コンベア搭載型 AGV の協調による物体搬送システム*

太田 順^{*1}, 新井民夫^{*1}, 井上康介^{*2}
千葉龍介^{*2}, 平野智一^{*3}, 前田雄介^{*4}

Material Transport System by Cooperation of Conveyor-Loaded AGVs

Jun OTA^{*5}, Tamio ARAI, Kousuke INOUE,
Ryousuke CHIBA, Tomokazu HIRANO and Yusuke MAEDA^{*5} Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

A new transport module for constructing an efficient and flexible material handling system are proposed in this paper: an AGV (Automated Guided Vehicle) module loaded a conveyor in which it is possible to hand over a transported object between two modules. The operation can solve a deadlock problem among AGVs in the process of material handling. Prototype modules are created and hand-over experiments are made to measure three kinds of hand-over costs of the modules. Control strategy is proposed and transport simulations are made for a model plant layout by using the cost values in the former experiments. The results show the effectiveness of the proposed module and control strategy in comparison with singleloop and unidirectional type transportation.

Key Words: Robot, Flexible Manufacturing System, Production Engineering, Transportation, Material Handling System

1. はじめに

近年, 多品種少量生産を指向した様々な生産システムが提案されている(たとえば新井らの研究⁽¹⁾等)。これを実現する上で, 効率的かつ柔軟な自動搬送システムの開発が重要である。これより, 生産サイクルと製造コストを減少させることが可能となる。現状多く使われている搬送機器には, クレーン, コンベアおよび AGV (Automated Guided Vehicle) がある⁽²⁾が, それぞれ長所・短所を有している。クレーンは効率性と柔軟性の面で比較的優れているが, 完全自動化に適していない。これは, 搬送物体の把持・位置決め時に人間による助けが通常必要となるためである。コンベアは, 生産現場内

のある特定の場所に一旦据え付けた後には位置の変更が困難であることから, 柔軟性の観点から問題がある。AGV は一回の移動につき比較的小さなサイズの物体しか運べないことから, 効率の低さという短所を持っている。このことは, 既存の搬送機器を用いた, 効率性と柔軟性の両者を満たす搬送システムの設計が困難であることを意味している。

本論文では AGV にコンベアを搭載した新しい搬送モジュール「コンベア搭載型 AGV」を提案する。図 1 に試作した提案モジュールを示す。ここで AGV 部は搬送物体の大域移動を実現する。コンベア部は, 搬送物体を直接搭載し, 搬送モジュールと生産機械間の物体受け渡し動作などの細かな動きを実現する。このモジュール間の協調により, 望ましい搬送システムの構築を目指す。

各搬送装置の比較を表 1 に示す。柔軟性を目指した搬送装置としては, 提案システムの他にも, 無軌道走行 AGV, マニピュレータ搭載型 AGV 等が考えられる。前者は, レーザーを用いたタイプが市販されているが, コストが非常に高い短所を有する。後

* 原稿受付 2000 年 6 月 8 日。

^{*1} 正員, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。^{*2} 東京大学大学院。^{*3} 東日本電信電話(株)(〒112-0004 東京都文京区後楽 2-5-1) (元: 東京大学大学院)。^{*4} 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。

E-mail: ota@prince.pe.u-tokyo.ac.jp

者は、搬送対象物のマニピュレータでのハンドリングが難しくコストも高い。提案モジュール群は比較的安価なベルトコンベアを AGV に搭載するため、コストも極端に高くなく、他の要因も卓越することが期待できる。

Table 1: comparison of transporters

	Efficiency	Flexibility	Cost	Automation
Crane	○	○	○	×
Conveyor	○	×	○	○
AGV	×	○	○	○
AGV(guided)	○	○	×	○
AGV with manipulator	×	○	×	○
Conveyor-loaded AGV	○	○	△	○

提案モジュール群はいくつかの協調形態を持つことができる⁽³⁾。本論文では、コンベア部を用いてモジュール間で搬送物体を受け渡す「受け渡し動作」に着目し、それを組み入れたモジュールの制御戦略を提案し、搬送システムの性能に対する戦略の影響を明らかにする。試作モジュールを用いて搬送実験を行い、受け渡し動作に要するコストを評価するとともに、提案したモジュール及び動作戦略の妥当性を検証するため、搬送シミュレーションを行う。

Fig.1 The proposed module

同質のモジュールから構成される柔軟な搬送システムについて既にいくつかの研究がなされている。福田らは、二自由度を有するモジュール群を平面上に敷き詰めた搬送システムを提案している⁽⁴⁾。坂尾らは、同様な概念に基づいたセル型の搬送装置を提案している⁽⁵⁾。Luntz らは、平面上の対象物を操作するアクチュエータアレイを提案し、タスク実現の際に柔軟性のある制御戦略を提案している⁽⁶⁾。

これらの研究で提案されているモジュール群はすべて環境内に固定されており、自らが移動することによる柔軟性について言及していない。群ロボット系におけるロボット間の受け渡し動作については以下の研究がなされている。Drogoul らは、餌あさり作業において、ロボット台数が増加するにつれて受け渡し動作の有効性も増すことを示している⁽⁷⁾。福田らは、ロボット間のデッドロックを回避するための手渡し動作の有効性を示している⁽⁸⁾。吉村らは、多数物体の繰り返し搬送作業を行う群ロボットアーキテクチャを提案している⁽⁹⁾。これらの研究は本論文でのアプローチに類似しているが、これらはすべて基本的には二点間での搬送問題を対象としており、実際の工場環境のような多くの地点間で混在する搬送問題への拡張法について論じていない。

2. AGV を用いた搬送システム

通常の AGV システムは、磁気テープ等の固定軌道上を移動している。ここでは、AGV の経路走行問題を、経路の形状（単数ループ型あるいは複数ループ型）および動作方向（単方向型あるいは双方向型）から分類する。前者の分類に関しては、経路の形状の単純さ、作業環境内における AGV による被覆領域の狭さ、の理由により単数ループ型が望ましい。後者の分類については、動作自由度の多様性の観点から双方向型が望ましいと言える。

ところが、受け渡しを行わない通常の AGV システムにおいて「単数ループ・双方向型」の方法論を採用することは、後述する（第三の方法として述べる）工夫をしない限り非常に困難である。これは、同一の経路上を逆方向に走行する二台の AGV が相互に邪魔し合っデッドロックに陥ってしまうことから明らかである。そのため、通常は、以下の三つの方法が採られている：第一は「単数ループ・単方向型」（図 2(a)）、第二は「複数ループ・双方向型」（図 2(b)）である。第一の方法は効率性において問題がある。第二の方法は、待避線等の余分な経路を追加せねばならず、AGV の制御アーキテクチャもより複雑なものになってしまう。また第三の方法として、「単数ループ・双方向型」であっても、各 AGV の走行経路を AGV 毎に完全に分割すれば（図 2(c)）、デッドロックに陥ることがない。ただ経路分割が経路上の任意の場所においてできるわけではない、すなわち経路のつなぎ目において物体の中継をするステーションが必要となるため、柔軟性の観点から問題が残されている。

Fig. 2 Types of transportation

ここで、提案モジュールを用いた場合、受け渡し動作によってデッドロック問題を解決することができる。なぜなら、同一経路上で二台のロボットが出会ったとき、相互の作業情報（「モジュールの最終目標地点」および「目標地点までの経路」）及び搬送物体を交換することで役割交換できるからである。任意台数より構成される系においても二台間のこの手続きの反復により、デッドロックが生じないのは明らかである。各モジュールは搬送地点間を結ぶ最短経路を常に選択できるため、効率的な搬送を期待できる（図 2(d)）。この方式は、第三の方式において、受け渡し地点を動的にした方法とみなせる。これにより制御系ならびに搬送経路の両者の単純化を図ることができる。

実際の搬送においては、受け渡しに要するコストが問題となる。モジュールの状態に応じて、受け渡し動作には以下の三つの場合が考えられる。

(Case-A) 両モジュールが搬送物体を保持している場合、物体と作業情報の両者を交換する必要がある。
 (Case-B) 片方のモジュールのみが物体を持っているとき、作業情報を交換する必要がある。物体は片方のモジュールから他方へ移される。
 (Case-C) 双方ともに物体を保持していないときは作業情報のみを交換すればよい。

実際のモジュールを用いた実験によりそれぞれの場合におけるコスト評価を行う。

3. 試作モジュールを用いた受け渡し動作のコスト評価

図 1 に示したモジュールを二台試作した。AGV 部としては、2 駆動輪型移動ロボットである Nomadic Technologies 社製の高さ 0.34 [m]、半径 0.19 [m] の「Nomad Scout」を使用した。コンベア部にはハイテック精工社製 0.55 m 長のベルトコンベアを用いている。コンベアはオンオフ入力で動作する。モジュールに対する全ての制御信号は Linux ベースのホストコンピュータにより生成される。ホストとモジュールの間の通信は無線で行っている。

2 章で述べた三種類の受け渡し動作のうち、Case-A では物体の交換も行うため最も高コストを要する。ここでは、二つのモジュール（モジュール A、B とする）間の受け渡しを考えた。図 3 は試作モジュールによる受け渡し実験過程であり、キャプションの時間はその時点での経過時間を示している。

ある一定距離の初期位置に存在する 2 台のモジュールが接近し、物体を受け渡して、もとの場所に戻る過程を実験した。まず以下に述べる手続きにおいて、各モジュールは容量的に同時に二つの物体を保持できるという仮定を与えている。図 3(a)では、各モジュールは 2.0 m 離れた初期位置に存在している。図 3(b)において両モジュールはあらかじめ定義された受け渡し位置に到達している。図 3(c)においてモジュール B は物体をモジュール A に渡している。この際に両モジュール間での作業情報の交換も行われる。図 3(d)でモジュール B が 180 度の回転を行う。図 3(e)ではモジュール A は物体をモジュール B に渡す。最後に図 3(f)で初期位置に戻っている。

実験において、モジュールへの制御入力には並進・回転各方向の速度入力の形で与え、制御方式としては、通常的位置・速度フィードバック制御を行った。モジュールの位置情報は車輪に取り付けられたエンコーダを用いたデッドレコニングにより得た。サンプリング値を 0.3 秒とし、フィードバックゲインは試行錯誤的に決定した。

(a) Initial position (0 sec.)

(b) Approach each other (4.5 sec.)

(c) Hand the object from left to right (6.6 sec.)

(d) Rotate Module B with 180 degree (11.1 sec.)

(e) Hand the object from left to right (13.2 sec.)

(f) Back to the initial position (17.4 sec.)

Fig.3 Transportation Experiments

各モジュールの位置・姿勢とコンベアへの入力の時間変化をそれぞれ図4(a), (b), (c)に示す。図4における“(a)”～“(f)”は図3の(a)～(f)の各時点に対応している。この結果から、受け渡しコストを以下の三つの要素に分割して考えることとした。

(a) Position transition of robots

(b) Orientation transition of robots

(c) Conveyor movement of robots

Fig. 4 Experimental results

Fig.5 Derivation of positioning cost

- i. モジュール自身の位置決めコスト
 - ii. コンベアにより物体を片方のモジュールから他方のモジュールに移すためのコスト
 - iii. モジュールの回転に要するコスト
- ここで、情報交換のためのコストは微小であるとして無視した。コスト(ii)は図4(c)から2秒、コスト(iii)は図4(b)から5秒とみなした。

コスト(i)に関しては、(1)実際の目標位置への到達時間と(2)モジュールが最大速度で移動したときの予想目標位置到達時間のとの差から得た。この値はモジュール位置の時間軌跡の接線と最終位置を示す直線との交点により表現される時間と実際最終位置に到達するのに要した時間との差を計算することから得られる。図5は、図4(a)におけるモジュールBの最初5秒間の位置を拡大表示したものである。上記の計算の結果、コスト(i)を1.5秒とみなした。

結果として、Case-Aの受け渡し動作のコストは、 $(i)+(ii)+(iii)+(ii)+(i)=2(i)+2(ii)+(iii)=12$ 秒、と計算できる。同様にしてCase-Bのコストは $2(i)+(ii)=5$ 秒、Case-Cは $2(i)=3$ 秒となる。

最後に、試作したモジュールが、実際に産業用に用いられているAGVと比較して小型サイズであることを考慮しなければならない。ここではモジュールのサイズがモジュールの速度に比例するという仮定を置く。この仮定は、「試作システムを用いて測定された受け渡し動作のコスト(時間)は、サイズが大きくなったとしても一定とみなせる」ことを意味している。すなわち、位置決めコストをエネルギーの観点から評価すると、発生エネルギーを(最大速度)²に比例したものとして、消費エネルギーを(AGVの質量)に比例したものとしてそれぞれ近似できる。実験システムの質量は約28[kg]、Fig.5に示す実験時の最大速度は直線の傾きから約0.4[m/s]である。また通常のAGVとして、(株)富士通自律分散型搬送システムを例にとる⁽¹¹⁾と、質量は搬送対象物を含めて約150[kg]、最大速度が1.0[m/s]とみなせる。ここで、(最大速度)²の比は6.3、(質量)の比は5.3となる。このため、実験システムと実AGVの消費エネルギーと発生エネルギーの比がほぼ等しい、すなわち位置決めコストは等しいと考える。このため、上記のコスト値をそのまま次章でのシミュレーションで利用する。搬送性能に対するコストの感度解析を、次章の最後で行う。

4. 提案搬送モジュールによる仕分け作業シミュレーション

本章ではあるモデル工場環境における搬送シミュレーションを行い、ベルトコンベア搭載型モジュールおよびその制御法の有効性を検証する。

最初に、ある組立製造工場の部品搬送過程をモデル化したところ以下の知見を得た。

- ・ 生産する製品の種類が2種類、一日の生産個数が各々200個、25個、部品種類が各々61種類、43種類ある。部品は数個～数十個のロット単位で搬送される。部品調達のためにトラックが発着するトラックヤードが七箇所、製品

の生産ライン近傍に部品置き場が三箇所存在する。

- ・ 各部品置き場において、必要な部品の「種類」および「単位時間あたり個数」があらかじめわかっている。その部品供給はトラックヤードよりなされるが、どの部品がどのトラックヤードに供給されるかはランダムに決定される。

その結果、搬送過程が図6に示す形でモデル化できた。

Fig.6 Layout of the simulation environment

- ・ 七つの搬送開始地点(AからG)と三つの搬送終了地点(aからc)が存在する。搬送開始地点はトラックヤードを、搬送終了地点は部品置き場を、それぞれモデル化したものである。なお座標値の単位はmであり、実際の工場での値を採用している。a,b,cを結ぶ線分が製品の製造ラインを表している。
 - ・ 地点間を結ぶ経路は、すべての地点を通り障害物を回避するループ型経路を設定した。
 - ・ 作業内容は搬送開始地点から搬送終了地点まで物体(部品)を搬送することである。作業は、各開始地点毎に等しくある頻度 $(4.51 \times 10^{-3} [\text{個}/\text{sec.}])$ で発生するものとし、発生がポアソン分布に従うと仮定した。
 - ・ 作業に対する搬送終了地点は一定の確率で決定されることとした。ここでは、地点aへ29.7%、地点bへ17.1%、地点cへ53.2%の確率とした。
- 搬送形態として、提案モジュールを用いた制御法と「単数ループ・単方向型」の二種類の比較を行った。後者を比較対象として採用した理由は、提案手法と同一の経路を利用し、評価をしやすいからである。モジュールの行動制御を以下のように設計した。
- ・ 一定速度(1[m/sec.])で経路上を周回する。
 - ・ 搬送開始地点に到達し、そこに未実行作業が存在した場合には、その作業を請け負う。これを作業主体に考えると、最初に作業に出会ったモジュールがその作業を実現すると言う意味でFEFS(First-Encountered-First-Served)モデルであると言える。

- ・ 作業を請け負ったモジュールは、時計回り経路・反時計回り経路のうちの短い方を選択し、その経路に沿って搬送終了地点に向かいその地点に到達し、作業を完了する。
- ・ 移動中に他のモジュールと行き会ったとき相互の状態に応じて3章で測定したコストで受け渡し動作を行う。モジュールが2台とも物体を搬送している際にも、先の実験で示した方法で、受け渡しをするものとする。また角を走行する際には2秒のコストが、搬送開始・終了点との物体受け渡しに5秒のコストがそれぞれかかるとする。
- ・ 受け渡し以外で自身の進行方向に他のモジュールが停止している場合、待機する。

この行動則は、各モジュールにとって大域的な情報を必要としないことに注意されたい。比較対象となる「単数ループ・単方向型」における作業請負は上記の設定と同一とした。

シミュレーションは一個のデータに対して3600秒間、計50個のデータに対して行い、平均をとって評価した。評価項目として作業完了時間とスループットレートを評価した¹⁰⁾。ここでスループットレートは、(完了したジョブ)/(生成されたジョブ)により計算した。図7にモジュール数と作業完了時間との関係を、図8にモジュール数とスループットレートとの関係を示す。作業仕様として、平均作業完了時間を300秒、スループットレートを98%としたとき、提案手法における必要モジュール数が11台となり、従来法(「単数ループ・単方向型」)においては14台となる。提案法では、モジュール3台分(21%)の効率化がなされたことがわかった。

図9に、作業発生頻度の 4.51×10^{-3} [個/sec.]を基準として、それに定数 α を掛けた際の、 α と必要モジュール数との関係を示す。以下の知見が得られた。

- ・ あらゆる作業発生頻度において、提案手法は従来法より改善されている。搬送頻度の変化に応じてモジュールの台数変化で対応できるため、提案手法は、柔軟性があると言える。
- ・ $\alpha = 1.0$ の時に最も提案手法の優位性が高く、頻度がそれ以上の時もそれ以下の時も優位性が落ちる。これは以下の理由が考えられる。頻度が小さいとき、走行時のモジュール間干渉が少ないため、提案手法と従来手法の間に大きな差が見られない。また、非常に大きくなった場合、移動コストと同程度に受け渡しコストも大きくなり、提案手法の有効性はそれほど大きなものではなくなる。優位性が極大となる頻度(α)は、レイアウト、荷積み/降ろしコスト、受け渡しコストに影響

して変動するが、上記の定性的性質は保たれる¹²⁾。

最後にコスト(i), (ii), (iii)のうち、どの変動が作業完了時間に大きく影響するかを比較した。シミュレーションの結果、それらのコストを10%ずつ変化させたときの作業完了時間の変動率はそれぞれ0.61%, 1.9%, 0.35%であった。このことより、ハードウェアや制御手法等の改良により(ii)のベルトコンベアによる物体移動コストの減少を目指すことが重要であることがわかった。

5. おわりに

本論文では、「コンベア搭載型 AGV」という新しい搬送モジュールを提案した。試作モジュールを用いた実験により受け渡しコストの評価を行い、提案ハードウェアの有効性を示した。モデル工場環境における搬送シミュレーションから、提案モジュールの有効性が示された。今後の展望として、モジュール機構の改良による受け渡しコストの低減や、提案機構に適した経路設計等が挙げられる。

6. 謝辞

この研究の一部は、IMS/MMHS (メタモルフィック搬送システム) プロジェクトの援助を受けた。

文 献

- (1) T. Arai, Y. Aiyama, Y. Sasaki: Holonic storage: an assembly and storage cell by manipulation using environment, Proc. 29th CIRP Int. Seminar on Manufacturing Systems, 221/226 (1997).
- (2) T. Tsumura: AGV in Japan, Proc. 1994 IEEE/RSJ/Int. Conf. Intel. Robots and Syst. (IROS 94), 1477/1484 (1994).
- (3) 新井 民夫, 太田 順: ベルトコンベア搭載型 AGV を用いた柔軟な搬送システム, 平成 11 年度 IMS 研究成果講演論文集, 48/51 (1999).
- (4) T. Fukuda, K. Sekiyama, Y. Hasebe, Y. Hasegawa, S. Shibata, H. Yamamoto, Y. Inada: Distributed control of flexible transfer system (FTS) using learning automata, Proc. 1999 Int. Conf. Robotics and Automat., 96/101 (1999).
- (5) T. Sakao, S. Kondoh, Y. Umeda, T. Tomiyama: The development of a cellular automatic warehouse, Proc. 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. Intel. Robots and Syst. (IROS 96), 324/331 (1996).
- (6) J.E. Luntz, W. Messner, H. Choset: Discrete actuator array vectorfield design for distributed manipulation, Proc. 1999 Int. Conf. Robotics and Automat., 2235/2241 (1999).

- (7) A. Drogoul, J. Ferber: From Tom Thumb to the dockers: some experiments with foraging robots, From Animals to Animats 2, 451/459 (1992).
- (8) T. Fukuda, H. Ishihara, N. Hiraoka: Deadlock resolution in distributed autonomous robotic system with hand-to-hand motion, Proc. 1996 Int. Conf. Robotics and Automat., 2049/2054 (1996).
- (9) 吉村 裕司, 太田 順, 井上 康介, 平野 智一, 倉林 大輔, 新井 民夫: 群ロボットによる多数物体の繰り返し搬送計画, 日本ロボット学会誌, 16, 4, 499/507(1998).
- (10) J-H. Ting, J.M.A. Tanchoko: Comparisons of single and mixed-model AGV systems, 97-WAM/MH-4, 1997 Int. Mechanics Engineering Congress and Exposition, (1997).
- (11) 富士通自律分散型搬送ロボットシステム, カタログ (1998).
- (12) J.Ota, T.Arai, K.Inoue, R.Chiba, T.Hirano: Flexible transport system by cooperation of conveyor-loaded AGVs, Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1144/1150 (2000).

Fig.7 Relationship between the number of robots and average job flow time

Fig.8 Relationship between the number of robots and throughput rate

Fig.9 Relationship between task frequency and required number of robots