

# 偏光と地磁気を利用した羽ばたきロボットのためのナビゲーションシステム

徳網大哲 東善之 木村浩（京都工芸繊維大学）

## Navigation system for a flapping robot using skylight polarization and geomagnetism

\*H. Tokuami, Y. Higashi and H. Kimura (Kyoto Institute of Technology)

**Abstract**— For navigation, it is important for robots to know directions they should go. Bees and ants are able to go to feeding sites and go back to their home in the long distance. Especially, we know that bees use skylight polarization and earth magnetism for their navigation. In this paper, in order to actualize flapping robot's navigation in the future, we develop a polarized-light sensor and carry out the navigation experiment on a wheel robot with both the developed sensor and a magnetic sensor.

**Key Words:** Navigation, Polarized light sensor, Magnetic sensor, Flapping robot

### 1 はじめに

生物において、ミツバチや砂漠アリ等の複眼を持つ昆虫は、人には見えない偏光を読み取れることが知られており、偏光を用いたコンパスを利用して太陽の位置を把握し、餌場と巣を往復することができる<sup>1)</sup>。また、ミツバチは定位に地磁気を利用していると言われており、偏光視と合わせることで、太陽が雲で隠れて見えない時でも、自ら進むべき方向を定めることができる<sup>2)3)</sup>。

一方エンジニアリングにおいては、近年の小型軽量化技術の向上により、羽ばたきロボットの研究が盛んになってきている<sup>4)5)</sup>。我々の研究室でも、生物を規範とした羽ばたきロボットのオンボード自立・自律制御の研究を行っている。現時点では、ピッチ制御を行い安定した飛行が可能であるが、ナビゲーションを行うことは出来ない。ナビゲーションには距離と方向の情報が必要であり、昆虫は距離の情報をオプティカルフローや体内歩数計によって得ている。方向の情報は基本的に太陽の位置から得ている。昆虫を規範としたナビゲーションの研究が、Wehner ら<sup>6)</sup>や小林ら<sup>7)</sup>によって行われており、偏光センサについても、小型でCMOS イメージセンサを用いたものが開発されている<sup>8)</sup>。しかし、これらの研究で用いられているセンサは、重量が重く、サイズも大きいことから、ペイロードに限界がある飛翔ロボットには応用できないため、より軽量のセンサが必要である。

そこで、本研究では将来羽ばたきロボットでのナビゲーションを実現させるため、昆虫の眼を模した軽量の偏光センサを製作した。また、偏光センサと地磁気センサによるナビゲーション実験を車輪型ロボットで行い、有効性を検証した。

### 2 センサ

#### 2.1 偏光センサ

##### 2.1.1 偏光と青空の偏光パターン

太陽からの自然光（非偏光）はあらゆる方向に均等に振動しているが、大気や空気中の塵に当たって散乱すると同時に、光の振動方向に偏りができる (Fig.1)。この偏りができた光を偏光（直線偏光）と呼ぶ<sup>9)</sup>。人

間には見えないこの光を昆虫は見る事ができる。

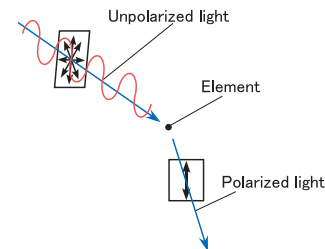


Fig. 1: Mechanism of linearly polarized light.

青空には、Fig.2 のように、太陽を中心とした同心円状の偏光のパターンが生じる。このパターンは太陽の位置によって変化するが、太陽と天頂を結ぶ線（子午線）に関して対称であることが分かっている。また、太陽、観測者、観測点のなす角が  $\frac{\pi}{2}$  rad になる時、偏光の強さは最大になる。

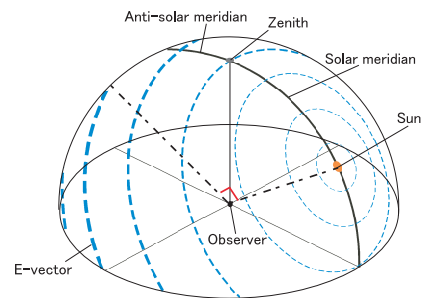


Fig. 2: Pattern of polarization in the sky.

##### 2.1.2 昆虫のナビゲーション

昆虫の眼には、単眼と複眼があり、単眼は明暗を検知することに特化している。一方、複眼は個眼と呼ばれる小さな眼の集合から成り、色や形を識別している。昆虫はこの複眼で偏光を検知している。偏光を検知するためには、偏光の振動面の角度に応じて、その透過率が変わる二色性が必要である。昆虫の場合は、個眼の視細胞中の感桿（ラブドーム）と呼ばれる部分の微絨毛が二色性を持っており、偏光を検知している<sup>10)</sup>。

昆虫は偏光のパターンを読み取り、子午線の方

基準として自分の体軸とのずれを知ることによって目標への方向を定めている<sup>11)</sup>。これが昆虫の偏光コンパスである。ただし、偏光コンパスだけでは子午線の方が分かるだけで、太陽の位置はわからない。そのため昆虫は、太陽の方向に近い空ほど長波長の光に富んでいることを利用して、太陽の位置を判断している。

Fig.3 は太陽と子午線の動きを 2 次元で表したものである。このように太陽および子午線は時間によって移動するが、昆虫は体内に正確な時計を持っているため太陽を基準としたナビゲーションが可能となる。

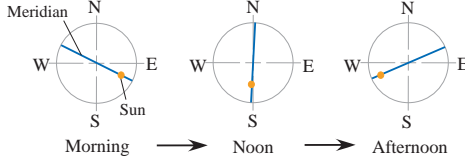


Fig. 3: Sun and Meridian for time.

### 2.1.3 偏光センサ

偏光を読み取るために製作した偏光 (POL) センサは可視光領域のフォトトランジスタを偏光フィルタのキャップで覆ったものである。Lambrinos らの研究<sup>6)</sup>では光センサを 6 個使用していたが、3 個でも偏光を読み取ることが可能であることに着目し、軽量化のため半数の 3 個を使用する。3 個の光センサへ偏光フィルタの向きをそれぞれ  $\frac{2}{3}\pi\text{rad}$  ずつずらして配置することで、センサを 1 回転させた際に、Fig.4 のように位相が  $\frac{2}{3}\pi\text{rad}$  ずれた偏光の値を出力する。天頂の偏光方向は太陽の位置に関わらず、子午線に関して直交しているため、このセンサで天頂の偏光を読み取り、角度を求めている。ロボットには偏光センサが水平になるよう、また、ロボットの回転中心が 3 個のセンサの中心付近になるように配置している。Fig.4 のように偏光センサからの出力は 1 周期が  $\pi\text{rad}$  であるため、ロボットは南北の線に沿っていることはわかって、北か南のどちらを向いているのかわからない。そこで、その判別に内界センサであるエンコーダから算出したロボットの旋回角度  $\theta_{\text{enc}}(t)$  の情報を利用する。

方位の推定は以下の手順で行う。実験前にキャリブレーションを行い、2 分の参照テーブルを作成する。実験中はそのテーブルの内の 0 から までの値と現在のセンサ出力値をそれぞれ比較し、3 個のセンサからそれぞれ推定された方位  $\theta_{p0}(t)$ ,  $\theta_{p1}(t)$ ,  $\theta_{p2}(t)$  から式 (1) により求める。その際、 $\theta_{\text{enc}}(t)$  が 以上の場合は  $\theta_{\text{pol}}(t)$  に 加算した値を推定方位にする。

$$\theta_{\text{pol}}(t) = \begin{cases} \frac{\theta_{p0}(t) + \theta_{p1}(t) + \theta_{p2}(t)}{3} & (0 \leq \theta_{\text{enc}}(t) < \pi) \\ \frac{\theta_{p0}(t) + \theta_{p1}(t) + \theta_{p2}(t)}{3} + \pi & (\pi \leq \theta_{\text{enc}}(t) < 2\pi) \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 地磁気センサ

本研究では、市販の 2 軸地磁気センサ「HMC6352」を使用する。このセンサからは、IIC 通信で北を 0 とし、分解能 0.1 で時計回りに 359.9 までの方位  $\theta_{\text{mag}}(t)$  が出力される。正確に角度を測るために、センサ使用前には必ずキャリブレーションを行うが、キャリブレーションを行っても周囲に強力な磁場をもつものがある

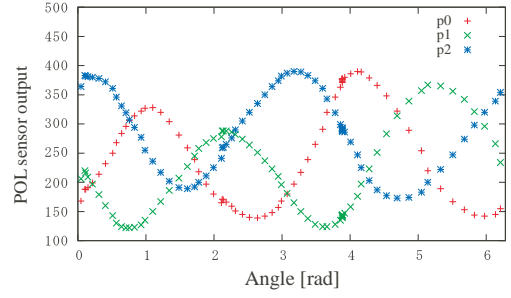


Fig. 4: POL sensor output for angle.

場合、影響を受ける。例えば、モータの影響を受けた時は角度を正確に測ることは出来ない。これはモータとセンサの距離を十分に取れない羽ばたきロボットには致命的である。また、磁場は本来 3 次元の広がりを持つが、HMC6352 ではそのうちの 2 軸で方位を検知しているため、水平な状態から傾いた場合にも誤差を生じる。そのため、駆動用モータからの影響を受けない位置に水平に配置している。

## 3 車輪型ロボット

### 3.1 概要

MAXON 社のエンコーダ付モータ 2 個とキャスタ 1 個を使用し、独立二輪駆動の 3 輪ロボットを製作した (Fig.5)。サイズは 0.160m(L) × 0.185m(W) × 0.110m(H) である。コントローラには HiBot 社の「TITech SH2 Tiny Controller」を用いた。このマイコンにより、センサ及びエンコーダ情報を処理し、モータドライバに命令を出す。モータドライバには 3 軸の「3Axes DC Power Module」を用いた。3 軸のうちの 2 軸を使用し、左右の車輪用モータに PWM 信号を伝える。パソコンとロボットの無線通信には株式会社ベストテクノロジーの無線モジュール「Zig-100」を用いて、実験中の操作、データの取得を行う。

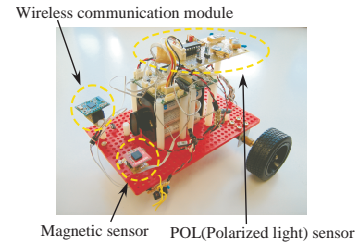


Fig. 5: Wheel robot.

### 3.2 オドメトリ

車輪型ロボットにおいては、エンコーダを利用したオドメトリによって位置推定を行う。

移動開始時刻を  $t_0$  とし、時刻  $\tau$  でのロボットの進行方向の速度を  $v(\tau)$ ,  $\omega(\tau)$  とすると式 (2), (3) のように表される (Fig.6)。

$$v(\tau) = \frac{R_w}{2}(\omega_r(\tau) + \omega_l(\tau)) = \frac{(v_r(\tau) + v_l(\tau))}{2} \quad (2)$$

$$\omega(\tau) = \frac{R_w}{D}(\omega_r(\tau) - \omega_l(\tau)) = \frac{(v_r(\tau) - v_l(\tau))}{D} \quad (3)$$

ここで、 $R_w$ ,  $\omega_l(\tau)$ ,  $\omega_r(\tau)$ ,  $v_l(\tau)$ ,  $v_r(\tau)$ ,  $D$  はそれぞれ車輪の半径、左右車輪の回転角速度、左右車輪の並進速度、トレッド (左右動輪の間隔) である。

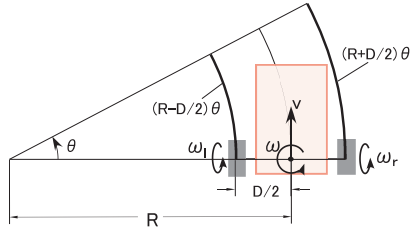


Fig. 6: Velocity of the wheel robot.

このとき、時刻  $t$  でのロボットの位置、姿勢  $(x(t), y(t), \theta(t))$  は次式 (4) ~ (6) のように計算できる (Fig.7) .

$$\theta(t) = \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau + \theta(t_0) \quad (4)$$

$$x(t) = \int_{t_0}^t v(\tau) \cos(\theta(\tau)) d\tau + x(t_0) \quad (5)$$

$$y(t) = \int_{t_0}^t v(\tau) \sin(\theta(\tau)) d\tau + y(t_0) \quad (6)$$

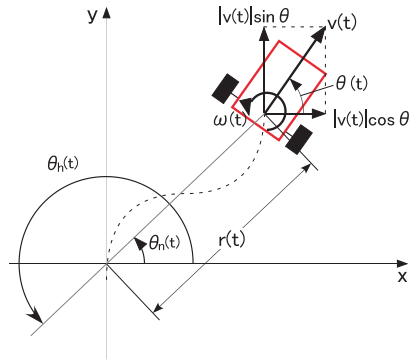


Fig. 7: Position of the wheel robot.

### 3.3 ナビゲーションシステム

内界センサは今回ロボットの位置を把握するために用いる．式 (5), (6) から算出した  $(x(t), y(t))$  により式 (7), (8) から、現在位置と  $x$  軸とのなす角  $\theta_n(t)$  と距離  $r(t)$  が求まる．

$$\theta_n(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (7)$$

$$r(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (8)$$

この  $\theta_n(t)$  を rad 反転させ、さらに外界センサを基準とした値に変換した角度を、ロボットがホーム方向へ向かう角度  $\theta_h(t) (= \theta_n(t) + \pi)$  とする．

ホームに帰還するときには、偏光センサと地磁気コンパスからの現在方位  $\theta_{pol}(t)$ ,  $\theta_{mag}(t)$  を利用し、 $\theta_h(t)$  を目標方位として、偏差を求める．偏差が 0 となるように車輪の回転速度を PID 制御することで、ロボットの旋回角度を制御しながら初期位置へ向かう．

## 4 車輪型ロボットのナビゲーション実験

### 4.1 実験環境

実験環境として、本学屋上の床にテープを張り、6m × 6m のフィールドを用意した．屋上の床は正確には平面ではなく所々に凹凸がある．縦、横がそれぞれ南

北、東西の線に沿っており、0.5m 間隔でマークをつけている (Fig.8)．偏光センサは太陽が天頂に近い正午前後の時間帯は、直射日光が強く偏光を正確に読み取ることが出来ない<sup>12)</sup> ため、実験は、太陽の高度が低くなり、偏光の度合いが強くなる夕方に行った．

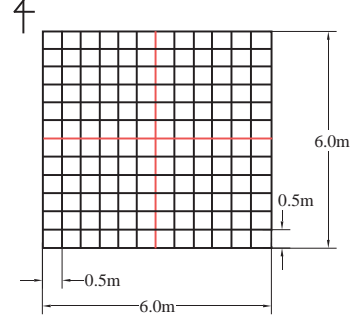


Fig. 8: Experimental field.

### 4.2 実験方法

偏光センサ及び地磁気センサのキャリブレーション後に車輪型ロボットを北向きに配置する．配置した任意の場所がホームとなる．配置完了後、PC より、直進・旋回・停止の命令をランダムに数回与える．その後、ロボットをそれぞれのセンサによる自律ナビゲーションモードに切り替え、ホームに向かって帰還させる．そのとき、車輪型ロボットの最終位置とホームとの距離を評価の基準にする．

## 5 実験結果

### 5.1 偏光を利用したナビゲーション実験

偏光システムを搭載したロボットのナビゲーション結果を Fig.9 に示す．(上段) は偏光センサから得られた方位  $\theta_{pol}(t)$  とホームのある方位  $\theta_h(t)$  ．(中段) はホームからの距離  $r(t)$  ．(下段) は実験開始から終了までのロボットの軌跡である．Fig.9(上段) より、自律モード後に目標方位である  $\theta_h(t)$  に  $\theta_{pol}(t)$  が近づくようにロボットが動いていることが分かる．最終的に、ホームまでの距離が 0.5m のところで停止した．偏光センサから得られる方位は地磁気センサやエンコーダから得られる方位と比較して、精度が悪いに関わらずホームに近づくことができた．その理由として、自律モード開始地点に移動する際のエンコーダから得られる情報に誤差が蓄積することで、ホームまでの距離・方向にも誤差が含まれていることと、ロボットの PID 制御のゲインが小さかったことにより、27 秒付近の偏光センサの極端な角度変化から影響を強く受けなかったことが考えられる．

### 5.2 地磁気を利用したナビゲーション実験

地磁気システムを搭載したロボットのナビゲーション結果を Fig.10 に示す．(上段) は地磁気センサから得られた方位  $\theta_{mag}(t)$  とホームのある方位  $\theta_h(t)$  ．(中段) は時間に対するホームからの距離  $r(t)$  ．(下段) は実験開始から終了までのロボットの軌跡である．地磁気センサからの方位出力は偏光センサよりも正確であり、最終的な位置もホームから約 0.3m となり、偏光を利用したシステムよりもホームに近づけている．しかし、(上段) を見ると偏差は 0 になった後大きくなっている．この場所で停止した原因として、自律モード後、ホーム



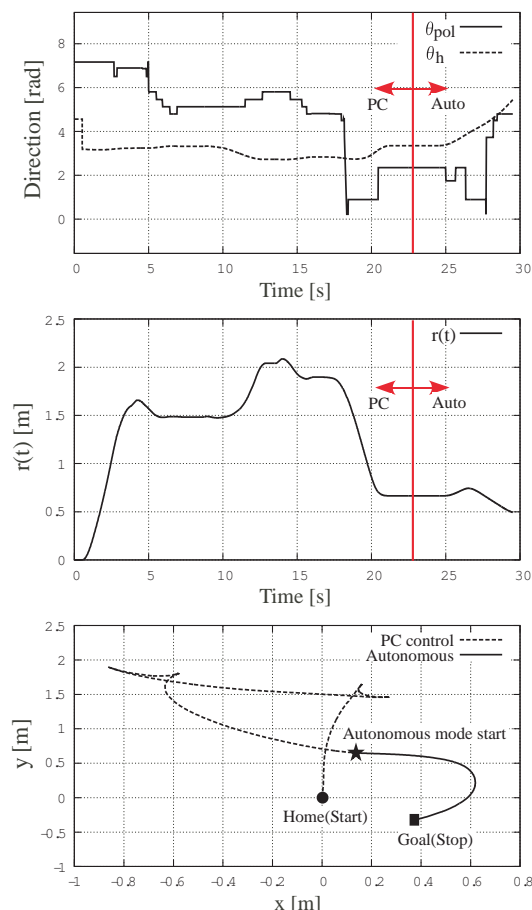


Fig. 9: Results of navigation experiment using the POL sensor. **Top:** The direction from the POL-sensor  $\theta_{pol}(t)$  and the direction of the home position  $\theta_h(t)$ . **Middle:** The distance  $r(t)$  from the home position. **Bottom:** The tracks of a wheel robot.

までの距離が一定以上近づくと速度を落とすようにプログラムしてあることと、ロボットのキャストの向きと地面の状況から動き出すのに必要なトルクをモータに伝えられなかったことが考えられる。

## 6 おわりに

本稿では羽ばたきロボットのナビゲーションのために、偏光センサの製作と車輪型ロボットを使用して開発したナビゲーションシステムの検証を行った。製作した偏光センサはコンパスとしては不十分ではあるが、ある程度のナビゲーションを実現できた。市販されている地磁気センサを外界センサとして使用した場合、ナビゲーションの精度は偏光センサよりも高かったが、ロボットの制御性を高めることでより正確なナビゲーションが出来ると考えられる。偏光センサと地磁気センサにはそれぞれ、偏光が読み取れない場合と地磁気が乱れる場合に問題点がある。しかし、それぞれのセンサでのナビゲーションが確認できたことで、両方のセンサを組み合わせただけの場合、どちらかの機能が低下しても、ナビゲーション出来るということが期待できる。今後はナビゲーションシステムの冗長性の向上を確認するための実験を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 富永, 昆虫の脳を探る, 48/80, 共立出版, (1995)

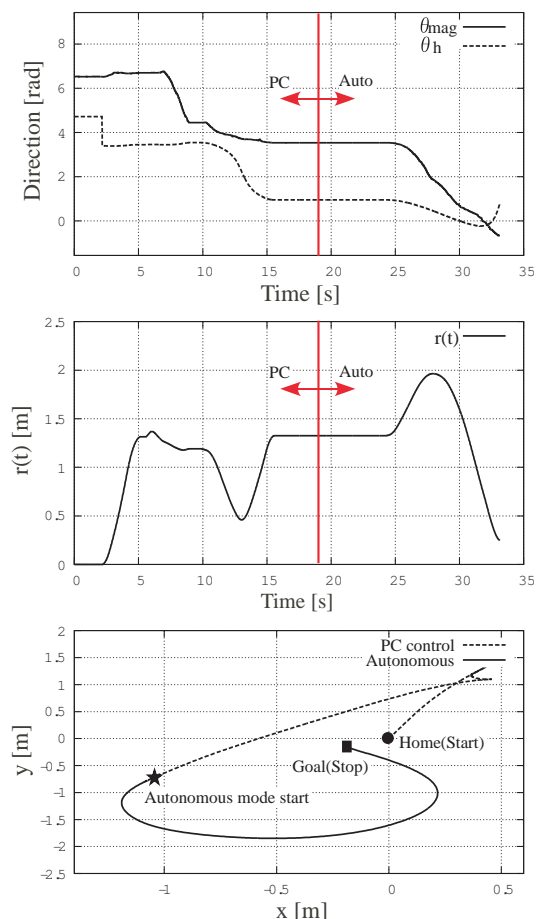


Fig. 10: Results of navigation experiment using the magnetic sensor. **Top:** The direction from the POL-sensor  $\theta_{mag}(t)$  and the direction of the home position  $\theta_h(t)$ . **Middle:** The distance  $r(t)$  from the home position. **Bottom:** The tracks of a wheel robot.

- 2) K.v. フリッシュ, 桑原, ミツバチの生活から, 76/129, 岩波書店, (1977)
- 3) 水波, 昆虫 - 驚異の微小脳, 244/266, 中公新書, (2006)
- 4) Robert J. Wood, The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect, IEEE Trans. on Robotics, 24(2):341/347, (2008)
- 5) D. Lentink, Novel Micro Aircraft Inspired by Insect Flight, Int. Symp. on Flying Insects and Robots, 67, (2007)
- 6) D. Lambrinos, R. Moller, T. Labhart, R. Pfeifer, R. Wehner, A mobile robot employing insect strategies for navigation. Robotics and Auton. Sys., 30:39/64, (2000)
- 7) 小林, 菊池, 小野木, 越智, 昆虫の視覚による帰巢行動を参考にした飛行ロボットのナビゲーション, 機論 C, 68 巻 668 号, 1104/1112, (2002)
- 8) M. Sarkar, D. Bell, C. Hoof, A. Theuvsen, Integrated polarization analyzing CMOS Image sensor for autonomous navigation using polarized light, 5th IEEE Int. Conf. on Intelligent Systems, 224/229, (2010)
- 9) 佐藤, 光と風景の物理, 77/84, 岩波書店, (2003)
- 10) 江口, 視覚生理学の基礎 - 比較生理学の立場から -, 167/194, 内田老鶴園, (2004)
- 11) 佐藤, 脳・神経と行動, 123/136, 岩波書店, (1996)
- 12) I. Pomozi, G. Horvath, R. Wehner, How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements for animal orientation, J. of Exp. Biol. 204:2933/2942, (2001)