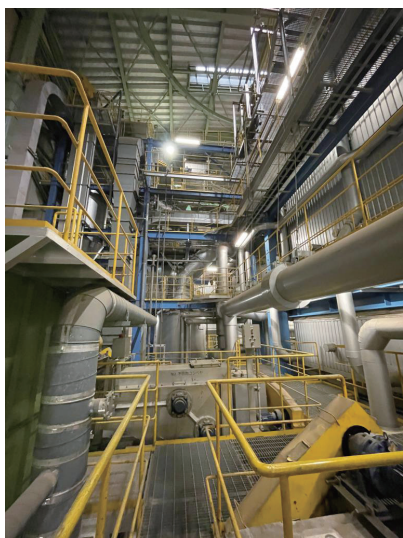


清掃工場における磁気測位システムの検討



新 佑太郎 ①
 川端 馨 ①
 奥村 嶺 ②
 松永 拓也 ②
 新井 イスマイル ②

要旨

清掃工場における作業員の安全管理、作業効率の向上を目的に、作業員の位置情報を把握するための屋内測位手法について検討した。屋内測位手法には、インフラ導入コストを抑えられる磁気FP (Finger-Printing) を用いたが、清掃工場の環境下では測位対象エリアが大きくなるほど精度が悪化し、実用的な精度が得られなかった。そこで当社は、清掃工場の構造的特徴から特異性のある磁場が形成されることに着目し、磁気トレンドによる測位で得た知見をもとに差分マッチング法を考案した。本法では対象ルートを約93%の精度で測位できることを確認した。また、フロア推定では、階層の判別に気圧差の線形回帰式による検証ならびにLPWA (Low Power Wide Area) のRSSI (Received Signal Strength Indicator) を特徴量とした機械学習手法で階層推定の有効性を確認した。これらの検証により、清掃工場でも通路は磁気差分マッチング、作業空間では相互補完型Wi-Fi・地磁気フィンガープリンティング¹⁾のハイブリッドな構成にすることにより低コストな高精度屋内測位システムの実用化の目処が立った。

キーワード

磁気FP, 屋内測位, インドアマッピング, 位置情報, 安全管理, 作業効率

1. 緒言

清掃工場において、作業員の位置情報を把握することで、メンテナンス業務の実態、動線の把握による作業効率の改善に繋げられる可能性がある。同時に、作業場所をリアルタイムでモニタリングする仕組みを構築すれば、熱中症や転倒など万一の事故で作業員が身動きとれない状態が発生した場合にも、検知、迅速な救助が可能になる。したがって、作業員の位置情報を把握することは、清掃工場の運営管理に大いに活用できると考えられる。しかし、清掃工場の大半は、騒音、臭気、景観等への対策から屋根と壁で囲まれた閉鎖構造で作られており、衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星) がほとんど使えないため、一般的な屋内測位システムは無いのが現状である。このため、清掃工場内で使える自前の測位システムを構築する必要がある。屋内測位として様々な方法が考案されているが大別すると次の三つに分けられる。

- ① 電波・光・超音波等の空間伝搬を利用するもの
 - ② 自律航法技術 (加速度センサ等) を利用するもの
 - ③ 磁気 (地磁気、残留磁気等) や気圧を利用するもの
- 上記の三つはそれぞれ長所短所を持ち合わせており、これらを相互補完するため、組み合わせることで精度の向上が期待できる。

我々はこの三つの手法の中から、清掃工場の構造や作業員の行動を考慮して最適な方法を検討した。広く普及させることを第一に考えると、新設・既設を問わず導入できて、かつ、コストがあまりかからないものが望ましい。また、高度なノウハウを必要とせず、自社で構築でき、数十年にわたる長期の運用が継続できるものであることも重要である。清掃工場の屋内は多数の機械、ダクト配管等が配置されており、電波や光、超音波を遮る物が多く、デッドゾーンがしやすい。このため、発信機の配置密度を上げる必要があり、空間伝搬を利用する手法はコストが問題となる。また、清掃工場の内部は広大であり、複雑な構造をもつことから、自律航法で不可欠な誤差のリセットポイントを多数配置する必要があり、これもコスト面で不利である。磁気や気圧を用いる手法は、システム構築時に測位対象エリア各所の磁気と気圧を収集する

① 環境事業本部 開発センター

② 奈良先端科学技術大学院大学

作業が必要になるが、身近にある自然現象を利用するので設備が少なく済み、導入から保守、維持に至るまでコストの優位性がある。しかも、磁気データ収集以外の調整は必要なく、自社での構築のハードルが他と比べて低い。以上の理由で清掃工場における測位手法として、磁気および気圧を主とする手法を選択した。また、最小限の範囲で、RSSIによる測位手法も検討し、参考文献¹⁾の手法を活用する仮定で進めた。

2. 磁気FPシステム

2.1 磁気FP (Finger-Printing) について

地球は巨大な磁石にも例えられる。この磁石で形成される磁場は、屋外・屋内問わず地球上のあらゆる場所において、磁気センサで観測することができる。清掃工場のような屋内では、建屋を支える鉄骨や大型機械、配管ダクト、電動機等が存在する。これらの影響で磁場が歪み、その場所固有の磁場が形成される。あらかじめ、測位対象範囲の磁場を計測して磁場分布を把握し、被測位者が持つ磁気センサが計測した磁場と照合することで、被測位者の場所を特定することができる。

この照合による測位手法として磁気FP (Finger-Printing) がある。磁気FPとは、あらかじめ把握した磁場の分布と、被測位者が計測した磁場が最も似ている場所を位置推定する手法である。実際には、事前に清掃工場内の測位対象範囲すべての場所で、3軸方向の磁気データを、場所を示す座標とともに調査しておく。磁気データ計測の際は、高さや3軸の方向性を一定に保持した状態で測定を行う。これで得られた磁気データをデータベース化する。以降、このデータベース化の作業を学習フェーズと呼ぶ。作業員の場所を測位する際は、スマートフォンで計測された磁気データをデータベースと照合し、最も類似している磁気データと紐づけられている位置情報を測位結果とする。以降、計測された磁気から測位を行う操作を測位フェーズと呼ぶ。このように磁気FPによる測位は学習フェーズと測位フェーズの二つのフェーズで成り立つ。

2.2 磁気計測と座標軸の考え方

施設内の測位対象エリアにおいて、スマートフォンに内蔵された3軸磁気センサを用いて、図1のように各所の磁気データを計測する。ただし、計測した磁気データをそのままFPに用いることはできない。なぜなら、地球から見た視点（地球座標軸）では、ある固定された空間磁界は大きさも向きも変化しない磁気として見られるが、スマートフォンで取得する場合、観測する磁界はその内蔵磁気センサから見た視点（スマートフォン座標軸）となり、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である磁界を変化している磁界として取得してしまうためである。そのため、計測した磁気をFPに使用するためには、前処理として端末の向きに依存しない値へ座標変換する必要がある。

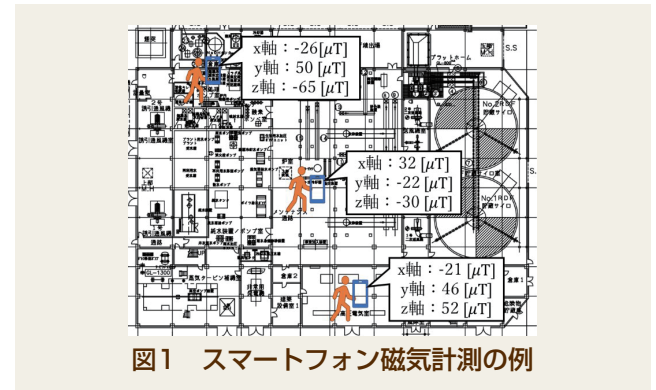


図1 スマートフォン磁気計測の例

2.3 座標変換

スマートフォンの姿勢によらない磁気データとするために、グローバル座標系（地表に平行な面をXY軸、鉛直方向をZ軸とした座標系）に統一することが考えられるが、この場合、姿勢推定が不可欠である²⁾。端末の姿勢推定には地磁気センサ値と加速度センサ値が必要だが、地磁気センサ値は鉄骨等の影響による磁気の影響を受けるため使うことが出来ない。そこで、加速度センサ値のみを用いて重力ベクトルを推定し、磁気センサが出力する3軸のベクトル値を座標変換して水平方向成分と鉛直方向成分のスカラ値へとすることで、磁気データをグローバル座標系に統一することとした。以下に座標変換の計算方法について説明する。

2.3.1 座標変換手法

図2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 M を、鉛直方向成分 M_v と水平方向成分 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、 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

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

$$M_h = \sqrt{|M|^2 - M_v^2} \because |M|^2 = M_v^2 + M_h^2$$

と求まる。

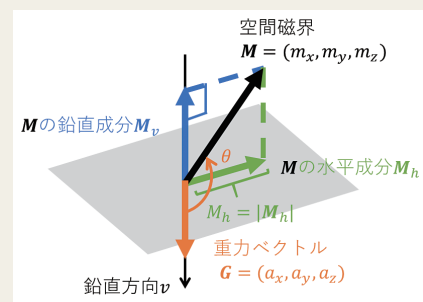


図2 磁気ベクトルの分解

2.4 気圧の併用 清掃工場のような複数階層にまたがる施設で磁気FPを行うと、測位対象エリアが広すぎるため誤測位が起りやすくなる。本開発では、磁気FPの前に気圧による鉛直方向（階層）の推定を行う事で測位対象エリアを絞り込み、精度向上につなげた。また、気圧は時間によって変化するため、最下層のフロアで気圧を定点観測し、その気圧差で気圧変動の影響を補正することとした。実際に清掃工場で気圧差を求めたものが図3となっており、フロアごとに気圧差が異なることが分かる。

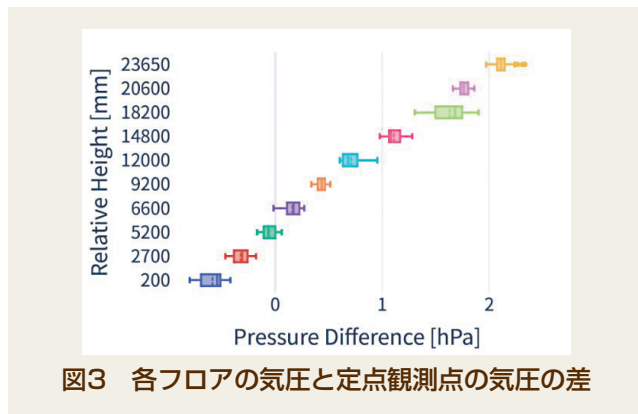


図3 各フロアの気圧と定点観測点の気圧の差

2.4.1 気圧差によるフロア推定手法 フロアの推定には2点間の気圧の差を用いる。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、 $p-p_0$ 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。下記に鉛直方向（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 $p-p_0$ 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。

2.4.2 気圧差によるフロア推定結果 計測した気圧データの傾向から、フロア推定に用いる線形回帰式は

$$h = 8406.7(p - p_0) + 5356.5$$

とした。推定結果の精度を示す混同行列を図4に示す。気圧によるフロアの識別精度は、平均値で約89%となった。図4に示す通り、地上高18,200 mmのフロアにおける推定精度が著しく低かった。原因としては、下記2点が考えられる。

- ・同一フロア内に高さの異なる場所が存在
 - ・スマートフォンに内蔵されている気圧センサの精度
- 今回の検証に使用したスマートフォン内蔵の気圧センサは、精度が ± 0.5 [hPa]程度であり、高さにして最大4 mの誤差が生じる。

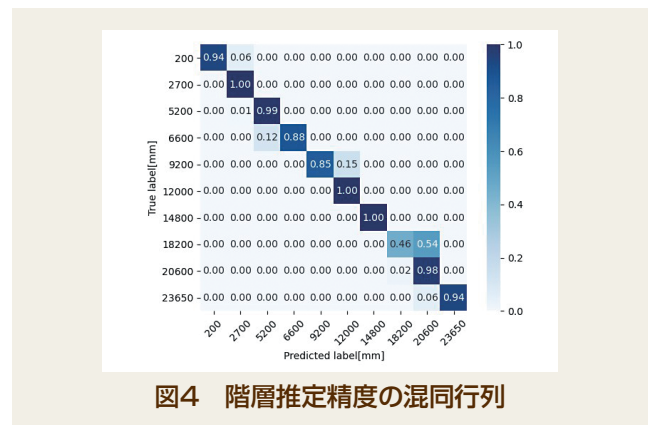


図4 階層推定精度の混同行列

2.5 磁気FPの実施方法 本節では、磁気FPの測位精度について、磁気計測用台車を製作し実際の清掃工場に持ち込んで検証方法について記載する。ただし、気圧等を用いて各フロアの識別が行われていると仮定している。

2.5.1 学習フェーズ 学習フェーズがもっとも時間と手間のかかる作業となるため、効率よく作業が行えるように磁気計測台車を作成した。磁気計測台車に、磁気センサとなるスマートフォンを画面が上向きになるように固定し、移動を繰り返して磁気計測を行った。磁気計測台車は、走行センサによる走行距離の取得と、磁気と気圧を同時に記録する機能を有しており、データベース作成までの期間を短縮した。磁気データは計測開始地点、終了地点を決定し、走行センサの分解能である0.14 [m]ごとのデータを計測した。

2.5.2 測位フェーズ 学習フェーズで計測したときと同じ手順、同じ位置で再度磁気計測を行った。学習フェーズ、測位フェーズで計測した磁気データを座標変換してFPを行う。ただし、今回は学習フェーズ、測位フェーズともにスマートフォンを台車に固定しているため、端末の姿勢推定の影響を受けない条件になっている。磁気データの照合処理として、ベクトル間の最小二乗誤差 (MSE) を計算した後、MSEが最小となる基準点を推定位置とする。本稿では以降、本手法をワンショット測位と称す。図5に磁気FPによる測位プロセスを示す。

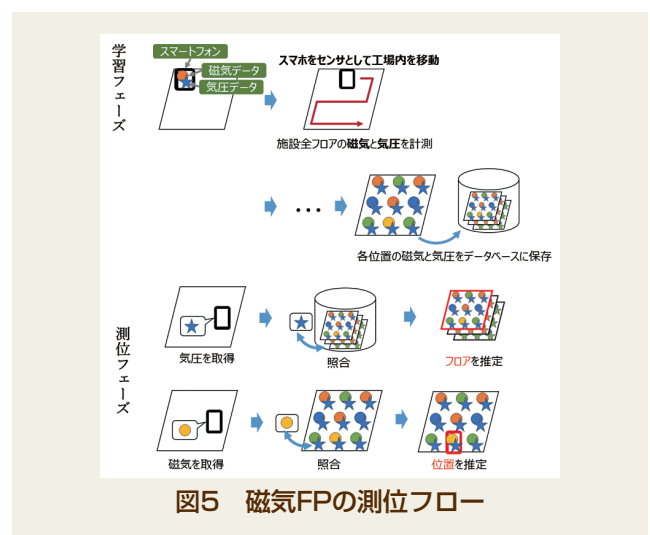


図5 磁気FPの測位フロー

2.6 磁気FPの検証結果 磁気FPによる各フロアの測位精度は図6に示す通りである。測位対象エリアがもっとも広い地上高200 mmでは、学習フェーズと測位フェーズで端末の姿勢が完全に一致していたにも関わらず、誤差が約24 mとなった。フロア面積が広大であるため、類似する磁気パターンが複数出現したことが原因だと考えられる。一方、測位誤差が0 mとなったエリアでは、大部分がメンテナンスで立ち入り禁止区域となっていたため、磁気計測のサンプル数が少なく、100 %の測位精度となった。測位精度のヒートマップを図7に示す。測位対象エリアの1辺の長さとの関係をグラフ化したものが図8であり、測位対象エリアが広くなるとほぼ比例して精度も悪くなるのが分かる。そのため、面積が広いフロアにおける磁気FPは、フロアの識別による測位対象エリアの絞り込みでは十分な測位精度が得られないことが分かった。

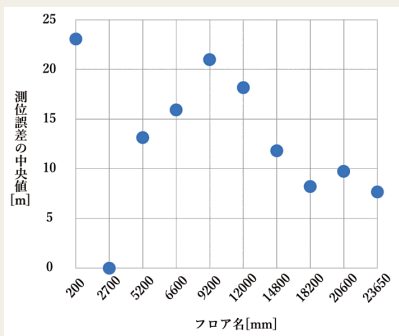


図6 階層ごとの測位精度

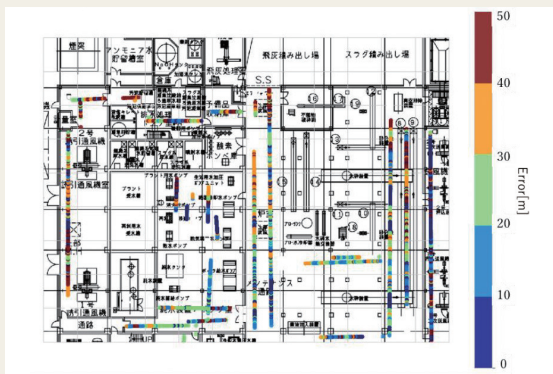


図7 ワンショット測位時の測位精度

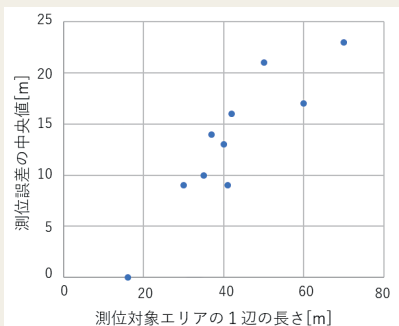


図8 測位精度と対象エリアの広さの関係

3. 磁気屋内測位の提案手法

3.1 磁気トレンドを使った測位手法 ワンショット測位では、類似した複数の磁気が出現したために正解を選ぶことができず、十分な測位精度が得られなかった。複数の類似磁気から正解を選ぶために、Wi-Fi等の補助情報を利用することが有効となりうるが、それには新たな設備投資が必要となる。そのため、得られている磁気情報だけで類似する他の測位ポイントと区別できる方法を考えた。現場の作業員が移動することにより取得する磁気データが変化することに着目し、歩行時に連続的に変化する磁気のパターンで、作業員の位置を特定する方法である。この磁気のパターンを磁気トレンドと呼ぶこととする。作業員の移動による磁気トレンドの波形は、歩行にともない周囲の機械や鉄骨等の金属構造物の種類や大きさで変化する。この変化が同一となるような場所が、施設内に複数出現することは稀であり、誤測位の原因となる類似な磁気トレンドの出現を減らすことができると考えた。本稿では以降、磁気トレンドを用いた本測位手法をグループマッチングと称す。

図9に歩行して得られた磁気トレンドの一例を示す。グループマッチングでは、この磁気トレンドをFPすることで位置推定する。また、磁気トレンドは歩く距離が長くなるほどユニークなものとなり、位置を特定する際の競合を減らせる効果が高まるが、磁気トレンドの長さを大きくすると最低歩行距離が延びることになるため、欠測の可能性も高まることから必要以上に長くしないよう留意しなければならない。

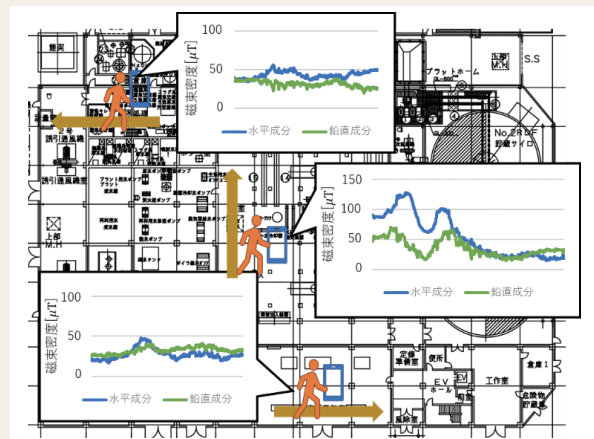


図9 磁気トレンド

3.2 磁気トレンドを用いた照合方法

3.2.1 学習フェーズ ワンショット測位と同様に磁気計測台車で位置情報と合わせて磁気を計測する。計測者はルート図を携行し、計測位置をルート図に記入しながら計測を繰り返す。 n 回目に計測した磁気と位置情報は m_n^b, p_n^b と表現する。これを測位対象エリア全域に対して行う。

3.2.2 測位フェーズ 作業員はスマホを1台携行し、一定距離歩いたときの磁気データと加速度データを得たとする。このとき、歩行距離は計測した加速度から歩数を検出し、これに歩幅を乗算して求める。歩幅は、参

参考文献³⁾によると65歳以下では身長 l の45%であるため、

$$\text{歩幅}[\text{m}] = \text{身長}[\text{m}] \times 0.45$$

の式から求める。

被測位者がある距離だけ歩行した際に得られた j 個の磁気データを

$$\mathbf{M}_t = [m_t^1, m_t^2, \dots, m_t^j]$$

と表す。次に、被測位者の移動距離と同じだけの距離を持つ磁気データを、磁気MAPから全パターン抜き出す。

抜き出した磁気データは、

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_b^1 &= [m_b^1, m_b^2, \dots, m_b^i] \\ \mathbf{M}_b^2 &= [m_b^2, m_b^3, \dots, m_b^{i+1}] \\ &\vdots \end{aligned}$$

と表される。抜き出した磁気 \mathbf{M}_b と、被測位者が計測した磁気 \mathbf{M}_t をそれぞれ時系列データとみなし、DTW (Dynamic-Time-Warping) を使って類似度 s を求める。DTWは二つの時系列の各点の距離を総当たりで求め、二つの時系列が最短となるパスを見つける手法である。対応する点を選ぶ際に重複を許すため、比べる磁気トレンドの長さや周期が違ってても類似度を求めることができる。このため、DTWは「周期はずれているが、形は似ている」という場合や、系列同士の長さが異なるデータの類似度を測りたいときに有効な手法と言える。時系列データAと時系列データBの類似度を、DTWで求める操作をDTW(A, B)と表すとすると、

$$\begin{aligned} \text{DTW}(\mathbf{M}_t, \mathbf{M}_b^1) &= s_1 \\ \text{DTW}(\mathbf{M}_t, \mathbf{M}_b^2) &= s_2 \\ &\vdots \end{aligned}$$

と表される。経路ごとに磁気トレンドを比較し、求めた類似度 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots]$ の中から最大値 s_{\max} を求めるのに用いた \mathbf{M}_b^{\max} に対応する座標群 $\mathbf{P}_{\max} = [p_b^{\max}, p_b^{\max+1}, \dots]$ を被測位者が移動した経路として推定する。

3.3 グループマッチングの検証方法 測位精度の検証は、ワンショット測位で最も測位精度が悪かった地上高200 mmのフロアで行った。学習データは、磁気計測台車にスマートフォンの画面が上を向くように固定し、計測位置をガイドするロープを用いて0.3 m刻みで計測した。これは、学習データと検証データの二つで計測位置に違いが出ないようにするためである。検証データはスマホを手に保持して歩きながら計測した。学習データと検証データ計測の際、スマホと地面との距離はできる限り一致させている。測位データとして、6 mを直線的に歩いた124本分のデータを使用した。また、測位誤差は推定した経路と実際の経路からそれぞれ6点を取り出し、それぞれの座標のずれの平均値とした。学習フェーズと測位フェーズで計測した磁気は、FPに使えるようワンショット測位と同様に座標変換した。特に測位フェーズでは、実際の利用状況を考慮して端末を自由姿勢にして行ったため、端末の姿勢推定を含めた座標変換を行った。

3.4 グループマッチングの検証結果 測位誤差の中央値は、図10の箱ひげ図に示す通り約12 mとなり、端末が自由姿勢であったにもかかわらず、ワンショット測位の測位精度に対して約2倍の向上となった。しかし、図11

の測位精度のヒートマップに示す通り、測位精度が悪くなりやすい場所があることが確認できた。このような場所と測位に成功した場所の磁気トレンドを比較したところ、図12に示す通り、学習用データと検証用データとのあいだに違いがあることが確認できた。磁気計測台車で再度、磁気データを取り直したところ、検証データと学習データの計測位置に少しのずれがあったためと判明した。計測点が30 cmずれた場合の磁気を計測すると、図13に示す通り磁気が大きく異なることが分かった。わずかなズレが影響して精度が悪くなった場所には、歩行ルートとすぐ横を並行して長いコンベアや、電力トランスなどの強磁界を発生する機器があり、磁界の変化が激しいといった特徴があった。

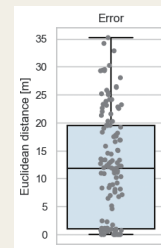


図10 グループマッチングを用いた測位誤差の箱ひげ図

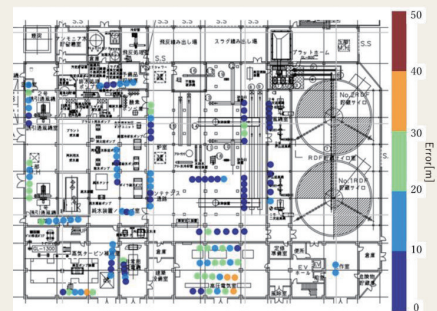


図11 グループマッチングを用いた測位誤差のヒートマップ

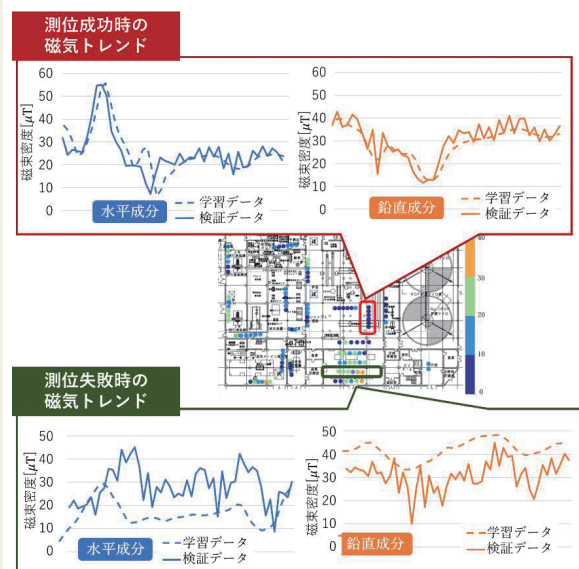


図12 測位成功時と失敗時の磁気トレンドの比較

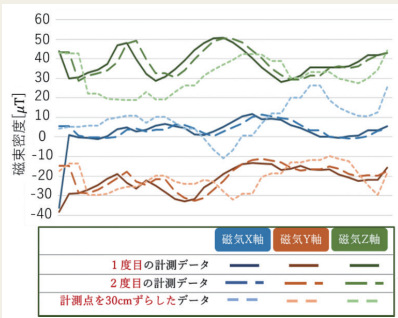


図13 計測点が僅かにずれた磁気データ

3.5 高さ方向の磁気変化に対応した測位手法

精度を悪化させる要因として、磁気に大きく影響を及ぼす機器が測位地点の周囲にある場合、グループマッチングによる検証結果から、高さ方向の磁気も大きく変化している可能性が疑われた。そこで、高さによる磁気の変化に対応するため、異なる高さで磁気データを計測し、それと被測位者の持つスマートフォンの磁気データの差分を位置推定に利用する手法を検討した。本稿では以降、本手法を差分マッチングと称す。

3.6 差分マッチングについて

図14に示すように磁気MAP作成時に、基準となる高さの磁気 M_b に加えて、異なる高さの磁気 M_d を計測する。被測位者が携帯するスマートフォンが計測した磁気をグループマッチングの場合には M_b と M_t を比較して最も類似度が高い地点を推定するが、ここではさらに、 M_b と M_d の差分 M_{bd} と M_t と M_d の差分 M_{td} を比較して位置推定に活用する。高さ方向のずれによって磁気が大きく変化してしまう場所においては、差分磁気を測位用いることで測位に使用するデータ次元数が増え、測位精度向上につなげられる可能性がある。以下、学習フェーズと測位フェーズの2段階に分けて手法を説明する。

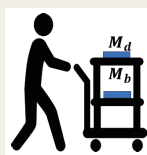


図14 高さの異なる2点での計測

3.6.1 学習フェーズ

グループマッチングと同じ方法で磁気トレンドを収集する。ただし、磁気は基準となる高さ M_b と、それとは異なる高さ M_d の2点で計測を行う。 n 回目に計測した、基準となる高さの磁気、異なる高さの磁気、位置情報は m_b^n, m_d^n, p_b^n と表現する。

3.6.2 測位フェーズ

初めにグループマッチングと同様の手順で、 M_t と M_b の類似度 S を求める。今回はもう一つ求める類似度と区別するために、 S_b とする。つぎに、基準高さの磁気と高さの異なる磁気の差分と、被測位者が計測した磁気と高さの異なる磁気の差分を求める。任意の n 番目に計測された磁気 M_b^n と M_d^n の差分は、 $M_{bd}^n = [m_b^n - m_d^n, m_b^{n+1} - m_d^{n+1}, \dots, m_b^{j+n} - m_d^{j+n}]$ であり、 M_t^n と M_d^n の差分は、

$$M_{td}^n = [m_t^1 - m_d^n, m_t^2 - m_d^{n+1}, \dots, m_t^{t+1} - m_d^{t+n}]$$

を求める。これらの類似度は、

$$S_d = [\text{DTW}(M_{bd}^1, M_{td}^1), \text{DTW}(M_{bd}^2, M_{td}^2), \dots, \text{DTW}(M_{bd}^n, M_{td}^n)]$$

である。本手法で、位置推定を用いる類似度は

$$S = w_b S_b + w_d S_d$$

と表す。ここで、 w_b と w_d はそれぞれの類似度の重みであり、磁気の各要素の絶対値の和

$$U_t = \sum_{q=1}^{t+1} (m_t^q)$$

$$U_{td} = \sum_{q=1}^{t+1} (m_t^q - m_d^{q+n-1})$$

を求め、 U_t と U_{td} の大きさの比率から決定する。絶対値の和が大きいかほどその磁気データに特徴があるため、そちらの結果を優先するように重みづける。最終的に得られた合計の類似度 $S = [s_1, s_2, \dots]$ の中から、最大値 s_{max} を求めるのに用いた M_b^{max} に対応する座標群 $P_{max} = [p_b^i, p_b^j, \dots]$ を、被測位者が移動した経路として推定する。

3.7 差分マッチングの検証方法

学習フェーズでは、高さの異なる2点で0.3 m刻みに磁気計測を行った。計測の際、グループマッチングと同様に、磁気計測台車を使用し、計測位置をガイドするロープを用いた。測位フェーズでは、グループマッチングの場合と同様に、検証データはスマホを手に保持して歩きながら計測した。それぞれのフェーズで計測した磁気の座標変換もグループマッチングの場合と同様である。

3.8 差分マッチングの検証結果

測位誤差の中央値は、図15の箱ひげ図に示す通り約0.3 mとなり、グループマッチングを用いた場合の約12 mに対して大きく精度が改善した。また、図16の測位精度のヒートマップに示す通り、グループマッチングで精度が悪かった場所においても、精度よく測位出来ていることを確認した。

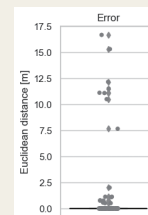


図15 差分マッチングを用いた測位誤差の箱ひげ図

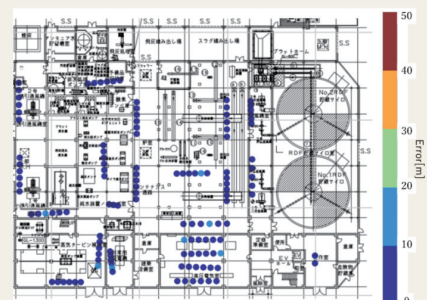


図16 差分マッチングを用いた測位誤差のヒートマップ

4. フロア識別の改善手法

2.4節で示した通り、気圧差を用いた線形回帰によるフロア識別成功率は89%(前と同じ)であった。ここでは、フロア識別成功率をさらに高める手法を提案する。

4.1 LPWAと気圧を用いたフロア推定 本手法ではフロア推定に用いる説明変数として、線形回帰の際に用いた気圧差に加えて、ISMバンドの一つであるLPWAのRSSIを利用した。LPWAは900 MHz帯の周波数を利用するため、2.4 GHz帯を利用するWi-FiやBluetooth Low Energy (BLE) に比べ障害物に対する透過が強く、長距離の通信が可能である。実際に清掃工場でLPWAとWi-Fi (2.4 GHz) の電波到達距離の比較をした結果が図17であり、LPWAはWi-Fiより広範囲をカバーできることが分かる。

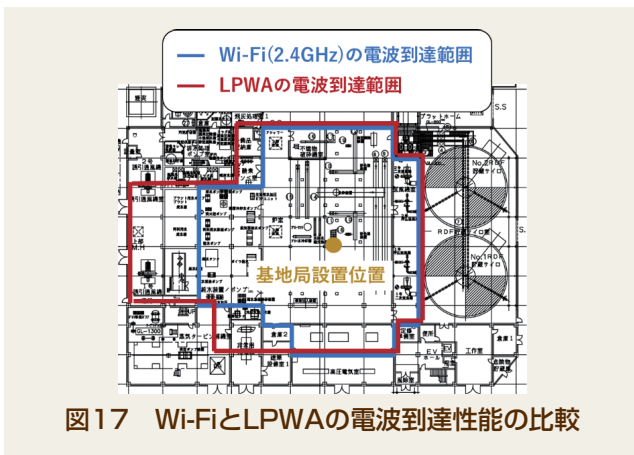


図17 Wi-FiとLPWAの電波到達性能の比較

4.2 フロア推定手法について 図18にフロア推定手法のデータフローを示す。座標が既知の地点における特徴量を学習するフェーズと、座標が未知の地点にて計測されたセンサデータを用いて、エリアを推定する測位フェーズに分かれる。学習フェーズでは、分類器に地点毎に計測されたLPWA RSSIと気圧差を説明変数、正解エリアを示すラベルを目的変数として入力し、分類器(Random Forest)を学習する。測位フェーズでは、未知の地点にて計測されたセンサデータを元に、学習済みの分類器を用いてエリアを推定する。

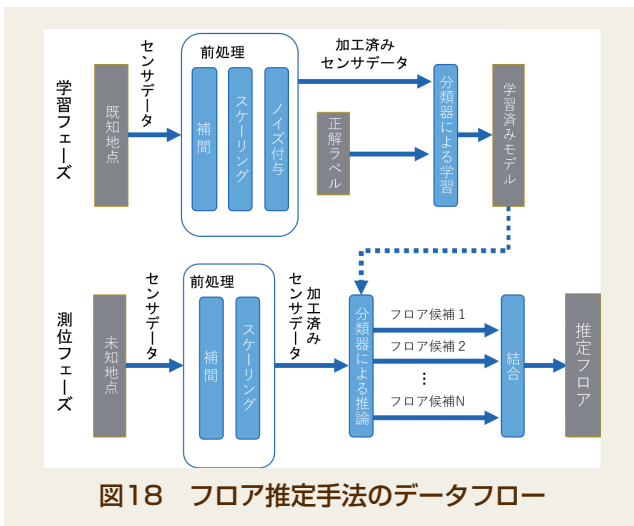


図18 フロア推定手法のデータフロー

4.3 検証条件 データセットには、清掃工場内の座標が既知の282地点における4台のLPWA発信機からのRSSI、基準地点との気圧差が含まれる。各計測地点間の距離は約6 mである。測位対象空間は10階層から構成されており、全階層の延べ床面積は計10,248.2 m² (エリア数:16、最小エリア:83.8 m²、最大エリア:1,786.9 m²、平均:640.5 m²)である。最初に収集したセンサデータをトレーニングデータとし、別の日に収集したセンサデータをテストデータとした。これらのデータセットを用いて、分類器のトレーニングとテストを行い、フロア推定精度について評価した。

4.4 検証結果 気圧差のみでフロア推定した結果の混同行列を図19、気圧差とLPWAのRSSIによってエリア推定した結果の混同行列を図20に示す。気圧差のみを説明変数として場合、フロアの識別成功率は85%となり、線形回帰による結果よりも低くなった。しかし、説明変数へLPWAのRSSIを加えることでフロア識別成功率は93%となり、線形回帰による識別成功率を上回る結果となった。

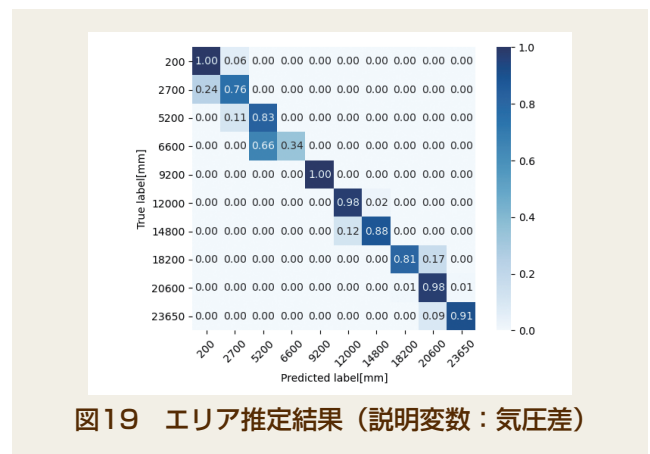


図19 エリア推定結果 (説明変数: 気圧差)

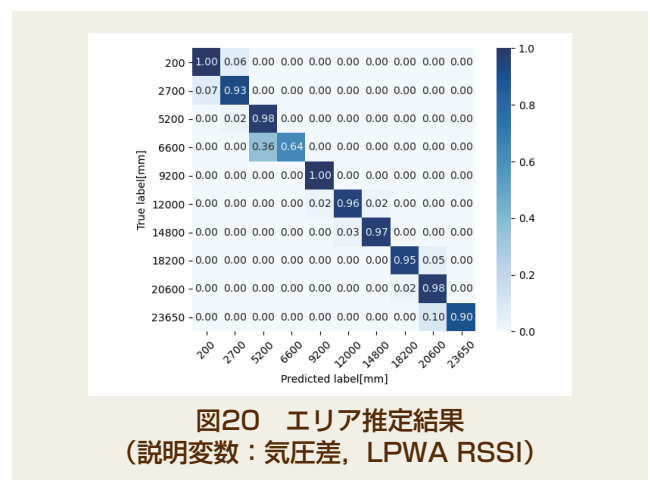


図20 エリア推定結果 (説明変数: 気圧差, LPWA RSSI)

5. 結言

清掃工場における磁気測位手法を提案し、測位精度について検証した。最も測位対象エリアが広いフロアにおいて、ワンショット測位では測位誤差の中央値が24 mであったが、グループマッチングでは12 mまで半減した。

そして差分マッチングでは、0.3 mまで改善し実用になる精度を得た。

また、フロア推定については気圧差を用いた線形回帰式では推定精度が89 %となったが、気圧とLPWAのRSSIを説明変数とした多クラス分類器を用いると93 %に改善することを確認した。LPWAはスマートフォンに内蔵されていないため、別途機器が必要になるが、携帯各社が運用しているプラチナバンド(800 MHz前後)が場内通話用に導入されている施設であれば代用できる可能性がある。

以上のことから清掃工場においては、通路や機側など歩行中心のエリアでは、差分マッチングが有効であることが分かった。また、機械室や作業空間等、作業員が滞留しがちな見通しの良い小スペースのエリアであれば、RSSIと磁気による相互補完型FP¹⁾で歩行を伴わなくても実用精度は得られると考えられる。これらを適宜組み合わせることで清掃工場全域において作業員の位置を高精度に測位できるシステム構築が可能になると考える。なお、本手法は導入コストが比較的低額で済むことが特長である。必要なハードウェアとしては被測位者が所持するスマートフォン、およびスマートフォンで計測した磁気や気圧のデータ中継用Wi-Fiアクセスポイント(または携帯電話の回線)、そして中央制御室や遠隔拠点に設置する測位結果表示端末のコンピュータであり、これらは広く一般に流通している製品が使用できるので安価にシステムを構築できる。今後は測位計算に要する時間を短縮するための高速化アルゴリズムを検討する。

SDGsに貢献する技術

清掃工場における磁気FPを用いた屋内測位手法の開発を行った。バイタルセンサ等と併用することで屋内においても作業員の安全管理を実現し、人の健康や安全をより確かなものにすべく開発を続けていく。

参考文献

- 1) 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, **2017**, 58 (2), 384-395.
- 2) Okumura, R. ; Arai, I. Et al. : Feasibility Study of Magnetism-based Indoor Positioning Methods in an Incineration Plant, 2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), **2022**, pp.563-568.
- 3) 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧ほか: 歩行者自律測位における行動センシング知識の利用, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, **2014**, 1614-1619.

文責者

日立造船株式会社 環境事業本部
開発センター EfWプロジェクトグループ
新 佑太郎
E-mail : hitzgiho001@hitachizosen.co.jp

Study of Magnetic Positioning System for Incineration Plants

Abstract

At Hitachi Zosen, we investigated an indoor positioning method for the purpose of improving the safety management and work efficiency of workers in incineration plants. For the indoor positioning method, we used magnetic fingerprinting, which can reduce the cost of infrastructure introduction. However, it was impossible to obtain practical accuracy in an incineration plant because the larger the target area, the lower the accuracy. We then took advantage of the unique magnetic field formed from the structural features of the incineration plant, and succeeded in devising a differential matching method based on the knowledge obtained from positioning by magnetic trend. With this differential matching method, we confirmed that the target route can be positioned with about 93% accuracy. As for floor estimation, we confirmed the effectiveness of verification using a linear regression formula of air pressure difference and a machine learning method using received signal strength indicator (RSSI) of low-power wide-area (LPWA) network as a feature value. The results suggested that by combining magnetic difference matching in the aisles with Evaluation of Complementary Indoor Positioning System with Wi-Fi and Geomagnetic Fingerprinting¹⁾ in the work space, it is possible to realize a low-cost, high-precision indoor positioning system in an incineration plant.

Authors

Yutaro Atarashi (hitachi Zosen Corporation, E-mail : hitzgiho001@hitachizosen.co.jp)
Kaoru Kawabata Rei Okumura Takuya Matsunaga Ismail Arai