磁気センサと LIDAR を用いた自己位置推定手法の開発

篠原 正 俊*・Sam Ann RAHOK*

井 上 一 道*・尾 崎 功 一*

Development of Localization Method Using Magnetic Sensor and LIDAR

Masatoshi SHINOHARA*, Sam Ann RAHOK*,
Kazumichi INOUE* and Koichi OZAKI*

In mobile robot's localization, it is well known that odometry can provide a reliable accuracy in short term navigation and a very high sampling rate. However, odometry produces cumulative error because of uneven terrains or wheel slippage and this error increases proportionally with the distance traveled by the mobile robot. Therefore, it is necessary to augment odometry with other sensors to improve its accuracy. This paper proposes an estimation method of mobile robot orientation using an environmental magnetic field (magnetic field that occurs in the environment). A three-axis magnetic sensor is utilized to scan the environmental magnetic field to build a magnetic database on a grid map called "a magnetic map" with the mobile robot operated with a joystick on a desired route. The mobile robot then estimates its orientation by comparing the magnetic sensor readings with the magnetic data stored in the magnetic map. However, even if the proposed method can improve the accuracy of the odometry, positioning error still remains as a major problem in long term navigation. In this work, a localization method using Monte Carlo Localization (MCL) based on a Light Detection and Ranging (LIDAR) is utilized to fix the positioning error at the areas where landmark can be observed. The experimental results showed that the mobile robot could localize robustly in any environments with the proposed method.

Key Words: magnetic navigation, Monte Carlo Localization, mobile robot, Tsukuba Challenge

1. 緒 言

われわれはより実用的な環境での自律移動技術の開発を目指して、つくばチャレンジ¹⁾に参加してきた。最後の年である 2011 年度には、屋外環境だけでなく、エレベータの搭乗や屋内外の狭隘路を含む 1.4 km の複雑な環境下での自律移動が課題とされ、環境変化に対してロバストかつ、10 cm 程度の精度をもつ自己位置推定手法が求められた。

近年、実用的な環境における移動ロボットの自己位置推定に、パーティクルフィルタを適用した手法である Monte Carlo Localization (MCL) が盛んに用いられている²⁾。この手法は、確率的な運動モデルを使ってロボットの位置をサンプリングし、センサの観測値に最も適合したサンプルを発見する手法である。MCL を用いて高い自己位置推定精度を保つためには、有効な観測を常に入力し、パーティクルを真値近傍で密に分布させることが重要となる。これまで GPS・カメラ・LIDAR (Light Detection and Ranging) を観測に用いた研

究が報告されている。

GPS による観測の場合、人工衛星から発せられた信号が受信機に到達する間に、マルチパスや回折(周囲の高いビルなどに囲まれた場合に発生)の影響を受けることで加わったノイズを含む信号を検出し、排除することが重要となる。Ohno³⁾らは、有効な GPS の観測の判別にオドメトリを用いることを提案している。また西村⁴⁾らは、赤外線カメラを用いて上空を撮影することで、障害物領域と空領域を認識することで、有効な観測を判別することを提案している。さらに山崎⁵⁾らは、3次元地図を用いて衛星の可視性を判別する手法を提案している。しかし、屋内や高層ビル群の中では GPS による有効な観測が継続して得られないため、自己位置推定の精度が低下する問題は避けられない。

カメラや LIDAR による観測の場合、観測範囲が有限かつオクルージョンが発生する条件の中、常に MCL へ有効な観測を入力することが重要となる。山田⁶⁾らは、歩行者の影響を受けにくい高いランドマーク(高所特徴)を観測することを提案している。さらに Yoshida⁷⁾らは、観測範囲を広げるために LIDAR による観測を3次元で行なうことを提案している。しかし、ロボット周囲に人だかりが発生した状況や、開けた空間のため周囲から物理的なランドマークを観測できない状況では、有効な観測が得られないため、オドメトリによ

* 宇都宮大学工学部 宇都宮市陽東 7-1-2

* Faculty of Engineering, University of Utsunomiya, 7-1-2 Yoto, Utsunomiya

(Received April 6, 2012)

(Revised February 20, 2013)

る誤差の累積に対する補正が行なえず、自己位置推定精度が低下する問題がある。

この問題に対してわれわれは以前より、物理的なランドマークを必要としない磁気センサを用いた磁気ナビゲーション⁸⁾を提案してきた。磁気ナビゲーションでは、地磁気と環境中の磁性体から発生する磁場（以下、残留磁場とする）が合成した磁場（以下、環境磁場とする）をあらかじめ観測することで構築した磁場マップを自己位置推定に利用する。そのため、観測される環境磁場から地磁気成分を分解する必要がないため（実際に分解することは困難である）、磁性体の影響が強い環境においても、磁気センサを簡易に利用できるメリットがある。しかし、大域的な自律走行ではオドメトリによる誤差の累積が顕在化することで、位置推定精度が低下し、磁場マップとの適切な参照が行なえない問題がある⁹⁾。つまり、磁気ナビゲーションでは磁場マップとの参照を行なうために、ある程度の位置推定精度を保つことが重要となる。

本稿では、従来の磁気ナビゲーション（従来法）に改良を加えた手法（改良法）および、改良法（2章で説明）とLIDARを用いたMCLを区間ごとに切り替える手法（5章で説明）を提案する。提案手法では、磁気ナビゲーションに改良を加えることで、柔軟な経路計画および磁場変動の検出を可能とし、磁気ナビゲーション自体の性能を向上させる。さらに、LIDARを用いたMCLと切り替えることで、大域的な移動において磁気ナビゲーションの位置精度が低下する問題を解決する。手法の切り替えは、環境に合わせて手動で設定し、周囲から物理的なランドマークが観測できる区間ではLIDARを用いたMCL、開けた空間や歩行者の影響が大きい区間では改良法を用いて自己位置推定を行なう。提案手法では、パーティクル集合に対して常に有効な操作を行なうため、パーティクルの分布を真値近傍で密に保つことが可能となり、高い自己位置推定精度を保てる有用な手法である。なお、提案手法を用いてつくばチャレンジ2011の試走会において6回の完走を達成した。

本稿では、提案手法の詳細と学内にて行なった検証実験の結果を報告する。検証実験から、周囲から物理的なランドマークが観測できない区間を含み、かつ、局所的な磁場の変動を有する環境における提案手法の有用性を示す。

2. 従来の磁気ナビゲーションからの改良

本章では、従来の磁気ナビゲーション⁸⁾（従来法）と提案手法で用いる改良を加えた磁気ナビゲーション（改良法）の違いを明確にする。なお、本章の内容は磁気ナビゲーション自体の改良であり、切り替え手法とは独立した内容である。

従来法を端的に述べると、観測した合成磁場と磁場マップ上の磁場方位を比較し、その差分がゼロとなるように姿勢を制御するライントレース方式の手法である。そのため、一度経路から逸脱すると、追従経路への復帰が困難となる問題がある¹⁰⁾。また、帯磁物体（トラックなど）の移動による環境中の磁場の変動を考慮していないため、ロボットが変動した磁場を観測すると誤った制御が行なわれ、走行経路から逸脱

Fig. 1 Mobile robot

してしまう問題がある¹¹⁾。

改良法では、ロボットの状態ベクトルをグローバル座標における位置および姿勢とする。それより、走行距離のみを状態ベクトルとしてもつ従来法と比較して、柔軟な経路計画が可能となる。また、磁場マップと観測した環境磁場を用いた比較から、磁場変動の評価を行なう。つまり、改良法は環境磁場が安定している区間に限り、磁場マップと観測磁場の方位を比較することでロボットの姿勢を推定し、オドメトリによる自己位置推定を補正する手法である。なお、不安定な磁場と評価された区間では、オドメトリによる自己位置推定のみが行なわれる。

3. 移動ロボット MAUV

Fig. 1にわれわれが開発した移動ロボット「MAUV」を示す。当研究室では、公共空間におけるサービスロボットの親和性への配慮や、機能の実装を考慮したデザイン方針決定プロセスを重視し、ロボットを製作してきた¹²⁾。MAUVにおいてもそのプロセスを踏まえ、子どもに受け入れられるような外観のボディの上に、100 kg程度までの人や荷物を載せて移動することが可能である。搭載センサとして、車輪の移動量を観測するためのエンコーダ、環境認識のためのLIDAR、環境磁場を観測するための3軸の磁気センサがある。LIDARは北陽電機社製のUTM-30LXを用い、車体前方に搭載している。磁気センサはMicro Strain社製の3DM-DHを用い、X軸方向をロボット進行方向、Y軸方向を右方向、Z軸を垂直下方向に向けて、MAUVのヨー軸方向における回転中心上に搭載している。提案手法におけるMAUVの運動モデルを(1)式に示す。

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \theta_{t-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_t \cos \theta_{t-1} \Delta t \\ v_t \sin \theta_{t-1} \Delta t \\ \omega_t \Delta t \end{pmatrix} + N(0, S) \quad (1)$$

ここで、 x, y は地図上の2次元座標、 θ はヨー軸方向の回転量、 v は並進速度、 ω は回転角速度、 Δt は計算ステップ時間、 $N(0, S)$ はガウスノイズ、状態ベクトルを $\chi = (x, y, \theta)$ とした。

4. 環境磁場

本章では、環境中に生成される磁場の構成成分を分類する。加えて、磁場の変動（磁性体の出現）が観測に与える影響を調査し、その特徴を明確にする。

4.1 環境磁場の分類

環境磁場を 3 種類に分類した結果を以下に示す。

- H_e : 静的磁場 (地磁気)

地磁気観測所¹³⁾の調査によれば、現在の日本における地磁気の強さは約 46,000 nT であるのに対し、天候の変化による地磁気の変化は 10~20 nT、太陽フレアでは 200~300 nT、1 年間を通しての変化は 20 nT と、センサの分解能に対して十分に小さいといえる。これらのことから、われわれは地磁気を静的磁場 H_e と定義する。

- H_n : 準静的磁場

建物などの鉄筋構造物や地中に埋まった鉄管など、帯磁している物体から生成されるものであり、残留磁場として知られている。新納¹⁴⁾の調査によれば、この磁場は時間経過に対して性質が変化しない。しかし、新たに帯磁物体が出現した場合や、帯磁物体が移動した場合には、以前とは異なる新たな磁場が生成される。これらのことから、われわれはこの磁場を準静的磁場 H_n と定義する。

- H_d : 動的磁場

回転するモータの周囲、高架橋 (下方を自動車が通過)、地中に埋没されたケーブル (流れる電流量が変化) の地表付近では、磁場が瞬間的に変動することが経験的にわかっている。われわれは、これらの時間経過に対して変動の大きい磁場を動的磁場 H_d と定義する。

われわれは、上記の磁場が合成された環境磁場に対して、磁気センサを用いることで、3 軸それぞれの磁束密度 (B_x, B_y, B_z) を観測し、そこから算出したローカル座標における磁場方位 θ^m (XY 軸の磁束密度から算出) と Z 軸の磁束密度 B_z を磁気ナビゲーションに利用する。このとき得られる観測値 B は (2) 式で示される。なお、 μ は透磁率とする。

$$B = \mu(H_e + H_n + H_d) \quad (2)$$

磁場方位 θ^m は、磁気センサの XY 軸における磁束密度を用いて算出する ((3) 式)。また、グローバル座標におけるロボットの姿勢 θ^r とローカル座標における磁場方位 θ^m より、グローバル座標における磁場の絶対方位 θ^g を算出する ((4) 式)。

$$\theta^m = \tan^{-1} \frac{B_y - B_{y_{ref}}}{B_x - B_{x_{ref}}} \quad (3)$$

$$\theta^g = \theta^r + \theta^m \quad (4)$$

ここで、 B_x と B_y は磁気センサの XY 軸で観測したそれぞれの磁束密度を、 $B_{x_{ref}}$ と $B_{y_{ref}}$ は B_x と B_y が取りうるそれぞれの最大最小値の平均値を示している。

各磁場の性質と (2) 式より動的磁場の有無は評価式 (5) を用いて行なうことができると考えた。これは、1 ステップにおける MAUV の移動量が微小なため、動的磁場の変動に対して準静的磁場の変動が十分に小さいとしたためである。仮にステップ間の移動量が十分に小さければ、準静的磁場の変動は 0 に近づくと考えられる。

$$P_{dm} = \frac{\partial B}{\partial t} = \mu \frac{\partial H_d}{\partial t} := 1 - \frac{|\theta_t^g - \theta_{t-1}^g|}{\pi} \quad (5)$$

Fig. 2 Investigation on influence of a change of appearance of magnetic material

4.2 磁性体の出現が観測に及ぼす影響

磁気センサを用いて、学内の任意の経路に対して行なった磁場方位 θ^m と Z 軸の磁束密度 B_z の観測結果を Fig. 2 に示す。観測は異なる日に 2 回行ない、磁気センサをガイドに沿わせて動かした。また、新たな磁性体の出現が観測に及ぼす影響を調べるため、2 回目の観測では、33m 付近に恣意的に磁性体を設置した。観測結果から以下の事柄が読み取れる。

- 磁性体を恣意的に設置した周辺を除いて、異なる日時で観測した磁場方位 θ^m と Z 軸の磁束密度 B_z がおおむね一致していることから、環境磁場は時間経過に対して安定しているといえる。
- 恣意的に磁性体を設置し、準静的磁場を変動させた箇所 (Fig. 2 中の囲まれた部分) では、磁場方位 θ^m と Z 軸の磁束密度 B_z が 2 回の観測で一致していない。そこでわれわれは、あらかじめ構築した磁場マップ B^m と観測値 B の Z 軸における磁束密度を比較することで、準静的磁場の安定性 P_{sm} は評価できると考えた ((6) 式)。なお、 $B_{z_{ref}}$ は Z 軸の磁束密度が取りうる最大値を示している。

$$P_{sm} := 1 - \frac{|B_z - B_{z_{ref}}|}{B_{z_{ref}}} \quad (6)$$

5. 提案手法

5.1 提案手法概要

観測が LIDAR に限られている場合、周囲から物理的なランドマークが得られない環境では、有効な観測が MCL へ入力できないため、位置推定精度が低下する。しかし、物理的なランドマークを必要としない改良法に切り替えることで、同様の状況においても、真値姿勢の近傍でパーティクルを密に分布させることが可能となる。その結果、姿勢との関係が強い位置に対する分散を抑制することができ、自己位置推定精度の低下が抑制される。また、再び物理的なランドマークを LIDAR で観測できる環境になれば、パーティクルの分布は真値位置の近傍で密となる。結果として、磁気ナビゲーション

Table 1 Algorithm of proposed method

1: Proposed Method ($\mathbf{X}_{t-1}, u_t, {}^l z_t, {}^m z_t, {}^l m_t, {}^m m_t$):	
2: $\bar{\mathbf{X}}_t = \mathbf{X}_t = \Theta$	
3: for i = 1 to M do	
4: sample $\mathbf{x}_t^{[i]} \sim p(\mathbf{x}_t u_t, \mathbf{x}_{t-1}^{[i]})$	
5.1	evaluation of magnetic field
5.2	if magnetic field is stability
5.3	estimate attitude $\theta_t^r = f(\mathbf{x}_t^o, {}^m z_t, {}^m m_t)$
5.4	reset $\mathbf{x}_t^{[i]} = (x_t^{[i]}, y_t^{[i]}, \theta_t^r)$
5.5	endif
Attitude estimation using a magnetic map	
5.1:	$w_t^{[i]} = p({}^l z_t \mathbf{x}_t^{[i]}, {}^l m_t)$
5.2:	$\bar{\mathbf{X}}_t = \bar{\mathbf{X}}_t + \left(\mathbf{x}_t^{[i]} w_t^{[i]} \right)$
MCL using a LIDAR	
6: end for	
7: for i = 1 to M do	
8: draw i with probability $\propto w_t^{[i]}$	
9: add $\mathbf{x}_t^{[i]}$ to $\mathbf{X}_t$	
10: end for	
11: return $\mathbf{X}_t$	

ンによる大域的な移動で問題となる位置推定精度の低下を抑えることが可能となる。

5.2 改良法

5.2.1 磁場マップの構築

経路に沿って手動でオペレータがロボットを移動させ、あらかじめ環境磁場を観測することで、グリッドマップで表現された磁場マップ $\mathbf{T}$ を構築する。磁場マップに対する動的磁場の影響を小さくするために、評価式 (5) が閾値を満たした場合に限り、グローバル座標における磁場の絶対方位 θ^g と Z 軸の磁束密度 B_z を磁場マップ上の該当グリッド $\mathbf{T}_{(x,y)}$ へ保存する ((7) 式)。

$$\mathbf{T}_{(x,y)} = [\theta^g \ B_z] \quad (7)$$

$\mathbf{T}$ はグリッドで表現された磁場マップを示している。なお、磁場マップは走行経路における環境磁場のみをもつため、経路から逸脱した地点では姿勢推定を行なうことができない。

5.2.2 改良法 (磁場マップを用いた姿勢推定)

改良法のアルゴリズムを Table 1 に示す。

$\mathbf{X}$ はパーティクル集合、 $\mathbf{x}$ は各パーティクル、 u_t は制御入力、 ${}^l z_t$ は LIDAR の観測、 ${}^m z_t$ は磁気センサの観測、 ${}^l m_t$ は LIDAR を用いて構築した占有格子地図、 ${}^m m_t$ は磁場マップ、 $(x_t^{[i]}, y_t^{[i]}, \theta_t^{[i]})$ は各パーティクル $\mathbf{x}_t^{[i]}$ の状態ベクトルを示している。

2 行目では、パーティクル集合 $\mathbf{X}$ に空集合 Θ を代入する。

4 行目では、制御入力 u_t に応じたサンプリングを、運動モデル ((1) 式) に基づいて行なう。

5.1 行目では、観測した磁場に対して評価式 (5) と (6) を用

いることで、動的磁場の影響の有無と環境磁場の変動を調べる。その結果、2 つの評価式が閾値を満たす場合に限り、磁場マップ構築時から磁場が安定していると判断し、姿勢推定を行なう。

5.3 行目では、オドメトリ (制御入力 u_t を用いる) によって得られた現在の自己位置 $\mathbf{x}_t^o$ を、磁場マップ ${}^m m_t$ に入力することで、グローバル座標における磁場の絶対方位 ${}^g \theta_t$ を得る。そして、取得した磁場の絶対方位 ${}^g \theta_t$ と観測した磁場方位 ${}^m \theta_t$ の差分を求めることで、グローバル座標におけるロボットの姿勢 θ_t^r を推定する ((8) 式)。

$$\theta^r = \theta^g - \theta^m \quad (8)$$

5.4 行目では、推定されたロボットの姿勢 θ_t^r を用いて、各パーティクルの姿勢 $\theta_t^{[i]}$ をリセットする。そのため、すべてのパーティクルが一意的な姿勢を取ることにになり、結果として位置 $(x_t^{[i]}, y_t^{[i]})$ についてのみパーティクルの分布が広がることになる。

改良法の特徴として、サンプリングされたパーティクル集合に対して、真値姿勢の近傍にパーティクルを再分散させるため、パーティクルのバラつきを抑え、分布密度が疎となるのを防ぐことが可能となる。その結果、LIDAR を用いて周囲から物理的なランドマークが得られる環境に到達した際に、十分なパーティクルが真値近傍に分布する状態となる。

5.3 LIDAR を用いた MCL による自己位置推定

5.3.1 占有格子地図の構築

LIDAR を用いた MCL では、環境中に存在する建物の壁、街路樹の幹、生け垣などの物理的なランドマークをあらかじめ LIDAR で観測することで構築する地図が重要となる。MAUV はその基本方針から、LIDAR を外装内部に設置しているため、前方 180 deg の狭い視野しかもたない。また、設置高が 45 cm のために地図生成時に歩行者の影響を受けやすい問題がある。そのためわれわれは、地図生成中に歩行者の影響を受けにくい占有格子地図¹⁵⁾を生成することで、この問題に対応した。なお、占有格子地図は 20 cm × 20 cm のグリッドマップを用いて表現した。

5.3.2 LIDAR を用いた MCL

LIDAR を用いた MCL のアルゴリズムを Table 1 に示す。なお、改良法と重複する箇所の説明は省略する。

5.1 行目は、LIDAR の観測 ${}^l z_t$ とグリッドマップで表現された占有格子地図 ${}^l m_t$ を用いて各パーティクル $\mathbf{x}_t^{[i]}$ に対する尤度 $w_t^{[i]}$ を計算する。

5.2 行目は、パーティクル集合 $\mathbf{X}$ に対して新たなパーティクル $\langle \mathbf{x}_t^{[i]}, w_t^{[i]} \rangle$ を追加する。

6~11 行目では、尤度 $w_t^{[i]}$ に従ってリサンプリングを行なう。

MCL を端的に述べると、予測過程で得られたパーティクルのうち、正しいパーティクルを観測過程で探手法である。そのため、根本的に正しいパーティクルを生成する必要がある。しかし、LIDAR を用いて有効な観測を MCL へ入力でき

ない環境では、状態の不確かさを表現するために、パーティクルの分布は次第に広がる。このときパーティクル数は有限のため、分布密度が疎となり、正しいパーティクルを喪失する可能性が高くなる。一方、提案手法では改良法に切り替えることで、真値近傍で密にパーティクルを分布させることが可能となる。

6. 学内実験

6.1 実験環境と実験方法

本稿では、パーティクル数を 200 個に設定し、LIDAR を用いた MCL, 改良法 (評価式なし・評価式あり) と提案手法 (LIDAR を用いた MCL と改良法の切り替えは 20m 地点) における自己位置推定の比較実験および、評価式の有用性に関する検証実験を Fig. 3 中の直線経路 (50m) で行なった。実験環境の特徴として、LIDAR を用いて周辺から物理的なランドマークを観測できない区間 (Open Space) が途中に含まれている。

自己位置推定の比較実験は、手動で直線経路を 2 回走行させた際に得られたログデータ (エンコード, 磁気センサ, LIDAR) を入力することで行なう。1 回目で得られたログデータを用いて磁場マップと占有格子地図を構築し、2 回目で得られたログデータを用いて自己位置推定を行なう。そのため、高い自己位置推定精度が得られる手法の走行軌跡は、1 回目の地図構築時のオドメトリによる軌跡に近づき、かつ、直線的な軌跡になると考えられる。なお、2 回目のログデータの取得時には、33m 付近に恣意的に磁性体を設置した。

評価式の有効性に関する検証実験では、恣意的に設置した磁性体の影響が含まれる環境磁場を観測し、安定と評価された地点でのみ姿勢推定を行なうことで、評価式の有効性を評価する。評価式が有効である場合、推定された姿勢は 0 degree 近傍となることが考えられる (手動で直線経路を走行させたため)。

6.2 実験結果

6.2.1 自己位置推定の比較

Fig. 4 にパーティクルの分布を、Fig. 5 に自己位置推定の軌跡を示す。

LIDAR を用いた MCL では、物理的なランドマークを観測できる環境では、真値近傍でパーティクルの分布が密となり、高い自己位置推定精度を保っている。しかし、22m 付近から物理的なランドマークを観測できない状況が継続するにつれて、パーティクルの分布が疎となり、自己位置推定精度が低下している。これは、MCL に有効な観測を入力できないことで、リサンプリング過程において真値近傍でないパーティクルを複製したことが原因だと考えられる。この現象はパーティクル数が有限のときに発生する。

評価式を用いた改良法では、有効な観測が得られる区間 (0~30m) では、真値姿勢の近傍でパーティクルを密に保つことで、位置に対するパーティクルの分散が最小限に抑えられ、実用的な自己位置推定精度を保っている。しかし、磁性体を設置した 33m 付近から、パーティクルの分散が広がると共に、

Fig. 3 Experiment environment

Fig. 4 Distribution of particles

Fig. 5 Tracks of self-position estimation

自己位置推定精度が低下している。パーティクルの分散の拡大は、磁場が変動していると評価されたことで、有効な観測が得られなかったことが原因だと考えられる。自己位置推定精度の低下は、有効な観測が得られない間に発生したオドメトリによる誤差の累積を補正できなかったことが原因だと考えられる。なお、評価式を用いない改良法では、変動した環境磁場を入力したことで走行経路から逸脱する結果となった。

Fig. 6 Verification of evaluation formula

提案手法では、物理的なランドマークが観測できる環境では、LIDARを用いたMCLを用いることでパーティクルが真値近傍で密となり、高い位置推定精度を保っている。また、物理的なランドマークが観測できない環境では、改良法に切り替えることで、真値近傍で進行方向にパーティクルの分布が広がりつつ、おおむね正確な位置推定精度が保たれている。加えて、再びLIDARによる有効な観測がパーティクルフィルタに入力されることで、改良法で発生したパーティクルの分散と自己位置推定精度の低下が小さくなっている。これは、改良法で分散したパーティクル集合の中に、真値のパーティクルが含まれていた結果だと考えられる。

以上の結果より、物理的なランドマークが観測できない状況で、改良法に切り替える提案手法は有用であるといえる。

6.2.2 評価式の検証

Fig. 6に磁場マップを用いた姿勢推定結果を示す。(a)は観測されたすべてのデータに対して推定した結果を示し、(b)は評価式を用いて安定と評価された場合に限り推定した結果を示している。このとき閾値は、 $P_{dm} = 0.998$, $P_{sm} = 0.995$ であった。

(a)では、経路全域で密に推定が行なわれているが、磁性体の影響を受けた33m付近において、明らかに誤った姿勢を推定している。一方の(b)では、(a)と比べ推定が行なわれている頻度は低下するが、(a)と比較すると磁性体の変動を評価式によって検出しているのが読み取れる。

6.3 つくばチャレンジ2011における考察

つくばチャレンジ2011の実験走行では、提案手法を用いて6回の完走を達成している。LIDARを用いたMCLと改良法の切り替えは、あらかじめ手動で選択し、周辺から物理的なランドマークが確実に観測できる環境では、LIDARを用いたMCLを選択し、それ以外は改良法を選択した¹⁶⁾。

公園を通過した先では、磁気センサの観測にさまざまなノイズが加わるため、 P_{dm} と P_{sm} の設定に苦労した。特に、橋の上では構造物として含まれる鉄骨の影響のほかに、下を通過する大型トラックやバスの影響を受けるため、閾値の調整に試行錯誤した。一方、公園内では評価式を用いなくとも走行が可能であった。経験的なものであるが、公園などでは数cm間隔で姿勢推定が行なわれるのに対して、橋やデパート前

では20cm間隔で姿勢推定が行なわれている印象を受けた。これは観測点の移動に対する環境磁場の変動が、磁場マップのグリッドサイズに対して大きいことが考えられる。

7. 結 言

本稿では、改良法(磁場マップを用いた姿勢推定)とLIDARを用いたMCLを環境に応じて切り替える自己位置推定手法と学内にて行なった検証実験の結果を報告した。

移動ロボットの自己位置推定にLIDARを用いたMCLを適用した手法の有効性が示されているが、ロボット周囲から物理的なランドマークを観測できない状況では、パーティクルの分布が疎になることで、実用的な自己位置推定精度を保つことが難しくなる。

本稿では、物理的なランドマークを必要としない磁気ナビゲーションとLIDARを用いたMCLを環境に応じて切り替えることを提案した。提案手法では、あらかじめ構築した磁場マップを用いることで、環境に対して絶対的な姿勢推定を経路全域で可能としている。

提案手法とLIDARを用いたMCLを検証実験によって比較した結果、LIDARを用いたMCLでは自己位置推定精度が低下してしまう環境においても、提案手法では高い精度で自己位置推定が可能であった。

提案手法は、物理的なランドマークが観測できない開けた空間を有する市街地においても、安定した自己位置推定が可能となる有用な手法である。

謝辞 ロボットの製作には、(株)FASOTECからは3D CAD教育、オリエンタルモーター(株)からは駆動モータ、北陽電機(株)からはLIDARの提供を受けた。また、産総研横塚将志氏、宇都宮大学計測工学研究室吉田大輔氏(2011年修了)、同研究室片寄浩平氏、島田遼氏から支援を受けた。また、査読者からいただいた貴重な複数の助言や指摘は、本論文の改善に大変役立った。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) (財)ニューテクノロジー振興財団:つくばチャレンジ, <http://www.ntf.or.jp/challenge/>
- 2) F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard and S. Thrun: Monte Carlo Localization for Mobile Robots, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1322/1328 (1999)
- 3) K. Ohno, T. Tsubouchi, B. Shigematsu and S. Yuta: Differential GPS and Odometry-based Outdoor Navigation of a Mobile Robot, Adv. Robotics, **18**, 611/635 (2004)
- 4) 西村, 目黒, 村田, 天野, 橋詰, 瀧口: 赤外線全周カメラを用いたGPS測位の高精度化, GPS/GNSSシンポジウム(2006)
- 5) 山崎, 竹内, 大野, 田所: 三次元地形情報およびGPSを用いたパーティクルフィルタによるマルチパスを考慮した自己位置推定, 日本ロボット学会誌, **29**-8, 702/709 (2011)
- 6) 山田, 石田, 関口, 岡村, 福永, 大矢: 高所特徴による自己位置推定を用いた明示的な動作計画に基づく屋外自律ナビゲーション, 日本ロボット学会誌, **30**-3, 253/261 (2012)
- 7) T. Yoshida, K. Irie, E. Koyanagi and M. Tomono: A Sensor Platform for Outdoor Navigation Using Gyro-assisted Odometry and Roundly-swinging 3D Laser Scanner, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Sys-

tems (2010)

- 8) S.A. Rahok, Y. Shikanai and K. Ozaki: Trajectory Tracking Using Environmental Magnetic Field for Outdoor Autonomous Mobile Robots, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1402/1407 (2010)
- 9) 吉田, 野永, 井上, 飯野, 手塚, 菊地, 篠原, S.A. Rahok, 尾崎: 自立移動ロボット MAUV の開発, つくばチャレンジシンポジウム参加レポート集, 57/58 (2010)
- 10) 尾崎, S.A. Rahok: 磁気ナビゲーション法による自立走行, つくばチャレンジシンポジウム参加レポート集, 59/60 (2010)
- 11) S.A. Rahok, 井上, 松田, 室井, 尾崎: 磁気ナビゲーション法による自立走行, つくばチャレンジシンポジウム参加レポート集, 65/66 (2011)
- 12) 井上, 尾崎: 公共空間における親和性を考慮した自律移動ロボットデザインの提案, 日本感性工学会論文誌, 9-2, 197/204 (2010)
- 13) 地磁気観測所 (気象庁), <http://www.kakioka-jma.go.jp>
- 14) 新納敏文: 環境磁場計測方法の事例調査 (その 3), 学術講演梗概集, D, 環境工学, 181/182 (2000)
- 15) S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: *Probabilistic Robotics*, MIT Press (2005)
- 16) 篠原, 吉田, 井上, S.A. Rahok, 片寄, 島田, 尾崎: 環境磁場とマップマッチングを用いたナビゲーション手法の開発, 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 201-1 (2011)

[著 者 紹 介]

篠 原 正 俊

2011 年宇都宮大学機械知能システム工学科卒業。同年より同大学大学院工学研究科博士前期課程に在籍。移動ロボットに関する研究に従事。

Sam Ann RAHOK (正会員)

2011 年宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年同大学地域共生研究開発センター大学院 VBL 部門研究員として研究に従事, 現在に至る。博士 (工学)。

井 上 一 道

2004 年 (株) エイム入社。自動車用部品の設計開発に従事。2008 年より宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程に在籍。感性評価を取り入れたロボットデザインの研究を進めている。

尾 崎 功 一

1996 年宇都宮大学工学部助手。97 年同大講師。2002 年同大学工学研究科助教授を経て, 現在は同大学教授。移動ロボット, ロボット技術応用に関する研究に従事。博士 (工学)。