

自動追走機能付き搬送ロボットの試作機開発

東海職業能力開発大学校 佐々木 英 世
 藪 厚 生
 河 合 正 人
 浅 井 英 史
 原 吾 朗
 澤 田 健
 中 杉 晴 久
 野 村 哲 章
 河 瀬 博 之
 中 野 考 志

Experimental Model Development of Robot Vehicle with Function of Tailing behind Operator

Hideyo SASAKI, Atsuo YABU, Masato KAWAI, Hideshi ASAI, Goro HARA, Takeshi SAWADA,
 Haruhisa NAKASUGI, Tetuaki NOMURA, Hiroyuki KAWASE and Takashi NAKANO

要約 工場内など限られた敷地内を搬送する機械は、生産現場の省力化、省人化および効率化等を目的に、従来より無人搬送システムとして一般に普及している。しかし、悪路・段差等を伴った不特定のフィールドにおいて汎用的に使用でき、かつインテリジェントな機能をもつ搬送機械は殆ど見かけられない。

筆者らはその点に着目し、悪路・段差走行に対応した車両機構と操作者の後方を半自律的に自動追走する機能および協調走行機能をもつ搬送ロボットシステムの構想をまとめ、さらに試作機の開発を行った。

その結果、試作機における車両機構に関しては悪路・段差走行が行え、かつ平坦路面においても効率よく走行することが可能な、車輪・クローラ併用型の機構を考案し、その実用化に向けたいくつかの問題点を明らかとした。また、自動追走機能については低コストで実現が容易なステレオ超音波センサ方式を考案し、その有用性を確認した。さらに、本ロボットの車両は前輪・後輪をそれぞれユニット化することにより、独立に操舵することが可能な特殊な機構と、将来的に様々なパターン走行が期待できる機構とした。

本稿は、H14年度の事業主団体研究開発事業（F方式）において、対象事業主団体の中心企業である株式会社シンテックホズミとともに取り組んだ成果について報告するものである。

はじめに

現在、荷物の「運送」(materials handling)や「搬送」もしくは「移送」(transfer)に使用される機器およびシステムは、すでに数多く製品化されてい

る⁽¹⁾。例えば個人もしくは商店などでは、最も原始的な人力台車が多く用いられている。さらに荷物の重量や数量の規模が大きな状況に適するものとして、アシスト機能付きの人力台車などが用いられている。一方、工場などの生産現場においては、搬送車やフォー

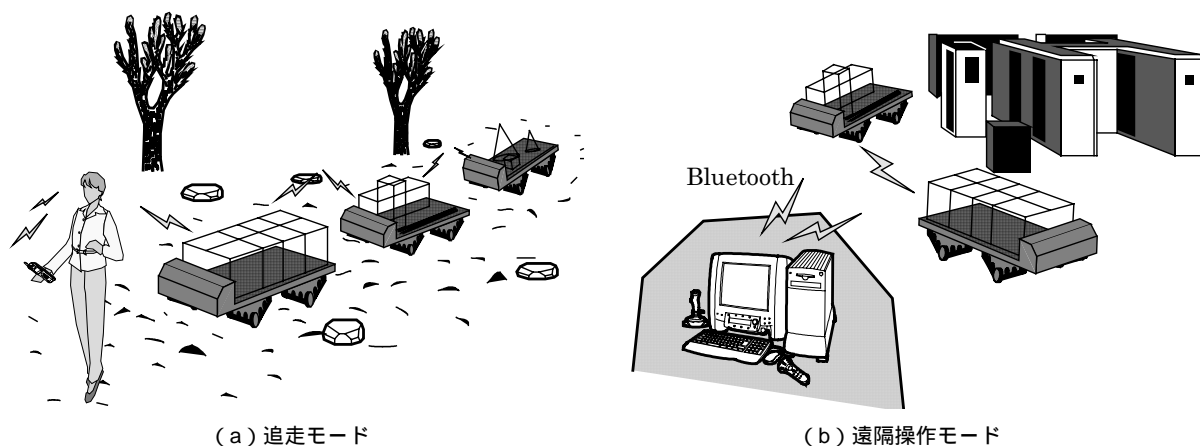


図1 搬送ロボットシステムの概念図

クリフトなどが活躍しており大規模な工場ではそれにIT技術が導入され無人搬送システムとして運用されている。

しかし、それらの多くは使用環境および使用範囲が限定され、ほとんどが平坦路面を走行することを想定した車輪構造となっている。筆者らはその点に着目し、調査および検討を行った結果、次の結論を得た。

高齢化および少子化社会に向けて、日常生活に加え生産現場において省力化を図ることは、高齢者・女性・障害者の社会参加を推し進める一助となる。路面状況にあまり左右されず、屋内外で広範囲に使用できると共に、インテリジェント技術やIT技術が導入された製品例があまり見受けられない。

このことから、筆者らは段差・悪路走行に対応し、追走機能および協調走行機能といったインテリジェントな機能を持つ搬送ロボットシステムの構想をまとめ、その第1歩となる試作搬送ロボットの開発を行った⁽²⁾。

搬送ロボットシステムの構想

図1に検討した搬送ロボットシステムの概念図を示す。

このシステムは大きく分けて2つの動作モードを持つ。1つは、複数の搬送ロボットが先導者（操作者）の後方を、互いに認識し合いコミュニケーションを取りながら、カルガモのように隊列となって自動追走する「追走モード」である。もう1つは、遠隔地にあるパソコンから無線通信を用いて走行操作を行う「遠隔操作モード」である。「遠隔操作モード」は、単なる遠隔操作による無人運転ができるだけでなく、将来的な発展形として搬送ロボットにマッピング機能を持たせ、学習をしながら自動ルート検索を行えるような

機能も考えられる。

搬送ロボットの適用範囲はなるべく広くなるよう、屋内外を問わず様々な路面状況に対応できることと、障害物や段差等を自動的に検出して半自律的に走行できることを想定している。

試作機の開発

今回の試作機開発は、農耕地や草原等の不整地、および18[mm]程度の段差乗り越えが可能な車両構造で、追走機能および遠隔操作機能をもつ1台の搬送ロボットの製作を目標とした。段差18[mm]は、車道-歩道間の段差高を参考とした。図2に製作した試作搬送ロボットの外観写真を、表1に性能諸元を示す。

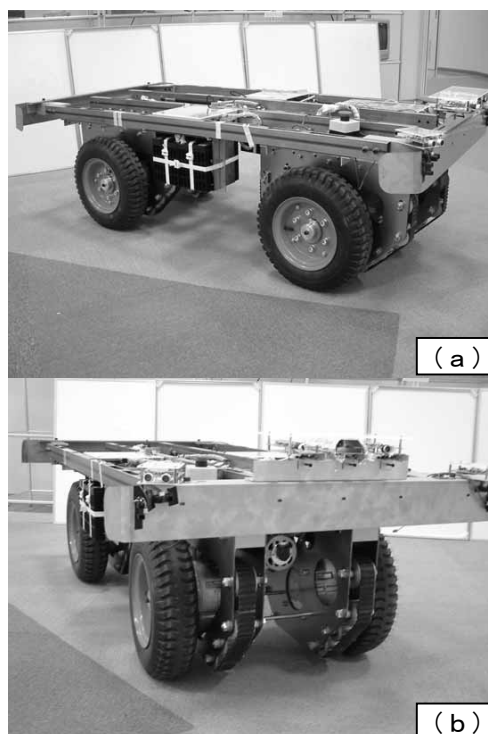


図2 試作搬送ロボット

表1 試作搬送ロボットの性能諸元

大きさ	: L = 1566, W = 666, H = 531	[mm]
質量	: 約200	[kg]
走破能力: 最高速度	11	[km/h]
乗越段差高	180	[mm]
登坂斜度	28	[deg]
電源	: 直流48V	
	(鉛蓄電池 12V19Ah (5 HR) × 4)	
CPU	: H8, PIC	
追走機能: 検出方法	ステレオ超音波方式	
検出角度	左右約40	[deg]
	検出距離 約5	[m]
無線機能: 通信方法	Bluetooth	
	通信距離 25	[m] 以内

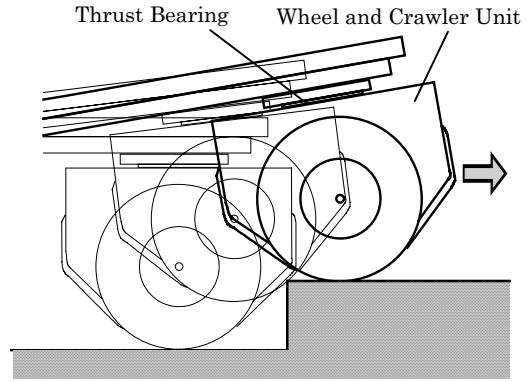


図4 段差乗り越えの様子

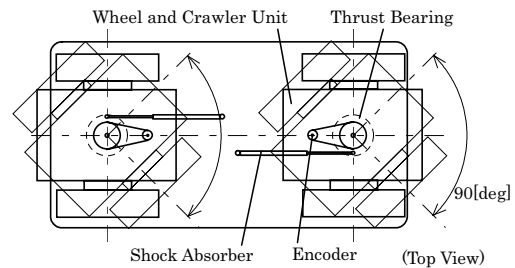


図5 本体上方からの外観図

1. 試作機本体⁽³⁾⁽⁴⁾

段差の乗り越えや不整地での移動にはクローラが有利であるが、整地された平坦路面では車輪による移動がクローラより効率的である。そこで整地の移動には車輪を用い、段差乗り越えや不整地走行時にクローラが補助的に作動する車輪・クローラ併用型の機構を考案した(図3および図4参照)。

また駆動性を良くするため、4つの車輪はそれぞれ独立にモータを配置した4輪駆動とした。さらに、図3、図5に示すように前2輪、後2輪にクローラを加えた機構をそれぞれユニット化した。そして各車輪ユニットは、本体シャーシ部とスラストベアリングにより連結し、約90[deg]の範囲で自由に回転できるようにした。車両の操舵は左右の車輪の回転差により車輪ユニットが本体シャーシに対し回転することにより行

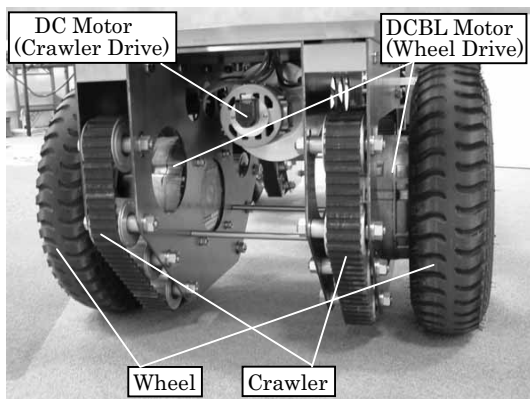


図3 クローラユニットの拡大写真

うことができる。それにより操舵機構が簡略化され、さらに前後輪を同時に操舵することによる極めて小さな旋回半径での旋回走行や平行移動走行といったユニークで機動性に優れた走行パターンが可能となった。

2. 制御システム

図6に制御システムのブロック図を示す。

遠隔操作モードでは、遠隔操作用パーソナルコンピュータ(遠隔操作用PC)より動作指令を行う。遠隔操作用PCと搬送ロボット間の通信は、Bluetoothモジュールを用いた無線通信方法により行った。

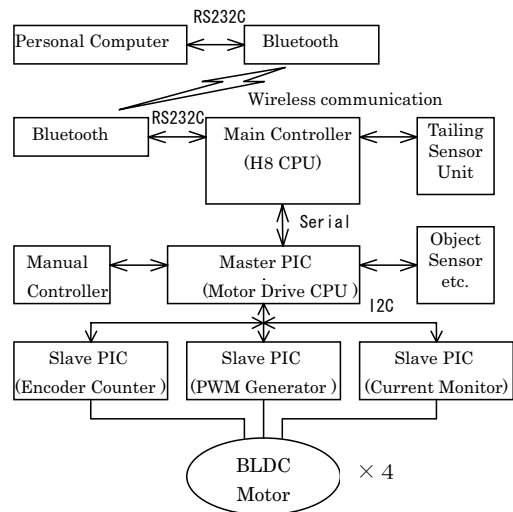


図6 制御システムのブロック図

追走モードでは、操作者がもつ誘導装置からの信号を検出する追走センサの情報と障害物センサの情報を搬送ロボットに搭載されたマイコンシステムにより処理することにより障害物を自動的に回避しながら半自律的に追走する。

2.1 Bluetooth モジュール⁵⁾

今回使用した Bluetooth モジュール (HA - 1217、株日立旭エレクトロニクス) は、シリアル (RS232C) インターフェースをもち、ケーブル接続による通信とほぼ同等に利用でき取り扱いが極めて簡単である。通信距離は、Bluetooth のパワークラスにおいて Class 2 をもち製品仕様で 25m 以内である。Bluetooth では、複数の通信ユニットで、近距離において簡単にサーバー・クライアント方式のピコネット構成が可能である。従って、将来的に複数台の搬送ロボットが互いにコミュニケーションを取りながら協調動作を行う場合に極めて有用である。

2.2 マイコンシステム

マイコンシステムは、上位の H8 マイコンと下位の PIC マイコン群から構成され、両者は RS232C の非同期シリアル通信で接続している。

H8 マイコンは、遠隔操作モードにおける無線信号の処理や、追走モードにおける追走センサ信号の演算およびそれによって得られる走行速度指令値と操舵角度指令値をアスキーコードとして下位の PIC マイコン群に伝達する。

PIC マイコン群は、1つのマスタ PIC マイコン (PIC16F877) と複数のスレーブ PIC マイコン (PIC16F873) が I²C 通信によって接続され、モータの駆動制御をする。マスタ PIC マイコンは、H8 マイコンから搬送ロボットの速度指令値と操舵角度指令値を受け取り、4 輪の回転速度値を演算する。4 輪の回転速度値は PWM 発生用スレーブ PIC に I²C 通信で送信され、回転速度値に応じたデューティ比をもつ PWM 信号が生成される。

2.3 I²C (Inter Integrated Circuit) 通信⁶⁾

I²C 通信は、1 枚の基板上でさまざまなペリフェラル IC 間のデータ通信をシンプルな回路設計により効率よく行うためにフィリップス社により提唱された通信方法である。各 IC には固有のアドレスが与えられ、SDA (serial data) と SCL (serial clock) の 2 本の双方向共通バスにより 1 つのマスタ IC といくつ

かのスレーブ IC 間を 100kbps、400kbps もしくは 3.4 Mbps の通信速度で高速なデータ通信が行える。

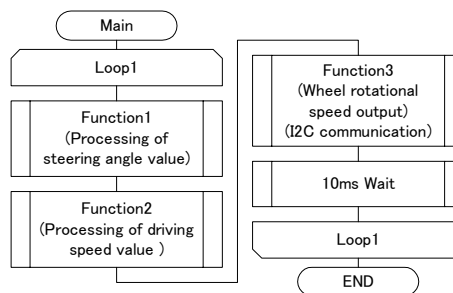
今回、制御システムに使用した PIC マイコンの PIC16F877 と PIC16F873 には、I²C 通信のハードウェアインタフェースが内蔵されている。さらに、コンパイラとして使用した CCSC コンパイラ (CCS 社) には、I²C 通信用の組み込み関数が用意されている。従って、小型である PIC マイコンをパッケージごとに機能分割し、それらを I²C 通信によってつなぎあわせることによって非常に効率よく開発を行うことができる。

2.4 搬送ロボットの速度および操舵制御方法

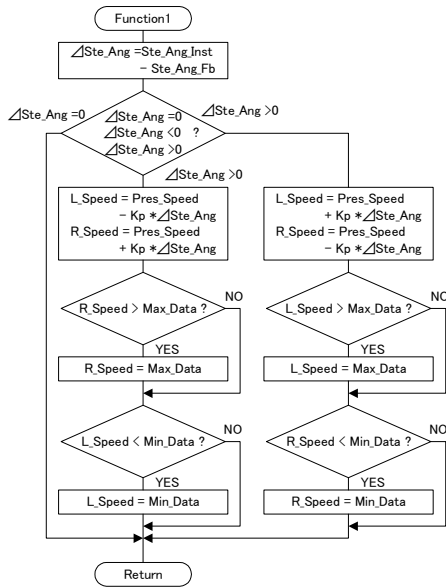
製作した搬送ロボットは、前後輪のユニットを独立して操舵制御できる構造となっている。今回は初段階として後輪を固定し、前輪ユニットの操舵のみで動作させることとした。

マスタ PIC マイコンは、上位の H8 マイコンが出力する走行速度指令値および操舵角度指令値を、シリアル割り込みによりリアルタイムに受信しラッチする。また、タイマ割り込みにより常時、約 30[us] 間隔で操舵角度の実際値 (車輪ユニットと本体シャーシとの角度情報を得るポテンシオメータのフィードバック値) を検出し、約 10 [ms] 間隔で、操舵角度の偏差演算を行っている。偏差がゼロとなり、かつ走行速度が走行速度指令値となるように一定の遅れ時間を持ちながら徐々に目標値に近づくよう左右の車輪の速度制御を行っている。図 7 に速度・操舵制御の大まかなフローチャートを示す。現段階において速度制御は、開ループ制御で行っている。

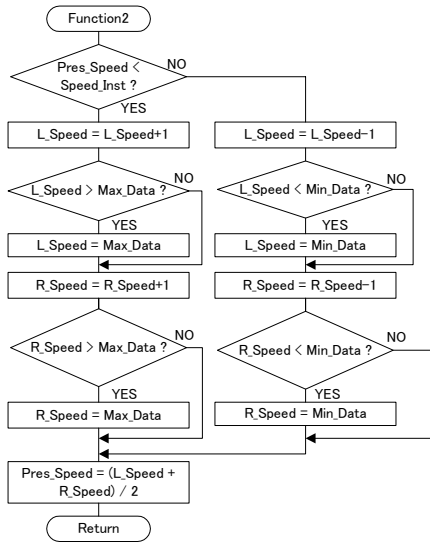
2.5 モータおよび駆動回路



a) メインルーチン



b) 操舵角度処理ルーチン



c) 走行速度処理ルーチン

ΔSte.Ang	: Steering angle deviation
Ste.Ang.Inst	: Steering angle instruction value
Ste.Ang.Fb	: Steering angle feedback value
L.Speed	: Left wheel rotational speed
R.Speed	: Right wheel rotational speed
Pres.Speed	: Present driving speed value
Speed.Inst	: Driving speed instruction value
Kp	: Proportional action constant
Max.Data	: Maximum driving speed value
Min.Data	: Minimum driving speed value

図7 速度・操舵制御のフローチャート

モータは、駆動回路およびエンコーダ内蔵のインホイール型 ブラシレス DC モータ (DDW4030、HONDA) を使用した。モータへの速度指令、ブレーキ (回生ブレーキ) 指令は、アナログ電圧 (0 ~ 5 [V]) でモータユニットに直接入力する。またモータユニットからはエンコーダパルス信号 (12 [pulse/rev]) と消費電流信号 (10 [A/V]) が得られる。

マイコン制御回路とモータ間の信号は、ノイズや故障時の回路保護に配慮しフォトカプラを用いて絶縁した。また、速度指令、ブレーキ信号のアナログ信号はマイコンより出力されるデジタル信号を PWM 型 AD コンバータ方式によりビットごとに AD 変換し入力した。

3. 自動追走回路

自動追走させるためには、搬送ロボットが先導する操作者の距離および角度 (方向) を認識する必要がある。その距離検出と角度検出の方法をいくつか検討した結果、今回は安価でシンプルな回路構成で容易に実現できるとともに、比較的長い距離を検出することができる超音波センサを用いた測距方式を採用した。

一般的に超音波センサを用いた測距では、超音波を対象物に向けて発信し、発信開始時間と反射波の受信時間の時間差を音波の空中伝播時間をもとに距離に換算する方法が用いられる。しかし、この方法を用いて本事例のように自由に移動する操作者を特定し測距することは極めて困難であり、さらに対象物との角度を検出することは不可能である。

そこで図 8 に示すように、操作者側に 1 つの超音波送信器をもつ送信装置を設置、搬送ロボットに 3 つの超音波受信器をもつ受信装置を設置する構成を考案した。図 8 より、送信器と受信器の位置関係から式(1)の連立方程式が成り立つ。但し、本試作機において $a = 200$ [mm] とした。さらに各受信器の受信時間差と音波の空中伝播時間 (気温 20 [] で換算) より演算によって得られる L_1 と L_2 との距離差 ($L_1 - L_2$) を d_1 、 L_3 と L_2 との距離差 ($L_3 - L_2$) を d_2 とすると (式(2))、式(3)に示すように、発信機との距離 L_2 と、方向 θ が求められる。

以上のことから、この原理に基づき回路を構成し実験を行った結果、安定した結果を得ることができなかった。原因として、3 つのセンサ間の距離が短いため、 d_1 、 d_2 の値が微小であること、ある一定時間間隔で送信されてくる超音波信号のエコー成分が混入することおよび送受信回路の不安定さが考えられた。

そこで次に、超音波センサ回路のノイズ対策および受信感度の向上に対して見直すとともに、新たに図 9 に示すように超音波センサの受信回路を 2 個にし、送信側は搬送ロボット本体に搭載された受信回路側からの赤外線センサによる超音波発信要求信号をトリガとして超音波信号を送信する方法を考案した。超音波要求信号の発信間隔は 90 [ms] とし、40 [kHz] の超

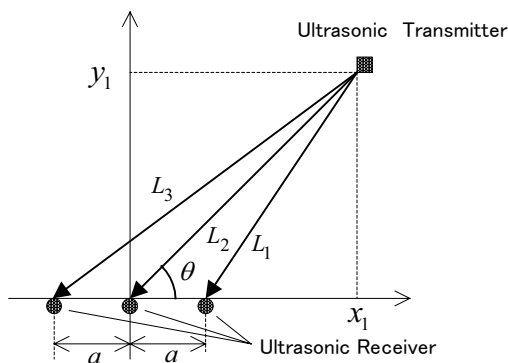


図8 3点受信器による距離・角度の検出原理

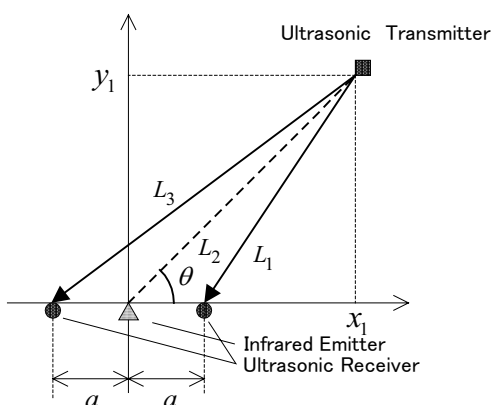


図9 ステレオ超音波方式による距離・角度の検出

$$\begin{cases} L_1^2 = (x_1 - a)^2 + y_1^2 \\ L_2^2 = x_1^2 + y_1^2 \\ L_3^2 = (x_1 + a)^2 + y_1^2 \end{cases} \dots(1)$$

$$\begin{cases} d_1 = L_2 - L_1 \\ d_2 = L_3 - L_2 \end{cases} \dots(2)$$

ただし、 d_1 、 d_2 は超音波センサの受信時間差より演算で求める。また、 $a = 200$ [mm]である。

$$\begin{cases} L_2 = \frac{2a^2 - (d_1^2 + d_2^2)}{2(d_2 - d_1)} \\ \theta = \cos^{-1}(x_1/L_2) \end{cases} \dots(3)$$

ただし

$$x_1 = \frac{(d_1 + d_2)(a^2 - d_1 \cdot d_2)}{2a(d_2 - d_1)} \dots(4)$$

$$\begin{cases} L_2 = \sqrt{\frac{L_1^2 + L_3^2}{2} - a^2} \\ \theta = \cos^{-1}(x_1/L_2) \end{cases} \dots(5)$$

ただし、

$$x_1 = \frac{1}{2a}(L_3^2 - a^2 - L_2^2) \dots(6)$$

音波を3 [ms] 発信するよう設定した。この方法では、発信機との距離 L_2 と方向 θ は、式(5)、および式(6)により求められる。つまり図9の方法では演算に、 L_1 、 L_3 のデータを用いることから、距離差 ($L_1 - L_2$)、($L_3 - L_2$)を用いる図8の方法に比べ、取り扱う値が大きくなり電子回路においてより安定した正確な結果が得られることとなる。

この方式では測定範囲は左右約40 [deg]、距離約5 [m]以内で安定して測定することができた。筆者らはこの方法をステレオ超音波方式と称した。

また、送信側・受信側にそれぞれ遠隔操作として用いたものと同様のBluetoothモジュールを搭載し、追走機能の開始・終了を通知する機能を付け加えた。

このような通信機能を有することで、将来的には送信・受信装置間で互いの情報を交換でき、複数台の搬送ロボットの縦列走行運転において互いに相手を識別する機能などのコミュニケーションが可能になると考えられる。

．おわりに

筆者らは、悪路・段差走行に対応した車両機構と操作者の後方を半自律的に自動追走する機能および協調走行機能をもつ搬送ロボットシステムの構想をまとめ、さらに試作機の開発を行い以下に述べる成果を得ることができた。

- 1) 整地および不整地を効率よく走行することが可能な、車輪・クローラ併用型の車輛機構を考案し試作機を製作した
- 2) 搬送ロボットを遠隔操作モードおよび追走モードで制御する、複数のマイコンを使用した車輛制御システムを開発した
- 3) 超音波センサを用いて、先導者の距離および方向を検出するステレオ超音波方式による自動追走路を開発した

さらに問題点および今後の課題として、以下の項目が明らかとなった。

- 1) 車体質量の軽量化
- 2) より多様な車輛走行制御が行える高度な制御プログラムの開発
- 3) 自動追走路の高精度化
- 4) 安全機能の装備
- 5) 複数車輛による協調走行機能の開発

謝辞

最後に、本取り組みにおいて、多大なるご協力をいただきました株式会社シンテックホズミの矢柳氏、小林氏にはこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- (1) 平井裕章：「高精度、高速性を実現する搬送装置設計のポイント」、機械設計 Vol.46、No.13、p.13 - 2 (2002)
- (2) 佐々木他：「自動追走機能付き搬送ロボットの試作機開発」、技能と技術 Vol.38、p.17 - 21、(2003/4)
- (3) 石川島播磨重工業株式会社：「姿勢可変型クローラ」、特許公開2001 - 354167
- (4) 山口孝美：「脚輪付き走行体の段差乗り越え装置」、実用新案公開平5 - 37636
- (5) 宮津和弘：「Bluetoothガイドブック」、日刊工業新聞社 (2000)
- (6) 「I²Cバス使用法」フィリップス社