

2 台の自律移動ロボットの 相互ハンドリングによる協調搬送

浅間 一^{*1} 佐藤 雅俊^{*2} 後藤 伸之^{*3}
嘉悦 早人^{*1} 松元 明弘^{*4} 遠藤 勲^{*1}

Cooperative Transportation by Mutual Handling of Two Autonomous Mobile Robots

Hajime Asama^{*1}, Masatoshi Sato^{*2}, Nobuyuki Goto^{*3},
Hayato Kaetsu^{*1}, Akihiro Matsumoto^{*4} and Isao Endo^{*1}

A new type of cooperation called mutual handling is introduced in this paper, which enables a multi-robot system to achieve an advanced functionality that cannot be realized by a single robot, and as an application of mutual handling, a method of cooperative transportation for two autonomous mobile robots to climb over a large step by operating each forklifts cooperatively is proposed, which cannot be overcome by a single robot. Then, a forklift mechanism for mutual handling is designed, and two autonomous mobile robots equipped with the forklifts are developed. Finally, a cooperative transportation method in which two autonomous mobile robots are controlled based on communication is presented, and the step-climbing motion by cooperative transportation is proved feasible by showing the experimental results using the developed omni-directional mobile robots.

Key Words: Mutual Handling, Cooperative Transportation, Forklift, Omni-directional Mobile Robot, Communication

1. はじめに

近年、柔軟・頑健・多機能で、耐故障性に優れる自律分散型ロボットシステムやマルチエージェントロボットシステムに関する研究が非常に活発に行われている [1]。これらの研究で最も注目されている問題の一つに、多数の自律ロボットをいかに協調させるかという問題がある。これまで、我々は、ACTRESS と呼ばれる自律分散型ロボットシステムの開発を行い [2]、様々な協調動作を実現してきた [3]~[5]。しかし、より高度な協調動作を実現するには、新しいハードウェアの要素技術開発が不可欠であるとの結論に達した。協調動作を行う自律ロボット群の移動メカニズムとして、すでに自在に移動可能な全方向移動機構の開発を行ったが [6]、我々は本研究も自律ロボット群が協調動作を行うためのメカニズムの研究の一環として位置づけている。本研究では、「相互ハンドリング」という協調形態について述べるとともに、その応用として 2 台の自律移動ロボットを

相互にハンドリングさせ、協調的に搬送する手法を提案する。また、それを実現するために開発したフォークリフト機構について述べ、これを搭載した 2 台の全方向移動ロボットを用いて実現した、協調搬送による段差の乗り越え動作を紹介する。

2. 相互ハンドリングによる協調搬送

2.1 相互ハンドリングの概念

ロボットの機能はそれ自身の仕様によって限定される。したがってロボット単体では、限られた環境条件で限られたタスクしか処理することができない。しかし、マルチロボットシステムであれば、複数台のロボットの協調によってその潜在的な機能を増幅させ、複雑な作業や大きな力を要する作業を遂行したり、環境に存在する障害を克服することによって、環境拘束条件を緩めることが期待できる。特に、「相互ハンドリング」は、大きな障害物や深い溝の乗り越えなど、大きな環境障害を克服するのに極めて有用な協調形態である。ここでは、完全には予測できない状況で多様な作業をロボット群によって自律的に処理することを最終的な目標として、「相互ハンドリング」によって協調的に搬送しながら大きな環境障害にいかに対処するかについて議論する。

マルチロボットの研究では、小型化、マイクロ化によってその応用が広がることが指摘されている [7]。しかし、小型化によるデメリットもある。例えば、ロボットの小型化によって、環境に存在する障害物や作業対象物が相対的に大型化してしまう。

原稿受付 1996 年 10 月 18 日

^{*1}理化学研究所

^{*2}鐘紡株式会社

^{*3}NECCO 株式会社

^{*4}東洋大学

^{*1}The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

^{*2}Kanebo Ltd.

^{*3}NECCO Co., Ltd.

^{*4}Toyo University

移動ロボットの場合、ロボットを小型化するとちょっとした段差(床上のケーブルなど)や溝でも乗り越えられなくなったりする。そこで筆者らは、「相互ハンドリング」という協調形態に注目した。

これまでに協調する群の様々なメリットが指摘されているが[8]、「相互ハンドリング」という協調形態はほとんど議論されていない。「相互ハンドリング」とは、群を構成する個体(システムを構成するサブシステム)どうしが互いにハンドリングしながら、単体では持ちえない機能を発現することである。すなわち、個体Aが個体Bをハンドリングすると同時に、個体Bが個体Aをハンドリングしている状態が2個体間の相互ハンドリングであり、これを多体間に発展させたのが、群における相互ハンドリングである。「相互ハンドリング」は、特にマニピュレーション等の物理的インタラクションを伴う点が特徴的である。

群は、ほぼ同じ構造、機能を有する個体群から構成される均質な系となっているのが特徴である。群における複数の個体(サブシステム)の相互ハンドリングの典型的例として、紡ぎ蟻による巣作り(複数の蟻の相互ハンドリング)[9]、猿橋による谷越え(複数のサル相互ハンドリング)[10]、サーカスの綱渡りや忍者の塀越え(複数の人間の相互ハンドリング)などが挙げられる。いずれの場合でも、蟻が他の蟻をくわえる、猿が他の猿を手で引っ張る、人間が別な人間を持ち上げるといった相互ハンドリングを行うことによって、大きな葉を引き寄せる、間隔の広い谷を渡る、高い障害物を乗り越えるという、単体では発揮できない高次の機能が創出されている点が重要である。

これまで複数の移動ロボットが協調してある対象物を押したり[11]、搬送する[12]研究は多く報告されているが、移動ロボットが他の移動ロボットをハンドリングする研究は非常に少ない。従来の発想では、移動ロボットによって他の移動ロボットをハンドリングしようとする、親子ロボットのように、ハンドリングするロボットはハンドリングされるロボットより大型になり、非均質なシステムになってしまうケースが多い。このようなロボットシステムでは、設計もアドホックで、一般的な拡張性において有効でない。柔軟で汎用的な群ロボットシステムを構築するには、開発を容易にするためにも、均質な系、すなわち各ロボットが同じ構造、機能を有するような系にすることが重要なポイントとなる[13]。

同じロボットどうしを相互ハンドリングさせた例としては、セルと呼ばれる多数の要素移動機構を合体して協調させる研究[14]や、複数のクローラタイプの移動機構をリンク機構で連結して相互ハンドリングさせ障害物の乗り越えを行わせた研究が報告されている[15]。しかし、単独で動作可能な自律型移動ロボットを実際に状況に応じて相互ハンドリングさせて、動作させた例はまだ報告されていない。本研究では、同じ形状、同じ機能を持つ自律移動ロボットどうしをフォークリフト機構を用い通信を行いながら相互ハンドリングさせ、協調的に搬送しながら1台のロボットでは不可能な大きな段差の乗り越えを可能にしたので、この手法について報告する。

2.2 相互ハンドリングによる協調搬送の戦略

ロボット単独では対処できない環境拘束を相互ハンドリングによって克服する例として、まずここでは、2台の移動ロボットの相互ハンドリングで協調的に搬送することによって比較的大きな障害物や段差を乗り越える戦略について述べる。

まず、移動ロボットで同じ構造の他の移動ロボットを持ち上げて移動する状況を考える。リンク機構を有するマニピュレータによって自分と同じ重量の対象物を持ち上げるのは、可搬重量の面からかなり難しい。移動ロボットを障害物の上や段上に持ち上げたり搬送するという目的には、器用で複雑なマニピュレーション機能は不要である。本研究において、すでに開発した自立化したホロノミック全方向移動ロボット[16]を移動プラットフォームとして用いることを仮定すると、平面上を移動する3自由度は確保できるので、上下の動作を行う1自由度さえ備わっていれば、協調搬送は可能と考えられる。むしろ、同じ重量のロボットどうしを搬送するには、できるだけ軽量化すべきであるので、最も単純な機構であることが望ましい。そこで、単純な1自由度の動作機構で、大きい可搬力を発生できるフォークリフト機構を採用することとし、3自由度の動作が可能な全方向移動ロボットに上下方向の移動を可能とするフォークリフト機構を搭載して、相互ハンドリングを行わせることとした。

また、あるロボットが単独で別のロボットをフォークリフトによって持ち上げる状況を見ると、自分と同じ重量の対象物を持ち上げるだけの非常に大きな持ち上げ力が必要となる。また、転倒しない安定条件が厳しくなる。そこでここでは、Fig. 1に示すように、2台のロボットのフォークリフトを協調させることによって持ち上げ動作を行うこととした。すなわち、ロボットAを持ち上げる際、ロボットBがロボットAを持ち上げると同時に、ロボットAも自分のフォークを床面に押し付けて自分自身を持ち上げる動作を行わせる。これによって、ロボットAを持ち上げるのに必要な力を、ロボットBのフォークとロボットAのフォークの合力によって発生させればよくなるので、分散化が可能になり、各フォークに要求される力を小さくできる。また、ロボットAのフォークで床面に対して支持する

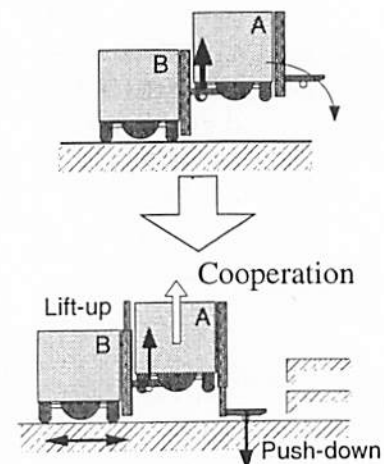


Fig. 1 Strategy of mutual handling

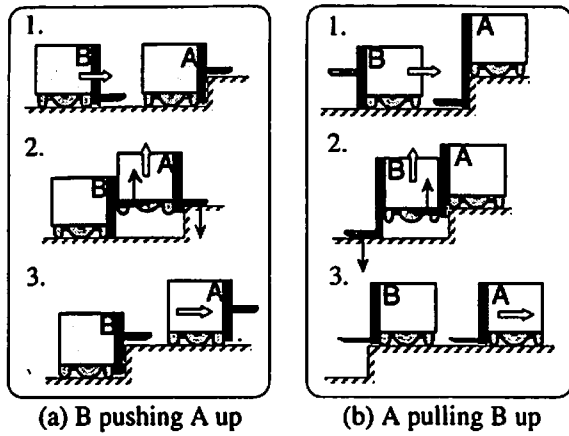


Fig. 2 Step-climbing procedure

ことになるので、より安定な協調搬送が可能になる。ロボットAのフォークを可動範囲内のいずれの位置に移動することも可能であるので、様々な高さの床面（段差）に対処することができる。さらに、持ち上げた状態で移動する場合、ロボットBのみを制御するだけで2台一緒に移動することが可能なので、搬送の制御も容易になる。

2.3 協調搬送手法の提案

相互ハンドリングによって協調搬送を行い、大きな段差を乗り越える手法について述べる。まず、ロボットBがロボットAを段上に持ち上げる手順をFig. 2(a)に示す。

- (1) ロボットBがロボットAに接近し、フォークをロボットAの下面に差し込む。
- (2) ロボットAおよびロボットBのフォークを協調して動作させることにより、ロボットAを段上の高さまで持ち上げる。この際、ロボットBはフォークでロボットAを持ち上げると同時に、ロボットAはフォークを段上の床面に押し付け自分自身を持ち上げる。
- (3) ロボットBが前進し、ロボットAを段上まで搬送する。さらに、ロボットAおよびロボットBのフォークを協調して動作させることにより、ロボットAを段上を下ろす。この際、ロボットBはフォークでロボットAを下ろすと同時に、ロボットAはフォークを上げて自分自身を下ろす。

ロボットAが段上に到達した後に、ロボットA、Bはともに180[deg]旋回し、後向きになる。次に、ロボットAがロボットBを段上に引き上げるプロセスをFig. 2(b)に示す。

- (1) ロボットAがフォークを段下まで下ろし、ロボットBはロボットAのフォークの位置まで接近する。
- (2) ロボットAおよびロボットBのフォークを協調して動作させることにより、ロボットBを段上の高さまで引き上げる。この際、ロボットAはフォークでロボットBを引き上げると同時に、ロボットBはフォークを床面に押し付け自分自身を持ち上げる。
- (3) ロボットAが後退し、ロボットBを段上まで搬送する。さらに、ロボットAおよびロボットBのフォークを協調して動作させることにより、ロボットBを段上を下ろす。この際、ロボットAはフォークでロボットBを下ろすと同時

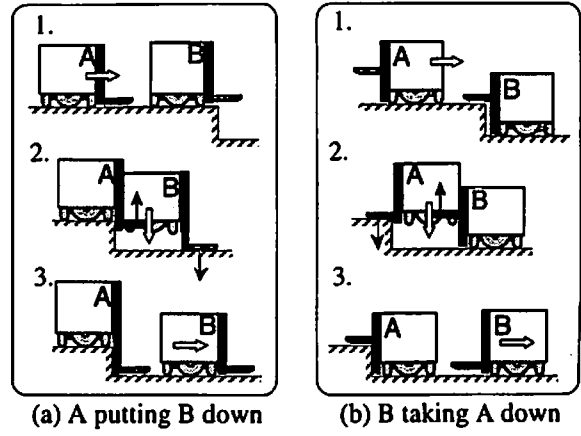


Fig. 3 Step-descending procedure

時に、ロボットBはフォークを上げて自分自身を下ろす。

以上の手順によって、1台では乗り越えられない比較的大きな段差も、2台ともに昇ることが可能となる。また、Fig. 3に示すように、これと逆の手順をたどることによって、段差を降りることも可能である。以上から、1台では対処できなかった段差という環境の拘束を、相互ハンドリングによって協調的に搬送しながら、2台ともに乗り越え、克服できることが示された。

3. 協調搬送のためのロボットシステム開発

3.1 相互ハンドリング用フォークリフト機構の開発

まず、2台の移動ロボットで協調搬送する際の、相互ハンドリング用フォークリフトの機構の設計を行う。1台のロボットを上昇させるのに、2台のフォークリフトを協調させることによって、理論的にはそのペイロードを1/2に低減できるわけだが、実際にその動作を行わせるためのフォークリフトを設計すると、動力学的な条件、摩擦等による損失、安全係数などの余裕などを考慮しなければならず、フォークリフトはかなり大きな力が発生できなければならないことになる。さらに、協調搬送手法を実現するには、下記の要求仕様が求められる：

- (1) フォークが対象物を単に持ち上げる方向だけでなく、床に押し付ける方向にも力を発生できなければならない。
- (2) 協調搬送によって段差を乗り越えるには、床から段差分下の位置から床から段差分上の位置まで、フォークを移動できなければならない。
- (3) 相互ハンドリングの際にロボットが転倒してはならない。
- (4) 搬送中は、搬送されるロボットのフォークを床に押し付けたまま移動しなければならないので、フォーク下面の摩擦は十分小さくなければならない。

(3)の安定な条件についてさらに検討を加える。Fig. 4に示すような、ロボットBはフォークでロボットAを持ち上げ、同時にロボットAは自分のフォークを床面に押し付けて、相互ハンドリングによってロボットAを持ち上げる状況を想定する。ロボットAに関する力およびモーメントの釣り合いから、床からの反力 P_0 およびロボットBのフォークから受ける

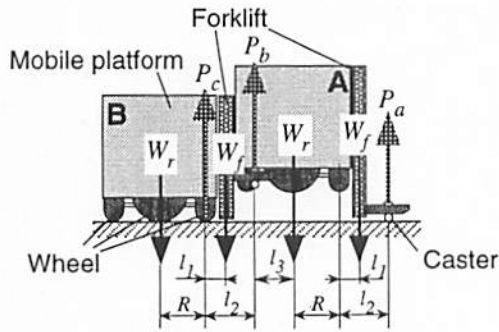


Fig. 4 Cooperative lifting mechanism

力 P_b は、それぞれ以下のように求められる。

$$P_a = \frac{W_r l_3 + W_f (R + l_1 + l_3)}{R + l_2 + l_3}$$

$$P_b = \frac{W_r (R + l_2) + W_f (l_2 - l_1)}{R + l_2 + l_3}$$

ここで、 W_r および W_f は、それぞれロボットおよびフォークリフトの重量を、また R はロボットのトレッド（車輪間距離）の1/2（すなわち旋回半径）を、 $l_i (i = 1, 2, 3)$ は Fig. 4 中の各寸法や距離を表している。

また、この図に示す通り、ロボット B が転倒しない限界の状態では、ロボット B の最もロボット A 寄りの車輪のみに床からの反力 P_c がかかる。この状態でのロボット B の釣り合い式より、 P_c は以下のように求められる。

$$P_c = \frac{W_r (2R + 2l_2 + l_3) + W_f (R + 2l_2 + l_3 - l_1)}{R + l_2 + l_3}$$

ロボット B の P_c 回りのモーメントの関係から、ロボット B が転倒しない条件は以下のように求められる。

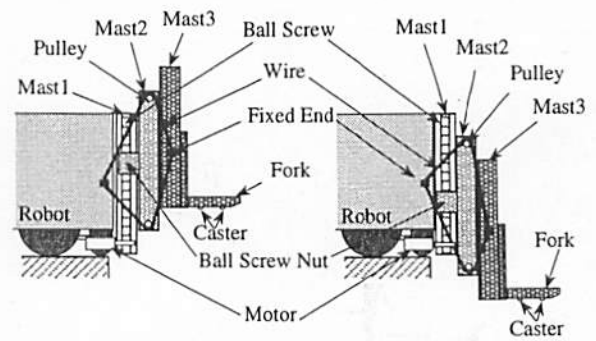
$$\frac{W_f}{W_r} < \frac{R^2 + Rl_3 - l_2^2}{Rl_1 + l_1 l_3 + l_2^2} \quad (1)$$

以上述べた要求仕様に基づき開発したフォークリフト機構を Fig. 5 に示す。

本機構の基本的メカニズムについて説明する。ロボット本体に固定されたマスト 1 には、ボールねじが組み込まれており、そのナットにマスト 2 が固定されている。マスト 2 には、プーリが取り付けられており、ワイヤがこのプーリを介してロボット本体とマスト 3 に固定されている。ボールねじのナットを上下に移動させると、これに固定されたマスト 2 が上下する。マスト 2 上のプーリは動滑車の役割を果たしており、プーリの上下に伴い、ワイヤに張力が発生し、マスト 3 が上下に駆動される仕掛けである。プーリはマスト 2 の上下 2 箇所に配置され、ワイヤも上下 2 方向にかけられている。フォークの下面にはキャスタを取り付けた。

本機構によって、以下に述べるように要求仕様が達成できた。

- (1) 上下 2 本のワイヤにより、フォークの上下両方向に力を発生することが可能となった（フォーク持ち上げ時には、上側のワイヤが持ち上げ力を発生し、フォーク押し付け時には、下側のワイヤが押し付け力を発生する）。
- (2) 3 本のマストと動滑車機構によって、上下両方向に大きな



(a) Lift up

(b) Lift down

Fig. 5 Structure of the forklift mechanism

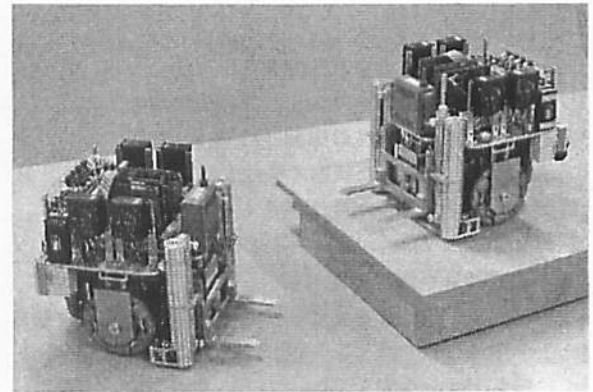


Fig. 6 Overview of two mobile robots

可動域を実現した。

- (3) コンパクトな機構にすることによって、式 (1) を満足させ、転倒しない安定性を確保した。ただし、ここでは安全率を 2 として設計したが、動的な条件は考慮しておらず、低速度/低加速度で操作することとした。
- (4) フォークの下面にキャスタを取り付けたことにより、床面接地時摩擦を十分小さくした。

なお、このフォークリフトには 90 [W] の DC サーボモータを用い、十分な力を発生するために減速比の大きい動力伝達機構を採用した。実際に製作したフォークリフトの仕様は、重量約 8 [kg]、可搬重量約 50 [kg]、可動領域は床面から上下に約 140 [mm] となっている。

3.2 自律型移動ロボットのシステム構成

前述のフォークリフト機構を、すでに開発したホロノミックな自律型全方向移動ロボット [16] に搭載し、このロボット 2 台を用いて相互ハンドリングによる協調搬送動作を実現した。フォークリフト機構を搭載した 2 台の自律型全方向移動ロボットを Fig. 6 に示す。このロボットの寸法は、幅約 430 [mm]、奥行き約 430 [mm]、高さ約 550 [mm] であり、重量は約 37 [kg] である。

このロボットの制御系の構成を Fig. 7 に示す。このロボットは、各自由度（X 方向の並進、Y 方向の並進、Z 軸回りの旋回）の動作を三つのアクチュエータによって独立に制御することが可能である。したがって、各アクチュエータに直結したタコジェ

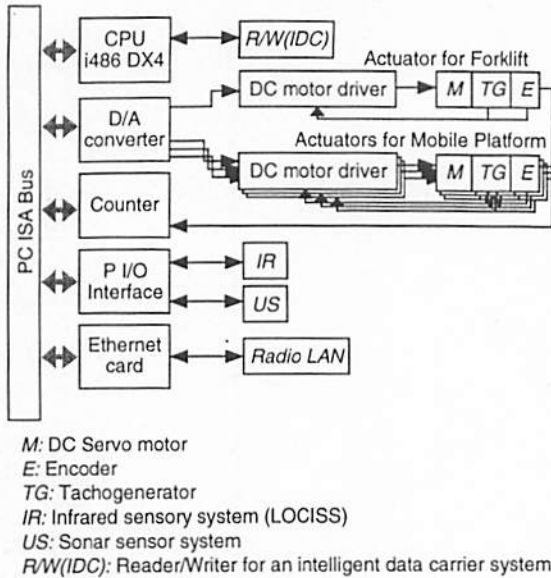


Fig. 7 Control system diagram

ネおよびエンコーダによって、各自由度方向の運動の速度および位置を検出することが可能である。本研究では、これらのセンサの値に基づいたデッドレコニングによって移動ロボットの位置制御を行っている。フォークの位置についても同様に、アクチュエータに直結したセンサに基づき位置制御を行っている。また、各ロボットには、無線のイーサネットが搭載されており、これを用いたロボット間で通信によって、必要なメッセージ交換をさせたり、同期動作を行わせることとした。なお、OSはリアルタイムマルチタスクの VxWorks を用いている。

4. 相互ハンドリングによる協調搬送の実現

4.1 協調搬送における通信と制御

以上述べたフォークリフトを搭載した自律型全方向移動ロボット2台を相互ハンドリングさせ、協調搬送による段差乗り越え動作を実現した。あらかじめ地図等の環境に関する情報、段差の位置、高さなどは各ロボットに与えておき、ネットワークに接続されたヒューマンインタフェース用計算機からのコマンドによって2台のロボットが動作を開始するようにした。

Fig. 8 は、2台の全方向移動ロボットの協調搬送により段差を登る手順を示している。図中 → はロボット間での通信、□で囲まれた部分はフォークリフトによる協調搬送の同期動作を表している。本手順では、ロボット A がコーディネータとしての役割を担っている。送信したメッセージに対しては、必ず返答を行い、通信が確実に行われたことを確認しながら次のステップに進む。エラーが発生した際には、通信によって各ロボットがこれを確認し、停止する。各移動動作における制御は、前述のようにデッドレコニングに基づく位置制御で行っている。なお、Fig. 2 の (a)(b) は、Fig. 8 の (a)(b) のプロセスに対応している。

4.2 相互ハンドリングによる協調搬送制御実験

以上の手法を具体的に全方向移動ロボット上に構築し、協調搬送実験を行った。実験で用いた段差は、120 [mm] である。全

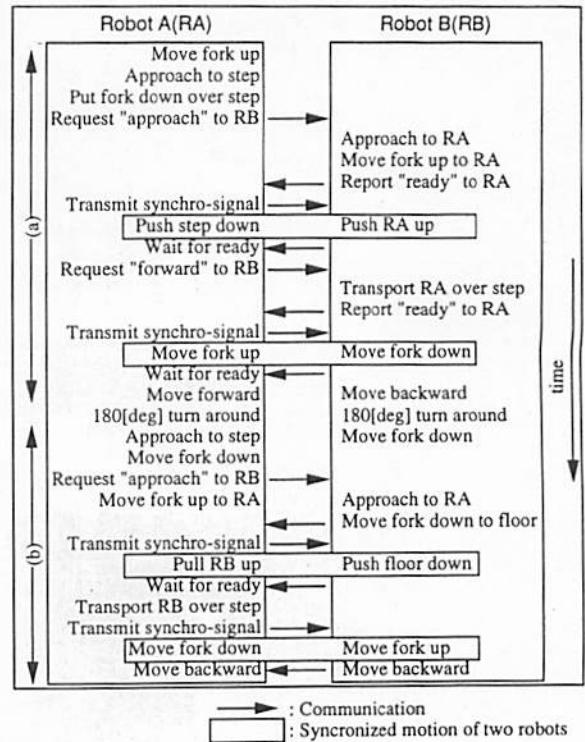


Fig. 8 Control process for cooperative transportation motion

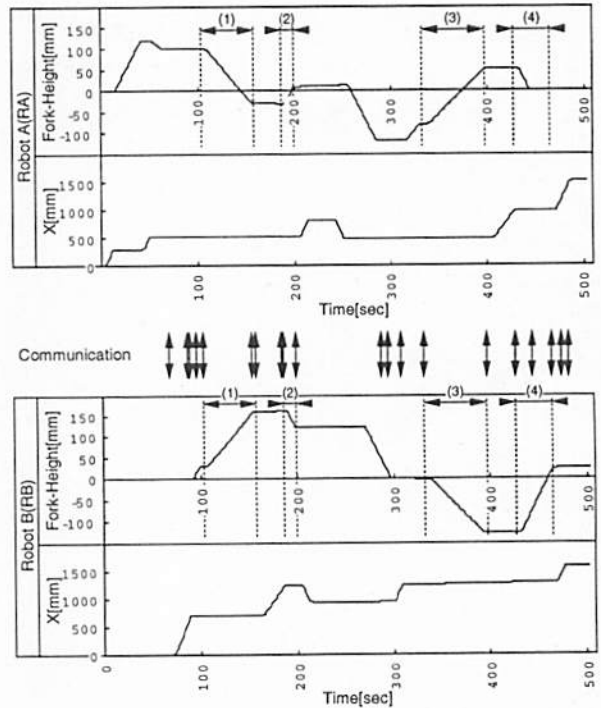


Fig. 9 Experimental result in cooperative transportation motion

方向移動ロボットの車輪の直径は 200 [mm] であり、理論的にもロボット単独ではこの段差を乗り越えることは不可能である。Fig. 8 に従って制御プログラムを作成し、動作実験を行った結果、高い成功率で協調搬送が実現できた。Fig. 9 は、成功した

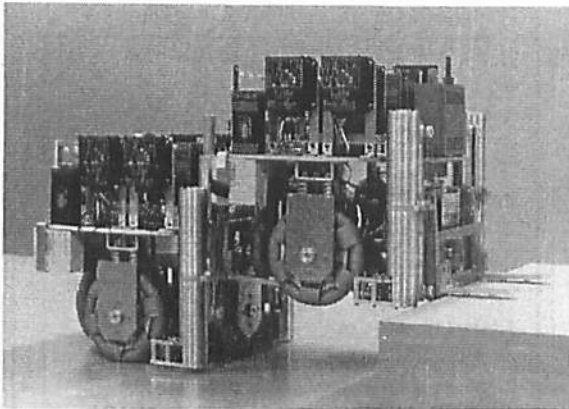


Fig. 10 Experiment of pushing-up motion

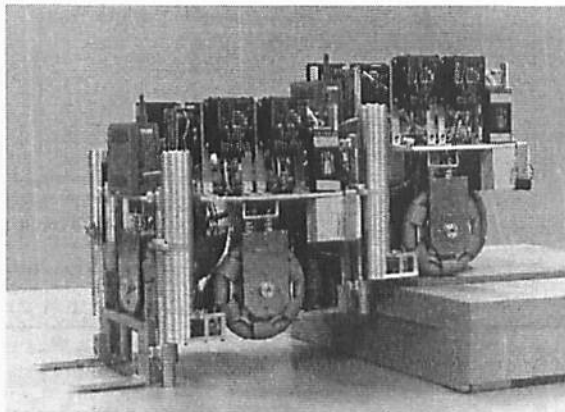


Fig. 11 Experiment of pulling-up motion

例の実験結果を、移動ロボットの X 軸方向（段差を乗り越える進行方向）の位置（各ロボットの初期位置を 0 とする）と、フォークの高さ（床面の高さを 0 とする）をプロットしてグラフ化したものである。上側が前方を走行するロボット A の動作実験結果、下側が後方を走行するロボット B の動作実験結果であり、横軸の時間スケールは共通となっている。図の中央に示した上下の矢印は、このタイミングでロボット A とロボット B の間で通信が行われていたことを示している。また、(1)~(4) は、フォークリフトによる協調搬送の同期動作の部分である。この実験結果から、通信を用いて同期を取りながら、2 台の自律移動ロボットが相互にハンドリングしながら協調して段差を乗り越えている状況が読み取れる。Fig. 10 および Fig. 11 にその様子を示す。

失敗したケースでは、同期の合図の通信後、同期動作の速度制御が各ロボットに任されているために、同期動作に入る直前の 2 台のロボットの初期位置関係のずれがフォークへの負荷のばらつきに影響を及ぼし、その結果フォークの上げ下ろし動作がスムーズにいかなくなる状況が確認された。制御系のドリフトなども、位置のずれの原因として挙げられる。これらの対処方法としては、フォークの機構の改良、ロボットのコンパスや超音波センサ、視覚などを併用したナビゲーションの制御などが考えられ、これによってかなりの部分の問題点を解決するこ

とが可能であろうと考えられる。

5. おわりに

群ロボットが相互にハンドリングすることによって、単独では不可能であった機能を発現することができる「相互ハンドリング」という協調形態について述べ、その例として、移動ロボット単独では乗り越えられない大きな段差を、2 台の自律移動ロボットがそれぞれのフォークリフトを相互に動作させ、協調搬送によって乗り越える手法を提案した。また、相互ハンドリングのためのフォークリフト機構を設計し、これを装備した 2 台の自律型全方向移動ロボットシステムを開発するとともに、これを用いて通信を行いながら協調搬送を行う制御手法について述べ、開発した 2 台の自律移動ロボットを用いた実験によって、相互にハンドリングし、協調的に搬送させることによって段差の乗り越えが可能であることを示した。

今後は、3 台以上の自律移動ロボットの相互ハンドリング、より複雑な環境拘束に対する対処方法などについて検討を行う予定である。

なお本研究は、原子力基盤技術総合的研究（クロスオーバー研究）の原子力用人工知能のテーマとして理化学研究所で実施している「自律型プラントのための分散協調知能化システムの開発（小型ロボット群による協調的保全技術の開発）」の成果の一部をまとめたものである。

6. 謝 辞

本ロボットの機構設計および制御に関して貴重な御意見を賜った宇都宮大学工学部尾崎功一氏および理化学研究所藤井輝夫氏、フォークリフトの試作機製作・改造において御協力いただいた日化機工業株式会社岡崎重夫氏、さらに動作実験を手伝っていただいた埼玉大学大学院鈴木剛氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- [1] H. Asama, T. Fukuda, T. Arai and I. Endo eds., Distributed Autonomous Robotic Systems, Springer-Verlag, Tokyo, 1994.
- [2] 石田慶樹, 浅間一, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲: “自律分散型ロボットシステムのための通信機能の設計と通信シミュレータの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.4, pp.544-551, 1992.
- [3] 浅間一, 尾崎功一, 松元明弘, 石田慶樹, 遠藤勲: “通信を用いた分散的管理に基づく複数の自律型ロボットの協調的作業分担決定手法”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.7, pp.955-963, 1992.
- [4] 尾崎功一, 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲, 横田和隆, 松元明弘: “自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第 15 報) 通信を用いた複数移動ロボットによるに荷片付け作業の実現”, 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.643-644, 1995.
- [5] 尾崎功一, 浅間一, 石田慶樹, 松元明弘, 遠藤勲: “通信を用いた複数自律移動ロボットの相互衝突回避”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.961-967, 1996.
- [6] 浅間一, 佐藤雅俊, 嘉悦早人, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲: “3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.2, pp.249-254, 1996.
- [7] T. Fukuda and T. Ueyama: Cellular Robotics and Micro Robotic Systems, World Scientific, Singapore, 1994.
- [8] 長谷川勉, 坂根茂幸, 佐藤知正: “知能行動のための情報処理”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.1, pp.112-121, 1991.
- [9] B. Hölldobler and E.O. Wilson: “Journey to the Ants,” The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, London, 1994.

- [10] Hugh Lofting: "The Story of Dr. Dolittle," Curtis Brown Ltd., London, 1920.
- [11] e. g. L.E. Parker: "ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant, Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Robots," in Proc. IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.776-783, 1994.
- [12] e. g. M. Hashimoto and F. Oba: "Dynamic Control Approach for Motion Coordination of Multiple Wheeled Mobile Robots Transporting a Single Object," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, p.1944, 1993.
- [13] 伊藤正美: "自律分散システムはいかにして構成されるか", 計測と制御, vol.29, no.10, pp.877-881, 1990.
- [14] 福田敏男, 川内陽志生, マーチン・ブス, 浅間一: "動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第3報, セル構造化ロボット"CEBOT"の認識, 通信システム", 日本機械学会論文集(C編), vol.56, no.523, pp.709-716, 1990.
- [15] S. Hirose, T. Shirasu and F.E. Fukushima: "A Proposal for Cooperative Robot "Gunyu" Composed of Autonomous Segments," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems, pp.1532-1538, 1994.
- [16] 佐藤雅俊, 浅間一, 松元明弘, 嘉悦早人, 尾崎功一, 遠藤勲: "3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの自立化", 1995年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp.485-486, 1995.



浅間一 (Hajime Asama)

1959年1月18日生。1984年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補。生化学システム研究室研究員を経て、現在研究基盤技術部先任研究員。自律分散型ロボットシステム、複数移動ロボットの協調、群知能、ロボットの評価、バイオプロセスの知能化技術の開発に従事。Distributed Autonomous Robotic Systems (Springer-Verlag, Tokyo) 第1巻および第2巻の編者。工学博士。IEEE, ニューヨーク科学アカデミー, 日本機械学会, 精密工学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



後藤伸之 (Nobuyuki Goto)

1972年7月3日生。1995年東洋大学工学部機械工学科卒業。現在, NECCO 株式会社に勤務。移動ロボットの協調機構の設計・開発に関する研究に従事。



松元明弘 (Akihiro Matsumoto)

1958年6月8日生。1983年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1983年東京大学工学部助手, 1988年東洋大学工学部講師, 1990年同大助教授, 現在に至る。工学博士。1994-1995年ルイバスツール・ストラスブール第1大学(フランス)訪問研究員。ロボット言語, 自律分散型ロボットシステムの研究に従事。精密工学会, 日本機械学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



佐藤雅俊 (Masatoshi Sato)

1970年5月4日生。1996年東洋大学大学院博士前期課程修了。現在, 鐘紡株式会社に勤務。1995年日本機械学会ロボメック賞受賞。自律分散型ロボットシステムの研究, 特に移動ロボットの設計・開発, 移動ロボットとその協調に関する研究に従事。



嘉悦早人 (Hayato Kaetsu)

1948年10月30日生。1971年東京理科大学中退。1971年理化学研究所同位元素研究室勤務, 1981年同化学工学研究室へ移籍。同位体分離の研究, 分散型ロボットシステムに従事, 前任技師として現在に至る。日本原子力学会, 日本機械学会, 精密工学会の会員。



遠藤勲 (Isao Endo)

1940年8月14日生。1970年東京大学工学研究科博士課程修了。理化学研究所化学工学研究室勤務, 現在, 同主任研究員。1989年より埼玉大学理工学研究科客員教授兼任。生物工学, 特にバイオプロセスエンジニアリングの研究に従事, 1978年化学工学協会論文賞受賞, 1994年ヘルシンキ工科大学名誉工学博士, ニューヨーク科学アカデミー, アメリカ化学工学会, アメリカ化学会, 化学工学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)