リニアインダクションモータを用いた無人搬送車の 走行制御方式*

牧野 俊昭**・丸子 盛久***

Driving Control of an Automated Guided Vehicle Using Linear Induction Motors*

Toshiaki MAKINO** and Morihisa MARUKO***

This paper reports a linear-type steering mechanism, an image guidance system, and a steering control method in linear-type automated guided vehicles using linear induction motors.

To improve the steering characteristics of four-wheel linear-type automated guided vehicles, we propose linear-type traveling, and steering mechanisms made up of on-the-vehicle two linear induction motors. They generate a thrust between the motors and reaction plates layed on the floor of the vehicle's guide track. A guiding tape affixed on the reaction plate is accurately and quickly recognized by an image guidance system that uses the signals from an image sensor to control a linear-type steering mechanism.

In traveling experiments, a prototype automated guided vehicle was verified to travel smoothly on a straight track at 240 m/min with as little as ± 12 mm amplitude deviation which is less than the guiding tape 50 mm width.

1. ま え が き

昨今, 新しいFAシステムを構築するとき, 搬送路を自由に敷設し, 柔軟に拡張や変更が行える複数台の無人搬送車(以下, AGVと称す)を中心にした, 高機能無人搬送システムが広く用いられている^{1), 2)}.

これらのシステムでは, 少ない台数のAGVを運用して, 搬送物(たとえば, バレット, バケット等)を効率良く運ぶための運行制御方式や, 複数局間での無線通信方式が提案されている^{3)~6)}. また, 狭くて, 複雑な搬送路(分岐, 合流, 交差点等)や長距離搬送路を高速に走行する走行制御方式, 操舵制御方式, リニア駆動方式等も提案されている^{7)~15)}.

従来のAGVでは, 搬送路上の媒体(たとえば, 反射テープ, 誘導線等)から走行情報を得て, 最大60~120 m/minの速度で誘導走行している. しかし, 媒体

の破損や走行速度を少し上げると, 左右方向への揺れ量が大きくなり, 脱線走行することがある. これらの問題を解決するため, AGVの走行操舵性能を改善させる制御方式の提案がなされている^{16)~20)}.

筆者らは60 m/minの速度で走行するAGVの走行操舵特性の検討を行い, 車輪のコナリングフォースの特性改善, 誘導検出系の検出精度の改善, 操舵機構系の高応答化, 操舵制御方式の最適設計の必要性について報告した²¹⁾.

本論文では, これらの検討結果を盛り込んで提案したリニア式走行操舵機構, イメージセンサからなる視覚誘導方式等を用いて, 240 m/min(従来の2~4倍)の速度で高速走行するリニア無人搬送車(以下, リニアAGVと称す)の提案を行っている. リニア式走行操舵機構は低床で簡単な構造からなり, 横方向を案内輪で支持せずに, リアクションプレートとの間で走行方向と直角の左右方向の推力を作用させる車上一次(地上側にリアクションプレートを埋設する)方式のリニアインダクションモータ(以下, LIMと称す)を用いた駆動機構である. 視覚誘導方式は, 搬送路上に貼着した反射テープを複数のホトセンサで検出していた従来方式²¹⁾から, リアクションプレート上に貼着し, SN比が大きく取れる誘導テ-

* 原稿受付 1993年10月26日

** 日立製作所 機械研究所 Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.; 794 Higashitoyoi, Kudamatsu city, Yamaguchi 744, JAPAN

*** 広島女子商短期大学 Hiroshima Women's Commercial College; Sakacho, Aki-gun, Hiroshima 731-43, JAPAN

Key Words: automated guided vehicle, bi-linear induction motor, image sensor, driving control, hunting reduction.

ブを密着形のイメージセンサで形状認識した後、誘導テープの形状から走行方向と直角の左右方向の位置ずれ量(以下、蛇行量と称す)および各種の走行情報を算出する誘導方式である。そして、筆者らは提案したこれらの方式を織り込んで試作した積載質量 50 kg のリニア AGV を用いて、直線搬送路上を 60~240 m/min の速度で誘導走行させた。その結果、リニア AGV の蛇行量の振幅が ± 12 mm (今回、用いた幅 150 mm のリアクションプレート上に貼着した誘導テープ幅 ± 25 mm) 以内に小さく、安定走行することを確認したので、それらの内容について報告する²²⁾。

2. リニア無人搬送車の開発目的

筆者らは複雑な搬送路を簡単に敷設し、容易に拡張や変更が行える複数台の AGV を用いて、搬送物を無人搬送する F & F (Flexible control and Free layout) システムを開発してきた²³⁾。さらに、複数台の AGV を効率良く運行させるために、最適な搬送要求を AGV に割り付ける運行制御方式や、運行指令を複数台の AGV に無線通信するスペクトル拡散通信方式をも開発して来た。しかし、Fig.1 に示すような、製造ラインと自動倉庫システム間の搬送距離 L が長い高機能無人搬送システム (L ; 500~1000 m) では、全体システムのスループットを向上させる必要がある。すなわち、必要最小限の AGV を用いて、各々の AGV を高速走行(たとえば、従来の AGV の速度を 2~4 倍にすると、240 m/min の直線走行)化することが必要不可欠になる。しかし、従来の AGV では、約 100 m/min の速度で直線走行すると蛇行の振幅が大きくなり、脱線走行するという問題点が指

摘されていた²¹⁾。また、高加速・高減速走行ができるリニアモータを用いた有軌道式リニア搬送システムでは、搬送路上の左右に案内軌道レールを設置し、4 個の案内輪により横方向の蛇行を強制的に防止して、約 600 m/min の高速走行を行っている。しかし、高速化に伴う走行抵抗が大きくなり、案内輪の信頼性が著しく低下する問題点が指摘されていた⁹⁾。そこで、案内軌道レールおよびそれに沿って、左右方向の蛇行を防止する案内輪を用いない無人搬送車方式を取り入れ、その走行速度を向上させることを目的に、リニア式走行操舵機構(以下、リニア機構と称す)、イメージセンサ式視覚誘導装置(以下、イメージセンサと称す)などを織り込んだリニア AGV を提案することにした。提案したリニア AGV は、搬送路上に薄形のリアクションプレートを埋設し、その上に貼着した誘導テープに沿って高速走行する。このため、AGV 上に搭載するリニア機構、イメージセンサ等の検討を行った。たとえば、参考文献 21) で検討した AGV が直線搬送路上を走行する場合では、走行速度を上げていく程、蛇行量 y_1 の振幅が速度の 2 乗に比例して大きくなり、約 100 m/min 以上で脱線する。96 m/min の走行限界速度では、蛇行量 y_1 の振幅が大きくなり、 ± 35 mm の蛇行量 y_1 で誘導走行することが確認されている。これにより約 100 m/min 近く速度では不安定な走行を行う。この原因としては種々考えられるが、シミュレーション計算により検討した結果、走行操舵機構の応答性能、誘導装置の検出精度や検出遅れに依存していることが分かった。

本論文では、リニア AGV が従来の 4 倍の速度 (120~240 m/min の直線走行、60 m/min の旋回走行) で走行しても安定に誘導走行する検討を行っている。

3. リニア無人搬送車の概要

3.1 全体構成

まず、Fig.2 (a), (b) に示したリニア AGV (図面上、AGLV と称す) の構成と機能について述べる。今回提案するリニア AGV は、前側と後側を四つの車輪で支持し、高速走行するために、操舵用リニア機構(操舵推力 U_0)と走行用リニア機構(走行推力 f)を有している。車上のコントローラは詳細に図示していないが、光通信装置により地上からの運行指令を受けて、目標の停止位置、速度パターン等を抽出した後、走行および操舵の指令信号 (e_0 , U_e) を出力させ、速度制御や操舵制御を行う。また、コントローラはワンボードマイコンからなり、リニア駆動回路へ速度信号を出力して、走行用リニアモータ(以下、走行 LIM と称す)を速度制御する。さらに、コントローラはリアクションプレート上の誘導テー

Fig. 1 Configuration of high efficiency conveyor system

Fig. 2 Conceptual configuration of the automated guided vehicle using linear induction motors (AGLV)

ブの幅形状をイメージセンサで検出し、走行方向と直角の左右方向の蛇行量 y_1 を算出した後、操舵信号を出力し誘導テープに沿って走行するように、操舵用リニアモータ（以下、操舵 LIM と称す）を操舵制御する。これにより、リニア AGV はリアクションプレートと走行 LIM、および操舵 LIM との隙間に発生した駆動力（走行推力 f 、操舵推力 U_0 ）で誘導走行する。Fig. 2 (b) に示すように、その走行 LIM は車体の重心位置より後側 l_2 の所に取り付けられると共に、操舵 LIM は車体の重心位置より、前側 l_1 の所に取り付けられ、AGV がアンダーステアリング特性になるようにしている。さらに、イメージセンサの取り付け位置は、リニア AGV の走行安定性に大きな影響を及ぼすため、車体の重心位置に対して前側 l_a の所に取り付けられている。そのイメージセンサはリアクションプレート上の誘導テープを検出した後、走行方向に対して直角、すなわち左右方向のテープ中

心とセンサ中心との蛇行量 y_1 を出力するものである。これにより、走行速度 v で誘導走行しているリニア AGV の重心位置での蛇行量 y および姿勢角度 ϕ は、(1)、(2) 式から求められる。

$$y = y_1 - l_a \cdot \phi \approx y_1 - l_a \cdot \frac{\dot{y}_1}{v} \quad (1)$$

$$\phi \approx \frac{\dot{y}_1}{v} \quad (2)$$

走行 LIM、操舵 LIM、イメージセンサ等を含むリニア AGV の走行操舵制御系を Fig. 3 に示す。この制御系は主に、マイコン系、走行系、操舵系、視覚誘導系から成り、操舵系の操舵信号 U_e により台車系を制御するものである。

走行系は目標停止位置 X_0 に対して、走行パターンの速度信号 e_0 により、加速、定速、減速等の速度制御を行った後、視覚誘導系からの番地マーク信号 x'_0 により相対的にカウントしていき、減速マークを検出することにより停止位置を決める。また、操舵系は目標の蛇行量 y_0 （直進時、 $y_0 = 0$ 、旋回分岐時、 $y_0 = f(R)$ ）に対して、視覚誘導系から出力される車体状態量 y'_1 により求められる操舵量 y_8 から操舵信号 $U_e (= y_0 - y_8)$ を算出する。後述する操舵 LIM とリアクションプレートとの間に発生する左右方向の操舵推力 U_0 により、左右方向の蛇行量 y_1 を小さくするように操舵制御し、車体全体を運動させる。操舵量 y_8 は (3) 式の操舵アルゴリズムで与えられる。

$$y_8 = k'_1 y'_1 + k'_2 \dot{y}'_1 \quad (3)$$

ただし、 k'_1 、 k'_2 は操舵ゲインである。

Fig. 3 Block diagram of the AGLV

以上述べたように、本論文の従来よりの改良点は、① AGV の走行機能と操舵機能とを分離し、お互いの機能が干渉しないで、高応答できる二つの車上一次方式のリニアインダクションモータを用いたこと、② 操舵機能を重心位置より前側、すなわち AGV をアンダーステアリング特性となるように構成し、操舵機構の応答性（立ち上がり特性）を向上させたこと、③ 高速・高精度の視覚誘導装置を用い、その出力をフィードバックして操舵制御したこと等である。このことにより、走行と操舵の立ち上がり特性が早くなり、Wheel のコーナリングフォースの応答性能および AGV 全体の操舵性能が向上する。

3.2 視覚誘導方式の構成

今回、提案した視覚誘導方式は主に、ロッドレンズアレイ部、CCD 検出部、LED アレイ部からなる密着形 CCD イメージセンサとその駆動回路から構成され、リアクションプレート上に貼着した誘導テープの汚れや破損が生じて信頼性良く、車体状態量（蛇行量 y_1 、番地マーク信号 x_0' ）が得られるように構成されている。

この視覚誘導方式のハード構成を Fig. 4 に示す。イメージセンサは図示したように、前後 2 本の LED アレイ、そのアレイの中央に位置する四つの CCD 検出部プレート、そのプレート上に誘導テープの反射画像を投影するロッドレンズアレイ、および検出信号の処理回路からなる。図示していないが、誘導テープの寸法形状から直線走行、旋回走行、分岐・合流走行、交差点走行、位置決め等の走行条件が得られる。たとえば、番地信号マーク（幅 150 mm、長さ 150 mm）は、誘導テープ（幅 50 mm）の形状より幅広に設定したもので、それをイ

メージセンサで検出した場合、番地マーク信号 x_0' と認識する。同様に、減速マークは、さらに幅を縮めた形状（幅 100 mm、長さ 150 mm）にしたもので、それをイメージセンサで検出した場合、高速走行しているリニア AGV の速度を減速させるように認識する。しかし、リアクションプレート上に貼着した複数の誘導テープを形状認識するイメージセンサを用いた場合では、次のような問題点がある。

- (1) リニア AGV が走行する時に生じる上下振動により検出距離が変化し、ピンボケや解像能力の変動（焦点深度の変化による検出分解能の変動）が生じる。
- (2) 搬送路の勾配などによる走行速度の変化に対応したイメージセンサの読み取り遅れ（検出時間の遅れ）が生じる。
- (3) リアクションプレート上面の色と反射テープとの SN 比（コントラスト）が低い。

以上、述べたような問題点を解決するための検討を行った。

まず、(1) に関しては、レンズ光学系に必要な倍率、焦点合わせができるロッドレンズアレイを用い、焦点深度が大きく取れるように ($25 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$) 設定し、 0.3 mm/bit の分解能が得られるようにした。この分解能の設定に関しては、参考文献 21) に記した ITV カメラから成る視覚計測装置（軌道偏差量の分解能 0.3 mm/bit ）を用いた AGV で、その視覚計測量をフィードバックする（論文上記していないが）と、操舵性能が良好になるという経験から決定した。

(2) に関しては、読み取り走査周期を 1.58 ms/line にして、車体状態量を 10 ms で検出できるようにした。

(3) に関しては、誘導テープに照射して得られる反射画像の波長領域（ 567 nm の黄緑色の光）を考慮し、等倍型 LED アレイと光学フィルタを用いることで、得られた信号パターンをスミージングフィルタ（パターンの規定値を決め、それ以下のパターンを削除する）などにより補正した。

以上述べたような工夫をして設計、製作したイメージセンサを車体下部に取り付けた外観および仕様を Fig. 5, Table 1 に示す。今回用いたイメージセンサは誘導テープの形状から車体状態量（たとえば、 y_1 、 x_0' 等）の変化を高精度（ 0.3 mm/bit ）に幅広く（検出長 216 mm の $3,640$ 画素から成り、 16.9 画素/mm の分解能）、かつ高速（ 10 ms ）に検出することができる。

Fig. 4 Circuit configuration of the image guidance system

Fig. 5 Photograph showing the image sensor, the driving LIM and the steering LIM

Table 1 Specifications of the image guidance system

Item	Specification
Sensor	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Equivalent Image Sensor ◦ Image Scanning Equivalent ◦ Magnifying 1 : 1 LED Array
Resolution	0.3 mm/bit (Gap; 25 mm $\pm$ 10 mm)
Sampling Time	10 ms
Detective Length	216 mm (3,640 Point)
Dimension	250 (L) $\times$ 40 (W) $\times$ 35 (H) mm
Weight	700 g
CPU	8 bit CPU, 32 kB Memory

また、イメージセンサはリアクションプレート上面からセンサの検出面まで 25 mm 離して取り付けられているので、等倍型 LED アレイの光線を誘導テープに照射し、その反射画像を 1 対 1 に並んだロッドレンズアレイにより CCD 検出部プレート上に結像させ、その映像信号を 2 値化信号に変換している。

その検出特性を Fig. 6 (a), (b) に示す。Fig. 6 (a) に示した映像波形は、リニア AGV が 60 m/min の速度で走行している時に、誘導テープの形状を画像認識したものである。図中、上段がイメージセンサの映像信号である。この映像信号は Low レベル（リアクションプレート）の映像信号と High レベル（誘導テープ）の映像信号からなり、任意に設定したスレッシュホルドレベルにより、2 値化信号となる。図中、下段がその 2 値化信号である。この High レベルの 2 値化信号の横幅により、上述したような直線走行、旋回走行、分岐・合流走行、交差点走行、位置決め等の走行条件が得られるようになっている。

Fig. 6 (b) に示した特性は各種の誘導テープ（ステンレス材、アルミニウム材、ビーズ入り白色アルミニウム材）を用いて、イメージセンサとリアクションプレート間との隙間（センサの取り付け高さ）を変化させた時に得る 2 値化信号特性である。この結果から、ステンレス材から成る誘導テープを用いた場合、5～35 mm 範囲での隙間変化に対する 2 値化信号の変動幅は 3 bit（約 0.9 mm）以内であり、非常に小さいことが分かる。

また、LED アレイの照射波長領域に合わせてリアク

(a) Output voltage from the image sensor

(b) Gap characteristics of several kinds of tapes

Fig. 6 Experimental characteristics of the image sensor

ションプレートの上面色を緑色にし、ステンレス材から成る誘導テープとの SN 比を大きく取るようにした。これにより、図示していないが、外乱光の影響についても、Fig. 5 に示すようにイメージセンサをカバーで囲った場合で、リニア AGV の側面および正面から約 10 万 l_x （晴れた日の太陽光の直射照度値）²⁴⁾ の光線が照射されても正常に検出することを確認している。

以上述べたように、今回開発したイメージセンサを用いた視覚誘導装置の仕様（分解能、サンプリング時間）は 16 個のフォトセンサから成る光学検出器（分解能 3.0 mm/bit, 50 ms）や ITV カメラ装置（分解能 1.0 mm/bit, 50 ms）を用いた従来方式に比し、高速・高精度になっている。このことは検出系の量子化要素による操舵特性の向上が図られていることを示す。この値を決めるに当り、筆者が参考文献 21) に記した ITV カメラからなる視覚計測装置（軌道偏差量の分解能 0.3 mm/bit, サンプリング時間 10 ms）を用いた AGV では、その視覚計測量をフィードバックする（論文に記していないが）と操舵性能が良好になるという経験から決定した。しかし、検出系の量子化要素の高精度化の極限については検討していないので、今後定式化してゆきたいと考えている。

3.3 リニア式走行操舵機構の構成

Fig. 5 に示したように、リニア AGV を走行操舵させるリニア機構は、車体の前側および中央部にそれぞれ操舵 LIM、走行 LIM をバランス良く取り付けられている。

Table 2 Specifications of the driving LIM and the steering LIM

Item	Driving LIM	Steering LIM
Thrust (Length of Gap=2.5 mm)	150 N	60 N
Current	12 A	5 A
Dimension	Length	385 mm
	Width	150 mm
	Height	96 mm
Mass	18 kg	4 kg

Fig. 7 Control circuit of the linear induction motor

今回用いたリニア機構は、走行方向に対して並行と直角に二つ設置したもので、一つの走行 LIM と走行方向に対して直角の左右方向に設置した一つの操舵 LIM から成る。

走行 LIM は最大 240 m/min の走行速度が出るように AC 200 V, 3 相駆動で 12 A (Max) 出力の LIM から構成されている。操舵 LIM はリニア AGV が左右方向に脱線しないように AC 200 V, 3 相駆動で 5 A (Max) 出力の LIM から構成されている。

これらの LIM の仕様と駆動回路の構成を Table 2, Fig. 7 に示す。リニア駆動回路は図示したように、トランジスタから成る 3 相インバータ回路、速度検出回路等から構成され、図示していないがタコジェネレータからの速度信号 v を帰還値として用い、指令値（走行信号 e_0 や操舵信号 U_e ）との偏差量を PWM 信号に変換してインバータ回路へ送り、走行 LIM や操舵 LIM を駆動している。その走行 LIM や操舵 LIM を搭載したリニア AGV の走行性能および操舵性能を把握するために、リアクションプレートとそれぞれの LIM 間での隙間変位および重なり量に対する推力、電流などの特性を測定した。

その実験結果を Fig. 8 (a), (b) に示す。この結果から、隙間変化による走行 LIM、操舵 LIM の推力特性は、隙間変位が 2 mm から 12 mm まで変化した時、それぞれ右下りに減少する。一方、その電流特性は逆にそれぞ

れ右上りに増加する傾向にある。隙間変位が 12 mm になると、走行 LIM および操舵 LIM の推力は最大値の 50 % になり、小さくなる事が分かる。また、走行 LIM および操舵 LIM に対するリアクションプレートとの重なり量が小さくなると、それぞれの推力は比例して小さくなり、約 50 mm ではほぼゼロに近くなる特性を有している。これにより、操舵 LIM (幅 210 mm) がリアクションプレート (幅 150 mm) と完全に重なっている場合では設計どおりであり、最大電流 (5 A) に対し最大推力 (60 N) が出力される。しかし、そうでない場合には、

最大電流に対して最大推力が出力されない。すなわち、リニア AGV の蛇行量が ± 30 mm 以内であれば、操舵 LIM の応答特性はあまり変化しないが、それ以上になると応答特性が悪くなることを示している。

その操舵 LIM を用いた走行操舵機構の動特性として次式を用いることにした。

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + K_e (\dot{y} + l_1 \dot{\phi}) = U_e \quad (4)$$

$$U_0 = K_f \cdot i \quad (5)$$

(a) Gap characteristics

(b) Lap characteristics

Fig. 8 Experimental characteristics of the driving LIM and the steering LIM

ここで, L は LIM の電機子インダクタンス ($=2.9\text{mH}$), R は LIM の電機子抵抗 ($=7.93\Omega$), K_e は誘起電圧定数 (13.0Vs/m), K_f は推力定数 (12N/A), i は LIM の電機子電流 ($4\sim 7\text{A}$), U_0 は LIM の操舵推力 ($25\sim 60\text{N}$), U_e は LIM の印加電圧 (V) で, 前述した操舵信号 U'_e に相当する。

3.4 シミュレーションによる操舵方式の検討

リニア AGV の操舵制御系をシミュレーション計算するための簡易モデルを Fig.9 (a) に示す。図示したように, リニア AGV は速度 v で誘導走行すると, 操舵 LIM から操舵推力 U_0 が作用して目標軌道に沿うように制御される。この操舵推力 U_0 は (5) 式に示したように, 操舵 LIM の電機子電流 i を変化させることにより得られる。その電機子電流 i は (4) 式の LIM の印加電圧, すなわち操舵信号 U_e により得られる。そこで, リニア AGV が誘導走行した場合に操舵推力 U_0 , 操舵モーメント $U_0 \cdot l_1$ を作用させて, リニア AGV の操舵制御系の安定性を以下のように検討することにした。状態変

(a) Schematic layout of the AGLV

(b) Simulation results for travel at 60 m/min

Fig. 9 Configuration of the steering control system and simulation results

数として, $x_1 = i$, $x_2 = y$, $x_3 = \dot{y}$, $x_4 = \phi$, $x_5 = \dot{\phi}$ とした場合, その状態方程式は以下ようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_4 & 0 & a_5 & a_6 & a_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_8 & 0 & a_9 & a_{10} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k'_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U'_e \quad (6)$$

ただし,

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{R}{L}, \quad a_2 = \frac{K_e}{L}, \quad a_3 = -K_e \cdot \frac{l_1}{L}, \quad k'_3 = \frac{1}{L}, \\ a_4 &= \frac{k_f}{m}, \quad a_5 = -\frac{k_f + k_r}{mv}, \quad a_6 = \frac{k_f + k_r}{m}, \\ a_7 &= -\frac{k_f l_f - k_r l_r}{mv}, \quad a_8 = \frac{k_f \cdot l_1}{I}, \\ a_9 &= -\frac{k_f l_f - k_r l_r}{Iv}, \quad a_{10} = \frac{k_f l_f - k_r l_r}{I}, \\ a_{11} &= -\frac{k_f l_f^2 + k_r l_r^2}{Iv} \end{aligned}$$

とする。

そこで, w を入力とし, 蛇行量 $y (= x_2)$ とその微分値 $\dot{y} (= x_3)$ を線形一次結合してフィードバックした時の操舵制御を考えると, 操舵信号 U'_e は次式で表わされる。ただし, $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$ とする。

$$U'_e = w - [0 \ k'_1 \ k'_2 \ 0 \ 0] \cdot X = w - D \cdot X \quad (7)$$

また, 出力として $y_1 = y + l_a \cdot \phi$ を用いると, 出力方程式は (8) 式で表わされる。

$$Y = [0 \ 1 \ 0 \ l_a \ 0] \cdot X = C \cdot X \quad (8)$$

以上, 上述したリニア AGV の操舵制御系の状態方程式は, (9)~(11) 式で表わされる。ただし, $w = 0$ とする。

$$\frac{d}{dt} X = A \cdot X + B \cdot U'_e \quad (9)$$

$$Y = C \cdot X \quad (10)$$

$$U'_e = -D \cdot X \quad (11)$$

そこで, (11) 式を (9) 式に代入すると, 状態方程式は (12) 式となる。

$$\frac{d}{dt} X = (A - B \cdot D) X \quad (12)$$

(12) 式の状態方程式で表わされる特性方程式の $\det[sI - (A - B \cdot D)] = 0$ の係数から, 漸近安定かどうか判定することができるので, 操舵ゲイン定数 k'_1, k'_2 の安定領域が求められる。すなわち, 参考文献 21) で検討したことを参考にして操舵ゲイン定数 k'_1, k'_2 の関係

より安定、不安定が決定されるので、その特性方程式の $\det[sI - (A - B \cdot D)]$ の特性根が複素平面上左半面から左側に配置するようにしている。ここでは、状態変数が五つあるので、それらの変数をすべて検出して最適レギュレータ問題で最適化できると考えられるが、操舵ゲイン定数 k'_1, k'_2 を try and error の経験手法により決めた。その値 ($k'_1 = 1.0, k'_2 = 0 \sim 0.2$) を用いて、シミュレーション計算した一例を Fig. 9 (b) に示す。

その時用いた定数は、 $m = 50 \text{ kg}$, $I = 52.5 \text{ Nm}^2$, $v = 60 \text{ m/min}$, $k_f = 240 \text{ N/rad}$, $k_r = 240 \text{ N/rad}$, $l_f = 0.33 \text{ m}$, $l_r = 0.32 \text{ m}$, $L = 2.90 \text{ mH}$, $R = 7.93 \Omega$, $K_e = 13.0 \text{ Vs/m}$, $K_f = 12 \text{ N/A}$ 等である。図中、横軸に時間、縦軸に速度（一定速度、60 m/min）と蛇行量 y_1 を取る。この結果、リニア AGV の初期の蛇行量 y_1 が -16 mm で、操舵ゲイン定数 k'_2 を 3 段階に変えた場合 (0, 0.1, 0.2) では、 $k'_2 = 0$ で不安定走行となり、 $k'_2 = 0.1$ 以上で安定走行し、以下ようになる。

- (1) $k'_2 = 0$ では、脱線走行する。
- (2) $k'_2 = 0.1$ では、蛇行量 y_1 が大となり、周期的 (0.66 Hz) な蛇行運動を行う。
- (3) $k'_2 = 0.2$ では、蛇行量 y_1 が小となり、安定走行する。

4. リニア無人搬送車の走行実験結果

前項で検討した内容を盛り込んで試作したリニア AGV の外観、仕様等を Fig. 10 (a), (b), Table 3 に示す。

本 AGV は Fig. 10 (a), (b) に示すように長さ 0.8 m、幅 0.58 m、高さ 0.2 m、および質量 50 kg で、積載質量 50 kg の積載物を搭載して、最大 240 m/min の速度で誘導走行するものである。また、本 AGV は 4 輪支持（ウレタンゴム、径 100 mm）構成で、地上からの走行指令により、搬送路面上に沿って複数個の厚みが小さい、長さ 1 m のリアクションプレート（Al-Fe 板の張り合せ材で、厚さ 8.5 mm、幅 150 mm、長さ 1 m）を直列に継ぎ合わせ、アンカーボルトを用いて敷設すると共に、そのリアクションプレート上に誘導テープ（幅 50 mm、厚さ 0.1 mm のステンレス材）を貼着し、その誘導テープに沿って誘導走行する。

今回、AGV への電力（AC 200 V）は地上側からケーブルを介して供給することにした。電力を供給された走行 LIM（幅 150 mm、長さ 385 mm）および操舵 LIM（幅 210 mm、長さ 120 mm）とリアクションプレート（幅 150 mm、厚み 8.5 mm）との隙間変位を 2.5 mm に調整し、前項で述べた走行推力 f と操舵推力 U_0 が作用するようにしている。とくに、操舵 LIM とリアクションプレートとの左右方向の重なり量が小さくなると操舵推

(a) Front external view

(b) Oblique view

Fig. 10 Photograph of the prototype AGLV on the traveling floor

Table 3 Specifications of the Prototype AGLV

Item	Specification
Self Mass	50 kg
Dimension	(L) (W) (H) 800 mm × 580 mm × 200 mm
Speed	240 m/min (Max) ~ 5 m/min (Min)
Driving Mechanism	Bi-directional LIM (Traveling and Steering)
Length of Gap	2.5 mm
Reaction Plate Thickness	Al-Plate ; 2.5 mm, Fe-Plate ; 6.0 mm

力が小さくなるので、操舵 LIM の幅 (210 mm) がリアクションプレートの幅 (150 mm) より大きくなるようにしている。これにより、蛇行量 y_1 が $\pm 30 \text{ mm}$ 以上になると、上述した操舵推力 U_0 が小さくなるので、良好な蛇行特性が得られなくなる。ここで、操舵 LIM の中心取り付け位置 (l_1) は、車体の重心位置より前側 170 mm にして、アンダーステアリング特性を得るように配置している。また、走行 LIM の中心取り付け位置 (l_2) は、車体の重心位置より後側 115 mm である。さらに、イメージセンサの中心取り付け位置 (l_3) は、車体の重心位置

より前側 275 mm である。リニア AGV はこのような機器配置で構成され、走行速度を 5~240 m/min まで変化させて、地上側からの走行信号により調整できるようにしている。

Fig. 11 Traveling characteristics measured on a straight track

つぎに、リニア AGV が直線搬送路上を誘導走行した時の実験結果を Fig. 11 (a)~(c) に示す。図中、走行信号は走行 LIM の駆動回路の指令電圧値、走行速度は車輪に取り付けたタコジェネレータの出力値、操舵 LIM の電流値は操舵 LIM に供給される LIM の線間電流値、蛇行量 y_1 はイメージセンサの出力値等である。

Fig. 11 (a) では、リニア AGV を 60 m/min の一定速度で直線走行した場合であり、安定して誘導走行をしている。この時の蛇行量 y_1 の振幅は -8.8 mm~11 mm の範囲であり、操舵 LIM のピーク電流 (2.9~4.2 A) が流れ、操舵制御されることにより抑制されている。

Fig. 11 (b) では、リニア AGV の走行速度を 180 m/min まで上げた場合であり、走行開始時や減速時に大きな蛇行が生じている。180 m/min の一定速度に達した場合、蛇行量 y_1 の振幅は小さくなって安定走行することが分かる。この時の操舵 LIM のピーク電流は 1.6~4.2 A であった。

Fig. 11 (c) に示すように、リニア AGV を 240 m/min の最高速度で走行した場合では、約 2 秒という短時間であるが、安定して誘導走行している。初期蛇行量 y_1 を -6.7 mm にした時の蛇行量 y_1 の最大振幅は -11.7 mm~12 mm の範囲であり、誘導テープの幅 (± 25 mm) 以内であることを確認した。図示していないが、初期蛇行量 y_1 を誘導テープの幅 ± 25 mm に設定した場合、初期の蛇行量 y_1 が少し大きくなるが、安定走行することを確認している。

5. あとがき

搬送路上に複数枚の薄形リアクションプレートを直列的に埋設し、走行方向と直角の左右方向を案内輪などで支持しないリニア無人搬送車を高速走行させるために、車上一次のリニア式走行操舵機構、視覚誘導方式、操舵制御方式等を提案し、それを織り込んだ 4 輪構成のリニア無人搬送車を試作し、次の結論を得た。

- (1) リニア式走行操舵機構では、車体下部に取り付けられた走行機能用と操舵機能用の二つのリニアインダクションモータを用い、操舵特性がアンダーステアリング特性になるように構成し、かつ Al-Fe のリアクションプレートとの隙間を 2.5 mm にした場合、最大 150 N、60 N の推力を出して 60~240 m/min の速度で走行し、 ± 30 mm 以内であれば、その操舵特性の変化が小さいことが分かった。
- (2) 視覚誘導方式では、緑色で幅 150 mm のリアクションプレート上に、幅 50 mm のステンステープを貼着し、そのテープ形状を 25 mm 離れた

車上に取り付けられた検出幅 216 mm の密着形 CCD イメージセンサにより形状認識するもので、SN 比を大きく取り、分解能 0.3 mm/bit、検出時間 10 ms 以内で検出している。

- (3) リニア AGV を高速に安定走行させる操舵制御方式では、車体の重心位置より前側 275 mm の位置に設置したイメージセンサからの蛇行量 y_1 とその微分値 $\dot{y}_1$ の線形一次結合量 ($k'_1 \cdot y_1 + k'_2 \cdot \dot{y}_1$) をフィードバックして操舵量 y_8 としたもので、 $k'_1 = 1.0$, $k'_2 = 0.2$ としている。
- (4) 試作したリニア AGV を直線搬送路上、無荷重でかつ、240 m/min の速度で高速走行させた結果、蛇行量 y_1 の最大振幅が ± 12 mm であり、安定走行することを実験で確認した。

参 考 文 献

- 1) 高橋：無人搬送システムの利用実態とその分析；無人化技術，Vol. 338, No. 5, pp. 2~47 (1988)
- 2) P. P. Bose : Basics of AGV Systems ; American Machinist & Automated Manufacturing, Special Report, No. 784, pp. 106~122 (1986)
- 3) 都島ほか：知識工学を応用した搬送車の運行制御方式；計測自動制御学会論文誌，Vol. 24, No. 3, pp. 300~307 (1988)
- 4) 山口ほか：搬送車ファジィ制御システム；東芝レビュー，Vol. 43, No. 4, pp. 300~307 (1988)
- 5) 牧野ほか：複数台の無人搬送車に用いるスペクトル拡散通信の応用；計測自動制御学会論文誌，Vol. 28, No. 12, pp. 1387~1396 (1992)
- 6) 津川：車両間通信による自律車両群の走行制御；計測自動制御学会論文誌，Vol. 26, No. 9, pp. 76~83 (1990)
- 7) 米倉ほか：光学誘導形地上搬送ロボット「ホイバース」の開発；日立評論，Vol. 75, No. 10, pp. 23~28 (1975)
- 8) P. Boegli : A Comparative Evaluation of AGV Navigation Techniques ; Proc. 3rd. IC. AGVS, pp. 169~175 (1985)
- 9) T. Higuchi : Application of Linear Stepping Motors to Automated Conveyor System ; Bull. Jap. Soc. Pre. Eng., Vol. 17, No. 1, pp. 31~34 (1983)
- 10) 森下：リニア誘導式搬送システム，特開昭 61-102105 号 (1984)
- 11) 萩野ほか：リニアモータを用いた無人搬送車の開発；日本工業調査会 M. E. リポート，Vol. 85, No. 5, pp. 86~95 (1985)
- 12) 刈田ほか：リニア誘導モータの FA 機器への応用；電気学会マグネティックス研究会資料，No. MAG-86-28 (1986)
- 13) 星野ほか：リニア搬送システムの制御；神鋼電機技報，Vol. 32, No. 1, pp. 14~19 (1987)
- 14) 隈元，平根：単一インバータを用いた複数誘導電動機制御の無人車走行への応用；計測自動制御学会論文誌，Vol. 23, No. 5, pp. 505~511 (1987)
- 15) 津村：無人搬送車とその制御；計測と制御，Vol. 26, No. 7, pp. 593~598 (1987)
- 16) 畑：無人車の振舞いシミュレーション；神鋼電機技報，Vol. 24, No. 3, pp. 5~10 (1977)
- 17) S. Shadover : Steering Controller for AGV way Transit Vehicles ; Trans. ASME. J. Dyn. Syst. Meas. Control, Vol. 100, No. 3, pp. 1~7 (1978)
- 18) 小森ほか：ランドマークを使った移動機械の制御；機械技研所報，Vol. 37, No. 1, pp. 1~10 (1983)
- 19) 川辺ほか：車両操舵システムの動特性と四輪操舵機構の設計；機論，Vol. 56, No. 530, pp. 70~74 (1990)
- 20) C. Chang : Stability Analysis of Three and Four Wheel Vehicles ; JSME. Int. Jour., Vol. 33, No. 4, pp. 567~574 (1990)
- 21) 牧野，田中：無人搬送車の走行操舵特性の改善；システム制御情報学会論文誌，Vol. 4, No. 3, pp. 103~110 (1991)
- 22) 牧野：自走式リニア搬送車の高速走行；第 2 回インテリジェント FA システムシンポジウム講演論文集，B 3, pp. 27~28 (1989)
- 23) K. Okasaka et al. : Automated Storage and Retrieval System Using AI ; Proc. of the 5th Int. Conf. on Automated Guided Vehicle System, pp. 1~18 (1987)
- 24) 瀧波ほか：画像処理による無人搬送車の白線走行に関する研究；機論，Vol. 54, No. 499, pp. 792~797 (1988)