天井蛍光灯を用いた移動体の自律走行 に関する基礎的検討

非会員 橋 本 岳 (京大)
 学生員 山 本 茂 広 (京大)
 非会員 麻 生 武 彦 (京大)
 正 員 安 陪 稔 (京大)

Vision-Based Vehicle Navigation Using Ceiling Fluorescent Lamps

Takeshi Hashimoto, Non-member, Shigehiro Yamamoto, Student Member, Takehiko Aso,
 Non-member, Minoru Abe, Member (Kyoto University)

In this paper, an autonomous navigation based on a TV vision system on board a vehicle is proposed. Our method is to use fluorescent lamp array on the ceiling as a lighthouse for vehicle motion.

First, the experimental study of a vehicle control based on information from photo-sensors, set up on a TV screen, is worked out using a practical autonomous vehicle. As a result of this experiment, the validity of our method is confirmed. Next, numerical simulations for this control scheme are carried out in detail. Then, the contour map about the initial position on the floor which gives the limit of controllable or uncontrollable region is indicated.

キーワード：天井蛍光灯，移動体の自律走行，画像処理

1. はじめに

最近の多品種少量生産においては，部品などを効率良くかつフレキシブルに搬送するシステムが不可欠であり，この目的に供される自律走行移動体に関しては数多くの研究がなされている^{(1)~(4)}。しかし，従来の研究の多くは，汎用性・適応性を高めるために高度な手法を用いており，実用的な面ではまだ解決すべき多くの問題が残されている。

そこで著者らは，ボトムアップ的に既存の簡便な技術を応用して，技術レベルそれぞれにおいてどのような機能が実現できるかを念頭に置きつつ研究を進めてきた。具体的には，天井に配置された蛍光灯を目印とした移動体の位置計測および制御⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾についての検討を続けている。

天井蛍光灯を利用したシステムの特徴として次のような点を挙げる事ができる。

- (i) コントラストが高く安定した画像を利用できる
- (ii) 多くの工場内で設置されており，既存の設備の利用が可能である
- (iii) システムが比較的簡便・安価である

本手法は，画像処理の技術を利用して位置測定・制御を行う。方法論的な位置づけとしては，環境を認識して操縦する方法と磁気テープなどを使用する経路誘導方式との中間にあたると考えられる。なお，現在，本システムは他の内向センサなどを併用していない。

2. 研究の概観および前提条件

本研究は図1に示すような幾つかの技術レベルに分けることができる。図中，上部ほど高度なシステムであり，下部ほどシンプルである。ただし，各境界はそれほど明確なものではなく，それぞれ併用する場合がある。本論文は，最も基礎的な検討である step 1，つ

図 1 研究全体の階層図

Fig. 1. A hierarchy of the study.

まりコンピュータを使用せずに“天井蛍光灯列の真下に沿った移動”に関するものである。

著者らは、研究の前提条件として次の2点に留意している。

(1) 実用速度での走行の実現 一般に画像を利用した制御を行う場合には、その処理に時間がかかり実時間走行の実現は容易ではない。このため、ここでは、最も簡便な制御方法を採用し、かつコンピュータではなくアナログ/デジタル回路を用いることで実用速度での走行を実現している。

(2) オープンループのPWM制御方式のモータを使用

これは、現在の無人搬送車の多くが採用している操舵方式であり、本研究でもこの制御方式を対象とした。

3. 制御方法および基礎実験

〈3・1〉 制御原理 蛍光灯列の真下（以後、「基準軌道」と呼ぶ）に沿った移動を実現するためには、どのような制御を行う必要があるかについて、その制御原理を図2を用いて説明する。図2(a)～(d)それぞれにおいて、左側の図は天井から見下ろした実験環境を示し、移動体（ハッチされた長方形）とその撮影範囲（破線の台形）、および天井蛍光灯（太い実線）が記されている。更に、右側の図はカメラ画像に蛍光灯像が映る様子を示している。なお、カメラ取付けの都合上、カメラ画像は左右が反転する。

(a)図は、移動体が蛍光灯列の真下に位置し、蛍光灯像は画像の中央にある。この場合には移動体の舵を正面（移動体と平行）としてそのまま進行すればよ

図 2 天井蛍光灯位置と移動体の関係

Fig. 2. An illustration of control procedure.

い。しかし、(b)、(c)図では、移動体が基準軌道より左領域に存在するため蛍光灯像が画像の中央より左領域に映り、このため基準軌道に復帰するためには、右方向への操舵が必要である（蛍光灯像が右領域にある場合にはこれと逆方向に操舵する）。また、(d)図では、これ以上の右転回を防ぐために、舵を正面に戻す必要がある。

以上の制御をまとめると、蛍光灯像が画像の中央、左領域、右領域の3領域のどこにあるかを判断して、それぞれに対応した操舵を行えばよいことがわかる。

〈3・2〉 制御方法 以上のような制御原理を実現するため、実機の特性を考慮して、以下のような制御方法を採用することとする。具体的な実機の制御装置については第4章で詳述する。

まず、蛍光灯像検出部として、TVモニタスクリーン上にフォトセンサ列をスクリーン中央（床面での基準軌道と対応）とそれを挟んで左右に対称に配置する。以下では、これを「3センサゾーン」と呼ぶ。この状態で、天井蛍光灯をビデオカメラにより取り込み、スクリーン上に蛍光灯像を映し出し、各センサ領域の出力を得る。

次に、操舵部は検出部の出力を受け次のような手順で操舵指令を出す。表1に示すように、実機の操舵モータがオープンループ制御のため操舵角は初期位置から相対的に決定されることを考慮して、直前に行った

表 1 操舵方向の決定
Table 1. Decision of the rudder direction.

現在の舵の向き	フォトセンサ入力		
	左	中央	右
左	右	右	不変
正面	右	不変	左
右	不変	左	左

(a) アイリス：通常 (b) アイリス：絞り込み

図 3 天井蛍光灯像

Fig. 3. The video images of ceiling fluorescent lamp.

操舵による現在の舵の向きと、現在のフォトセンサからの入力をもとに操舵方向を判断する。例えば、現在右方向に舵を切っている場合に、像が中央になった場合には、左方向へ操舵を行う。

また、復帰のため十分な操舵量を確保しつつ、かつ移動体の滑らかな動きのために、1回の操舵角は左右両方向ともに 10° のみとし、簡単化のためここでは中間の値は設定していない。

〈3・3〉基礎実験1（蛍光灯像の抽出） 蛍光灯像は背景に比べてコントラストが高いため、像だけを抜き出すこと（二値化処理に相当）が容易である。このことより、上述のフォトセンサによる蛍光灯像の水平位置の検出が可能となる。ここでその様子を確認しておく。図3は、ビデオカメラに映った通常アイリスでの実験環境の天井風景像(a)とビデオカメラのアイリスを絞ることで蛍光灯像だけを表示した画像(b)である。画像中央に見える蛍光灯像だけが抽出されていることがわかる。

〈3・4〉基礎実験2（移動体の偏差と蛍光灯像の変位の関係） 次に、画像上の蛍光灯像の動きから移動体の制御が可能であるかどうかを調べるために、“床面における蛍光灯列の真下からの移動体の偏差”と“蛍光灯像の変位”とを比較した結果を図4に示す。同図において、横軸は移動体の偏差、縦軸は変位であり、これらは、後述する実機と同じ条件、つまり14インチのTVモニターおよび画角約 63° のVTRカメラを前方へ 30° チルトした状態での結果である。図

図 4 移動体の偏差と蛍光灯像の変位の関係
Fig. 4. Deviation of fluorescent lamp image on TV monitor screen.

4より、例えば移動体の偏差が10 cmの場合、蛍光灯像の偏差は画像上部で6 mm、画像下部で10 mmと、いずれの場合でもほぼ1 cm程度の変位があるため、これらはTVモニタの解像度から十分に識別可能である。後に述べるセンサ間隔はこの結果を考慮して決定した。

4. 実機システムの構成

図5にシステムの概観の写真を示す。また、図6にシステムの構成を示す。本システムは移動台車、ビデオカメラ、TVモニター、蛍光灯像検出部、操舵制御部から構成されている。以下でそれぞれについて説明する。

〈4・1〉移動台車 移動台車として、磁気テープ方式で実用化されている無人搬送車（日本輸送機製「ムジンカーミニ」）に改造を加えたものを用いており、そのスペックを次にまとめる。

全長	900 mm
全幅	485 mm
ホイールベース	400 mm
最大積載量	100 kg

この台車は、前輪1輪、後輪2輪の3輪式であり、前輪で前進および操舵を行っている。また、操舵用のDCモータはサーボ機構でなくオープンループのPWM方式で制御されており、また前輪の操舵回転速度および方向は加える電圧により制御される。すなわち、操舵の方向と角度は、電圧の大きさとその継続時間によって決定される。ただし、この際、オープンループのため多少の誤差が生じる可能性があることに留意する必要がある。

走行速度は、高速モード：42 cm/s、低速モード：27 cm/sの2種類である。通常、軌跡を測定する装置の都合上低速モードで実験を行っているが、制御装置

図 5 システムの概観
Fig. 5. Overview of vehicle.

図 6 システムの構成
Fig. 6. A block diagram of control system.

は高速モードにも対応することが可能である。

〈4・2〉ビデオカメラ、TV モニタ ビデオカメラは市販の 8 mm ビデオカメラ (SONY 製 CCD-V 800) に広角アタッチメントレンズ (semi fisheye) を取り付けて画角約 63° で使用している。このビデオカメラをほぼ操舵輪の上に鉛直方向から前方へ約 30° チルトして取り付けた。天井蛍光灯とカメラとの距離は約 2.1 m である。ビデオカメラのシャッタ速度は

図 7 蛍光灯像検出部
Fig. 7. An illustration of photo-sensor unit.

1/60 で、アイリスは約 F 16 程度まで絞ることで、前述した図 3 のように TV モニタ上に蛍光灯像のみを映し出すことが可能である。

TV モニタ (SONY 製トリニオン管) は 14 インチである。

〈4・3〉蛍光灯像検出部 TV モニタのスクリーンの蛍光灯像を検出するための蛍光灯像検出部として、図 7 に示すように、ユニバーサル基板上に小形のフォトリンジスタ TPS 606 を配置したものを用いた。フォトリンジスタは、図のように、中央と左右の三つの領域に分かれて配置され、それぞれの領域の中で並列に接続されている。中央領域ではフォトリンジスタは 1 列で、それ以外では 6 列となっている。中央領域と左右領域との間隔が移動体の基準軌道上での許容最大偏差と関連しており、像の大きさおよびフォトリンジスタの感度特性などを考慮して、偏差を約 10 cm 以下に抑えるために約 13 mm とした。左右の領域内でのフォトリンジスタの配置間隔は、蛍光灯像を見落とさないように決定した。

〈4・4〉操舵制御部 操舵制御部は、入力として蛍光灯像検出部 (フォトリンジスタ) の出力を取り込み、出力として操舵モータを駆動するパルスを出す。具体的には、次のような三つの回路から構成されている。

- (1) インタフェース回路
- (2) 操舵方向制御回路
- (3) 操舵角制御回路

以下、これらについて順に説明する。

(1) インタフェース回路 フォトリンジスタの出力はビデオ信号の走査のため 60 Hz のパルス信号となっているので、これをロジック回路に入れる前にインタフェース回路を介している。ここでは低域フ

図 8 操舵制御回路の出力
Fig. 8. Output pulse of rudder control unit.

ィルタとヒステリシス特性を有するコンパレータにより次の操舵方向制御回路のロジックレベル（15 V，0 V）へ変換する。

（2）操舵方向制御回路 インタフェース回路の出力を受けて，表 1 の制御を実現するために，ロジック回路により構成されている。

（3）操舵角制御回路 操舵角制御回路は，操舵方向制御回路の出力に従って，操舵モータの回転角を調節する部分である。具体的には，出力パルスの電圧と幅を決定する単安定マルチバイブレータによって構成されている。このパルス波形を図 8 に示す。通常は 6.2 V で，右方向に操舵する場合 7.5 V，左方向に操舵する場合 4.8 V のパルスが発生する。パルス幅は 0.5 秒で，現在の設定では，移動体はその間に約 10° の操舵を行う。左右の操舵角は等しくなるように調整してある。

5. 走行実験結果

本章では，実機による走行実験結果についてまとめる。

本実験の目的は，提案手法の実現可能性の確認である。具体的には天井蛍光灯列の真下，つまり基準軌道上を一定偏差内で走行することを目標とする。

〈5・1〉 実験条件 実験環境は，長さ 56 cm の蛍光灯が長軸方向に約 3 m の間隔で 3 本配置されている約 10 m の廊下で，照明はこれら以外には存在しない。ビデオカメラの画角 63° では，画像中には蛍光灯像がほぼ 1 本映り込んでいる。

〈5・2〉 実験方法 移動体を低速（または高速）モードで走行させ，その軌跡を測定した。移動の初期位置は，蛍光灯列の真下および真下からほぼ 30 cm 程度の範囲内で変化させた。また，蛍光灯列に平行または傾いた状態からもスタートさせた。

〈5・3〉 実験結果 次の 2 例について走行実験結果を示す。図中，横軸は進行距離，縦軸は偏差（進行

図 9 走行実験結果 1
Fig. 9. The experimental result 1.

図 10 走行実験結果 2
Fig. 10. The experimental result 2.

距離 3～7 m の平均値を基準）であり，実線は移動体の軌跡，上部の十字は蛍光灯列の真下の方角に対する移動体の角度を示す。

（1）移動体をほぼ基準軌道上から移動させた場合 走行軌跡の一例を図 9 に示す。最大偏差 4 cm，平均では 2 cm であり，この偏差はフォトセンサ部の中央と左右のセンサ領域との間隔から予測される値以内であり，良好な制御が行われていると判断できる。

軌跡を検討すると次のようである。移動開始直後，移動体の傾きなどにより右に操舵した後，蛍光灯像がビデオカメラから消えるため，移動体は右にそれている（点 A）。その後，点 B 付近で TV モニタに次の蛍光灯像が得られるため，復帰動作を始めていることがわかる。

更に，点 C において再び蛍光灯像が得られない領域に入り，その後復帰動作を行っている。

（2）移動体を基準軌道から離れた位置から移動させた場合 移動体を基準軌道から約 30 cm 離れた位置からスタートさせた場合の結果を図 10 に示す。この場合にも移動開始直後に復帰運動に入っており，その後は，ほぼ基準軌道上を移動していることがわかる。

以上の結果から，天井蛍光灯列を目印として移動体を制御することが可能であることが確かめられた。

図 11 シミュレーションの流れ図
Fig. 11. Flowchart of simulation.

図 12 シミュレーションのセンサ
Fig. 12. Sensor zones of simulation.

6. シミュレーションによる走行特性の検討

本章では、コンピュータシミュレーションによって、本制御の適用可能性、特に、移動体が復帰可能な初期位置についての検討を詳しく行う。

〈6・1〉 シミュレーション方法 シミュレーションは図 11 に示すように、初期設定の後、次のアルゴリズムで実験を模擬している。

(1) 移動体の移動ステップ 移動量は、計算時間の関係上 5 cm (蛍光灯像待機状態)、または 12 cm, 33 cm (操舵中) としている。

(2) 画像作成 天井座標上の蛍光灯列を透視変換により画像座標へ投影することで画像を作成する。

(3) 操舵の判断 各ステップごとに作成した画像中の蛍光灯像が、図 12 のどの領域に入るかを調べ、その結果から実機の場合 (表 1) と同様の判断に基づいて操舵方向を決定する。この結果を受けて、上記の微小移動を行う。

〈6・2〉 シミュレーションパラメータ シミュレーションパラメータは基本的に実機に準拠した値であ

図 13 センサ間隔と最大偏差
Fig. 13. Maximum deflection of vehicle vs. sensor gap.

図 14 蛍光灯間隔と最大偏差
Fig. 14. Maximum deflection of vehicle vs. space of between florescent lamps.

り、以下に主なパラメータを列挙する。

走行速度：26.5cm/s

操舵雑音：5%

画角：63°

カメラと天井蛍光灯との距離：2.1 m

カメラ方向：前方へ 30° 傾ける

レンズ特性： $2 \sin(1/2\theta)$

画素数：256×256 画素

センサ感度 左センサ ON：30 画素

中央センサ ON：15 画素

右センサ ON：30 画素

シミュレーションパラメータは、“環境、制御系、移動体のパラメータ”に大別できる。この中で、“環境のパラメータ”は本手法が適応すべき条件（すなわち、蛍光灯の本数、配置などの外部条件）であり、本論文では、蛍光灯列一列に限定している。また、“移動体のパラメータ”では、実機の操舵機構に合わせるため、操舵角に一定量の雑音を加えている。

本シミュレーションでは、主として“制御系のパラメータ”について検討した。

図 15 復帰距離の等高線図
Fig.15. The contour map of recovering area.

〈6・3〉 シミュレーション結果 まず、実機の走行軌跡とシミュレーションの結果とを比較して一致することが確かめられたので、以下の項目についてシミュレーションによる検討を行った。

- (1) センサ間隔および蛍光灯間隔の変化の影響
実験条件の変更が容易ではない項目として、
- (i) センサ間隔と最大偏差
- (ii) 蛍光灯間隔と最大偏差

これについて検討した結果を図 13, 図 14 に示す。それぞれ、縦軸は軌跡の最大偏差で、横軸にはセンサ間隔または蛍光灯間隔をとった。図 13 より、センサ間隔 14 mm では、最大偏差を 10 cm 以下に抑えることが可能であることが読み取れる。また、図 14 より、レンズの画角 63° の場合、蛍光灯間隔 3 m が、移動体を走行制御できるほぼ限界に近い条件であることがわかる。

(2) 復帰距離 移動体の初期方向および操舵角を 0° とし、移動開始位置を蛍光灯列の真下から距離方向 (蛍光灯列に直角方向) に -60 cm~60 cm まで、また、進行方向には約 4 m まで、それぞれ 10 cm 間隔で変化させて復帰距離を調べ、その結果を等高線グラフ (図 15) にまとめた。また同図には、幾つか

の代表的な移動開始位置から出発した場合の軌跡をあわせて示した。(a)図は天井から見下ろした実験環境を示し、中央の太い線は天井蛍光灯を表している。濃淡が濃くなるほど復帰に距離がかかり、黒い領域から移動を開始した場合は復帰が不可能である。(a)図より、ほぼ基準軌道から 20 cm 程度では確実に復帰することが可能と判断できる。ただし、蛍光灯の直前付近では復帰が困難な領域が存在する。このように、復帰が不可能、または、復帰に時間がかかる場合の軌跡を検討すると、その原因として次のことが挙げられる。

(i) 蛍光灯像が不連続であるため、復帰途中に蛍光灯像がセンサ領域から消えてしまう場合[(c), (e)図]。これらより、移動体が無蛍光灯像領域に入る前の処置として、できるだけ移動体を基準軌道に平行に保つことが重要であると考えられる。

(ii) 操舵が頻繁に起こり徐々にしか復帰ができなくなる場合[(b), (f)図]。

7. ま と め

天井蛍光灯を目印とした移動体の制御手法についての提案を行い、研究の第一段階として、天井蛍光灯列

の真下を走行することについて各種の検討を行った。制御方法は最も単純な3センサゾーン方式を用いた。結果として次のことが確かめられた。

(1) フォトセンサ方式の実機を用いた走行実験によって、本手法の実現可能性を確認した。

(2) コンピュータシミュレーションによって、復帰可能な移動開始位置について検討した結果、蛍光灯列の真下から約20 cm程度なら復帰可能である。

今後は、移動の精度向上とともに、多様な蛍光灯配置に対しても適用できるようなシステムの構築を検討する必要がある。

なお、本研究の一部は京都大学工学部附属高度情報開発実験施設のワークステーションを使用して行われた。

(平成5年3月5日受付, 同5年5月13日再受付)

文 献

- (1) 津村俊弘:「移動体の知能化」, 計測と制御, 30, No.1 (平3)
- (2) 橋野 賢・中野米二・久米正夫:「蛍光灯センサと全方向移動車への応用」, 第3回日本ロボット学会学術講演会(昭60)
- (3) T. Hashimoto, T. Aso & M. Abe: "Vision-based vehicle navigation using fluorescent lamp array on the ceiling", Proc. 1992 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, p. 1371
- (4) 陶山毅一・新井民夫・太田 順:「天井蛍光灯を利用した移動ロボットの位置修正」, 第10回日本ロボット学会学術講演会(平4)
- (5) 山本茂広・橋本 岳・麻生武彦・安陪 稔:「天井蛍光灯を利用した移動体の自律走行に関する実験的検討」, 第21回パターン計測部会研究会(平4)
- (6) 山本茂広・橋本 岳・麻生武彦・安陪 稔:「天井蛍光灯を用いた移動体の自律走行に関する実験的検討」, 平4電気関係学会関西支部連大, G2-37
- (7) 橋本 岳・山本茂広・麻生武彦・安陪 稔:「天井蛍光灯を用いた移動体の自律走行に関するシミュレーションによる基礎的検討」, 平4同上, G2-38

橋本 岳 (非会員)

昭和60年3月京都工芸繊維大学工学部電気工学科卒業。平成2年3月京都大学大学院工学研究科博士課程中退。同年4月同大学工学部助手, 現在に至る。

この間, 画像計測(テキストチャ解析, オーロラ立体観測画像の解析, 自律走行移動体)に関する研究に従事。電子情報通信学会, システム制御情報学会, 日本リモートセンシング学会会員。

山本 茂広 (学生員)

平成4年3月京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月同大学大学院工学研究科博士課程入学。この間, 高周波インバータ, 自律走行移動体に関する研究に従事。システム制御情報学会会員。

麻生 武彦 (非会員)

昭和44年3月京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学工学部助手, 56年同大学超高層電波研究センター助手, 58年同工学部助教授, 現在に至る。この間, 超高層物理, 計算機シミュレーション, 画像計測などの研究に従事。工学博士。地球電磁気・地球惑星圏学会, AGU, 計測自動制御学会会員。

安陪 稔 (正員)

昭和36年3月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。37年同大学工学部助手, 38年同講師, 41年同助教授, 現在, 同電気工学科教授。この間, 非線形振動, パワーエレクトロニクス, サーボシステムなどの研究に従事。工学博士。システム制御情報学会, 計測自動制御学会会員。