イメージセンサを用いた無人搬送車の高速走行†

牧 野 俊 昭*・大 泉 純 一*・橋 本 直 人**

High-Speed Driving Control of an Automatic Guided Vehicle Using an Image Sensor

Toshiaki MAKINO*, Junichi OIZUMI* and Naoto HASHIMOTO**

High accuracy, high response guidance and high steering mechanism response at high speed are required to improve the travelling characteristics of an unmanned delivery cart (AGV: Automatic Guided Vehicle), which is a component of modern FA systems.

In this paper, an image sensor guidance scheme and steering mechanism for a high-speed AGV are developed considering limit velocity for stable travel and control system stability. Factors which effect on steering characteristics are examined through computer simulation and experiments. An Image sensor guidance scheme is considered by examining with an equivalent image sensor.

The sensor is attached to the steered and driven wheel, and detects a pre-set route by following guiding tape bonded to the floor.

In the experiment, the developed high-speed AGV is 100 kg load rated. The high-speed AGV was verified to travel smoothly on straight routes at 120 m/min, and on curved routes at 60 m/min with as little as ± 5 mm amplitude and 1 sec. period hunting motion, which is less than the guiding tape width.

Key Words: automatic guided vehicle, high speed, hunting motion, image sensor guidance

1. ま え が き

新しいFAシステムを構築するとき、搬送経路を自由に敷設し、柔軟に拡張や変更が行える無人搬送車(以下、AGVと称す)を中心とした無人搬送システムが必要不可欠である^{1),2)}。

これらのシステムに関して、少ない台数のAGVで、決められた搬送物を効率良く運ぶための運行制御方式や多局間通信方式が多く提案されている^{3)~6)}。また、狭くて、複雑な搬送経路(分岐、合流、交差点など)の設置や長距離搬送での安定した高速走行化に関する新しい誘導制御方式、電動機制御方式なども提案されている^{7)~11)}。

従来のAGVでは走行路上の媒体から走行情報を入力

して、最大60 m/minの速度で走行している。しかし、媒体の破損や走行速度を少し上げると左右の揺れ(以下、蛇行と称す)が大きくなり、脱線走行することがある。これらの問題点を解決するため、AGVを含む移動体の操舵性能を改善させる操舵制御方式の提案がなされている^{12)~17)}。

本論文では、3輪構成のAGVが直線路上を低蛇行で、安定に高速走行することを目的に、簡単な構造の走行操舵機構、等倍型イメージセンサからなる視覚誘導装置などを用いた操舵制御系の設計やシミュレーション計算による検討を行った¹⁸⁾。そして、筆者らは開発した積載質量100 kgのAGVを走行路上120 m/minの速度で直線走行させたとき、蛇行の振幅が ± 5 mm(反射テープ幅50 mm以内)で小さく、かつ曲線走行路上に貼着した反射テープに沿って旋回走行する場合では、60 m/minの速度で滑らかに追従走行することを確認したので、報告する。

2. 無人搬送車の高速走行化の開発目的

筆者らは複雑な軌道敷設並びに拡張や変更の容易な複

† 第25回計測自動制御学会学術講演会(1986・7)および第1回インテリジェントFAシンポジウム(1987・7)で発表

* (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町502

** (株)日立製作所笠戸工場 下松市東豊井794

* Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tsuchiura

** Kasado Works, Hitachi, Ltd., Kudamatsu
(Received April 2, 1991)

Fig. 1 Travelling characteristics of the conventional AGV

数台の AGV を中心にした F & F (Flexible Control & Free Layout) システム³⁾を開発してきた。この中で、複数台の AGV を効率良く運行するために、最適な搬送要求を AGV に割り付ける運行制御方式⁴⁾や運行指令を複数台の AGV に無線で多局的に通信するスペクトル拡散通信方式⁵⁾を開発してきた。このような構成で、必要最小限の AGV を用いてスループットの向上を図るには、AGV の高速走行化（たとえば従来の速度を 2 倍にすると、120 m/min で直線走行、60 m/min で旋回走行）が必要不可欠になる。従来の AGV では 60 m/min 以上で直線走行すると蛇行の振幅が大きくなり、脱線走行することや曲線走行路では旋回走行の速度 (30 m/min 以下) を落さなければ安定走行できないという問題点が指摘されていた⁷⁾。たとえば、文献 17) で検討した AGV が直線路上を走行する場合では、Fig. 1 に示す計算と実験の結果から走行速度を上げていくと、蛇行の振幅 y_1 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。この AGV では、96 m/min 以下の速度において、蛇行の振幅 y_1 が大きくなっているが、誘導走行している。しかし、約 100 m/min 以上の速度では不安定な走行を行う。この原因として種々考えられるが、シミュレーション計算による操舵特性の結果からつぎのことがわかった。まず、検出系の検出精度 (3 mm/bit) や検出遅れ (サンプリングタイム, 50 ms) による影響が大である。これにより、位相遅れなどが生じて操舵制御系が十分に追従できず、蛇行の振幅が大きくなる。

そこで、AGV が高速走行しても、蛇行の振幅が小さく、かつ滑らかに安定走行する操舵性能を得るために、高速型無人搬送車 (以下、高速 AGV と称す) を開発した。

3. 高速型無人搬送車の概要

3.1 全体構成

まず、高速 AGV の構成と機能について述べる。前輪に操舵機能と駆動機能を集約させた高速 AGV の構成を Fig. 2 に示す。高速 AGV は車体を前側の一つの駆動・操

Fig. 2 Conceptual configuration of the Automatic Guided Vehicle (AGV)

舵輪 (径 180 mm) と後側の二つの従動輪 (径 150 mm) よりなる 3 輪構造のものである。車上のコントローラは 1 ボードマイコンからなり、駆動回路を介して、DC の駆動モータを速度制御すると共に、走行路上の反射テープの形状を駆動・操舵輪の前側に取り付けた視覚誘導装置で検出し、車体状態量 (たとえば、横方向の位置ずれ量、姿勢角度など) を算出した後、反射テープに沿って走行するように駆動・操舵輪を回動して高速 AGV を誘導走行させる。

Fig. 2 に示す高速 AGV は長さ 1.0 m、幅 0.6 m、高さ 0.35 m および質量 120 kg (バッテリー含む) であり、100 kg の積載物を搭載することができる。この AGV は車上のコントローラ、SS 無線通信装置などからなり、地上計算機からの運行指令を SS 無線通信装置で受信して、コントローラへ送り、コントローラからの走行指令により駆動・操舵輪の速度制御を行って走行する。

高速 AGV の車体状態量を算出する視覚誘導装置の取り付け位置と、重心位置に対する駆動・操舵輪などの寸法を Fig. 3 に示す。視覚誘導装置は車体の重心位置 G に対して前側に 1 個設けられ、走行路上の反射テープを 216 mm 幅の等倍型イメージセンサで検出した後、進行

Fig. 3 Schematic layout of the AGV

Fig. 8 Schematic layout of the driving and steering mechanism

置検出器，イメージセンサなどをバランス良く取り付けられている。ここで，イメージセンサは駆動・操舵輪の前側 0.16 m の所に取り付けられ，走行路面に対して 25 mm の隙間を有している。

今回，設計・製作した走行操舵機構は最大 120 m/min の走行速度が出る DC 24 V 駆動で 120 W の駆動モータと，左右 90° の操舵角度が得られる DC 24 V 駆動で 30 W の操舵モータから構成されている。この走行操舵性能を把握するため，高速 AGV を走行させて，操舵モータの電流 i に対する操舵角度 δ ，操舵角速度 $\dot{\delta}$ のステップ応答特性を測定した。その波形を Fig. 9 (a) に示す。

(a) Step response characteristics of the steering block

Fig. 9 (a) に示した実験結果から，操舵モータの電流 i (4.8 A で 0.05 s のインパルス) に対する操舵角速度 $\dot{\delta}$ (ピーク値 3.5°/s) の立上り特性は走行速度を変化させた場合でも，操舵角度 δ の立上り特性とほぼ同じ特性を示すことが分かる。

ここで，走行操舵機構の動特性として，(4) 式の 2 次系を考慮することにした。

$$\ddot{\delta} + 2\zeta\omega_n\dot{\delta} + \omega_n^2\delta = k_1 \cdot e_0 \quad (4)$$

ただし， δ は操舵角度， ω_n は固有角振動数， ζ は減衰係数比， k_1 は操舵機構系のゲインである。

Fig. 9 (a) の実験結果と，(4) 式を用いて計算したシミュレーション同定結果から， $\omega_n = 57.1 \text{ rad/s}$ ($= 9.1 \text{ Hz}$)， $\zeta = 0.7$ であった。これにより，今回設計した走行操舵機構は，従来のもの¹⁷⁾ ($\omega_n = 10.36 \text{ rad/s}$ ， $\zeta = 0.25$) に比べ，高応答で高減衰な特性になっている。

つぎに，駆動・操舵輪の操舵角度 δ に対する高速 AGV の重心位置での姿勢角速度 $\dot{\psi}$ の実験結果と計算結果を Fig. 9 (b) に示す。

図示したように，ステップ入力 11.3° の操舵角度 δ に対する姿勢角速度 $\dot{\psi}$ は，11.8°/s であった。この結果から実験値に対する計算値のパラメータを同定すると，駆動・操舵輪の k_r ， k_r は約 2,400 N/rad ($= 245 \text{ kgf/rad}$) であった。そこで，これらの値を用いて高速 AGV の安定限界速度 V_c を (5) 式から求めてみると，340 m/min で

(b) Step response characteristics of the vehicle block

Fig. 9 Experimental steering characteristics of the developed AGV

あった。

$$V_c = \sqrt{\frac{k_f \cdot k_r \cdot g}{m(k_f \cdot l_f - k_r \cdot l_r)}} \cdot (l_f + l_r) \quad (5)$$

4. 高速走行化に関するシミュレーション検討

高速 AGV の操舵制御系の主要諸元を Table 2 に示す。これらの値は操舵制御系の設計¹⁷⁾に必要な値であり、 k_f , k_r , ω_n , ζ , L などを実測から求めた。これらの値を用いて、高速 AGV が 120 m/min の速度で安定走行するための操舵制御系の安定性を検討する。状態変数として $X = [\delta, \dot{\delta}, y, \dot{y}, \phi, \dot{\phi}]^T$ 、操作量として $U = (k_1 y + k_2 \dot{y} + k_3 \delta)$ を用いると、状態方程式は以下になる。

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (6)$$

$$U = -C \cdot X \quad (7)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_n^2 - 2\zeta\omega_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_f}{m} & 0 & 0 & -\frac{k_f + k_r}{mv} & \frac{k_f + k_r}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_f l_f}{I} & 0 & 0 & \frac{k_r l_r - k_f l_r}{Iv} & -\frac{k_r l_r - k_f l_f}{I} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} k_3' \\ 0 \\ k_1' \\ k_2' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_r l_r - k_f l_f}{mv} \\ 1 \\ -\frac{k_r l_r^2 - k_f l_f^2}{Iv} \end{bmatrix}$$

(7) 式を (6) 式に代入すると、状態方程式は (8) 式となる。

$$\dot{X} = (A - B \cdot C) X \quad (8)$$

(8) 式の状態方程式で表わされる系が漸近安定であるためには、すべての固有値の実部が負でなければならない。よって、 $\det(A - B \cdot C) = 0$ から操舵ゲイン定数 k_1, k_2 (ただし、 k_3 は 0.5 で一定とした場合) は Fig. 10 に示す斜線範囲内であればよい。Fig. 10 の安定領域内で設定した操舵ゲイン定数 ($k_1 = 0.02$, $k_2 = 1.0$, $k_3 = 0.5$) を用いて、シミュレーション計算した一例を Fig. 11(a) に示す。図中、①は操舵制御信号 (IN)、②は前側の軌道偏差量 (y_1)、③は操舵角度 (δ)、④は重心位置での軌道偏差量 (y) である。この結果、高速 AGV の初期の軌道偏差量 y_1 を -50 mm にした場合、操舵角度 δ と軌道偏差量 y, y_1 の運動は非同期になり、駆動・操舵輪を約 ± 2.90 (3.3 Hz) で頻繁に制御し、目標軌道に対して y_1 および y がオーバーシュートするが、高速 AGV は 3.0 s 後、滑らかに追従走行することが明らかになった。

高速 AGV の蛇行性能に及ぼす各種の操舵因子として、視覚誘導装置の検出量子化要素、サンプリングタイム、取り付け位置 (b)、駆動・操舵輪の取り付け位置 (l_f) などが上げられる。前 2 者については先に報告したよう

Fig. 10 Region of a local stability of the steering gain ($V = 120$ m/min)

Table 2 Developed AGV specification

Item	Specification
$m = 120$ (kg)	Self mass
$I = 5.6$ (kgm ²)	Moment of inertia
$V = 120$ (m/min)	Travelling maximum speed
$K_f = 245$ (kgf/rad)	Cornering coefficient of front wheel
$K_r = 245$ (kgf/rad)	Cornering coefficient of back wheel
$l_f = 0.288$ (m), $l_r = 0.162$ (m)	Length from wheel to center of gravity
y (m)	Lateral deviation of center of gravity
ϕ (rad)	Yaw angle
δ (rad)	Steering angle of steered and driven wheel
k_3 (rad/V)	Steering amplifier gain
e_0 (V)	Steering voltage
$f_n = 9.1$ (Hz), $\omega_n = 2\pi f_n$	Frequency steering system
$\zeta = 0.7$	Damping factor of steering system
$L = 0.01$ (s)	Time delay on steering system
$k_1' = 0.02$ (V/m), $k_2' = 1.0$ (v·s/m)	Steering gain
$k_3' = 0.5$ (V/rad)	

に蛇行特性¹⁾を改善する方法がわかっているので、後2者について今回検討した。その計算結果を Fig. 11(b), (c) に示す。

Fig. 11(b) では、駆動・操舵輪に取り付けるイメージセンサの位置(寸法: b)を変えた場合における目標軌道への収束特性を示す。 b が 0.16 m 以上になると、AGV は安定走行する。しかし、イメージセンサを駆動・操舵輪側へ近づけた場合 (b が 0.08 m) では、点線で示すように発散特性となり、AGV は脱線する。また、AGV が安定走行する場合でも、 b が 0.24 m の場合と、 b が 0.16 m の場合では前者のほうが後者に比して、目標軌道への追従性が悪くなる。

(a) Simulation result of the steering control

(b) Lateral deviation by length from image sensor to steered and driven wheel center (b)

(c) Lateral deviation by length from steered and driven wheel to center of gravity (l_f)

Fig. 11 Simulation results of the developed AGV

Fig. 11(c) では AGV の重心位置から駆動・操舵輪までの寸法 l_f を変えた場合における収束特性を示す。これは AGV の走行操舵特性を変化させた場合の収束特性であり、 l_f が小さいほど目標軌道への追従性は良くなるが、オーバーシュートする。たとえば、 l_f が 0.576 m の場合では一点鎖線で示すように、AGV は 2 s 後に目標軌道へ収束する。しかし、Fig. 3 に示したように AGV の長さ寸法が大きくなり、旋回走行するときの曲線走行路の半径を大きくしなければならない。したがって、直線走行での安定性と旋回走行での追従性を合せもつように、AGV の重心に対する駆動・操舵輪並びに視覚誘導装置の取り付け位置 (l_f , b) を考慮する必要がある。

5. 高速 AGV の走行実験結果

前項で検討した内容を盛り込んで開発した高速 AGV の外観を Photo. 2 に示す。高速 AGV は SS 無線通信装置を介して、地上のパソコンからの走行指令により 120 m/min の最高速度で走行し、3 m/min の最低速度で停止位置を決める。高速 AGV が走行操舵したときの蛇行特性を Fig. 12(a), (b) に示す。この場合、①走行速度 V は従動輪に取り付けたタコジェネレータの出力値、②台車前側の軌道偏差量 y_0 は高速 AGV の先端に取り付けた視覚センサの出力値、③姿勢角速度 $\dot{\phi}$ は高速 AGV の重心位置に取り付けたジャイロの出力値、④操舵角度 δ は駆動・操舵輪の上部に取り付けたポテンショメータの出力値などを測定した。

Fig. 12(a) では、高速 AGV が直線走行した場合の蛇行特性を示し、80 m/min から 120 m/min まで速度を 3 段階に変化させた場合、 y_0 の最大振幅は ± 5 mm 以下であった。高速 AGV の走行速度を上げていくと、 y_0 の周期は 1.5 s から 1.0 s まで変化 (蛇行の周波数: $0.66 \rightarrow$

Photo. 2 Photograph of the developed AGV travelling on the floor with bonded guiding tape

(a) Comparison of measured travelling speed

(b) Measured travelling characteristics on a curved route at 60m/min

Fig. 12 Measured travelling characteristics of the developed AGV

1.0 Hz) する。また、 y_0 の最大振幅も増え、 ± 3 mm から ± 5 mm になるが、安定に高速走行することを確認した。

Fig. 12(b) では、高速 AGV が直線走行と旋回走行を含むループ軌道(直線走行路 4 m, 旋回半径 0.45 m の曲線走行路 2 m) 上を 60 m/min の一定速度で走行した場合を示す。この結果、旋回走行時に V が少し落ちるが、曲線走行路に貼着した反射テープに沿って駆動・操舵輪が追従して、60 m/min の速度で旋回走行することが可能であることを確認した。

また、旋回走行時の高速 AGV の姿勢角速度 $\dot{\phi}$ は $70^\circ/\text{s}$ であり、大きくなっている。これは高速 AGV が旋回走行するときの遠心力により、駆動・操舵輪に加わる力が増え、横すべりがより大きく働くためであると考えられる。また、駆動・操舵輪の角度 δ 変化に対して、

Fig. 13 Comparison of conventional AGV at 60m/min and developed AGV at 120m/min

ϕ が同位相で変化し良く追従していることが分かる。

以上、高速 AGV と従来 AGV による蛇行性能の比較をまとめると、Fig. 13 に示ようになる。従来 AGV¹⁾ では車体側に 16 個のホトセンサを取り付け、そのホトセンサの出力信号から操舵信号を求め、50 ms のサンプリングタイムで出力していた。その結果、走行速度 60 m/min 時、 ± 15 mm の蛇行性能を有していたが、さらに高速走行すると、不安定走行し脱線する。これに対して、高速 AGV では高精度な蛇行性能 ($y_0 : \pm 5$ mm) を有し、安定でかつ高速走行 (120 m/min の直線走行と、60 m/min の旋回走行) を実現できることを確認した。

6. あとがき

走行路上の反射テープを検出する 3 輪構成の無人搬送車に関して、簡単な構造からなる走行操舵機構と等倍型イメージセンサからなる視覚誘導装置を用い、蛇行を少なくして高速走行する操舵制御系の設計やシミュレーション計算による検討を行った。

これらの検討内容を取り入れた積載質量 100 kg の高速型無人搬送車を設計・製作して、120 m/min の直線走行と、60 m/min の旋回走行を行った。その実験結果から、1 s の周期でかつ蛇行の振幅が ± 5 mm 以下となり、滑らかに走行していることを確認した。

参考文献

- 1) 高橋, ほか: 無人搬送システムの利用実態とその分析, 無人化技術, **338-5**, 2/47 (1988)
- 2) P. P. Bose: Basics of AGV Systems, American Machinist & Automated Manufacturing, Special Report, **784**, 106/122 (1986)
- 3) 牧野, ほか: F & F 自動倉庫制御システムの開発, 第 3 回知能移動ロボットシンポジウム資料, 105/110 (1986)
- 4) 都島, ほか: 知識工学を応用した搬送車群の運行制御方式, 計測自動制御学会論文集, **24-3**, 300/307 (1988)
- 5) 大泉, ほか: 産業移動機械制御用スペクトル拡散通信装置, 第 24 回 SICE 学術講演会予稿集, 347/348 (1985)
- 6) 津川, ほか: 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集, **26-9**, 76/83 (1990)
- 7) 米倉, ほか: 光学誘導形地上搬送ロボット「ホイバサ」の開発, 日立評論, **75-10**, 23/28 (1975)

- 8) P. Boegli: A Comparative Evaluation of AGV Navigation Techniques, Proceedings of the 3rd IC on AGVS, 169/180 (1985)
- 9) 見浪, ほか: 磁石補償式自律誘導方法, システムと制御, 31-5, 382/391 (1987)
- 10) 隅元, ほか: 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集, 23-5, 505/511 (1987)
- 11) 津村, ほか: 無人搬送車とその制御, 計測と制御, 26-7, 593/598 (1987)
- 12) 畑 俊二: 無人車の振舞いシミュレーション, 神鋼電機技報, 24-3, 5/10 (1977)
- 13) S. Shadover, et al.: Steering Controller for Automated Guide Way Transit Vehicles, ASME Trans. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 100-3, 1/7 (1978)
- 14) 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, 37-1, 1/10 (1983)
- 15) 川辺, ほか: 車両操舵システムの動特性解析と四輪操舵機構の設計, 機論, 56-530, 70/74 (1990)
- 16) C. N. Chang, et al.: Stability Analysis of Three and Four Wheel Vehicles, JSME International Journal, 33-4, 567/574 (1990)
- 17) 牧野, ほか: 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, 4-3, 103/110 (1991)
- 18) 牧野, ほか: 小形無人搬送車の誘導・通信, 第1回インテリジェント FA シンポジウム資料, 129/132 (1987)

[著 者 紹 介]

牧 野 俊 昭 (正会員)

1971年, 戸畑工業高校機械科卒業, 同年(株)日立製作所に入社. 1974年同社茨城工業高等専門学校卒業, 同年より1年間東京大学工学部受託研究員. 現在同社機械研究所研究員. FAシステムのメカトロ制御の研究および自動倉庫, 無人搬送車の製品開発に従事. 日本機械学会などの正会員.

大 泉 純 一 (正会員)

1973年, 静岡大学大学院電気工学専攻修士課程修了. 同年(株)日立製作所日立研究所入社. 現在同社機械研究所主任研究員. 工業計器, 流体機械の制御, SS通信の研究などを行い, 現在銀行端末装置の製品開発に従事. 電子情報通信学会の正会員.

橋 本 直 人

1978年, 徳島大学大学院精密機械工学専攻修士課程修了. 同年(株)日立製作所笠戸工場入社. 現在同工場主任技師. 荷役運搬機械(クレーン), 自動倉庫, 無人搬送車, 物流システムなどの製品開発や設計に従事.