィールドとして清掃工場を対象としている。清掃工場は炉室と呼ばれる大きな空間を有しており、炉室内には焼却炉やボイラーといった被焼却物を全自動で焼却処理するための機器が立体的に配置されている。そのため、水平方向だけでなく鉛直方向にも広い空間となっている。例えば、清掃工場の一つである石川北部 RDF センターの炉室は、水平方向 32 [m] × 40 [m]、鉛直方向は 25 [m] 以上となっている。図 1 は炉室内の写真であり、金属製の設備や、多くのパイプ、グレーチング^{*1}で構築された足場が見て取れる。このように、清掃工場は他の工場や建物には無い炉室があり、それが工場の占有空間の多くを占めることが特徴である。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Japan

² 日立造船株式会社
Hitachi Zosen Corporation, Japan

a) okumura.rei.os5@is.naist.jp

b) atarashi.y@hitachizosen.co.jp

c) ismail@itc.naist.jp

d) kawabata.k@hitachizosen.co.jp

e) fujikawa@itc.naist.jp

*1 道路脇の側溝の蓋によく用いられる、鉄製の格子状篋子



図 1 清掃工場，炉室内
Fig. 1 Overview of an incineration.

2. 関連研究

本研究が対象としている、清掃工場内の作業員の位置をリアルタイムに監視するシステムは、屋内測位システムの一つであると言える。屋内測位に関する関連研究としては、まず、Wi-Fi を用いるものがある。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ている [1]。屋内の研究室と教室の2つの環境において、Wi-Fi アクセスポイント（以下 AP と記述）から 1[m]~5[m] 離れた複数の地点に対して3点測位法を用いて位置を推定しており、推定誤差は平均して 0.664 [m] が得られている。一方で、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、適用フィールドとしては、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 の電波周波数といった Channel State Information (CSI) を用いる方法を提案している [2]。彼らは、縦 60[m] 横 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 全てを利用した場合の推定誤差が 4[m] 以内となっている。類似手法として、Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンを用いるものもある。Zhuang らは BLE ビーコンを用いたスマートフォンによる屋内測位のアルゴリズムを提案している [3]。彼らはチャンネル分離型フィンガープリンティングを始めとする4つの技術を組み合わせて検証しており、BLE ビーコンを 9 [m] あたり1つずつ配置した場合の推定誤差が、90%の確率で 2.56 [m] 以下である。これらの手法では AP やビーコンを配置するインフラが前提となっているが、清掃工場には未導入である。インフラを導入するとしても、広い清掃工場内に十分な AP やビーコンを整備するのはコストの面で現実的ではないと言

える。また、炉室には前述の通り金属製の大きな設備や、何層にも重ねられたグレーチングが存在し、マルチパスの影響にも不安が残る。

屋内測位に磁気を利用する手法も研究されている。Ashraf らは、スマートフォンで取得した磁気データを Convolutional Neural Network (CNN) で分類する手法を提案している [4]。彼らは、磁気フィンガープリンティング（以下 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、推定誤差の最大を 3 [m] 以下に抑えている。FP は屋内測位に用いられる汎用的なアルゴリズムであり、あらかじめセンサデータを位置（基準点やリファレンスポイントと呼ばれる）と共に記録してデータマップを作成しておき（図 2）、測位時に得たセンサデータと比較して最も近いセンサデータを持つ基準点、あるいは上位の基準点の重心を測位結果とする（図 3）。屋内空間に存在する磁気の種類は主に地磁気、残留磁気、電磁気の3種類である。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地場で、方位を知る手がかりとしてコンパスに活用されている。残留磁気は磁性体に磁界を与えるとその物体の保磁力に応じて残り続ける磁気である。電磁気はアンペールの法則に則り、導線に電流が流れた時や電磁石が作用した時の短期的な磁界の変化によって現れる。前章の通り炉室内には、保磁力の高い鉄製の機器が多く存在するため、炉室内に広く残留磁気が分布していると考えられる。つまり、この残留磁気による地場の局所性を活用して磁気測位が可能となると思われる。磁気を用いる屋内測位としては、最も単純な手法として前述の FP が、高度な手法としては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 [5]。磁気 FP を利用した屋内測位の困難な点としては、複数の基準点で類似する磁気が観測されうることである。これは、測位範囲が広くなるほど起こりやすいため、位置推定する範囲をいかに限定するかが高精度に測位する鍵となる。磁気測位の問題を補う研究として、東らは Wi-Fi と組み合わせて精度を上げる調査を行い、有効性を示している [6]。武島らは、回転磁石マーカを空間に設置してランドマーク化する手法を考案している [7]。しかし、両者とも整備コストの問題により、我々のフィールドへの適用は難しい。

3. 気圧と磁気による屋内測位手法の提案

本研究の目的は、清掃工場における、現実的なコストで導入可能な屋内測位システムの開発である。前述の通り、フィールドの環境下では、各地点で磁気が大きく乱れ、炉室内の磁気のばらつきが大きいと考えられる。したがって、任意の地点の磁気がそれぞれ特異な値を持つことが期待され、磁気 FP による屋内測位が可能であると仮定している。一方で、研究対象のフィールドすべてを磁気 FP でカバーすることは、広さの観点から困難であるため、気圧を用い

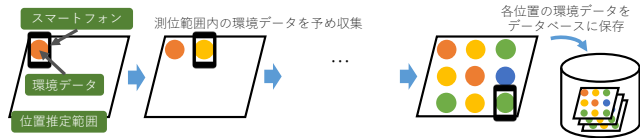


図 2 提案手法の磁気センシングにおける，学習フェーズ
Fig. 2 Training phase.

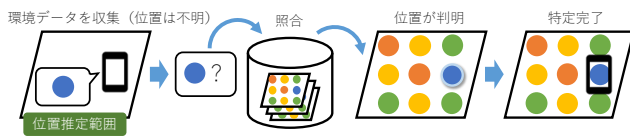


図 3 提案手法の磁気センシングにおける，推定フェーズ
Fig. 3 Estimation phase.

て鉛直（高さ）方向を推定することで磁気 FP の測位範囲を狭める．本章では，前述の目的を達成するために，磁気と気圧を用いた屋内測位手法について述べる．

3.1 磁気センシングによる屋内測位

磁気センシングによる屋内測位では，予め測位範囲内の磁気を調査し，測位の際に照合する．以降，前者の調査を学習フェーズ，後者を推定フェーズと呼ぶ．また，これ以降，磁気情報や気圧情報，端末の加速度といった情報を環境データと記す．各フェーズと大まかな手順は以下の通りである．

- 学習フェーズ（図 2）
 - 測位の際に基準となる点（以降基準点と記述）を測位範囲に設定する
 - 基準点ごとに座標と環境データを取得する
- 推定フェーズ（図 3）
 - 測位範囲内で環境データを取得する
 - 学習フェーズで取得した基準点と照合（3.2 節を参照）して座標を特定する

3.2 推定フェーズの照合における提案手法

前述の通り，我々が目指すシステムにおいて測位精度を向上させるには，推定フェーズでいかに正確に環境データを照合させ，推定座標を割り出すかが重要である．本システムでは，清掃工場内の複数階にわたって使用できることを目指している．つまり，平面的な測位だけでなく，鉛直方向（複数階あるどこのフロアか）も推定できる 3 次元空間の測位が必要である．本節ではこれらの推定方法について，前者を水平方向の推定，後者を鉛直方向の推定として個別に述べる．我々が取得した環境データの項目を表 1 に示す．

また，表 1 は測位範囲内の任意の地点で取得するデータであるが，追加で気圧情報を定点観測している．これは，清掃工場周辺の気候変動による気圧変動を収集し，フロア推定を正確に行うためである．

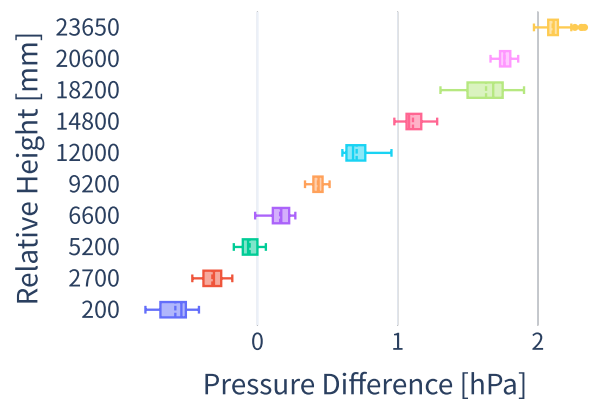


図 4 清掃工場内の各フロアにおける，気圧と定点観測点の気圧の差
Fig. 4 Difference between the air pressure at each level and the air pressure at the fixed observation points in the cleaning plant.

3.2.1 鉛直方向（フロア）の推定手順

ここでは，我々が提案する屋内測位システムにおける鉛直方向（フロア）の推定手順について述べる．本研究では清掃工場内に，観測端末からのデータを受信する LPWA 基地局を少数設置することを前提としており，この基地局に気圧の定点観測を任せる予定である．よって，鉛直方向の推定には 2 点間の気圧の差を用いることができる．具体的には，定点観測している地点を基準高さと考え，定点観測点の気圧を p_0 ，フロアを推定したい地点の気圧を p とし， $p_0 - p$ の値からフロアを求める．求めるアルゴリズムとしては，現地調査で得られたデータの傾向から，線形回帰を用いる．図 4 は清掃工場内で実際観測された気圧データより，作成したグラフである．縦軸はフロアの高さを，横軸は定点観測点と基準点の気圧差を，示している．以下に鉛直方向（フロア）の推定手順を示す．

- (1) 学習フェーズにおいて，得られた基準点と定点観測点との気圧差を求める
- (2) 上で求めた気圧差 [hPa] を説明変数，高さ [mm] を目的変数とし，線形回帰する．
- (3) 推定フェーズにおいて，上で求めた線形回帰モデルに $p_0 - p$ を代入し高さの数値を得る．
- (4) 得た数値と実際のフロアの高さの差を求め，その差が最小であるフロアを正解とする．

手順 (4) の補足として，実際の運用では，3.2.2 項で述べる水平方向の推定手順と組み合わせる．5.1 節に示した結果から，正解率 1.00 は得られていないため，フロアの推定確率を用いるべきか検討中である．

3.2.2 水平方向の推定手順

ここでは，我々が提案する屋内測位システムにおける水平方向の推定手順について述べる．前述の手順でフロアが推定完了していることから，1 フロアを平面とみなして，磁気を用いて水平方向の座標を推定する．具体的には，3 要素ある磁気データを図 5 に示すように xy 平面（水平）

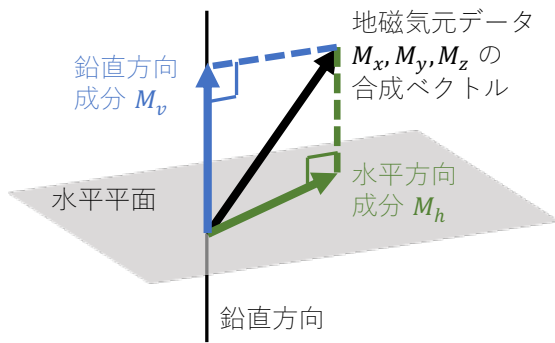


図 5 磁気ベクトルの分解
Fig. 5 Decomposition of magnetic vectors.

成分と z 方向（鉛直）成分に分解し、2 要素の磁気データとして扱う。3 要素から 2 要素へデータの削減を行う理由としては、環境データ取得時の端末の姿勢変化が挙げられる。後述する環境データ測定用台車を使用しない場合は、環境データ取得端末の姿勢を固定するのが困難である。また、地磁気が正常に取得不可能な環境での端末姿勢推定手法は確立されていないため、我々は加速度のみで姿勢推定可能となる制約下で実験を進めている。データの削減は、この制約下での姿勢変化を許容するものである。以下に 3 要素の磁気データを 2 要素にする手順を示す。

- 環境データ測定用台車を使用する場合
 - 端末の画面が常に上を向き、道が水平な時は、重力方向を Z 軸とする実世界のワールド座標系と端末座標系の Z 軸が一致するので、磁気データ 3 要素 m_x, m_y, m_z に対して、水平成分、鉛直成分 2 要素 M_h, M_v は以下のように求められる。

$$M_h = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \quad M_v = m_z$$
- 端末を手持ちの自由姿勢でデータ収集する場合
 - (1) まず、端末を縦持ちした状態で環境データを収集する運用のため、前転後転の姿勢変化のみが起こり、左右回転は無視できると仮定する。実際に環境データ取得する際は、端末（Android スマートフォン）を縦に持ち、可能な限り端末の画面が鉛直上方向から手前水平方向までの任意の角度を維

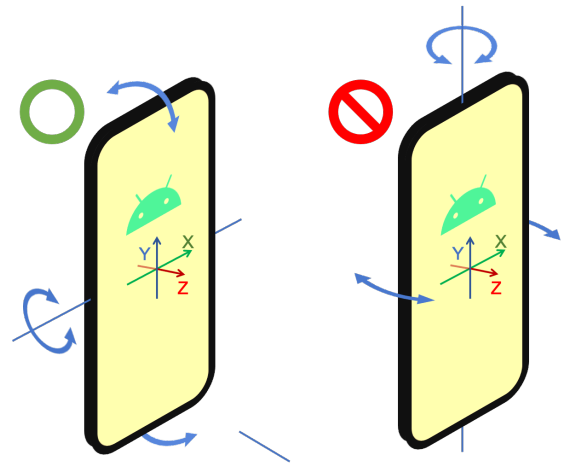


図 6 環境データ取得の際の端末の姿勢について
Fig. 6 The posture of the terminal when acquiring environmental data.

持する。すなわち、図 6 に示すように端末を縦持ちの状態、水平に寝かせたり、鉛直に立たせたりすることは問題ないが、端末を横に向ける（横持ちする）ことを避ける。

- (2) 上記の制約が守られると、端末の X 座標軸が常に水平方向を指すため、端末の加速度データを用いることで、水平方向の磁気 Y 軸成分と鉛直方向の磁気成分を算出できる。磁気データ 3 要素 m_x, m_y, m_z 、加速度データ 3 要素のうちの yz 成分 a_y, a_z に対して、まず、水平方向の磁気 Y 軸成分 M_y と鉛直方向の磁気成分 M_v を算出する。

$$M_y = \sqrt{m_y^2 + m_z^2} \cos \theta$$

$$M_v = \sqrt{m_y^2 + m_z^2} \sin \theta$$
 ただし

$$\theta = \text{atan2} \frac{a_y}{a_z} + \text{atan2} \frac{m_z}{m_y}$$
 である。
 - (3) 次に、磁気の水平方向成分 M_h は、

$$M_h = \sqrt{M_y^2 + m_x^2}$$
 であることから、磁気データ 2 要素 M_h, M_v が求まる。
- また、この 2 要素の磁気データの照合処理としては、ベ

表 1 環境データ一覧
Table 1 Sensor data from a smartphone.

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であるから	約 30 [μ s] 毎に収集
加速度	3 (XYZ)	収集端末の姿勢推定	約 7 [μ s] 毎に収集
ジャイロ	3 (XYZ)	収集端末の姿勢推定	約 7 [μ s] 毎に収集
気圧	1	鉛直方向 (フロア) 推定	約 115 [μ s] 毎に収集
セルラー	asu_level, rssi 等	測位補助	Android API で取得可能な項目は全て取得
Wi-Fi	bssid, rssi 等	測位補助	Android API で取得可能な項目は全て取得
Bluetooth	name, state, rssi 等	測位補助	Android API で取得可能な項目は全て取得
環境音	音声データ	測位補助	.flac で保存

※セルラー、Wi-Fi、Bluetooth は収集に時間がかかるため、含まれない基準点もある

クトル間の最小二乗誤差 (MSE) を計算した後、

- MSE が最小の基準点を推定位置とする (Top 1)
- MSE が小さい順に 5 点取得し、その重心を推定位置とする (Top 5)

の 2 通り検証する。

4. 現地調査

本章では、屋内測位システムに必要な基準となるデータを実際に清掃工場にてどのように収集したのかについて述べる。測定対象の清掃工場の概要や収集したデータと収集方法について順に示す。

4.1 測定対象の清掃工場

本節では、我々がデータを収集した 2 つの清掃工場について、その概要を示す。1 つめは、神奈川県秦野市にあるはだのクリーンセンター*2 である。ここでは、近隣で発生する可燃ごみを焼却処理している。2 つめは、石川県羽咋郡志賀町にある石川北部 RDF センター*3 である。ここでは、処理工場で製造された RDF を溶融処理している。RDF とは、Refuse Derived Fuel の略であり、廃棄物から生成される燃料を指す。具体例を挙げると、家庭や事業所から出るごみのうち、リサイクルされなかった紙、布、木、プラスチックなどの可燃物を破碎・乾燥・選別・成型し燃料化したもので、褐炭に近い熱エネルギーを持っている。

このように、データを収集した清掃工場 2 つは、焼却する物が異なっており、各施設の設備には細かな違いがある。例えば、可燃ごみを焼却するはだのクリーンセンターには、可燃ごみを一時的に溜めておくごみピットがあるのに対し、RDF を焼却する石川北部 RDF センターには、RDF を貯蔵するサイロがある。ごみピットはコンクリート製に対してサイロは金属製なので、磁気特性に違いが現れると考えられる。また、焼却炉の形状も大きく異なり、この形状差も磁気特性に影響を及ぼすと考えられる。

4.2 データの収集

本節では、データを取得する方法やそれに用いた機器について述べる。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いる。また、環境データの収集については、清掃工場内を短時間で広範囲にわたって収集するために、専用の台車を開発して併用した。

4.2.1 環境データ収集用 Android アプリケーション

清掃工場内の磁気や気圧情報といった環境データを収集するために用いる Android アプリケーションを作成した。図 7 はメインのユーザインタフェースを示している。メインのユーザインタフェースにおいて、画面上部は測定し

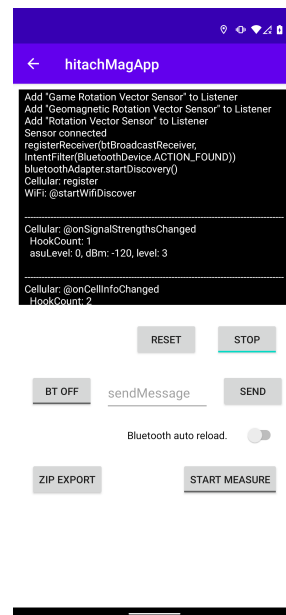


図 7 メイン画面のユーザインタフェース

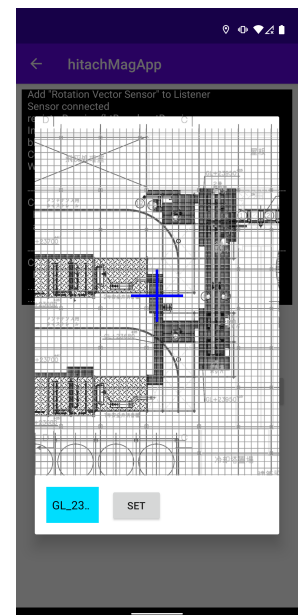


図 8 座標位置を選択するユーザインタフェース

Fig. 7 Main user interface. Fig. 8 Position input screen.

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。

- (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
- (2) 清掃工場内の位置を時刻とともに保存する機能
- (3) 測定用台車と Bluetooth で接続し、Android を遠隔操作する機能

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 1 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、我々の開発した 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 8 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が可能であり、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

*2 <http://www.hadanoshi-iseharashi-kek.or.jp/index.html>

*3 <http://www.scnet.tv/~rdf/>

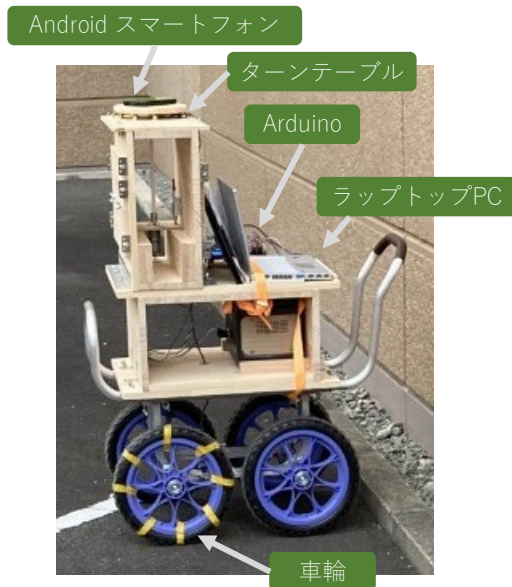


図 9 環境データ測定用台車 外観
Fig. 9 Our measuring cart appearance.

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。清掃工場内での計測時には、この Android アプリケーションを Google 社製 Pixel 4 と Pixel 4a にインストールして使用した。計測時の Android バージョンはどちらも 11 である。

4.2.2 環境データ測定用台車

計測の効率化を目指し、我々は環境データ測定用台車 (図 9) を開発して運用している。

スマートフォンは画面が上になるように、すなわち仰向けにターンテーブルに固定されている。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を行うことで、磁気センサが校正不足でも原点とのズレが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ことを期待している。台車上の Arduino 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、Android 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 Android スマートフォンの相対角度を 30°

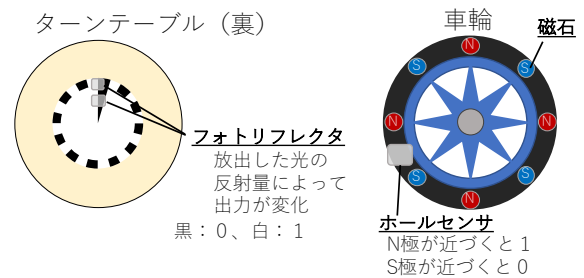


図 10 ターンテーブルと車輪の回転検出
Fig. 10 Turntable and wheel rotation detection.

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 つのみ取り付けしている。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 $0.35 \times 3.14/8 \approx 0.14$ [m] である。それぞれの検出方法を図 10 に示す。

4.3 清掃工場内の環境データ収集

2 つの清掃工場における現地調査の際、工場内の環境データは、主に前述の環境データ測定用台車で収集した。しかし、湾曲した通路や段差が多い箇所といった、台車を活用することが困難な区域では、我々自身が Android スマートフォンを手に取り、環境データを収集した。このように人手によって環境データを収集する際には、収集区域内を大まかに 1 [m] ごとの点で収集した。

また、石川北部 RDF センターの現地調査時には、気圧の時間変化の補正のために、気圧を定点観測した。

5. 結果と考察

本章では、4 章にて説明したデータに対して、3 章に示した手法を適用した結果について述べる。

5.1 鉛直方向 (フロア) の推定

本節では、石川北部 RDF センターで収集した気圧データを用いて、炉室内の高さを推定した結果について述べる。まず、線形回帰によって得られた回帰式を式 (1) に示す。この式では $p - p_0$ は気圧差であり、 h は得られる高さである。次に、図 11 に混合行列を示す。これは、提案手法によりフロアを推定した結果を示している。また、この混合行列における正解率は 0.895 である。

図 11 について、18200 フロア以外の正解率が 0.85 以上であり、全体の正解率も 0.895 と 9 割近い数値となっている。しかし、18200 フロアについては、誤って 20600 フロアと推定する割合が 5 割を超えている。これについて現状で考えられる原因としては、気圧を測定する場所の気温を考慮していないことが挙げられる。18200 フロアには、

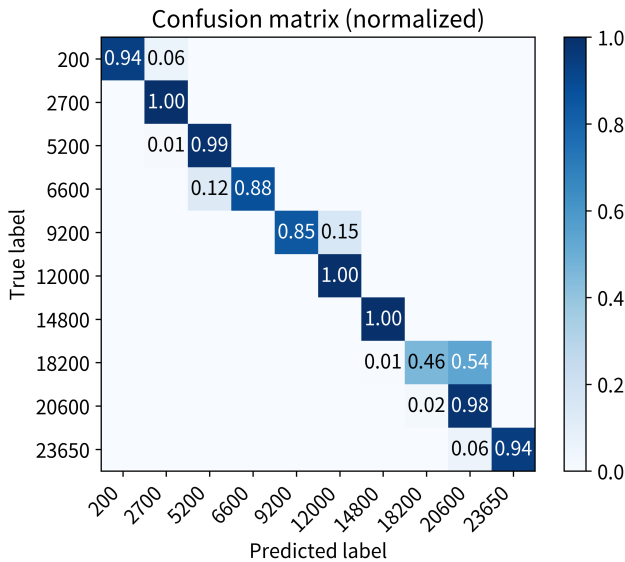


図 11 気圧を用いたフロアの推定結果

Fig. 11 Results of floor detection using atmospheric pressure.

焼却処理を行うボイラがあり、フロア内に局所的に気温が高い場所が多く存在する。この気温差によってフロア内の気圧がばらつくことで、誤推定につながったのではないかと考えられる。

$$h = 8406.7(p - p_0) + 5356.5 \quad (1)$$

5.2 水平方向の推定

本節では、はだのクリーンセンター、石川北部 RDF センターそれぞれにおいて収集した磁気データを用いて単一フロア内で測位した結果について述べる。はだのクリーンセンターでの測位結果を図 12 と図 13 に、石川北部 RDF センターで測位した結果を図 15 と図 16 に示す。これらの図はそれぞれ、3.2.2 項で示した通り照合処理に違いがある。ここで、これらのヒートマップ図について解説する。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いる。各点の位置は基準点の正解位置を表しており、色は対応する推定位置との距離（ユークリッド距離）、すなわち誤差を示している。つまり、このヒートマップでは、図中の青点が多いほど測定精度が良いと言える。また、はだのクリーンセンターでの測位誤差を図 14 に、石川北部 RDF センターでの測位誤差を図 17 に示す。

これらのヒートマップ図より、はだのクリーンセンター、石川北部 RDF センター双方で、磁気測位では照合時に 5 点の重心を選択する Top5 の方が全体的に青点が多く、精度良く測位できていることがわかる。図 14 と図 17 にも Top5 の方が精度が良い傾向がみられる。

6. おわりに

今日の清掃工場では遠隔運転が可能であるが、機器の点

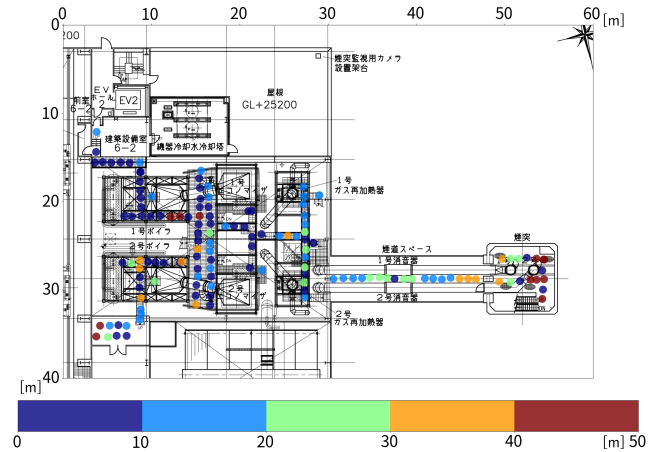


図 12 はだのクリーンセンターでの測位ヒートマップ (Top 1)
Fig. 12 Detection heatmap at Hadano (Top 1).

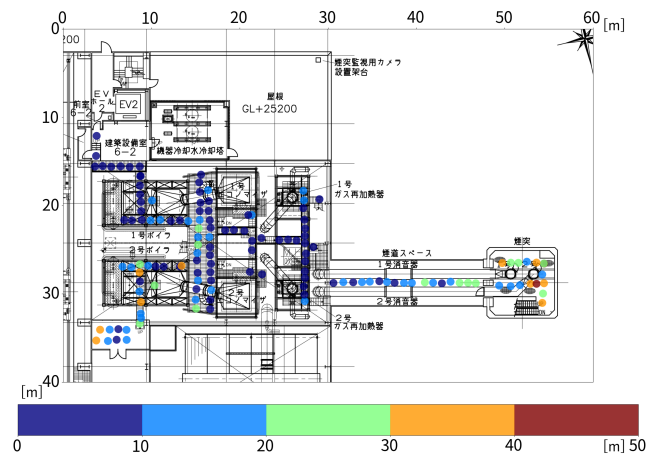


図 13 はだのクリーンセンターでの測位ヒートマップ (Top 5)
Fig. 13 Detection heatmap at Hadano (Top 5).

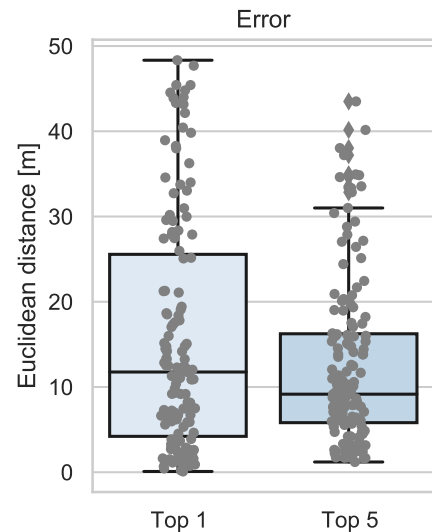


図 14 はだのクリーンセンターでの測定誤差
Fig. 14 Boxplot of detection error at Hadano.

検や清掃においては依然として作業員が現場に赴く必要がある。運用費削減のために人員を極限まで減らした場合、

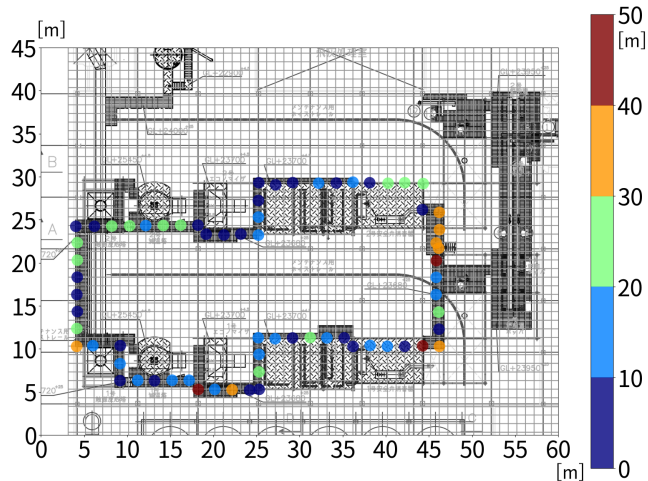


図 15 石川北部 RDF センターでの測位ヒートマップ (Top 1)
Fig. 15 Detection heatmap at Ishikawa (Top 1).

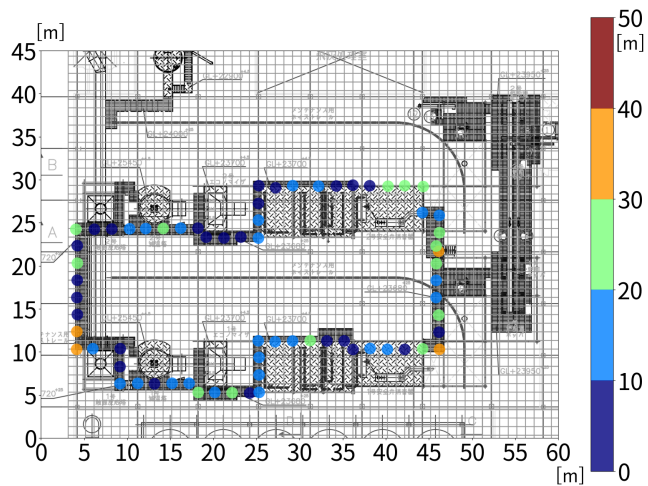


図 16 石川北部 RDF センターでの測位ヒートマップ (Top 5)
Fig. 16 Detection heatmap at Ishikawa (Top 5).

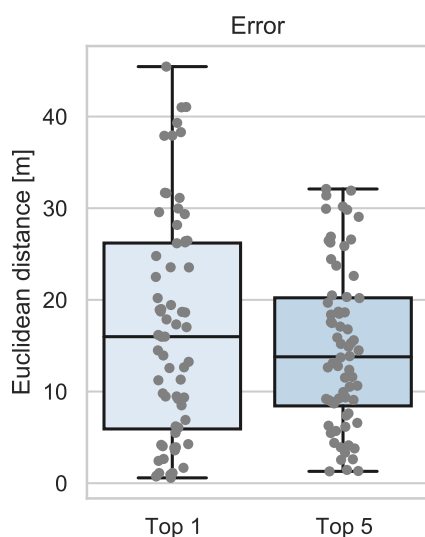


図 17 石川北部 RDF センターでの測定誤差
Fig. 17 Boxplot of detection error at Ishikawa.

高頻度で現場に 1 人で赴く必要があり、不慮の事故を迅速に発見するためにリアルタイムに作業員の位置をモニタリングするシステムが求められている。そこで本研究では、気圧と磁気を用いて清掃工場における 3 次元空間での測位を行うシステムの開発を行っている。本稿では、清掃工場のような広い空間で磁気センシングによるフィンガープリンティング手法を行うために必要な、データ収集やその解析の現状について報告した。

気圧を用いたフロアの特定では、定点観測する地点の気圧と推定する場所の気圧の差を用いて、線形回帰モデルをベースに推定することで、0.895 の正解率でフロアを特定できている。しかし、特定のフロアで極端に誤推定が多くなることがわかった。気温差が原因であると仮定できるが、今後、その妥当性を確認する必要がある。

磁気を用いた測位では、清掃工場側に整備するインフラを最小限に抑えつつ、2つの清掃工場での測位誤差の中央値が 9.16 [m] と 13.79 [m] であった。しかし、測位誤差の最大値は 40 [m] を超えており、精度向上が課題である。

今後は、気圧を用いたフロア特定と磁気を用いた測位を組み合わせた際のシステムの挙動を評価する。更に測位精度向上のための処理を検討する。

謝辞 データ収集にご協力いただいたはだのクリーンセンター、ならびに石川北部 RDF センターの関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] Sadowski, S. and Spachos, P.: RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 30149–30161 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2843325 (2018).
- [2] Sen, S., Lee, J., Kim, K.-H. and Congdon, P.: Avoiding multipath to revive inbuilding WiFi localization, pp. 249–262 (online), DOI: 10.1145/2462456.2464463 (2013).
- [3] Zhuang, Y., Yang, J., Li, Y., Qi, L. and El-Sheimy, N.: Smartphone-Based Indoor Localization with Bluetooth Low Energy Beacons, *Sensors*, Vol. 16, No. 5 (online), DOI: 10.3390/s16050596 (2016).
- [4] Ashraf, I., Kang, M., Hur, S. and Park, Y.: MIN-LOC: Magnetic Field Patterns-Based Indoor Localization Using Convolutional Neural Networks, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 66213–66227 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985384 (2020).
- [5] Subbu, K. P., Gozick, B. and Dantu, R.: LocateMe: Magnetic-Fields-Based Indoor Localization Using Smartphones, *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, Vol. 4, No. 4 (online), DOI: 10.1145/2508037.2508054 (2013).
- [6] 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 (2017).
- [7] 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 (2018).