TOPOLOGICAL な情報による飛行船型ロボットの 屋内ナビゲーション*

小林 宏^{*1,*2}, 椎葉太一^{*1}, 古川清一^{*1}
加藤良樹^{*3}, 菊池耕生^{*4}

Study of Indoor Navigation with 3D Airship Robot by Topological Information

Hiroshi KOBAYASHI^{*5}, Taichi SHIBA, Kiyokazu FURUKAWA,
Yoshiki KATO and Kohki KIKUCHI

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Science University of Tokyo,
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

Sensor-based navigation is one of the most important researches for mobile robots domain and there are many research works for sensor-based navigation. We have proposed the insects inspired landmark navigation to pinpoint the target position. Three landmarks are used for our previous navigation method by using 3D blimp-type flying robot and navigation undertakes successfully though, it is revealed that to stay at one point is difficult and trajectory is not efficient. To overcome these issues, new navigation method is proposed in this paper. Two landmarks are used and changes of landmark size are applied to control the 3D blimp-type flying robot. Experimental result shows the new navigation method works out very well.

Key Words: Visual Navigation, Landmark Navigation, Flying Robot, Insect Visual Homing, Pinpoint 3D navigation

1. はじめに

ナビゲーション機能は移動ロボットにとって最も基本的で重要な機能の一つであることから、現在までに数多くの研究が行われている。研究の目的に応じて必要な情報や環境設定は様々であるが、これらの研究は、基本的に、環境が既知と未知の場合に大別される。

環境が既知の場合は、環境モデルを与え、それを元に計画した経路を、移動ロボットが自己位置を推定しながら忠実に実行するというものであり、例えば、グラフサーチを用い衝突の危険性を最小とする方法⁽¹⁾、凸自由空間を用いた方法⁽²⁾、ポテンシャル関数法⁽³⁾などがある。これらの研究では、自己位置推定の正確さと、環境が常に同じであるという条件が前提となる。明示的に環境が既知ではないが、記録走行により走行路の画像を視覚的に記憶することで事前に環境情報を得る方法がある。この手法では、記憶画像と現在の画像とのマッチングにより自己位置を推定するが、一般に画像は情報量が多いため、フーリエ変換して情報量を減らした画像情報を用いたり⁽⁴⁾、特徴的な画像だけ記憶して用いる⁽⁵⁾等の方法が提案されている。これらは、事前の記録走行が必要となり、画像の記録方法と自己位置

推定の正確さが要求され、それらが画像を用いたナビゲーション研究の中心課題となっている。

環境が未知の場合、障害物の形状・位置が分からなくても、目標位置と移動ロボットの現在位置が分かれば、必ず目標位置に到達できるための十分条件が示されている⁽⁶⁾。環境が未知の場合も環境が既知の場合と同様、目標位置に到達するために自己位置の認識が必要不可欠であることがほとんどで、デットレコニング⁽⁷⁾やランドマーク⁽⁸⁾、それらの融合⁽⁹⁾によって自己位置誤差を修正する方法が提案されている。また、カメラ画像を用い、特にランドマークを用いることなく環境中にある道路端や交差点を画像処理により検出しながら移動し、交差点毎に事前に与えられた指示行動(前進、右折など)を実現する報告もある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。さらに、自己位置情報を必要とせず、目標方向のみが分かれば目標位置へ到達できる方法も提案されている⁽¹²⁾。

以上のように、環境が未知の場合は、移動ロボットはセンサを用いて自ら周囲環境を調べながら行動を決定する必要がある。このようなナビゲーション手法は、ロボットの自律化を実現するものとして、計算機の高速化を背景に近年盛んに研究されており、代表的なものとして SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾がある。SLAM は、環境モデルのような topographical な情報をロボットに与えず、レーザー照準器や画像センサなどを使用して自己相対位置を測定しながら周囲の地図を作成していく手法である。ロ

* 原稿受付 2004 年 3 月 15 日。

^{*1} 正員、東京理科大学工学部(〒162-0825 東京都新宿区神楽坂1-3)。

^{*2} 科学技術振構機構さきかけ研究 21(〒151-0053 東京都渋谷区代々木1-11-2)。

^{*3} 東京理科大学大学院。

^{*4} 正員、千葉工業大学(〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1)。

E-mail: hiroshi@kobalab.com

ボットは自己位置同定を行いながら、目的地への移動経路を自律的に算出する。環境が変わっても柔軟に対処できる手法等も開発されており、完全な自律移動型ロボットとなりうる。しかし、このシステムを確立するには、高性能なハードウェアとソフトウェアを必要とする。

ところで、完全に自律的に行動できる昆虫は、環境モデルを持たず、誤差を含んだ topological な情報のみにより目標位置に到達できる。例えば、砂漠で生息する蟻の一種 *Cataglyphis* は、巣から数百メートル離れた所からでも蟻酸による道標を用いずに帰巣できる(17)。このような昆虫の帰巣機能を模倣することは、自律的に移動するロボットのナビゲーションを実現するための一手段であると考えられる。そのため、著者らはこれまでに、知見の豊富な *Cataglyphis* のナビゲーションを参考にした簡易なナビゲーション手法を提案し、ロボットによりその有効性を示した(15)(16)。*Cataglyphis* のナビゲーション、及びそのロボットへの実装については 2 章で概要を述べるが、基本的には遠距離ナビゲーション(15)と、ピンポイントで目標位置に到達するためのナビゲーション(16)に分けることができる。

本論文は後者に関するものであり、ランドマーク(LM)を用いたナビゲーション手法に関するものである。この手法では、自己位置を推定する必要がなく、一般に移動ロボットの情報として用いられている車輪の回転数等を必要としない。従って、床や地面に接した移動を考えなくても良く、本研究では飛行ロボットを用いてナビゲーションを実現する。従来の方は(16)、LM を 3 つ用い、隣り合う LM 間の 2 つの角度情報により環境を 4 領域に分割し、それぞれの領域において目標位置へ到達するための移動方向のみを決定するというものであった。この方法では、領域が変わる度に移動方向が急激に変化するため、慣性によるオーバーシュートが発生し、移動軌跡も効率的ではないという問題があった。さらに、LM として赤い円筒を採用しており、画像中から必ずしも安定して抽出できなかった。

本論文では、画像中の LM の大きさをを用い、その変化により移動方向とその大きさを制御する手法を提案する。この場合、LM の数も 2 つに減らすことができる。また、LM として新たに白熱電球を採用し、減光フィルターを用いて安定してそれを抽出できることを示す。さらに、屋内での移動、つまり、扉やドアの通り抜けの実現や、慣性の減少による制御性能向上を目的に、飛行船自体の小型化を図る。

以上、本論文では、2 章で *Cataglyphis* のナビゲ-

ーションの概要、従来法の概要、及び、本論文での提案手法を述べ、3 章でランドマークについて説明する。4 章で飛行船型ロボットの概要、及び制御手法を述べ、5 章でナビゲーション実験結果を示す。

2. ナビゲーションアルゴリズム

2.1 *Cataglyphis* のナビゲーション 一般的には、蟻は蟻酸により帰巣を行うが、*Cataglyphis* の生存する砂漠では、すぐに蒸発してしまうために蟻酸を使うことはできない。*Cataglyphis* の帰巣のためのナビゲーション手法は、蟻酸を用いないという特殊性から詳しく研究されてきた。そして、*Cataglyphis* の帰巣は、path integration(dead reckoning) と visual landmark navigation の 2 種類により実現されていることが実験により推測されている⁽¹⁵⁾。path integration は遠距離のナビゲーションを実現するためのもので、巣の近くに帰ることを可能にする。この際、センサ情報として、太陽の進行方向に対して垂直方向に光の帯のように表れる偏光を用いる。そして、餌探索行動によるランダムな移動時は、巣からの移動ベクトルを偏光を用いて時々刻々更新し、餌を確保した後は、その移動ベクトルを用いることで、ほとんど直線的に巣の周辺に帰ることができる。この偏光を用いたナビゲーションに関しては、移動ロボットを用いた実験によりその有用性が実証されている⁽¹⁵⁾。

Cataglyphis は巣の周辺に帰ることはできるが、餌探索行動時の偏光計測誤差などにより、完全に巣に戻ることはできない。そこで *Cataglyphis* は、巣の周辺に戻ってからは、visual landmark navigation と呼ばれる視覚から得られるランドマークの位置情報を用いてナビゲーションを行っていると考えられている。これは、次に述べる実験から推測されている。まず、*Cataglyphis* の巣から数メートル離れたところに、巣を中心に数個のランドマーク(黒の円筒状の物)を配置し、数日間放置する。その後、巣以外の場所で同じようにランドマークを配置し、*Cataglyphis* を適当な位置に置いて探索行動を行わせる。このとき、*Cataglyphis* の探索場所密度を求めると、本来巣のある場所が非常に高密度であった。これに対し、ランドマークの配置や高さを変えたとき、*Cataglyphis* の探索した場所は、明確に高密度な場所がなかった。このことから、*Cataglyphis* はランドマークの配置を記憶し、視覚情報を基に巣を探索していると考えられる。同様の実験結果が蜜蜂を用いた場合にも得られている⁽¹⁸⁾。

この昆虫の visual landmark navigation を参考に、著者らは次に示すナビゲーションアルゴリズムを提案

した。次節で概要を示すが、このモデルに至った背景や類似研究などは、既報(16)を参照されたい。

2・2 従来のナビゲーションアルゴリズム 2次元空間でロボットの位置を制御するには、2つの変数が必要である。従来法では、LMを3つ配置し、隣り合うLM間のロボットから見た2つの角度を用いることによって、次に示すようにロボットの移動方向のみを決めている。

ロボットの目的地 (Home Position. 以下, HP) を決めると、図1に示すように、隣り合う2つのLMとHPの3点を通る外接円 Circle1, Circle2により、環境を4つの領域に分けることができる。ロボットは、HPにおけるLM間の角度 ($\phi 12$, $\phi 23$) を記憶しておき、現在位置 (Current Position 以下 CP) から見たLM間の角度 ($\theta 12$, $\theta 23$) とそれ ($\phi 12$, $\phi 23$) とを比較することにより、現在いる領域を判別することができる。そこで、各領域において、表1に示すように移動方向を定めれば、最終的にHPに到達することが可能となる。飛行船型ロボットを用いて検証した結果、HPまでのナビゲーションは実現できたが、各領域において1つの移動方向を指示しているだけのこの手法では、ロボットが目標位置を通り過ぎてしまったり (オーバーシュート)、移動軌跡が効率的でない問題が明らかとなった⁽¹⁶⁾。

Fig.1 Previous navigation algorithm

Table 1 Relation between area and action

Area	State	Action
1	$\theta 12 > \phi 12$ and $\theta 23 < \phi 23$	Right
2	$\theta 12 > \phi 12$ and $\theta 23 > \phi 23$	Back
3	$\theta 12 < \phi 12$ and $\theta 23 > \phi 23$	Left
4	$\theta 12 < \phi 12$ and $\theta 23 < \phi 23$	Forward

2・3 新しいナビゲーションアルゴリズム

2・3・1 水平面内のナビゲーション 従来法の問題点を解決するには、2・2で説明したバンバン制御のような従来法を改善する必要がある。そこで、HPとCPにおけるLMから得られる情報の違いを定量的に表し、それを制御量に用いることにする (従来法では、どの

領域にいるかの認識にしか使わなかった)。また、同じ精度が得られると予想できるなら、LMの数は少ない方がよい。そこで、従来法では、LMを3つ使い、隣り合うLM間の2つの角度を使用していたが、新しい手法では、画像中におけるLMの大きさ (画素数) を採用することで、LMの数を2つに減らすことが可能となる。つまり、2つのLMの画素数を2つの変数とする。以下、LMを2つにした場合における新しいナビゲーション手法を示すが、この手法は、LMを3つ用いた従来法にも適用可能である。

まず、HPとCPにおいて、ロボットから見える各LM (LM1, LM2) の画素数を次の変数で表す。

$$\begin{aligned} \text{Size of LM1 at HP: } & H1[\text{pixel}] \\ \text{Size of LM2 at HP: } & H2[\text{pixel}] \\ \text{Size of LM1 at CP: } & C1[\text{pixel}] \\ \text{Size of LM2 at CP: } & C2[\text{pixel}] \end{aligned} \quad (1)$$

また、HPとCPにおけるLM1とLM2の画素数の平均値を次の変数で表す。

$$\begin{aligned} (H1 + H2)/2: & H0[\text{pixel}] \\ (C1 + C2)/2: & C0[\text{pixel}] \end{aligned} \quad (2)$$

CPにおける各LMの画素数と、HPにおけるのそれらとの差を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} C0 - H0: & e1[\text{pixel}] \\ C1 - H1: & 1_e[\text{pixel}] \\ C2 - H2: & 2_e[\text{pixel}] \\ 1_e - 2_e: & e2[\text{pixel}] \end{aligned} \quad (3)$$

この定義では、水平面内において、HPに対して、 $e1$ が前後方向、 $e2$ が左右方向の偏差となり、これを制御量として用いることにする。これらの値を用いて決定する各モータへの入力値は、4・2で説明する。

Fig.2 Roll and height control

2・3・2 姿勢と高さ制御 飛行ロボットは3次元空間を移動するため、水平面内の制御だけでなく、姿勢 (ロール角、ピッチ角、ヨー角) と高さ制御が必要で

ある。本研究では、姿勢制御を容易にするため、飛行船を採用することでロール角、ピッチ角については受動的に決定されるようにする。

水平面内の制御方法は 2・3・1 で説明したので、旋回（ヨー角）と高さの制御方法について説明する。旋回（ヨー角）と高さの制御では、図 2 に示すように、HP と CP で得られる LM1 と LM2 の中点 (MP) 座標の水平方向と鉛直方向の差を比較し、それぞれ旋回偏差: $e3(\text{pixel})$, 高さ偏差: $e4(\text{pixel})$ として、これをなくすように制御する。これらの値を用いて決定する各モータへの入力値は、4・2 で説明する。

2・3・3 LM を見失った場合の対応 飛行ロボットは、カメラから得られる情報を用いており、外乱などの影響により LM を見失うと制御不能となる。そこで、LM を見失った場合には、以下のようにして対応する。

LM を見失うケースとして、基本的には次の 5 つが考えられる。

- i) LM を上方に見失う
- ii) LM を下方に見失う
- iii) LM を左方に見失う
- iv) LM を右方に見失う
- v) 近づきすぎて LM を左右に見失う

さらに、これらの条件を組み合わせたものとして、

- vi) LM を左上に見失う
- vii) LM を右上に見失う
- viii) LM を左右上に見失う
- ix) LM を左下に見失う
- x) LM を右下に見失う
- xi) LM を左右下に見失う

これらを考慮に入れ、LM を見失った場合の対処方法として、次のようなアルゴリズムを提案する。まず、使用しているカメラから得られる 512(H)×440(V)画素の画像を 8×8 に分割する（水平方向に 64 画素ずつ、鉛直方向に 55 画素ずつ）。この分割された画面において、LM を見失う直前に、各 LM がどの分割領域に存在したかを記憶しておき、それに応じてロボットの対処行動を表 2 のように決定する。表中、X, Y は画面左上を原点とした水平方向右向き、及び鉛直方向下向きを正方向とする場合の座標値を表す。また、controlled variable は、各移動方向の制御量 V1~V4 (4・2 参照) をどのように変えるかを表したもので、実際にモータへ送る制御量 (200 段階の PWM デューティ比) の中間値となる 100 を、表に示すように加減する。100 は経験的に決めたもので、これより小さいと時間ロスが大きく、大きいと加速しすぎて安定性に問題が生じる。表 3 は、LM を見失う各ケースと表 2 に示す対処

行動の対応関係を示す (表 2 の代表値として、previous state の番号を表示してある)。

Table 2 Relation between previous state and action

	Previous state	Action	Controlled variable
1	$0 < LM1_Y < 55$	Up	V4+100
	$0 < LM2_Y < 55$		
2	$385 < LM1_Y < 440$	Down	V4-100
	$385 < LM2_Y < 440$		
3	$0 < LM1_X < 64$	Left turn	V3+100
	$0 < LM2_X < 448$		
4	$64 < LM1_X < 512$	Right turn	V3-100
	$448 < LM2_X < 512$		
5	$0 < LM1_X < 64$	Back	V1-100
	$448 < LM2_X < 512$		

Table 3 Relation between LM loss state and previous state

LM loss state	Previous state	LM loss state	Previous state
i	1	vii	1 and 4
ii	2	viii	1 and 5
iii	3	ix	2 and 3
iv	4	x	2 and 4
v	5	xi	2 and 5
vi	1 and 3		

3. ランドマーク

特定の色をした LM を用い、実環境においてそれを抽出する場合、照明による色情報の変化やノイズの影響により抽出できなくなることが多い。従来法では赤色円筒のランドマークを用いていたが、安定して抽出するためにライトアップしていた。

本研究では、実環境内において LM を安定して正確に抽出するために、LM として白熱電球 (直径 110mm, GW 110V 150W G125 K) を採用し、減光フィルタ (減光率 10%) を用いてそれを抽出する方法を提案する。

室内の蛍光灯などが多く含まれている環境中に、白熱電球を LM として配置した状態を図 3 (a) に、LM をオンにした状態を (b) に示す。このままでは、蛍光灯などの他の光源と区別がつかないことが分かる。そこで、減光フィルタを 2 枚取り付けたところ、図 4 (a) のように白熱電球 LM のみが明るく見え、閾値処理により図 4 (b) のように LM のみを抽出できる。

本研究のナビゲーションでは、LM の画素数を用いて飛行ロボットを制御する。そこで、抽出した LM の画素数が距離に応じてどのように変化するかを調べた結果、図 5 のようになった。この結果から、使用しているカメラでは、6m 以上離れた場合は、LM の画素数変化がほとんどないことがわかる。そこで本研究では、

ナビゲーションアルゴリズムの有効性を検証する際、LM との距離が 6m 以内の範囲で実験を行うことにする。それ以上距離が離れ、LM の画素数変化がほとんどない場合は LM に向かって移動するものとするが、実験環境の制約から、本論文では特に取り上げない。

Fig.5 Relation between size of LM and distance

4. 飛行船型ロボットのシステム構成

4.1 飛行船型ロボットの仕様 従来の研究では、図 6 のような飛行船型ロボットを使用していた。全長 1.9m、全高 1.5m、全幅 1.1m であり、室内で移動するには大きく、形状が鉛直軸に対して非対称なため、直進には有利であるが、ピンポイントのナビゲーションに適しているとは言えない。そこで、飛行船自体の小型化を図り、風船の形状を軸対象にした。小型化の目安としては、必要浮力を満たす最小の大きさであること、及び、ドアや扉（通常それらの幅は 850mm 程度）を通り抜けられることを考慮し、風船の直径を 550mm とした。図 7 (a) に全体図を、(b) にマイクロコンピュータ (PIC)、モータ、プロペラ、カメラなどが取り付けられたコントロールユニット部の外観を、(c) にモータ

配置の詳細を示す。(c) に示すモータ設置用のフレームは透明なため、(b) では見えにくくなっている。表 4 にはロボットの仕様を示す。従来と同様に、2 対 3 組のプロペラを 3 軸に対応させて配置する。これにより、3 次元位置（上下、前後、左右の平行移動）及び yaw 角（左右の旋回）の制御を同時に行うことが可能になる。画像処理とモータ指令計算を行う PC は別に用意し、ロボットに付随しているマイクロコンピュータと PC とはワイアレスモデムにより通信を行う。また、カメラ画像も無線で PC に転送する。

Fig.7 New flying robot

Table 4 Specification for the blimp-type flying robot

Micro computer	Microchip PIC16F873
DC motor	YOSHIOKA MODEL FACTORY No.202 MOTOR × 6
CCD camera	CONY ALM-2452
Signal form	NTSC
Resolution	512(H)×440(V)
Angle of vision	64.0 deg(H), 52.3deg(V)
Frame rate	1/60 ~ 1/2000s auto
Propeller diameter	50mm
Buoyancy of balloon	170gf
Total weight of robot	165g

本システムの構成を図 8 に示す。情報の流れは以下の通りである。CCD カメラにより LM を含む環境を撮影し、その画像を無線により地上に設置した PC に送信する。PC は LM を抽出し、次節で述べる計算によりモータへの出力を決定する。その結果を無線によりロボットに送信し、モータの回転数を制御する。これを 1 周期とし、10Hz で制御を行う。

Fig. 8 System configuration

4.2 モータ制御量の決定 図 7 (c)に示すように、使用しているモータは、前後制御用 2 ヶ (Motor1, 2), 左右制御用 2 ヶ (Motor3, 4), 高さ制御用 2 ヶ (Motor5, 6) である。

本研究では、(4)式に示す PID 制御に基づき、各移動方向の制御量 V_i を決定する。ここで、 i : 各移動方向 1 ~ 4 (1: 前後方向, 2: 左右方向, 3: 旋回, 4: 高さ) とする。

$$V_i = K_{pi}(e_{in} + \frac{\Delta T}{T_{ii}} \sum_{k=1}^n e_{ik} + T_{di} \frac{e_{in} - e_{in-1}}{\Delta T}) \quad (4)$$

V_i : 各移動方向の制御量, e_{in} : 時間 n における偏差,

ΔT : サンプル周期,

K_{pi} : 比例定数, T_{ii} : 積分定数, T_{di} : 微分定数

Table 5 Control gains

i	K_p	T_i	T_d
1	0.07	108.9	4
2	0.9	46.3	5
3	1	109.8	1
4	4.5	161.3	1.1

表 5 には、経験的に決定した各コントロールゲインの値を示す。各移動方向の制御量 $V_1 \sim V_4$ を用い、それぞれのモータに対応した制御量 $U_1 \sim U_6$ (200 段階の PWM デューティ比) を次の(5)式によって決定する。なお、旋回制御には、応答性をよくするために Motor1, 2, 3, 4 を用いる。

$$\begin{aligned} U_1 &= V_1 + V_3 \\ U_2 &= V_1 - V_3 \\ U_3 &= V_2 + V_3 \\ U_4 &= V_2 - V_3 \\ U_5 &= U_6 = V_4 \end{aligned} \quad (5)$$

5. ナビゲーション実験

5.1 実験設定 ナビゲーション実験では、LM と HP の配置、及び、実験を開始するスタート地点を決定する必要がある。前者に関しては、まず、LM から見て HP の反対側は壁と想定し、また、LM にあまり接近すると視野にとらえられないことを考慮して、LM 間を 0.5m, HP を 2 つの LM の中心から 2m の位置に設定する。そして、図 9 に示すように、スタート地点 (SP) は、LM から約 6m (3 章より) 離れた HP から 4m の地点に設定し、どの方向からでも本ナビゲーション手法が有効であるかを検証するため、HP に対して 0° , 30° , 60° , 90° の角度 (それぞれ SP1, SP2, SP3, SP4) とした。また、実験は、それぞれの SP において LM が見える状態から開始し、LM の高さを 1m としたので、飛行船のコントロールユニットも約 1m の高さから開始した。実験は室内で、ほとんど無風状態で行う。

本研究では、ナビゲーションの成功条件として、HP を中心に $0.5m \times 0.5m$ (飛行船約 1 機分: 目標領域) に飛行船下部のコントロールユニットが一度入ってから、その範囲をでることなく 20 秒間留まることとした。先述のように、従来法では、4 領域において移動方向のみを与えていただけであり、HP に留まることはできなかった。どの程度留まっていれば良いかに関しては深く議論しないが、この程度とどまることができればその場をじっくり観測することができ、また、十分安定して留まっていると言えるであろう。

Fig.9 Experimental setup

Fig.10 Experimental result—trajectory of robot

5.2 実験結果と考察 各 SP からそれぞれ 3 回のナビゲーション実験を行った結果、全て目標領域内に留まることができ、ナビゲーションは成功した。以下に詳細を示す。図 10 には、各 SP からのロボットの水平面内の移動軌跡の一例を示す。これは、外部に設置したビデオカメラ画像から、ロボットの軌跡をトレースしたものである。ビデオカメラ画像は、約 4m で 640pixel の解像度としたので、1pixel の誤差は約 6mm である。また、図 11(a)には、各 SP から目標領域に入るまでの高さの変化、図 11(b)には、目標領域内での高さの変化と終了地点、表 6 には、ナビゲーション成功までの経過時間を示す(目標領域停止時間 20 秒を含む)。

なお、各 SP の高さが異なるのは、単に設置誤差であり、約 100cm の高さでロボットを手放してから制御を開始したために発生したものである。

(a) From SP to target area

(b) At target area

Fig.11 Experimental result—altitude changes

Table 6 Experimental result—time

SP	Trial no.	Time[sec]
1	1	43.8
	2	41.4
	3	39.7
2	1	42.9
	2	43.4
	3	43.7
3	1	46.1
	2	40.3
	3	41.8
4	1	42.4
	2	46.3
	3	41.7
Average		42.8
S.D.		3.5

まず、水平面内のナビゲーションについて検討する。図 10 より、ロボットの軌跡は、初期の姿勢・状態に依存して SP から必ずしも真っ直ぐに目標領域に向かってはいないものの、最終的に HP 近傍に収束していることが分かる。これは、水平方向(前後方向(Motor1, 2)および左右方向(Motor3, 4))の制御と、Motor1, 2, 3,

4 の制御の結果として表れる巡回制御が適切に行われた結果であると考えられる。他の 2 試行についても同様の結果であり、このことは、表 6 において、目標領域到達までに要する時間がほぼ一定であることから伺うことができる。先述のように、従来の手法では一カ所に留まることができなかった。これに対し本提案手法では、水平面内については、上記のように目標位置への安定したナビゲーションに加え、安定してある領域に留まることができ、その有効性が示されたといえる。

高さ制御については特に明確な成功条件を決めていないが、図 11 より、目標領域に入るまでは±20cm 程度の変位があり、目標領域に入ってから±10cm 程度の変位に収束していることが分かる。目標領域に入るまでは、前後左右方向制御のための 4 つのモータが活発に動作しており、各モータ間の距離が近いこと、その風の影響を受けて上下方向の変位が大きくなっているものと考えられる。一方、目標領域内では、水平方向にほとんど移動する必要がないためその影響は小さく、かなり安定して高度が維持できているものと考えられる。どの程度の精度が必要かに関しては議論の余地はあるが、おおむね安定しており、その程度を定量的に示すことができたと考えられる。また、本研究では、建物内の循環監視をひとまずの目標としており、本実験で得られた精度は、その目標の支障にはならないものと考えられる。

6. まとめ

本研究は、完全に自律的に行動できる昆虫の帰巣行動にヒントを得て、環境モデルを持たず、誤差を含む topological な情報のみによるナビゲーション手法に関するものである。従来法では、LM を 3 つ用い、それにより環境を 4 領域に分割し、それぞれの領域における移動方向のみを与えて飛行船型ロボットのナビゲーションを行うというものであった。この方法では、領域が変わる度に移動方向が急激に変化するため、慣性によるオーバーシュートが発生し、移動軌跡も効率的ではないという問題があった。さらに、LM として赤い円筒を採用しており、画像中から必ずしも安定して抽出できなかった。

これらの問題点を解決するために、本研究では、LM の大きさ情報を用い、その変化によりロボットの移動方向とその大きさを制御する手法を提案した。この手法では、LM の数を 2 つに減らすことができ、また、LM として新たに白熱電球を採用し、減光フィルターを用いて安定してそれを抽出できることを示した。さらに、屋内での移動、つまり、扉やドアの通り抜けの実現や、慣性の減少による制御性能向上を目的に、飛行船自体の小型化を図った。そして、新しい飛行船型ロ

ボットを用いた実験により、本手法の有効性を示した。

今後は、実用性を考慮し、屋内の長距離ナビゲーション、すなわち、あらかじめ環境中にいくつかの LM 組を配置し、それにより順次遠方へ誘導するような循環監視の実験を行う予定である。また、風などの外乱に対する限界を調査し、様々な用途の可能性を追求していきたい。

参考文献

- (1) 永谷圭司, 油田信一, 衝突の危険性を評価関数とする移動ロボットの経路とセンシング点の計画, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp.197-206, 1997.
- (2) M. K. Habib and H. Asama, Efficient Method to Generate Collision Free Paths for Autonomous Mobile Robot Based on New Free Structuring Approach, IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.563-567, 1991.
- (3) J.C. Latombe, ROBOT MOTION PLANNING. Kluwer Academic Publishers, pp.153-355, 1991.
- (4) 前田武志, 石黒浩, 辻三郎, 全方位画像を用いた記憶に基づく未知環境の探索, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU92-10, pp.73-80, 1995.
- (5) 松本吉央, 稲葉政幸, 井上博允, 視野画像列を利用した経路表現に基づくナビゲーション, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp.236-242, 1997.
- (6) 登尾, 未知空間におけるパスプランニングアルゴリズムを設計するための十分条件とそれに基づくアルゴリズムの評価, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.8, pp.1013-1021, 1992.
- (7) 渡辺, 油田, 車輪型移動ロボットのデットレコニングシステムにおける位置データ誤差, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.347-350, 1988.
- (8) 橋本, 大場, 藤川, 今牧, 西田, レーザ位置計測とのデットレコニングの統合による車輪型移動ロボットの位置推定法, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1028-1038, 1993.
- (9) 前山, 大矢, 油田, 移動ロボットののための漸近的現在位置推定法, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7, pp.1075-1081, 1997.
- (10) 西川, 森, 簡潔な経路情報を基にした移動ロボットの誘導法, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8, pp.1183-1191, 1994.
- (11) 柴田史久, 志摩昌和, 芦田昌也, 角所考, 北橋忠宏, 道標認識の曖昧性を考慮した移動ロボットのナビゲーション, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.7, pp.993-1000, 1999.
- (12) 山本元司, 牛見宣博, 毛利彰, 移動ロボットの目標方向センサによるセンサベースト・ナビゲーション, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp.1083-1090, 1998.
- (13) J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte: "Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot," Proc. of IROS '91, pp.1442- 1447, 1991.
- (14) S. Thrun, et. al.: "Integrating Topological and Metric Maps for Mobile Robot Navigation: A Statistical Approach," Proc. of AAAI '98, 1998.
- (15) Lambrinos, D. & Maris, M. & Kobayashi, H. & Labhart, T. & Pfeifer, R. & Wehner, R. An autonomous agent navigating with a polarized light compass, The Journal of Adaptive Behavior, Vol 6, No 1, p. 131-161, 1998.
- (16) 小林, 菊池, 小野木, 越智, 昆虫の視覚による帰巣行動を参考にした飛行ロボットのナビゲーション, 日本機械学会論文集 (C 編), 68 巻 668 号, pp.1104-1112, 2002
- (17) F. Papi edit: Animal Homing, Chapman and Hall, pp. 45-144, 1992.
- (18) B. Cartwright and T. Collet, Landmark Learning in Bees., Journal of Comparative Physiology A, 151, pp.521-543, 1983.