磁場の実験的解析に基づく磁気ナビゲーション法の実装

赤井直紀^{*1} Sam Ann Rahok^{*2} 片寄浩平^{*1}
島田遼^{*1} 井上一道^{*1} 尾崎功一^{*1}

Implementation of Magnetic Navigation Method based on Experimental Analysis of Magnetic Field

Naoki Akai^{*1}, Sam Ann Rahok^{*2}, Kohei Katayose^{*1},
Ryo Shimada^{*1}, Kazumichi Inoue^{*1} and Koichi Ozaki^{*1}

In practical use of automatic guided vehicles, magnetic markers are widely used. However, an approach of which pattern of magnetic intensity in usual environment is defined as landmarks is not investigated. This reason is that it is difficult to be known environmental magnetic field since magnetic intensity is invisible. This paper shows investigation of environmental magnetic field in actual environment and describes implementation of the magnetic based navigation, magnetic navigation method. As the magnetic investigation, magnetic intensity of the mounted devices in a mobile robot was measured, and condition of efficient layout of the devices was obtained. By the measurement of environmental magnetic field in mentioned condition, pattern of magnetic intensity that is suitable as a landmark is shown in this paper. The mobile robot records magnetic intensity on its travel path as magnetic map, and achieves stable navigation based on the magnetic map. In this paper, performance of the magnetic navigation method is shown by an experiment.

Key Words: Environmental Magnetic Field, Magnetic Navigation Method, Mobile Robot and Analysis

1. はじめに

実用稼働している無人搬送車の多くは、経路上に設置された磁場の目印をトレースすることで安定した走行を実現している。このように、ロボットが安定した自律走行を行うために磁場を利用することは有力であるが、目印設置等の経路設定にかかるコストが高い[1]。そこで筆者らは、環境中にそのまま存在する磁場（以下「環境磁場」）を利用した走行法（磁気ナビゲーション法：Magnetic Navigation Method [2][3]）を提案してきた。

磁場方位のように、環境磁場の利用は古くからある考え方であり、一見容易なように感じられるかもしれない。しかし、地上、特に建物などの人工物に囲まれた環境では、磁性体による地磁気の乱れが多々存在するため、安定した方位を得ることは困難である。これまで渡辺らや Woong らは、磁場方位を利用してロボットの姿勢を推定する方法を提案してきた[4][5]。これらの論文では、磁場の乱れる場所の存在を指摘しながらも、他のセンサを利用するなど、磁場の乱れをいかに回避するかを課

題としている。これに対し筆者らが提案している磁気ナビゲーション法は、磁場の乱れを回避するのではなく、それを目印とした位置推定を行うことを特徴とした自律走行法である。これまで著者らは、磁気ナビゲーション法によってつくばチャレンジでの課題である 1 [km] を越える自律走行を達成してきた。

しかし磁気ナビゲーション法は、GPS や LIDAR (Light Detection and Ranging) を用いたナビゲーション法[6][7]と比べ応用事例が少ない。これは、磁場が不可視であり直感的に把握できないことが理由と考えられる。著者ら自身も、環境磁場の把握については経験的なところが多く、磁気ナビゲーション法が容易に利用できる技術ではないと考えている。さらに問題となるのは、ロボットに搭載される電子機器が磁性体となることである。当然ながらこのことは、周囲の磁場に影響を及ぼすため、磁気ナビゲーション法に対しても影響を与えることとなる。

そこで本論文では、ロボットに搭載される電子機器および環境磁場を実験的に解析することで、それらがどのような性質を持つかを調査することとした。そして、この調査結果に基づいて磁気ナビゲーション法の実装を行い、実際に評価実験を行うことで本手法の有用性を考察することとした。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章では、磁気ナビゲーション法概念について述べる。3 章では、ロボットに搭載される電子機器や環境磁場について実験的に解析すること

原稿受付 2012 年 12 月 10 日

^{*1}宇都宮大学

^{*2}小山工業高等専門学校

^{*1}Utsunomiya University

^{*2}Oyama National College of Technology

でその性質を明らかにする。4章では、3章の結果に基づいて磁気ナビゲーション法の実装を行う。5章では、実装した磁気ナビゲーション法を用いて走行実験を行い、本手法の有用性を考察する。6章において本研究をまとめる。

2. 磁気ナビゲーション法概念

2.1 環境磁場を用いたナビゲーション法

文献[4][5]で提案されているように、磁場の乱れがない地点において、磁場方位を用いた姿勢推定を行うことは有用である。しかし実際の環境では、鉄骨などの磁性体が磁場を乱す区間が存在するため、姿勢推定を行うことが難しい区間も存在する。著者らが提案している磁気ナビゲーション法では、このような磁場の乱れを利用して位置推定を行う。また、それ以外の磁場の安定している地点では、文献[4][5]で提案されているように、磁場方位を用いた姿勢修正を行う。これらは周囲の動的障害物（磁性体を除く）から影響を受けないため、磁気ナビゲーション法は様々な環境で利用することができる。

Fig. 1 は、磁場の乱れを用いた位置推定法概念図である。鉄骨などの磁性体は、残留磁場と呼ばれる磁場を生成する[8]。残留磁場は磁性体により生成されるため、強さが場所ごとに変化し、時間的には安定するという性質を持つ。筆者らが提案している磁気ナビゲーション法では、オドメトリによる位置推定の累積誤差を磁場の乱れを利用して修正している。

残留磁場を利用した位置推定法では、次の二つの方法をとることができる。(1) 環境磁場を空間地図として取得しこれを利用する方法、(2) ロボットの経路上およびその周辺の磁場のみを利用する方法である。広い範囲を移動するロボットにとっては(1)の方法が望ましいが、環境磁場すべてを計測して地図化するのは手間のかかる作業である。一方(2)の方法では、位置推定は指定した経路周辺のものに限られてしまうが、移動する経路を特定することができれば、(2)の方法でも十分である。

2.2 磁場マップ

本稿では、(2)の方法による磁気ナビゲーション法について述べる。なお(1)の手法の詳細は文献[9]に譲る。

ロボットの経路は、移動距離および姿勢からトポロジ的に表現することができる。この経路情報に基づいて環境磁場情報 $M=[M_{b,0}, M_{b,1}, \dots, M_{b,N}, M_{\theta,0}, M_{\theta,1}, \dots, M_{\theta,N}]$ を記録することで、経路周辺の磁場について知ることができる。ここで、 N は磁場データを記録した地点（ノード）の数であり、 M_b は磁場強度、 M_θ は磁場方位をそれぞれ表す。便宜上、 $M_n=[M_{b,n}, M_{\theta,n}]$ とする。本研究では、経路情報に基づいて環境磁場を記録したものを「磁場マップ」と定義する。

Fig. 2 は、磁場マップの実装例である。距離ごとに磁場強度 $M_{b,n}$ が記録されていることによって、ロボットは経路上の磁場の変化を識別することができる。また、磁場強度を用いれば磁場方位 $M_{\theta,n}$ を計算することができる。磁場方位を用いることで、ロボット自身の姿勢を利用しなくともトポロジ的な地図表現を行える。さらに付加情報として、各ノードに環境磁場の性質を記録する。これには、磁場の乱れのパターンを識別するための識別情報 S_n と、磁場を制御に利用する量を調整する重み情報 W_n の2種類を用いる。これらを利用して経路周辺の

Fig. 1 Localization method using residual magnetism

Distance [m]	Magnetic field information M		Additional information	
	Intensity [T]	Azimuth angle [rad]		
$\vdots$ d_n	$\vdots$ $M_{b,n}$	$\vdots$ $M_{\theta,n}$	$\vdots$ S_n	$\vdots$ W_n
d_{n+1}	$M_{b,n+1}$	$M_{\theta,n+1}$	S_{n+1}	W_{n+1}
d_{n+2}	$M_{b,n+2}$	$M_{\theta,n+2}$	S_{n+2}	W_{n+2}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Fig. 2 Implementation example of a magnetic field map

Fig. 3 Control algorithm of the magnetic navigation method

磁場の性質を把握し、磁場をロボットの制御に対して有効に利用できるようにする。

2.3 ナビゲーションアルゴリズム

Fig. 3 には、磁気ナビゲーション法の制御アルゴリズム図を示す。磁気ナビゲーション法は、磁場マップ、位置推定モジュールそしてコントローラから構成される。磁場マップは、自律走行を行う事前に作成しておく。前節で述べたように、磁場マップには経路情報に対応した磁場情報と付加情報が記録されている。

Fig. 4 には、磁場の乱れを利用した位置推定法の概略図を示す。走行距離に対応して磁場強度を記録することで、経路上における磁場の変化を識別できる。位置推定モジュールにおいて、磁場情報 M と磁気センサの計測値 b を利用してロボットの状態 X を修正する。なお本研究では、ロボットの状態を走行距離 d のみで表すこととしている。

Fig. 4 Localization using variation of magnetic field intensity based on a magnetic field map

Fig. 5 Differential of magnetic field intensity on a path

しかし走行距離の修正のみでは、経路に対する横方向の誤差が累積する。そこでこの誤差を修正するために、走行経路の左右の磁場強度 lM_b , rM_b を利用する。磁場の乱れが存在する区間では、Fig. 5 に示すように、経路の左右によって磁場強度が変わる区間がある。このような区間では、現在計測している磁場強度と走行経路上の磁場強度が同じになるようにロボットを制御することで、走行経路にロボットを近づけることができる。このような、横方向誤差修正を行うことができる磁場の乱れが存在する区間を識別するために識別情報 S を利用する。この詳細については 4.2 節で述べる。

コントローラでは、ロボットの現在位置に対応した磁場マップ上の磁場情報 M_n と磁気センサの計測値 b の差分を求め、これを零にするような制御を行うことを基本としている。しかし、磁場が乱れた地点などでこのような制御を行った場合、ロボットが蛇行することがある。これを防ぐために、付加情報 S_n と W_n を利用して求めた差分を修正することで、制御に利用する偏差 e を求める。最終的に、求めた偏差 e の各値が零になるようにロボットの姿勢を制御することで姿勢修正を行う。この詳細については 4.4 節で述べる。

3. 磁場の実験的解析

3.1 電子機器が磁気センサに及ぼす影響

磁気センサは環境だけでなく、ロボットに搭載された電子機器からも影響を受ける。この影響は、磁気ナビゲーション法における自己位置推定やコントローラの部分に顕著に現れ、指定経路の追従を困難にさせる。これを回避するためには、磁気センサを電子機器から離さなければならない。しかし、ロボットのサイズには制限があり、確保できる距離には限界がある。そこで、ロボットに搭載される代表的な電子機器をいくつか選び、その影響がどれほどあるかを検証することとした。本研究では、モータ、バッテリーおよび PC を 2 種類ずつ調べた。モータは DC ブラシモータと DC ブラシレスモータ、バッテリーはサイズの異

Fig. 6 Measurement scheme of influence from a electric device

Fig. 7 Investigation result on influence from electric devices

なるもの、PC は磁界シールドがあるものとないものをそれぞれ調べた。またそれぞれの検証では、モータなら回転時など、それぞれの機器が稼働している状態で行った。

電子機器の影響の調べ方の概略図を Fig. 6 に示す。まず、周囲に機器がない状態で磁気センサを用いて磁場強度を計測する。そして機器を配置した後、機器とセンサの距離を変化させながら再び磁場強度を測定していき、機器がない状態との差分を計測していくこととした。なお本検証で利用する磁気センサ (3DM-DH) は、3 軸の磁場強度を計測でき、これを用いてヨー、ロールおよびピッチ軸回りの磁場方位を計測できるものである。各軸回りの磁場方位はそれぞれの軸の磁場強度から算出されているため、本検証では各軸の磁場強度の影響のみを検証することとした。磁気センサにおける各軸の方向は、センサの前後方向を x 軸、左右を y 軸、上下を z 軸としている。また本検証では、1 測定につき 10 [Hz] で 5 [s] 測定を行い、最も変化が大きいときの値を記録することとした。

影響を調べた結果を Fig. 7 に示す。同じ種類の電子機器でも影響の現れ方に差があることが見てとれる。また、影響の少ない機器であれば、距離を 10 [cm] 程確保するだけで影響がほとんどなくなることが分かる。すなわち、これらのことに留意す

Fig. 8 Distribution of magnetic field intensity around magnetic materials

Fig. 9 Distribution of magnetic field intensity next to magnetic materials

Fig. 10 Magnetic field azimuth angle on an area in stable magnetic field

Fig. 11 Magnetic field azimuth angle on an area in unstable magnetic field

れば、ロボットに搭載された磁気センサでも、機器の影響を受けずに環境磁場を計測できることが分かった。

3.2 磁場の乱れの目印としての利用

Fig. 8 には、磁性体の影響を強く受けた区間の磁場強度の計測例を示す。なおこの計測例では、X 軸方向をロボットの進行方向としている。またこの計測結果は、単一の磁気センサを用いて各地点の値を計測して得られた結果であり、計測の間隔は 20 [cm] とした。以下に示す **Fig. 9**、**Fig. 10** および **Fig. 11** の結果も同様に計測したものである。

Fig. 8 に示す結果が得られた地点 (**Fig. 14** の A 地点) は幅約 4 [m] の歩道であり、地下に排水管が埋設されている。排水管は、X が約 2 [m] と 5 [m] の 2 箇所であり、Y 方向に水平に埋設されている。磁気センサと排水管との距離は 20 [cm] 以上ある。**Fig. 8** に示す計測例は、z 軸 (磁気センサの上下) 方向の

磁場強度である。排水管は地下に埋設されており、この地点では z 軸方向に対して大きな影響が現れる。そのため、z 軸方向の変化が最も目印として利用しやすい特徴的な変化となる。もちろん、磁性体が磁気センサの x 軸、または y 軸方向に存在していれば、その軸方向の磁場強度が特徴的に変化することになる。

Fig. 9 には、走行経路の横方向に磁性体が存在する区間の磁場強度の計測例を示す。この地点 (**Fig. 14** の B 地点) も幅約 4 [m] の歩道であり、約 5 [m] 離れた道の横にある建物内の磁性体の影響を受けている。この磁場強度も磁気センサの z 軸方向のものである。走行経路の横方向 (Y 軸方向) に対して、磁場強度が傾斜していることが確認できる。なおこの地点の左右方向の磁場強度は、**Fig. 8** に示すような特徴的な変化を示している。

これらの計測結果から、まず、環境中に存在する磁性体は、ロボットに搭載される電子機器よりも大きな影響を及ぼすことが分かった。すなわち、ロボットに搭載した磁気センサでも、これらの影響を目印として検知できる。そして、上述した二つの磁場の乱れは、それぞれ異なる利用ができる。前者は進行方向 (X 軸方向) に対して特徴的な変化を示すため、進行方向の位置推定を行うために利用できる。一方後者は、進行方向に対して横方向に特徴的な変化を示しているため、進行方向に対する横方向の位置推定を行うのに利用できる。これらの位置推定が行えれば、ロボットをナビゲーションすることができる。これらのことから、磁場の乱れを利用してロボットの位置推定ができることが分かった。

さらにこれらの計測結果から、計測間隔が 20 [cm] でも十分に磁場の乱れを検知できていることが確認できる。つまり、磁場マップのデータ記録の分解能は 20 [cm] 以下であれば十分であることが分かった。また、磁気ナビゲーション法によって発生する経路に対する横方向の誤差は、最大でも 1 [m] 程度である [2] [3]。このことと **Fig. 9** の結果から、**Fig. 5** に示す左右の磁場強度を取得する際には、走行経路より約 1 [m] 離れた地点のデータを記録するのがよいといえる。

3.3 磁場方位を用いた姿勢修正

Fig. 10 には、磁性体の影響を受けていない区間における磁場方位の計測例を示す。なお本検証では、磁気センサのヨー軸回りの磁場方位を計測している。この地点 (**Fig. 14** の A 地点の約 30 [m] 右) は、周囲には何も存在しない開けた区間となっている。この区間では、ほとんどの地点で同程度の値が計測されていることが分かる。そのため、どの地点の方位を比較しても差はほとんど零となる。つまり、自律走行時に計測している磁場方位と、事前に登録した磁場方位の差分が零になるように制御すれば、どの地点においてもロボットの姿勢を一意に修正できる。このことから、磁場が安定している区間では、磁場方位を用いた姿勢修正が有用であることが分かった。

Fig. 11 には、磁性体の影響を受けている区間における磁場方位の計測例を示す。この地点 (**Fig. 14** の B 地点) の磁場方位の値は、変化が大きいことが分かる。この地点において、前述したような磁場方位の比較による制御を行った場合、参照する事前登録データが少しでも異なった場合、ロボットの姿勢修正が失敗することになる。つまりこの地点では、磁場方位を利用

した姿勢修正を行うことが困難であることが分かった。しかしこの地点では、多くの場合 Fig. 8 や Fig. 9 に示すような磁場の乱れが存在する。そのため、位置推定に利用できる磁場の乱れが存在する場合が多い。

4. 磁気ナビゲーション法の実装

4.1 ハードウェア構成

前章において、磁気センサが電子機器から受ける影響の性質を示した。この結果から、ロボットを構成する電子機器を選定する際に留意しなければいけないことは、機器の種類により影響に差があることと、機器と磁気センサ間の距離を十分に確保することである。そこで本研究では、まず機器をロボットの大きさを考慮して選定し、その後、センサに及ぼす影響をそれぞれ検証し、影響がなくなる距離を確保することとした。

Fig. 12 には、本研究で開発したロボットを示す。また Fig. 13 には、ロボットの断面図と代表的な電子部品の配置を示す。本ロボットは前輪を両輪独立制御方式としており、その場旋回を行うことができる。駆動軸中心の地面から 50 [cm] の高さに 3 軸磁気センサ (3DM-DH) を 1 台搭載した。磁気センサの各軸の方向は、ロボットの進行方向を x 軸、その 90 [deg] 右方向を y 軸、そして地面方向を z 軸とした。磁気センサの設置場所は、すべての電子機器から 20 [cm] 以上の距離を確保している。また、ロボット前方に LIDAR (UTM-30LX) を搭載し、これを衝突回避のみに利用することとした。

4.2 磁場マップの構築

磁気ナビゲーション法では、事前に走行経路でロボットを手動で走行させて磁場マップを構築する。磁場マップには、走行経路上の磁場情報 M_b と M_θ 、付加情報 S と W をそれぞれ走行距離に対応して記録した。磁場マップの構築の際には、ロボットを約 0.6 [m/s] で走行させ、10 [Hz] で磁場の観測を行うこととした。また、磁場マップにおける情報の記録間隔は、前章での計測結果を基にして 10 [cm] とした。10 [cm] の間隔で複数回の観測が行われた際には、その平均値を記録していく。ま

Fig. 12 View of a robot with the armor and without the armor

Fig. 13 A sectioned drawing of the robot

た $M_{b,n}$ には 3 軸方向の磁場強度 $m_{x,n}$, $m_{y,n}$, $m_{z,n}$, M_θ にはヨー軸回りの磁場方位 $m_{\theta,n}$ を記録した。また識別情報 S_n には、それぞれ 3 軸方向の磁場の乱れを識別するために $s_{x,n}$, $s_{y,n}$, $s_{z,n}$ を記録した。さらに、重み情報 W_n には、3 軸方向の磁場強度とヨー軸回りの磁場方位を用いた修正量を決定するために $w_{x,n}$, $w_{y,n}$, $w_{z,n}$, $w_{\theta,n}$ をそれぞれ記録した。

識別情報 S_n は、Fig. 5 に示すような磁場の乱れを有する区間を識別するために利用する。そのため、経路上の磁場強度 $M_{b,n}$ および左右の経路の磁場強度 ${}^lM_{b,n}$, ${}^rM_{b,n}$ を用いて、以下の式に従い決定した。

$$s_{k,n} = \begin{cases} 1 & ({}^l m_{k,n} + m_t > m_{k,n} > {}^r m_{k,n} - m_t) \\ -1 & ({}^l m_{k,n} - m_t < m_{k,n} < {}^r m_{k,n} + m_t) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで k は、 x, y, z の添字をそれぞれ表し、 m_t は任意の閾値である。本研究では m_t は、Fig. 9 の計測結果も参考にして $0.01[\times 10^{-4} \text{T}]$ とした。なお、左右の磁場情報の取得も、ロボットを手動走行させることで行う。

重み情報 W_n は、実際に走行経路でロボットを走行させ、そのときのロボットの動作を基にして実験的に決定することとした。具体的には、初期は一意に重みを設定しておき、走行させた際にロボットが蛇行するようであれば重みを下げていくことで決定することとした。

4.3 走行距離の推定

ロボットには自律走行を行う事前に、Fig. 8 に示すような変化がある地点と、その変化の最大値を教示しておく。ロボットは、自律走行時は 10 [cm] ごとに 6 [m] 分の磁場強度を保管していく。なお自律走行の際も、ロボットは約 0.6 [m/s] で走行し、10 [Hz] で磁場の観測を行っていく。そして、目印となる変化が存在する地点を 3 [m] 過ぎた際に、保管した磁場強度の最大値を求め、これとあらかじめ教示した最大値の差分が一定以下であれば、目印となる磁場の乱れを計測したとする。そして、観測した磁場の乱れの位置があうように、走行距離の修正を行うこととした。磁場マップのデータは 10 [cm] ごとに記録されているため、距離の修正は 10 [cm] 単位で行われることとなる。

4.4 制御手法

本研究で実装した磁気ナビゲーション法における走行制御では、まず、現在のロボットの走行距離に対応した磁場マップの磁場情報 M_n 、付加情報 S_n と W_n 、および磁気センサの計測値 b を用いて、制御に利用する偏差 e を以下のように定めた。

$$e = \begin{bmatrix} s_{x,n} w_{x,n} (m_{x,n} - b_x) \\ s_{y,n} w_{y,n} (m_{y,n} - b_y) \\ s_{z,n} w_{z,n} (m_{z,n} - b_z) \\ w_{\theta,n} (m_{\theta} - b_{\theta}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 b_x , b_y , b_z は磁気センサが計測する 3 軸の磁場強度であり、 b_{θ} は磁場方位である。そして偏差 e の各値が零になるように、ロボットの角速度を PD 制御することで姿勢を修正することとした。

磁場マップには、磁場情報としては走行経路上の情報しか記録されていない。そのため、障害物回避などにより経路から逸れた際には、参照する磁場情報がなくなることとなる。これを防ぐために付加情報を利用している。付加情報は、周囲の磁場の性質を表すパラメータであり、これを用いることで経路周辺の磁場を大まかであるが把握することができる。例えば、識別情報 S_n がすべて零となるような地点は磁場が安定しており、磁場方位を用いて姿勢を修正すれば姿勢を一意に修正できる。これは、前章において磁場解析を行った結果からも明らかである。また、 S_n の各値が非零であれば、横方向の誤差を修正するような姿勢修正が行われることになる。このように、付加情報を利用することで、走行経路上の磁場情報しか持たないとしても、ロボットの姿勢修正を効果的に行うことが可能である。

5. 走行実験

5.1 実験環境

Fig. 14 に実験環境を示す。図中の A～E 地点は、Fig. 8 に示すような走行距離の修正を行うことが可能な磁場の乱れが見られる地点である。また、図中の右下の点線四角で囲まれた区間は、磁場が時間変化する区間であり、正しい磁場方位を計測することが難しい。それ以外の区間では、磁場方位は概ね安定して計測できる。経路に対する横方向の誤差を修正できるような区間は、ところどころに点在している。図中の B 地点にのみ、約 15[m] 連続して横方向の誤差を修正できる区間がある。

5.2 走行実験

本実験では、実装した磁気ナビゲーション法によってロボットが自律走行を行うことが可能かを確認するため、まず、Fig. 14 に示す経路を連続で周回走行させた。Fig. 15 には、周回走行した際の 4 周分の走行軌跡を示す。すべての周回において同様の経路を走行し、安定した自律走行が行えることを確認した。また自律走行中の経路から横方向のずれは、目測ではあるが約

Fig. 14 Experimental course

Fig. 15 Trajectories by the magnetic navigation method

1[m] 以内であった。道路幅 4[m] の本実験環境においては、十分な位置精度で走行することが可能であった。

走行距離修正の性能評価のために、Fig. 14 の A～E 地点において修正がうまく行われたか、また修正が行われた際には修正前の走行距離を記録し、どの程度の修正が可能であるかを検証した。Table 1 には A～E 地点における各周回での走行距離修正の結果をまとめた。位置修正に失敗した地点には「×」を記している。この表より、まれに位置修正に失敗するものの、最大誤差 1.7[m] の走行距離修正が行えることが分かった。また、100[m] に 1、2 箇所が目印となる磁場の乱れが存在すれば、本手法による自律走行が可能であることも分かった。

Fig. 16 には、本実験で用いた磁場マップをグラフ化した一部を示す。これは、Fig. 14 に示すスタート地点から α までのものである。A 地点には特徴的な磁場の乱れが見られ、これを用いて走行距離の修正を行うことができた。またこの地点の周辺の磁場方位は、場所による変化が大きいため、姿勢修正に利用する重み w_θ を他より小さくした。さらに、付加情報である S と W の各軸成分の積は、横方向の誤差修正を行うための指標となる。この値が非零の地点では誤差修正が行われた。

Table 1 Localization result in the navigation experiment

Position	A [m]	B [m]	C [m]	D [m]	E [m]
Magnetic field map	23.2	94.2	220.3	346.8	389.1
1st Run	23.3	94.9	221.2	347.8	×
2nd Run	22.1	93.4	×	347.9	389.3
3th Run	21.5	93.8	221.1	347.4	389.6
4th Run	21.7	93.8	×	346.6	389.3
Max error	1.7	0.8	0.9	1.1	0.5

Fig. 16 Data of the magnetic map in the experiment

5.3 考察

Table 1 より, C, E 地点では磁場の変動を目印とした走行距離修正に失敗するケースがあった. この地点の磁場の乱れは, A 地点などと比べるとわずかに小さなものであった. そのため, 走行経路からずれると, 磁場の乱れを計測することができず, 距離修正に失敗したと考えられる. しかし, 他の地点でも磁場の乱れが見られた際には距離修正を行うことができ, 結果として周回走行を達成できた. このことから, 磁気ナビゲーション法による自律走行では, 常に高い精度の位置推定を必要としないということがいえる. これは, 磁場マップを利用した姿勢修正の利点である. 磁場マップには走行経路周辺の磁場の性質が記されているため, 常に環境磁場を有効に利用した姿勢修正を行うことができる. このため, 多少位置推定に失敗したとしても, これが直結して即座に自律走行に失敗することはない. このことは, 近年よく利用されている Monte Carlo Localization [10] やスキャンマッチング法 [11] と比較すると, 磁気ナビゲーション法の大きな利点であるといえる. また, 磁気ナビゲーション法はこれらの手法と比較すると, そもそも自己位置推定に利用する情報が異なるため, これらの手法により走行できない区間での走行も行うことができる. 実際, 先に示した実験では, 磁気ナビゲーション法により, 周囲が開けた区間においても容易に自律走行を達成できた. 以上のことから, 磁気ナビゲーション法は多様な環境での利用が可能であるといえ, 有用な手法であるといえる.

本論文中で述べたように, 環境中のすべての磁場を計測し地図化することは困難である. 先に示した実験においても, すべての磁場を計測することはしていない. しかし, 本研究によって明らかとなった磁場の性質を踏まえて磁気ナビゲーション法を実装することで, 磁場を効果的に利用し, 実環境の自律走行を達成できた. このことから本研究結果は, 磁場の性質を明らかにした結果であるといえる.

6. おわりに

本論文では, 磁気ナビゲーション法を効果的に実装するために, ロボットに搭載される機器が周囲に及ぼす影響を検証した. そして, ロボットに搭載した磁気センサが機器から影響を受けずに, 環境磁場を計測できることを示した. また, 環境磁場を測定して実験的に解析することで, 目印となり得る磁場の乱れの存在およびその傾向が明らかになった. そしてこれらの知見

に基づき磁気ナビゲーション法を実装し, 実環境中で安定した自律走行が可能であることを示した.

磁場の乱れ扱う本手法と, 周辺環境の幾何的な形状を測定する自己位置推定法 [10] [11] とは, 明らかに扱う情報が異なる. より安定した自律走行を実現するためには, これらを互いに補間し合うような組み合わせが有力である. 今後, 磁気ナビゲーション法をベースとし, 異なる情報を用いた自己位置推定法を組み合わせたナビゲーション法を開発する.

謝 辞 本研究は, 科研費 25420210 の支援を受けた. また, 筆者は斎藤裕氏から援助をいただいた. さらに, 本研究における環境磁場計測では, 当研究室の中田未央氏および山内健司氏から多大な協力を得た. ここに謝意を表す.

参 考 文 献

- [1] S.Y. Lee, et al.: "Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method," Robotics and Computer-integrated Manufacturing, vol.28, no.3, pp.425-436, 2012.
- [2] S.A. Rahok, et al.: "Navigation Using an Environmental Magnetic Field for Outdoor Autonomous Mobile Robot," Advanced Robotics, vol.25, Nos13-14, pp.1751-1771, 2011.
- [3] S.A. Rahok, 他: "環境磁場に基づいた移動ロボットの自律走行", 計測自動制御学会論文集, vol.47, no.3, pp.166-172, 2011.
- [4] 渡辺敦志, 他: "方位検出と交差点認識を用いた道なり走行ベースの屋外自律ナビゲーション", 日本ロボット学会誌, vol.30, no.3, pp.271-279, 2012.
- [5] W. Kwon, et al.: "Particle Filter-based Heading Estimation using Magnetic Compasses for Mobile Robot Navigation," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2705-2712, 2006.
- [6] K. Ohno, et al.: "Differential GPS and odometry-based outdoor navigation of a mobile robot," Advanced Robotics, vol.18, no.6, pp.611-635, 2004.
- [7] T. Yoshida, et al.: "A Sensor Platform for Outdoor Navigation Using Gyro-assisted Odometry and Roundly-swinging 3D Laser Scanner," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1414-1420, 2010.
- [8] 新納敏文: "環境磁場計測法の事例調査 (その 3)", 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1021-1022, 1996.
- [9] サム アン ラホック, 他: "磁気マップに基づいた屋内車輪型移動ロボットの自己位置認識", ロボティクス・メカトロニクス講演会 08, 2P2-C08, 2008.
- [10] F. Dellaert, et al.: "Monte Carlo Localization for Mobile Robots," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1322-1328, 1999.
- [11] Y. Chen, et al.: "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2724-2729, 1991.

赤井直紀 (Naoki Akai)

2013 年宇都宮大学大学院博士前期課程修了後、同年同大学博士後期課程入学、現在に至る。移動ロボットのナビゲーションに関する研究に従事。2011、12 および 13 年につくばチャレンジの課題を達成しつくば市長賞を受賞。（日本ロボット学会学生会員）

片寄浩平 (Kohei Katayose)

2013 年宇都宮大学大学院博士前期課程修了後、同年株式会社吉野工業所入社、現在に至る。

井上一道 (Kazumichi Inoue)

2000 年新潟大学理学部物理学学科卒業。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。感性評価とロボットのデザインの研究に従事している。（日本ロボット学会学生会員）

Sam Ann Rahok

2008 年宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻修士課程修了。2011 年同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。2012 年より小山工業高等専門学校電気電子創造工学科助教。博士（工学）。（日本ロボット学会正会員）

島田 遼 (Ryo Shimada)

2012 年宇都宮大学工学部機械システム工学科卒業後、同年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻入学、現在に至る。

尾崎功一 (Koichi Ozaki)

1996 年宇都宮大学工学部助手。1997 年同大学講師。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）。（日本ロボット学会正会員）