天井蛍光灯を用いた画像処理による移動体の実用速度での自律走行†

橋 本 岳*・山 本 茂 広*
麻 生 武 彦*・安 陪 稔*

Vision-Based Vehicle Navigation Using Ceiling Fluorescent Lamps at a Practical Speed

Takeshi HASHIMOTO*, Shigehiro YAMAMOTO*,
Takehiko ASO* and Minoru ABE*

We have proposed an autonomous navigation using fluorescent lamp array on the ceiling as a light house for vehicle motion, and discussed the computer simulation and experimental results of our primary method. As a next step, the vehicle control scheme based on the results of processing fluorescent lamp images using a personal computer is studied for more flexible navigation.

To realize the vehicle motion at a practical speed, the effect of image processing time on the deviation of vehicle track is examined by using computer simulations. As a result, it is possible to control the vehicle smoothly if the processing time is within 0.4 seconds.

A new method using the circumscribed rectangle of the fluorescent lamp image is adopted to detect the position and angle of the fluorescent lamp image on the screen. By this method, the position and angle information can be obtained more rapidly than Hough transformation.

Considering above discussions, an experimental vehicle system is constructed, and it is confirmed that the vehicle can be controlled to move under the fluorescent lamp array on the ceiling at a practical speed.

Key Words : vehicle navigation, ceiling fluorescent lamp, image processing, practical speed

1. はじめに

現在、多品種少量生産における部品などの搬送システムとして、無人誘導移動体の研究が積極的に行われており、すでに様々な誘導手法が提案されている^{1),2)}。しかし、これらの中で実用化されているものとして電磁誘導線方式や磁気テープ方式などが挙げられるが、いずれも工場床面に誘導経路を設置する必要があるため、汚れや経路変更の困難さなどの問題が残っている。また、研究段階にあるシステムの多くは、各種センサや高度な処理システムを搭載しているために、実用化の面では解決すべき点が多く残されている。

そこでわれわれは、ボトムアップ的に、最も簡便な手法から高度な手法まで、既存のそれぞれの技術レベルに

おいて実用化できる機能がどのようなものであるかという観点から研究を進めている。具体的には、多くの工場などですでに天井に設置されている蛍光灯を利用したシステムに関する研究が続けてきた^{4),10)}。天井蛍光灯を利用する特徴として、蛍光灯画像は安定して抽出可能であること、既存の設備を使用可能であることなどが挙げられる。また、本システムでは、直進走行を実現するために、ロータリエンコーダ、ジャイロ스코ープなどの内界センサは使用せず、蛍光灯だけを目印として制御を行っている。なお、この手法は、実用化されている経路誘導方式と現在研究段階にある環境認識方式の中間に位置付けられるものと考えている。

これまでに、まず第1ステップとして、CRT上に配置された光センサを搭載した実機による蛍光灯列の真下の走行実験に成功している¹⁰⁾。これに対して、今回は次ステップとして、より汎用的な制御の実現を目指して、光センサシステムの代わりにパソコンによる画像処理システムを搭載した結果、光センサ方式とほぼ同様の制御を実現することができたので報告する。これにより、より

† 第37回システム制御情報学会研究発表講演会で発表 (1993・5)

* 京都大学大学院工学研究科 京都市左京区吉田本町

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto
(Received June 23, 1994)

(Revised March 14, 1995)

汎用的な走行制御の実現が可能になると期待される。

2. 処理時間遅れに対する検討

パソコンシステムを用いて画像処理を行う場合、ある一定の処理時間が必要であり、移動体を実用的な速度で制御するためにはこれが大きな問題となる。この処理時間とは、画像を取り込んでから移動体へ指示を出すまでの時間であり、この間、移動体は直前の位置における蛍光灯情報により制御されているため、現在の移動体の位置偏差などには対応できない。その上、移動体が操舵を開始した後、実際に移動体が方向を変えるまでにはさらに時間を要し、走行に不安定な状態が発生することが考えられる。

このため、まず、コンピュータシミュレーションにより、移動体を実用的な速度で走行させるにはどの程度の処理速度が必要であるかについて調べた。

2.1 制御方法

まず最初に、制御方法についてまとめる。

現在、実用化されている簡易な無人搬送車の多くは、オープンループのPWM制御であり、サーボ機構は搭載されていない。本研究においては、これらの現状を考慮して、1回の操舵角は、左方向、右方向それぞれへ約 10° とし、その間の連続した角度は設定できないこととする。

制御の基本原理は、蛍光灯像が画像中央に映るように制御を行うことである。具体的には、Table 1 に示すような規則に基づき、パソコンが直前の操舵方向(Previous Rudder)を覚えており、それとその瞬間の蛍光灯像がどのセンサゾーンに属するか(Sensor Output)により操舵方向を決定する。これを橋本らは「3センサゾーン方式」と呼んでいる¹⁰⁾。

2.2 シミュレーション方法とパラメータ

つぎに、コンピュータシミュレーションにより、蛍光灯列に沿った移動体の直進走行について検討する。

シミュレーション方法は、天井面における蛍光灯の各構成点の座標を透視変換によりカメラ画像に投影し、その投影像の位置と上述の規則に基づいて操舵方向を定めるといったものである。全体の流れとしては、移動体を微

小移動させ、各位置において、蛍光灯画像を作成し、操舵判断、また微小移動というループを繰り返している。

シミュレーションの主なパラメータをつぎに列挙する。

走行速度 : 26.5 cm/s

操舵ノイズ : $\pm 5\%$

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 : $2 \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)$

画素数 : 256×256 画素

今回、操舵時間遅れを表現する上で、約 10° の操舵時間を0.5秒とした。

2.3 シミュレーション結果

Fig. 1 にシミュレーション結果を示す。

Figure 中、横軸は移動体の進行距離(移動体は左から右へ進む)、縦軸は基準軌道(蛍光灯列の真下)からの偏差を示す。スタート位置は、故意に基準軌道より右へ10 cmずらせている。中央の車型は移動体の軌跡を表わし、その上には基準軌道からの移動体の方向、下には操舵角度(左操舵を正、右操舵を負の値で表わす)を示している。

Fig. 1 より、光センサによる制御の場合(同 Figure の logic control の場合)はつぎのような軌跡である。

- 理想的に処理時間が0秒であるため、移動体は進行開始から左へ操舵を行い、スムーズに基準軌道への復帰動作を行い、操舵動作なしで安定して直進する。その後、移動体の姿勢の傾きのためにわずかに軌道からはずれているが、また復帰できることがわかる。これに対して、処理時間0.1秒から順に増加させた場合には、つぎのような結果が得られる。

- まず、処理時間0.4秒までは、移動体が基準軌道に復帰した後、舵をまっすぐにして平行に進行している部分が存在する。この復帰までには時間差があるものの、いったん復帰した後は基準軌道にほぼ平行に走行する部分が見られ、それまでの制御で移動体を適切な軌道に誘導できることがわかる。

- これに対して、処理時間が0.5秒以上になると移動体の方向が大きく変化し、操舵が頻繁に起こる。さらに1秒近くなると蛇行が見られる。1.5秒以上では、すでに移動体を基準軌道上に制御することが不可能である。

以上より、本シミュレーション条件のもとでは、パソコンシステムの実現には、画像処理時間は0.4秒以下でなければならないと判断できる。

Table 1 Rules of rudder control

		Sensor Output		
		Left zone	Center zone	Right zone
Previous Rudder	Left	—	Right	Right
	Center	Left	—	Right
	Right	Left	Left	—

Fig. 1 Effect of delay time on vehicle tracks

2.4 蛍光灯像の抽出方法

以上の結果を踏まえて、移動体を実用的な速度で走行させるためには、約 0.4 秒以下で蛍光灯像を抽出できる高速な画像処理手法の開発が必要である。

一般に蛍光灯像を画像から抽出するには、蛍光灯像の細長いという形状から、従来よりハフ変換が用いられている³⁾。ハフ変換は、蛍光灯像を直線として近似することが可能であるが、これに対して、本制御では蛍光灯像の位置を明確に求めることが必要である。しかも、ハフ変換は計算量が少なくなく、実用的な走行速度を目指すという本研究の目的に対して最適な手法であるとはいえない。さらに、広角レンズを使用した場合には様々な歪みが生じて蛍光灯像が直線ではないという問題もある。

そこで、われわれはもっと単純な方法で、蛍光灯像の位置、および、傾きを知り得る手法として、Fig. 2 に示すように、1 次元投影を繰り返すことにより蛍光灯像に外接する長方形を求めるという手法について検討を行った。具体的には、蛍光灯像の映っている画像を、まず左から右へ順に垂直スキャンを行い、Figure 中の画像上部にハッチで示すように(scan 1)、蛍光灯像が存在する領

Fig. 2 Illustration of detecting fluorescent lamp images using circumscribed rectangles

域を限定する(この段階で、蛍光灯列が2列の場合には、それらを分離することができる)。つぎに、その領域内を上から下へ水平スキャンして、蛍光灯列の像を3個の蛍光灯像に分離する(scan 2)。最後に、それぞれの領域内を垂直スキャンすることにより蛍光灯像に外接する長方形を得る(scan 3)。この段階で、画像中での蛍光灯像の位置が決定される。さらに像の角度は長方形の縦横比から求められるが、このとき、右上がりと左上がりの2通りが考えられるため、その長方形領域の頂点付近を調べることで、像の方向を一意に決定できる。以上よりこの方法は、垂直→水平→垂直と3回スキャンを行うだけであるので、実行速度はハフ変換より一桁速くなり、上記の目標である0.4秒を実現することが可能である。さらに、この方法は蛍光灯像が幅広く映っている場合や蛍光灯端点にノイズなどがある場合にはその影響を受けやすいため、像の角度を求める際には、長方形内について最小自乗法を適用して、角度精度を高める。

2.5 外接長方形による方法とハフ変換との精度比較実験

ここでは、外接長方形による方法とハフ変換との精度の比較実験の結果についてまとめる。ハフ変換では蛍光灯像は線分ではなく直線となるため、像の位置ではなく、角度を比較する。なお、ここで求められた像の角度は、今後の移動体制御に有効な情報を提供すると考えられる。

蛍光灯列に対して、様々な方向に移動体を設置し、実験機に搭載したカメラを用いて蛍光灯像を取り込み、外接長方形による方法とハフ変換による方法との像の角度推定の精度の比較例をTable 2に示し、Fig. 3に、そのときの天井蛍光灯像の例を示す。なお、透視変換およびレンズ固有の歪み誤差により、画像周辺部分では蛍光灯像に歪みが発生しているため、制御において実際に使用するであろう画像中央においてのみ実験した。ハフ変換領域は、角度座標： $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ (1° 間隔)の約60点、距離座

標： $0 \text{ pixel} \sim 352 \text{ pixel}$ (1 pixel 間隔)の約350点とした。

Table 2より、外接長方形による方法に最小二乗法を利用した場合には、実行速度がハフ変換より約1桁速い上に、精度はほとんど変わらないという結果が得られた。この際、データ点数が少ないために最小自乗法のための計算時間はほとんど必要としない。

3. パソコンシステム

3.1 システム構成と各部の概要

Fig. 4にシステム構成を示す。システムは、制御部と移動台車とに大別される。各部にはできるだけ汎用性のあるものに改造を加えずに流用することを試みた。

制御部では、カメラからのNTSC信号がパソコン拡張スロットの画像取り込み装置に読み込まれ、パソコンでこの画像を処理する。その結果に基づき、操舵方向指令がつぎの操舵角制御回路に渡され、この回路の出力パルスがPWM制御回路に送られて、操舵用DCモータを駆動する。パーソナルコンピュータには、日本電気(株)製のPC-9801 DS(クロック周波数16 MHzのi386 SXをCPUにもつ)を使用した。画像取り込み装置としては、サイバーテック社製のCT 9800 Aを用いた。画像は解像度横512×縦486画素で256階調で読み込まれ(但し、フィールド単位で処理を行っている)、パソコン内部では、このボードにバンク切替え方式の8000, 9000番地を割り当て各画素にアクセスすることが可能である。処理結果は、パソコンのプリンタポートを介して、操舵角制御回路に送られる。

Fig. 3 Examples of images for experiments of detecting fluorescent lamp images

Table 2 Comparison of the accuracy and the processing time to detect fluorescent lamp images by three schemes

vehicle orientation (deg.)	rectangle only (deg.)	rectangle + L. S. M. (deg.)	Hough transform (deg.)
0.4	2.7	0.7	0.0
4.8	6.0	4.9	5.0
8.3	10.5	8.4	9.0
12.2	14.7	12.0	13.0
16.0	15.9	15.1	14.0
processing time	0.294 (sec.)	0.306 (sec.)	3.973 (sec.)

Fig. 4 System configuration

移動台車は、磁気テープ方式として実用化されている日本輸送機(株)製の無人搬送車を改造したもので、走行速度は、27 cm/s, 42 cm/s の 2 段階に切り換えられ、前輪で操舵および駆動を行う 3 輪式台車である。

3.2 蛍光灯像の探索

蛍光灯像の探索は上述のような外接長方形を用いて行った。

走行実験における画像スキャンでは、処理時間短縮のために、像にある一定の大きさがあることよりすべての画素ではなく適度な間隔を空けてスキャンを行っている。その場合のスキャン間隔に関する実験結果を Table 3 にまとめる。図中、image 1, image 2 はそれぞれ、蛍光灯像が小さいものおよび大きいものに対応する。なお、現在の実験環境では、Fig. 3 のように 2 本の蛍光灯が映り込み、計測精度の問題から手前の大きな蛍光灯を制御に使用している。このため、移動体の制御には、画像中央から下部まで映る蛍光灯を用いている。

Table 3(a) は、スキャン間隔を縦横方向に変化させた場合に、大小の蛍光灯像を構成する画素数を示したものである。これらより、蛍光灯像が小さな場合でも、縦方向 3 画素、横方向 3 画素間隔でスキャンすれば像を見落とさなく捉えられることがわかる。

さらに、Table 3(b) は、(a) と同様にスキャン間隔を変化させた場合の外接長方形の検出時間を示したものである。画像全域にスキャンを行った場合には、約 0.4 秒の処理時間がかかるが、縦方向 3 画素、横方向 3 画素では、約 0.05 秒の処理時間で済むことがわかる。NTSC

Table 3

(a) Number of pixels to compose a fluorescent lamp image

vertical scan period (pixel)	horizontal scan period (pixel)				
	1	2	3	4	5
1	25/255	12/130	8/77	8/61	4/47
2	12/127	6/65	4/39	4/30	2/23
3	9/84	4/42	4/25	3/19	2/15
4	6/64	3/33	2/20	2/15	1/12
5	5/49	2/24	2/14	1/11	1/8

(image 1/image 2 (pixel))

(b) Detection time of a circumscribed rectangle

vertical scan period (pixel)	horizontal scan period (pixel)				
	1	2	3	4	5
1	274/288	136/145	92/97	69/72	56/58
2	136/145	70/72	46/49	35/37	28/30
3	93/99	46/51	31/33	24/26	17/21
4	70/76	35/37	23/24	17/19	15/15
5	58/62	30/31	19/21	14/15	10/12

(image 1/image 2 (msec.))

信号は 1 フィールドが毎秒 60 枚であるため、処理時間は最小でも 0.017 秒は画像読み込みにかかるが、これと合計しても約 0.1 秒程度の処理時間を実現できた。

以上より、パソコンによる画像処理に基づいた移動体の制御が実現可能であると判断できる。

4. 走行実験結果

4.1 実験環境

実験環境では、蛍光灯の長さ 0.56 m、間隔は約 3 m で、これが約 10 m の廊下に 3 本設置されており、これら以外には照明は存在しない。この環境は、実際の工場などに比べると蛍光灯間隔が広く、長さも短いため、かなり制御が困難な環境である。したがって、現実の工場内においては制御はより容易であろうと考えられる。

4.2 蛍光灯の真下の走行

まず、蛍光灯の真下を走行させることを試みた。その結果、Fig. 5 に示すような走行軌跡が得られた。この場合の平均偏差は 3.2 cm で、最大偏差は 3.9 cm である。蛍光灯とカメラまでの距離と、レンズの画角・解像度から判断すると、最大数センチの量子化誤差が存在すること、および、操舵角を約 10° として、かつ、オープンループの制御としていることを考慮すると、これらの結果は良好であると判断できる。

4.3 真下から離れた位置からのスタート

また、蛍光灯の真下から離れた位置からのスタートも試みた。この場合にも Fig. 6 に示すように、走行開始後、

Fig. 5 Vehicle track of experimental results (starting with no deflection)

Fig. 6 Vehicle track of experimental results (starting with 10 cm deflection)

約3mで基準軌道へのスムーズな復帰が行われたことがわかる。

5. ま と め

パソコンを用いた画像処理により、移動体を実用的な速度で誘導することに成功した。

まず、制御を可能にするための許容画像処理時間について調べ、0.4秒以下という結果を得た。これに対し、外接長方形を用いた蛍光灯像抽出手法を採用し、約0.1秒を実現した。そこで、実機システムを構築し、走行実験を行った結果、光センサ方式と同精度の直進走行を達成することができた。

今後は、パソコンによる汎用性を利用した移動体の転回や各種制御について検討し、実用化を目指した研究を行う予定である。

また、上記の実験環境は各器具に蛍光灯一本が点灯した場合であるが、既存の多くの蛍光灯器具は二灯型、三灯型などの複数灯型である。しかし、「3センサゾーン方式」を用いた制御においては、蛍光灯像の代表点を決定し、その位置がカメラ画像上でどのゾーンに存在するかに応じて操舵方向を決定するため、二灯型、三灯型などの複数灯型の場合でも、蛍光灯像の代表点を適時決定することにより、本方式を用いて制御を行うことは可能であると考えられる。そのほか、ルーバなどが取り付けられた環境においても、蛍光灯器具全体のコントラストが背景より高い場合には、本方式は有効であると考えられる。これらについて、より一般的な蛍光灯配置に対して実験的検討を行う必要がある。

尚、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。

参 考 文 献

- 1) 津村俊弘：移動体の知能化、計測と制御, 30-1, 1/8(1991)
- 2) 橋野, 中野, 久米：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, 1403, 119/120(1985)
- 3) 陶山, 新井, 太田：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, 3132, 933/934(1992)
- 4) T. Hashimoto, T. Aso and M. Abe: Vision-based Vehicle Navigation Using Fluorescent Lamp Array on the Ceiling, Proceedings of 1992 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, 1371/1374(1992)
- 5) 山本, 橋本, 麻生, 安陪：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(1992)
- 6) 橋本, 山本, 麻生, 安陪：天井蛍光灯を利用した移動体の自律走行, 第6回アドバンティ・シンポジウム(ビークルオートメーション技術研究会), 13/16(1993)
- 7) 橋本, 山本, 麻生, 安陪：天井蛍光灯を利用した移動体の実用速度での自律走行に関する基礎的研究, 平成5年電気学会全国大会, 680, 6-95(1993)
- 8) 山本, 橋本, 麻生, 安陪：天井蛍光灯を利用した移動体の実

用速度での自律走行に関する実験的検討, 第37回システム制御情報学会研究発表講演会, 3028, 239/240(1993)

- 9) 橋本, 山本, 麻生, 安陪：天井蛍光灯を利用した移動体のより高度な制御に関する基礎的検討, 第37回システム制御情報学会研究発表講演会, 3029, 241/242(1993)
- 10) 橋本, 山本, 麻生, 安陪：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, 電気学会論文誌(C), 113-C-10, 818/825(1993)

[著 者 紹 介]

橋 本 岳

1985年, 京都工芸繊維大学工学部電気工学科卒業。90年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, 95年改組により同大学院工学研究科助手。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などの会員。

山 本 茂 広

1992年, 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学院工学研究科博士課程に進学し現在に至る。この間, 高周波インバータ, 移動体の自律走行に関する研究に従事。電気学会, システム制御情報学会などの会員。

麻 生 武 彦 (正会員)

1967年, 京都大学工学部電子工学科卒業。69年同大学院修士課程(電子工学)修了。同年京都大学工学部電離層研究施設助手。81年同超高層電波研究センター助手。83年同工学部電気工学科助教授, 95年改組により同大学院工学研究科助教授。この間, プラズマ計測, 超高層物理, レーダー電波計測, 計算機シミュレーション, 画像計測などの研究に従事。81年日本地球電磁気学会(現地球電磁気・地球惑星圏学会)田中館賞受賞(京都大学工学博士)。電子情報通信学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, AGU, システム制御情報学会などの会員。

安 陪 稔 (正会員)

1961年, 京都大学大学院工学研究科博士課程修了。62年同大学工学部助手, 63年同講師, 66年同助教授, 82年同教授, 95年改組により同大学院工学研究科教授。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)。電気学会, システム制御情報学会などの会員。