

デジタルコンパスの蟻型群ロボットへの応用 — 方位センサによる自己位置同定の向上へ —

波田 邦彦 高田 宗樹 平田 隆幸

An application of a digital compass module to ant type swarm robots — Improvement of self localization of the robot by the RDCM-802 compass module —

Kunihiko HADA*, Hiroki TAKADA* and Takayuki HIRATA*

(Received February 10, 2011)

The properties of the RDCM-802 compass module were investigated to use it as a compass of an ant type robot. The RDCM-802 compass module can determine the direction with 3-bit accuracy, which means that it outputs direction in basic 8-points (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). The experiments show that the outputs of the compass module as a function of direction has high reproducibility. Therefore, although the outputs of the RDCM-802 compass module are eight principal compass points, the combination of the compass module RDCM-802 and out robot driven by stepping motors enable to know the direction with high precision (about $\pm 2^\circ$).

Key Words : RDCM-802 Compass Module, Swarm Robot, Ant, Self Localization.

1. はじめに

自律分散システムは、全体を統括的に制御する集中管理部分がなく、各要素が自律的に働き、相互作用することにより、全体としての仕事を達成するシステムである。自律分散システムの特徴の大部分は、集中管理部分がないことに起因する。例えば、ある特定の仕事を効率よく達成させるのを目的にシステムを設計したとき、自律分散システムはもっとも効率の良いシステムにならないことがある。なぜなら、各要素が自律的に判断し行動するため、システム全体としての効率性が保証されていないからである。つまり、各要素の自律性に起因するシステム全体からみると冗長性が生じ、非効率性が発生する。一方、この冗長性は、短所ばかりでなく、長所も生み出す。後述するように、自律分散システムには柔軟性(flexibility)と頑健性(robustness)という長所がある。

群知能(Swarm Intelligence)は、自律分散システムによる人工知能の研究分野の一つである^[1]。群知能と

は、要素間の相互作用によって創発(emergence)現象が発生し、より高度な知的システムが現われることに注目したものである。ところで、群知能の研究にはコンピュータ・シミュレーションによるものが多い。なぜなら、コンピュータ・シミュレーションではさまざまな相互作用を試すことができるからである。しかし、現実の系を理想化および単純化したコンピュータ・シミュレーションによる研究だけでは不完全といえる。そのため、実機をもちいた群ロボットの研究がなされるようになってきた^[2]。

群ロボットの研究には、相互作用する小型ロボットがもちいられる。群ロボットに使用される個々の小型ロボットの性能は、一般的に高くない。しかし、協調行動により、単独のロボットでは不可能な仕事を達成することができるのが特徴である。個々の小型ロボットに高度な能力を要求しない群ロボットには、次のような特徴がある。1) 個々のロボットを安価に製作できる。2) 安価ゆえに、多数のロボットを製作できる。さらに、自律分散システムとしての3) 多数のロボットが協調行動をおこない仕事を達成することから、たとえ数台のロボットが故障しても群ロボット全体の仕事は影響を受けない頑健性がある。

* 知能システム工学専攻

* Department of Human & Artificial Intelligent Systems

4)用途を限定し特殊化したロボットをもちいていないので、プログラムを変えるだけで、さまざまな作業(task)をこなせるという柔軟性がある。

さて、一般的に、群ロボットの設計には大きな自由度がある。個々のロボットにどれだけの機能をもたせるか？また、どのように相互作用をさせるか？など設計に大きな自由度がある。この設計上の自由度は、両義性をもつことになる。例えば、個々のロボットを高機能化すれば、個々のロボットのコストがあがり、多数のロボットをもちいるという群ロボットとしての長所が失われていく。また、複雑すぎる相互作用の導入は、コロニーとしての協調行動に現れる創発現象の理解を困難にしてしまう可能性がある。

では、どのように群ロボットを設計すればよいのだろうか？生物現象は、創発現象の宝庫である。特に社会性昆虫(social insect)の群れとしての行動は、創発現象の典型例である。そこで、蟻や蜂などに代表される社会性昆虫の行動をヒントに、群知能を考えようとする研究がおこなわれている^[3]。例えば、餌場探索において、蟻はフェロモンを介しての情報伝達をおこなっている。蟻コロニーのフェロモンによる巣-餌場間の運搬路形成は、AOL(Ant Colony Optimization)として、最適化問題へと応用されている^{[4],[5]}。さらに、蟻の行動をヒントにした群ロボットを使った研究がおこなわれている^[6]。

さて、コロニーとしての蟻の行動は非常に興味深いものであるが、一個体として見ても、蟻は知的な行動をする^[7]。蟻は、せいぜい10万個程度のニューロンしかもっていないにもかかわらず、歩測によって移動距離を知っている^[8]。さらに、蟻が太陽の動きなどによって、体内にコンパスを持っていることが知られている^[9]。

ここでは、蟻型群ロボットを製作するために、安価な方位センサをもちいて、蟻のコンパス機能を再現できるか、また方位センサを群ロボットに搭載したときの可能性を調べた。

2. 方位センサ

2.1 デジタルコンパスモジュール RDCM-802 の概要

蟻型ロボットに搭載するデジタルコンパスとして、GEOSENSORY社(オーストラリアのRobotron Groupの一部門)のRDCM-802 Digital Compass Moduleの特徴を調べた^[10]。コンパスモジュールRDCM-802は、小型・軽量で、比較的安価なため、ロボット、産業機器、のみならず、教育用、おもちゃなどに使うことが期待されている。Fig. 1に、コンパスモジュール

RDCM-802の写真を示す。

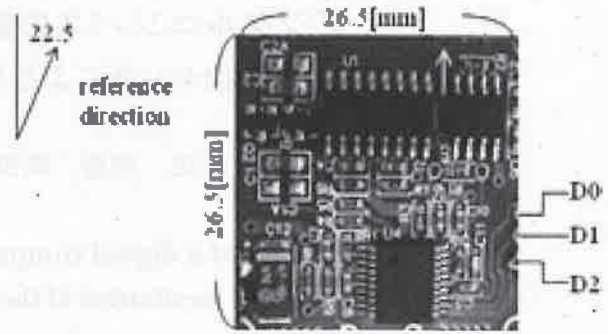


Fig. 1 RDCM-802 Compass Module (GEOSENSORY社).

コンパスモジュール RDCM-802には、磁気抵抗効果(magnetoresistive effect)を用いた磁気センサが搭載されている。磁気抵抗効果(Magnetoresistive effect: MR 効果)とは、物質に外部磁場をかけたとき、その物質の電気抵抗が変化する性質のことである。一般的には、MR 効果は半導体で大きく現れ、コンパスモジュール RDCM-802にも半導体センサが搭載されている。半導体センサは、メカニカルな部分がないため、小型軽量で高速なレスポンスをするものを作ることができる。また、”sticking problem“(方位磁針がコンパスにくっつく問題)が存在しないという特徴がある。

コンパスモジュール RDCM-802は、地球磁場に対するモジュールの方向に関して、2進数 3-bit の出力をする。つまり、モジュールが出力する方向は、8方向(N, NE, E, SE, S, SW, W, NW)である。出力は、3-bit parallel で TTLあるいはCMOS コンパチブルレベルで出力される。Fig. 1中のD0, D1, D2が3-bitの出力端子である。出力と8つの方位との関係を、Table 1(マニュアル^[10]では、NとEの出力値が反対であったので修正した)に示す。また、マニュアルによると、精度は $\pm 5^\circ$ 、ヒステリシスは $\pm 5^\circ$ 、セットリングタイム(settling time)は最大で500msである。なお、モジュールの大きさは、 $26.5 \times 26.5 \times 5\text{mm}$ である。

Table 1 コンパスモジュール RDCM-802 の出力

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
D0	1	0	0	1	0	0	1	1
D1	1	1	1	0	0	0	0	1
D2	0	0	1	1	0	1	1	1

2.2 方位計測の基礎データ

コンパスモジュール RDCM-802 をもちいて方位の計測をおこなった。なお、計測した場所は、福井大学総合研究棟 I の 7 階の実験室である。コンパスモジュール RDCM-802 をゆっくりと時計回りに 1° ずつ回転させて、出力値を計測した (100 回出力値を読み取ったのち、手動で 1° ずつ回転させて計測をおこなった)。Fig. 2 は、コンパスモジュール RDCM-802 を回転させた角度に対して、8 方位の出力の比率を示したものである。

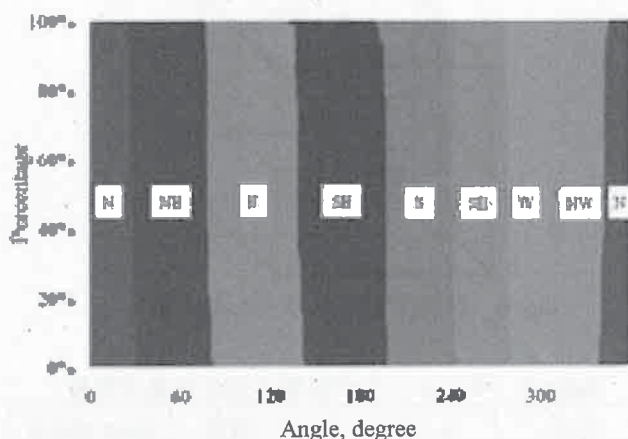


Fig. 2 コンパスモジュールを時計回りに回転させて、出力 (8 方位) の比率をプロットしたものの。

コンパスモジュール RDCM-802 の出力は、8 つの方位の境界付近で揺らぐ。例えば、N (北) と NE (北東) の境界値付近で、コンパスモジュールを時計回りに回転させて計測すると、最初、出力値は 100 回計測すると 100 回とも N であったものが、回転させるに伴い変化する。コンパスモジュールの回転角度が 24° から N という出力が減少し、NE という出力が増加し、 32° で NE という出力の比率が 100% になる。つまり、 $24^\circ \sim 31^\circ$ の範囲では、出力は、N と NE をゆらいでいる。

Fig. 2 から、8 つの方位の境界で、コンパスモジュール RDCM-802 の出力は、シャープに切り替わるのではなく、ゆらぎを伴い比率を変えながら切り替わっていくのが分かる。さらに、それぞれの方位を出力する角度の範囲は、等分割された 45° ではない。8 つの方向の出力の範囲には、大小があることが分かった。

コンパスモジュール RDCM-802 の方位の出力の再現性を調べた。自動で計測するため、コンパスモジュール RDCM-802 を蟻型ロボット^[11]に搭載してロボットを 3 回転時計回りに回転させて計測した。

ロボットは、ステッピングモーター (日本電産サーボ KH39EM2-801) で駆動されている。KH39EM2-801 は、1-2 相励磁では、1 パルスで 0.9° 回転する。ロボットの 1 回転 (360°) を 128 分割 (ステッピングモーターへの CPU からの出力 4 パルス毎) して、コンパスモジュール RDCM-802 の出力を計測した。ロボットは、約 90 秒で 1 回転させた。

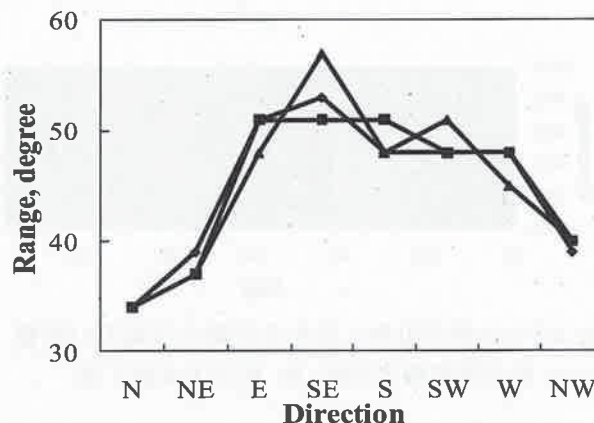


Fig. 3 8 つの方位を出力する範囲をそれぞれ各方位に対してプロットしたものの。3 回転させたときの値が重ねてプロットされている。

Fig. 3 に、8 つの方位を示す角度範囲をそれぞれ 8 つの方位に対してプロットしたものを示す。なお、8 つの方位の境界は、出力比が 50 パーセントになったときの値をもちいた。Fig. 3 から、8 つの方位を示す角度範囲には、ばらつきがあることが分かる。ここで計測したコンパスモジュールの場合、E と SE の範囲が広く、N を出力する範囲は狭い。しかし、3 回転させて計測したときの値はほぼ一致しており、同じコンパスモジュールを用いて計測したときには再現性があることが分かった。

次に、計測する場所の影響を調べるため、2 ヶ所で計測したときの結果を比較する。計測は、福井大学の総合研究棟 I の 7 階実験室と第 2 体育館 (柔剣道場) の 1 階でおこなった。計測する場所として、第 2 体育館を選んだ理由は、第 2 体育館の 1 階は剣道場として設計されており床が木造であるため、方位の計測に影響を与える可能性がある鉄骨材料などの影響が少ないと考えられるからである。Fig. 4 に、2 ヶ所での回転角度に対する出力の頻度分布を示す。計測は、コンパスモジュール RDCM-802 をロボットに搭載して自動計測によっておこなった。なお、ロボットの回転の角度の精度は、 360° を 115 分割 (ステッピングモーター 5 パルス毎) したものであった。Fig. 4 から、場所による差異はあまり大きくないことが分かる。

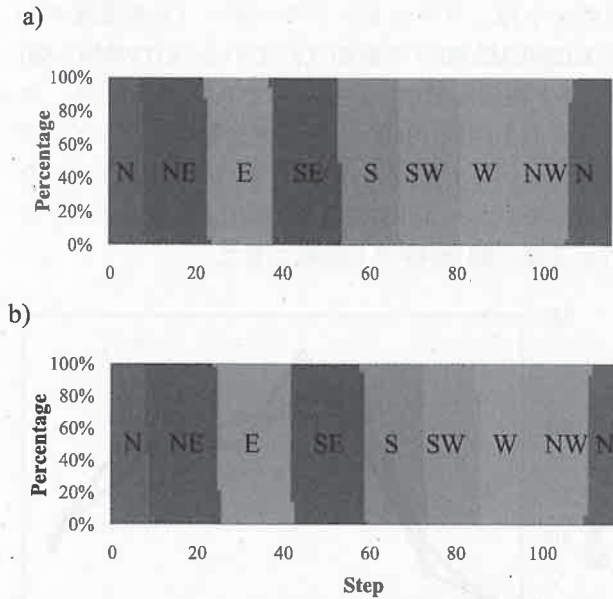


Fig. 4 8つの出力分布に対する計測する場所の影響.
a) 総合研究棟 I 7階, b) 第2体育館 1階.

最後に、コンパスモジュール RDCM-802 個々の影響、つまり個体差を調べた。5つのコンパスモジュールについて、8つの方位の範囲分布を計測した。計測は、ロボットにコンパスモジュールを搭載し、1周(360°)を約140分割して、それぞれの地点で100回ずつ出力値を計測することによっておこなった。Fig. 5は、5つのコンパスモジュールそれぞれについて、8つの方位がしめる角度範囲を示している。Fig. 5から、個々のコンパスモジュールには再現性があるが(Fig. 3参照)、5つコンパスモジュールの出力には、ばらつきがあることが分かる。

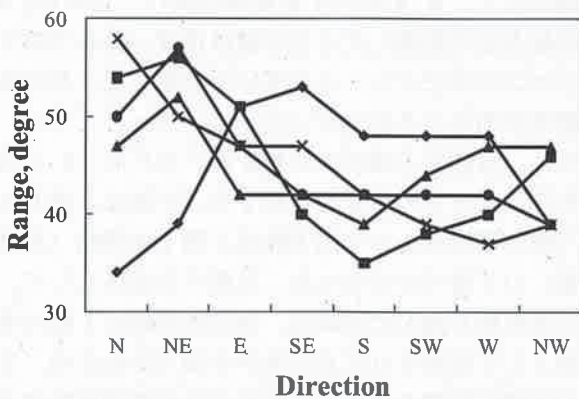


Fig. 5 コンパスモジュール間の差異. 5つのコンパスモジュールの8つの方位を示す範囲をプロットした。

3. 蟻型ロボットへの搭載

3.1 ロボット部品のセンサへの影響

我々の蟻型ロボットは、ステッピングモーター(日

本電産サーボ KH39EM2-801)、電池など磁性体を含む部品を有している。そのため、センサを搭載するためには、磁性を持つ部品の影響を考慮して、ロボットを設計しなければならない。ここでは、26の方向に関して、部品がセンサに影響を与える距離を求めた。計測は、センサをNとNEの境界方向に設置し、磁性を持つ部品をセンサに近づけ、出力値が変わったときの距離をセンサモジュールの中心から測った。26方向(ミラー指数(方向)(Fig. 6参照))について影響が出ない距離を調べた結果をTable 2に示す。

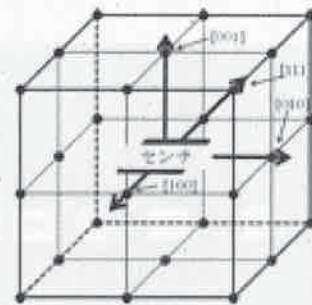


Fig. 6 計測方向(ミラーの軸指数)。

Table 2 モジュールが影響を受ける最大距離

方向	モーター	単三電池	006P型電池
100	120±0	30±0	42±4.0
110	120±0	30±0	40±0
010	130±0	20±0	40±0
110	130±0	—	30±0
100	110±0	20±0	50±0
110	100±0	30±0	42±4.0
010	100±0	20±0	50±0
110	102±4	30±0	60±0
001	130±0	20±0	20±0
101	120±8.9	22±4.0	50±0
111	118±4	30±0	38±4.0
011	130±0	20±0	40±0
111	130±0	20±0	36±4.9
101	102±4	26±4.9	44±4.9
111	90±0	20±0	50±0
011	92±4	20±0	50±0
111	98±4	20±0	50±0
001	140±0	—	40±0
101	120±0	10±0	42±4.0
111	120±0	—	30±0
011	124±4.9	—	30±0
111	128±4	—	30±0
101	110±0	—	50±0
111	90±0	32±4.0	40±0
011	90±0	10±0	50±0
111	106±4.9	30±0	50±0

*) 各5回計測した平均値と標準偏差が示されている。単位は、mmであり、—は、10mm以下を意味する。

Table 2 からステッピングモーターがもっとも強くセンサに影響を与えることが分かる。また、方向によってセンサに与える影響が異なることも明らかになった。Table 2 には、掲載していないがサーボモーター (FUTABA S3003) についても計測した結果、影響する距離は、40mm 以下であった (最大はミラー指数[110]方向のとき 40mm)。蟻型ロボットのボディは、アルミニウムで製作されており、磁性体としてのステッピングモーターをセンサから 140mm 以上離して搭載すれば、良いことが分かる。Fig. 7 にセンサを搭載した蟻型ロボットを示す。

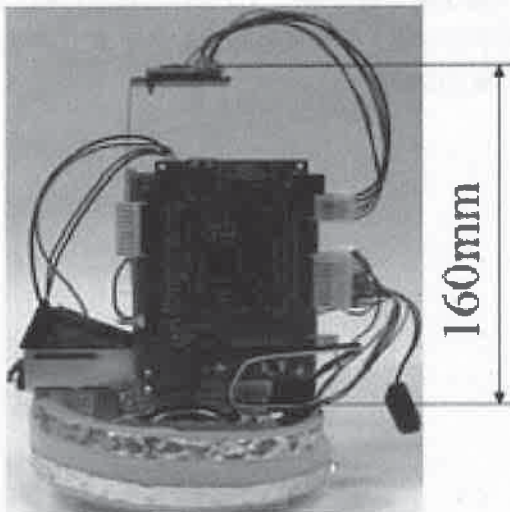


Fig. 7 コンパスモジュールを搭載したロボット。

3.2 ロボットの高精度な方位決定法へ

コンパスモジュール RDCM-802 は、方位を 3-bit の分解能で出力する (Table 1 参照)。ナイーブに考えると、このコンパスモジュールを使用した時のロボットの方位決定精度は、約 45° と思える。また、それぞれの方位を示す分布自身にもばらつきがあり、ロボットの方位決定精度は、もっと悪くなると思われるかもしれない。しかし、ステッピングモーターを駆動装置としてつけた蟻型ロボットの移動精度は、高く、約 1° の精度でロボットの回転を制御できる。Fig. 3 から同一のコンパスモジュールを用いた場合、方位分布には再現性があることが分かる。この再現性とロボットの高い回転移動精度を組み合わせることによって、ロボットは、高い精度で自己の向いている方向を知ることができる。

まず、詳細に計測した Fig. 3 のデータを既知のものとする。出力が切り替わる境界 (頻度が 50 対 50 になる角度) の角度を D_1, D_2, \dots, D_8 とする。この値をロボットに既知のレファレンスデータをして与

えておく。

ロボットを設置し、1 回転させ (回転に必要な時間は約 65 秒)、出力値が変わる角度を計測した値を M_1, M_2, \dots, M_8 とする。レファレンス値としての D_1, D_2, \dots, D_8 は、変わらないが、 M_1, M_2, \dots, M_8 は、ロボットの初期設置方向によって変わってくる。このため、なにもしないとロボット自身の方位決定精度は、低くなる。しかし、 M_1, M_2, \dots, M_8 をうまく、 D_1, D_2, \dots, D_8 と合わせる (マッチングさせる) ことによって、ロボットの初期設置方向を高い精度で決定できる。

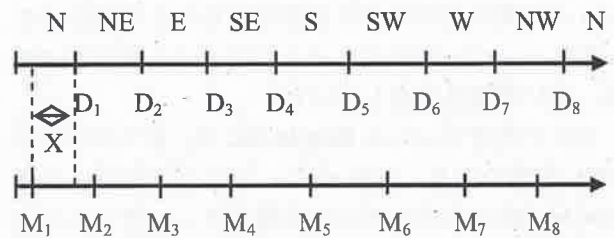


Fig. 8 レファレンス系列 $\{D_i\}$ 、計測系列 $\{M_i\}$ とずれ X の関係を示す模式図。

X をレファレンス系列 $\{D_i\}$ と計測系列 $\{M_i\}$ とのずれとする。ずれ X を考慮した 2 つの系列の要素間の差の 2 乗したものの和 $S(X)$,

$$S(X) = \sum (D_i - (M_i + X))^2 \quad (1)$$

を考える。この $S(X)$ を最小にする X を求めることによって、レファレンス系列 $\{D_i\}$ と計測系列 $\{M_i\}$ のずれを補正する。式(1)では、 $\{D_i\}$ 、 $\{M_i\}$ は定数であり、 X のみを変数である。よって、 X に関する 2 次方程式となる。

$$S(X) = \sum (X^2 + 2(M_i - D_i)X + D_i^2 - 2D_iM_i + M_i^2) \quad (2)$$

完全平方の形に変形すると、

$$\begin{aligned} S(X) &= 8X^2 + (\sum 2(M_i - D_i))X + \sum (D_i^2 - 2D_iM_i + M_i^2) \\ &= 8\{X + \sum (M_i - D_i)/8\}^2 \\ &\quad + \sum (D_i^2 - 2D_iM_i + M_i^2)/8 - (\sum (M_i - D_i)/8)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

となる。それゆえ、

$$X = -(\sum (M_i - D_i))/8 \quad (4)$$

のとき、 $S(X)$ は最小値をとる。ここで、 \sum は $i=1$ から 8 までの和をとるものとする。

つまり、 X だけ初期設置方位を補正することによって、高い再現性をもってロボットを同じ方向に設置できる。Fig. 3 の再現性から 8 つの方位の境界をマッチングすることによって、 $\pm 1^\circ$ 程度の精度でのマッチングが期待できる。また、ロボットの回転移動精度が $\pm 1^\circ$ 程度であることを考慮すると、初期設置方位を $\pm 2^\circ$ 程度で決定できることが期待できる。

4. おわりに

コンパスモジュール RDCM-802 の特性を詳細に調べることによって、蟻型ロボットへの応用の可能性を調べた。まず、ロボットに搭載する磁性体部品のコンパスモジュール RDCM-802 の方位出力に影響を与える距離を詳細に調べた。その結果、ステッピングモーターがもっとも強くコンパスモジュールへ影響を与えることが分かった。また、ステッピングモーターをコンパスモジュールから 140mm 以上離すと影響がなくなることを明らかにした。さらに、コンパスモジュール RDCM-802 について、個々のモジュール間にはばらつきが存在することが分かった。しかし、一つ一つのコンパスモジュール RDCM-802 は、高い再現性を有していた。

コンパスモジュール RDCM-802 は、8つの方位を 3-bit で出力する。それゆえ、コンパスモジュール RDCM-802 の出力をそのまま使うと、ロボットの方向の精度は、約 $\pm 22.5^\circ$ となってしまふ。しかし、高精度の回転移動能力をもつロボットに搭載した場合、高い精度で方位を知ることができることを明らかにした。

歩測によって自己位置同定をおこなう場合、ロボット同士の衝突や障害物との接触によって、ロボットの自己認識している方位と実際の方位に大きなずれが生じることがある。そのため、ロボットに方位センサを搭載することは、自己位置同定の精度向上のためには、重要なことと考えられる。しかし、高精度な方位センサの搭載は、コストやサイズ・重量の面などで困難である。ここでは、安価かつ軽量小型のコンパスモジュールをもちいても、高い精度での方向決定ができる可能性を示すことに成功した。

謝辞

本研究をおこなう上で、福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻非線形科学研究室のメンバーには、実験および議論において大変お世話になりました。ここに感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- [1] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz: *Swarm Intelligence*, Oxford Univ. Press, New York (1999).
- [2] F. Mondada, L. M. Gambardella, D. Floreano, S. Nolfi, J-L Deneubourg, M. Dorigo: *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12-2, 21 (2005).
- [3] 川村秀憲: 生命複雑系からの計算パラダイム, 森北出版, pp.1-81(2003).
- [4] M. Dorigo and T. Stützle: *Ant Colony Optimization*, MIT Press, Cambridge (2004).

- [5] M. Dorigo: *Ant Colony Optimization*, <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/>
- [6] T. Hirata, M. Yamazaki, N. Shuto : *Proceedings of SCIS&ISIS*, pp. 262-266 (2006).
- [7] 例えば, MSN エンカルタ総合大百科.
- [8] M. Wittlinger, R. Wehner, H. Wolf: *Science*, 312, 1965 (2006).
- [9] M. Müller & R. Wehner: *Naturwissenschaften*, 94, 589 (2007).
- [10] RDCM-802 Digital Compass, GEOSENSORY 社 <http://www.geosensory.com/pdf/rdc802.pdf>
- [11] 大場公隆: 群ロボットにおける協調行動, 福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻修士論文(2009).