

## 分散型ロボットヘルパー -DR Helpers- の制御

### Motion Control of Distributed Robot Helpers -DR Helpers-

平田 泰久\*, ○高木 健雄\*, 小菅 一弘\*, 浅間 一\*\*, 嘉悦 早人\*\*, 川端 邦明\*\*

Yasuhisa Hirata\*, ○Takeo Takagi\*, Kazuhiro Kosuge\*,  
Hajime Asama\*\*, Hayato Kaetsu\*\*, Kuniaki Kawabata\*\*

\*東北大学大学院, \*\*理化学研究所

\*Tohoku University, \*\*The Institute of Physical and Chemical Research,

キーワード : 移動ロボット (Mobile Robot), 分散制御 (Disentralized Motion Control),  
協調作業 (Coordinated Motion Control), キャスター運動 (Caster-like Motion), 地図 (Map)

連絡先 : 〒980-8597 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学 大学院工学研究科 機械知能工学専攻  
平田 泰久, Tel.: (022)217-4035, Fax.: (022)217-4035, E-mail: hirata@irs.mech.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

従来ロボットは、主として工場内で用いられ、溶接、塗装、組み立て等を行う劣悪な労働環境下での単純な繰り返し作業を代行するものとして、大いに発展してきた。しかし近年、ロボット技術の発展により、工場をはじめ、医療・福祉現場や家庭、オフィスといった、新しい分野におけるロボットの応用が期待されている。これに伴い、人間とロボットが同じ作業空間に共存・共生し、人間とロボットが協調して作業を行うといった機会が増えるものと思われる。

人間とロボットの協調に関する研究は、様々行われている。Kazerooniら<sup>1)</sup>は、人の力を増幅させるためのExtenderを提案した。小菅ら<sup>2)</sup>は、単一物体の操りに関して双腕マニピュレータシステムを提案している。これらはすべて、人間とロボットとが協調して作業を行うことを前提として設計されているが、移動機構を有していないため、そ

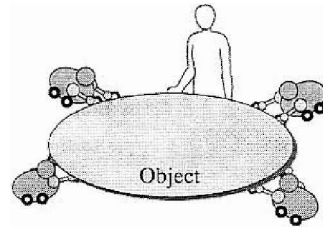


Fig. 1 Handling an Object with Robot Helpers

の作業範囲は限定される。

移動機構を有したロボットと人間との協調に関する研究も様々行われている。小菅ら<sup>3)</sup>は、協調搬送に関して、双腕マニピュレータを有する移動ロボット, MR Helperを開発した。Peshkin, Colgateら<sup>4)</sup>は、車の組み立てラインで人間と協調して作業を行う, Cobotと呼ばれるロボットを開発した。また, Khatibら<sup>5)</sup>は、人間と協調する複数の移動マニピュレータシステムを提案している。しかしこれらのロボットは、重量物の搬送には適してい

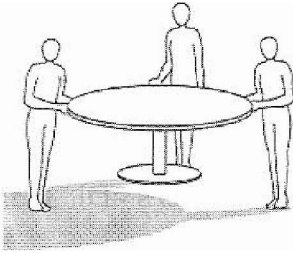


Fig. 2 Handling an Object with Helpers

ない。

そこで本研究では、分散制御された複数の移動ロボットを用いて、人間と協調して作業を行う、Distributed Robot Helpersと呼ばれる移動ロボットシステムを提案する。そして、人間とロボットとの協調作業の一例として、Fig.1に示すような単一物体の操り問題を取り上げ、これを実現する分散協調制御アルゴリズムを提案する。

本稿では、以下著者らが人間協調型ロボットとして開発したDR Helperの試作機を紹介する。そして複数DR Helperと人間とが協調して単一物体を搬送するための分散制御系を提案する。その制御アルゴリズムを2台のDR Helperに適用し、単一物体を搬送する実験を行い、その有効性を示す。

## 2. Distributed Robot Helpers

人間は、1人で持つことのできない大きな物体や重い物体を搬送する場合、Fig.2に示すように複数の人間が協調して搬送する。もしロボットが人間の代わりにすることができるのなら、我々は多くの人の助けを借りずに、大きな物体や重い物体を搬送することができる。そこで本研究では、Fig.1のように、人間の代わりに作業をしてくれるロボットをロボットヘルパーと呼ぶ。

ある環境において、ロボットヘルパーと人間が協調して作業を行う場合、作業空間の拡大という点で、ロボットヘルパーに移動機構を持たせるこ

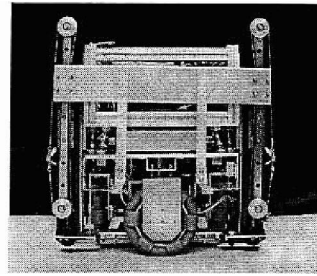


Fig. 3 Robot Helper DRH-1

とが有効である。また、大型物体や重量物のハンドリングを考えた場合、ロボットヘルパーを大きく、パワーのある1台のボットによって実現するのではなく、複数の比較的小型の移動ロボットを協調させて用いる方が、安全性の点で有利である。それは、ロボットが同じ速度で動いている場合に、そのロボットが持っている運動エネルギーは小型ロボットの方が小さく、たとえ人間に衝突したとしても、その人間に対する危険性をより小さくすることができるからである。

そこで本研究では、分散制御された複数の比較的小型の移動ロボットにより、人間の作業を助けるシステム、Distributed Robot Helpersを提案する。そして、人間と移動ロボットの協調作業として、Fig.1に示すような単一物体の協調搬送問題を取り上げ、この作業を実現する小型の移動ロボットDR Helpersを開発した。

Fig.3にDR Helperの試作機を示す。これは、浅間ら<sup>6)</sup>によって開発された全方向移動ロボットZenをベースに構成され、ボディーフォースセンサ<sup>7)</sup>と呼ばれる力覚センサ、フォークリフトを搭載している。DR Helperはそれぞれ、Fig.4に示されるようなPC/AT互換機とバッテリーを搭載し、自律的に動作することができる。また、無線LANを搭載することによって、ホストコンピュータの指令に基づいて動作することも可能である。このシステムは、物体を搬送するための設計となっている

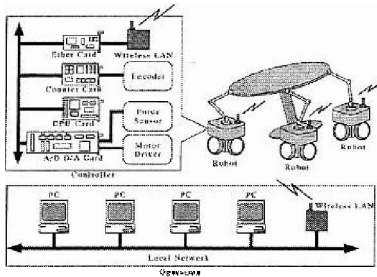


Fig. 4 System Structure

が、マニピュレータ等を搭載することにより、より多くの作業を実現することができる。

### 3. 分散制御系

本章では、どのようにDr. Helperが人間と協調して単一物体の搬送を実現するかについて考える。人間は、ロボットと操る物体を介してのみ相互作用することとし、人間とロボットの相互作用の安定な実現を保証するために、人間の力に基づいてロボットの運動を決定する、受動性を有した制御系を設計する<sup>8)</sup>。

#### 3.1 'キャスト運動

Dr. Helperのような移動機構を有したロボットでは、デッドレコニングを用いた位置推定がよく行われる。しかし、デッドレコニングを用いるとスリップなどにより位置誤差が発生し、複数の移動ロボットにより協調制御を行うような場合には、各ロボット間の座標系がずれてしまう恐れがあり、協調作業をうまく実現できない場合がある。したがって、複数の移動ロボットによる協調作業を実現するためには、その避けられない位置誤差に対して協調制御系がロバスタになるように設計しなければならない。

そこで本稿では、各ロボットをFig.5に示されるような、キャストの運動特性を持つように制御す

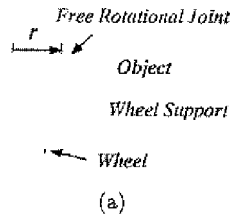


Fig. 5 Real Caster

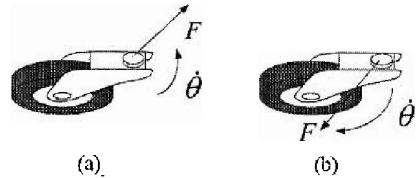
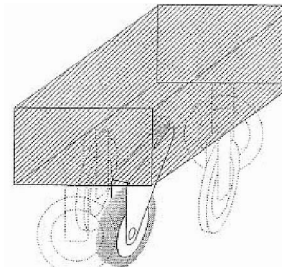


Fig. 6 Caster Action

ることを考える。キャストは、一般に椅子や家具などに取り付けられ、それらに力が加えられると、キャストは力の方向に回転し、自由に椅子や家具などを動かすことができる。このとき、各キャストは他のキャストの位置の情報を必要としない。今、各ロボットが搬送物体の重量をサポートし、さらに実際のキャストのように動作することができれば、その物体の運動は、複数のキャストに支えられているのと同様であると考えられる。これにより人間は、搬送物体に力/モーメントを働かせることで、ロボットと協調して物体を搬送することができる。この場合、各ロボットはキャストの特性により他のロボットの位置や姿勢の情報を必要としないため、ロボット間の位置誤差に対してロバスタな制御系が設計できる。

## 3.2 各ロボットの制御系

### 3.2.1 キャスタアクション

各ロボットを、Fig.5に示すようなキャスタの特性を持つように制御する方法は、Bayら<sup>9)</sup>によって提案された。Bayらは、非ホロノミックな移動ロボットにキャスタの特性を持たせることにより、複数の移動のロボットによる単一物体の搬送を実現した。著者らは、ロボットにキャスタの特性を持たせる手法を、キャスタアクションと呼び、この手法を人間協調型全方向移動ロボットであるDr Helperに適用し、人間と複数のDr Helperとの協調による単一物体の搬送を実現する。

Dr Helperの全方向移動を実現する各車輪は、速度サーボアンプによって駆動され、指定された角速度に基づいて回転するものとする。そして、Dr Helperが搭載するボディーフォースセンサより得られる力/モーメントの情報に基づき、あたかもDr HelperがFig.5(b)に示されるようなキャスタを持っているかのような運動を実現する。すなわち、人間が搬送物体を介して、Dr Helperに加える力/モーメントに基づき、Dr Helperは、Fig.6に示すようなキャスタの運動を実現する。

### 3.2.2 デュアルキャスタアクション

Fig.6(a)に示されるような方向に力が加わる場合、ロボットに実現されたキャスタは最小の動きで回転し、キャスタの車輪の進行方向は、加えられた力の方向に一致する。しかし、Fig.6(b)に示されるような方向に力が加えられる場合、各ロボットに実現されたキャスタは、90度以上回転する。もしその回転運動が90度以上で、キャスタのオフセットが大きい場合、実際のキャスタで知られているように、システムの操作性が悪化する。

このような問題を解決するために、著者らはデュアルキャスタアクションと呼ばれる手法を提案する<sup>10)</sup>。これは、Fig.7に示すように、キャスタのフ

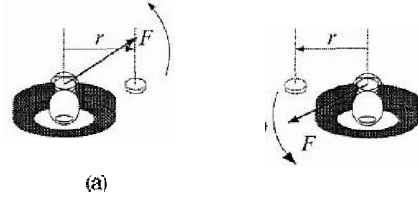


Fig. 7 Dual Caster Action

リージョイントと車輪の位置を一致させ、仮想的に実現されたフリージョイントの位置を力の向きによって変化させるものである。

デュアルキャスタアクションを用いることにより、各ロボットに実現されたキャスタは、不必要な大きな回転運動を行うことなく、その進行方向を力の向きに一致させることができる。

### 3.2.3 適応デュアルキャスタアクション

キャスタのオフセットの長さの変化は、ロボットのみかけの運動特性に大きく影響する。例えば、キャスタのオフセットを大きくすれば、Fig.5に示されるキャスタの車輪サポート部の回転速度は小さくなり、進行方向以外に働く外乱の影響を小さくすることができ、直進運動の安定性が増す。

一方、キャスタのオフセットを小さくすれば、車輪サポート部の回転速度は大きくなり、加えられた力の方向にキャスタの車輪を、瞬間的に回転させることができる。この場合、ロボットは全方向移動が可能となる。

キャスタの特性を持つロボットに把持された物体の運動は、各ロボットの運動特性に依存する。したがって、実際の作業に応じて各ロボットのキャスタのオフセットを変化させることにより、人間の負担を軽減するような搬送物体の運動特性を実現することができる。

このように、作業に応じてキャスタのオフセットを変化させる手法を、適応デュアルキャスタア

クシオンと呼ぶ。

## 4. 地図情報を利用した協調搬送

前章までの議論では、各ロボットは環境情報を持たず、人間が搬送物体に加える力/モーメントに基づいてのみ、その運動を生成する手法を提案した。しかし、オフィスや病院などといった環境で、ロボットを用いることを考えた場合、あらかじめ廊下の長さや部屋の入口の場所など、ある程度の環境情報は得ることができる。したがって、そのような場所において物体の搬送を実現する場合、人間によって加えられる力/モーメントのみによって物体を操作するのではなく、ロボットに環境情報を持たせ、それを利用することによって人間の負担を軽減した搬送作業ができると思われる。

そこで本研究では、既知の環境をあらかじめ地図情報としてロボットに与え、それに基づいた経路を生成し、その経路を持つ複数のDr Helperと人間が協調し、人間が容易に物体を搬送するための制御アルゴリズムを提案する。

### 4.1 制御系の設計

本節では、2台のDr Helperが経路に基づいて、人間と協調して単一物体の搬送を実現するために、Fig.8に示すようなシステムを考える。これは、物体に取り付けられた2つのフリージョイントを有した車輪が、環境情報より生成された経路上を通ることにより、その経路に従って人間がより容易に目的地まで物体の搬送を実現するシステムである。

このシステムを実現するために、本研究では、各ロボットをFig.9に示されるようなフリージョイントを有した車輪の特性を持つように制御し、それによって実現された車輪を常に環境情報より生成された経路に沿わせることを考える。

3章では、Fig.5に示されるように、各ロボットをキャストの特性を持つように制御し、人間が加え

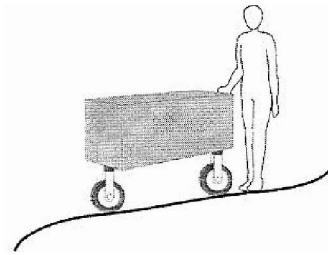


Fig. 8 Transportation along Path

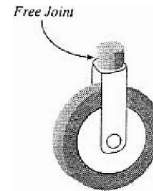


Fig. 9 Wheel with Freejoint

る力に基づいてキャストの車輪の進行方向の速度および車輪の回転速度を決定した。本章ではこの手法を拡張し、Fig.9に示すようなフリージョイントを有した車輪の特性を各ロボットに実現させる。すなわち、キャストのオフセットを車輪の軸と一致させ、車輪の進行方向に関しては人間の加える力によってその運動を生成し、車輪の向きに関しては、環境情報から生成された経路の接線方向に向くように制御する。

### 4.2 経路生成

本節では、ロボットに環境情報に基づく経路を与えるために、環境を表した地図情報からロボットの運動のための経路生成手法について考える。本研究では、Güntherら<sup>11)</sup>によって提案された手法を利用する。この手法は、地図を格子状に分け、スタートからゴールまで、障害物に衝突しない経路を拡散方程式を用いることによって生成するものである。これによって生成された経路を、Fig.10

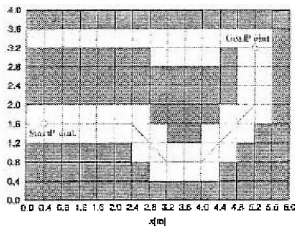


Fig. 10 Generated Map using Diffusion Equation

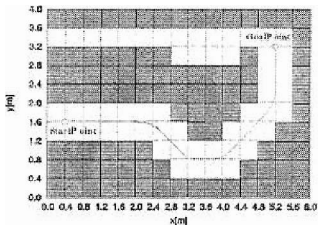


Fig. 11 Generated Path using Riesenfeld Spline

に示す。

この手法は、拡散方程式によって導かれる各格子点の濃度に基づき、格子点間を結ぶことによって経路を生成する。したがって、格子間隔が大きな場合、Fig.10に示されるように、絶対座標系における経路の接線角度が不連続になる点が発生し、ロボットの運動が不連続に変化する場合がある。そこで本研究では、ロボットが滑らかな運動を行うためにFig.10のように得られた格子点間をリーゼンフェルトスプライン関数<sup>12)</sup>を用いることによって結び、Fig.11に示されるような、より滑らかな経路を生成する。

## 5. 実験

著者が提案したアルゴリズムの有効性を示すために、2台のDR Helperと人間の協調による搬送実験を行った。この実験では、DR Helperが環境情報を持たず、人間が物体に加える力/モーメントに基づいて搬送を実現する実験と、各DR Helperが

環境情報を持ち、その情報より生成された経路に基づいて人間と搬送作業を実現する2つの実験を行った。各実験における制御系の実現にはVxWorksを用い、制御周波数は1024[Hz]である。それぞれの実験における一例をFig.12, Fig.13に示す。

Fig.12の実験では、2台のDR Helperによって把持された冷蔵庫に、力/モーメントを加えることによって協調して搬送を実現し、目的地に設置している。Fig.13の実験では、2台のDR HelperにFig.11のように生成された経路を与え、人間と協調による単一物体の搬送実験を行った。これらの実験により、2台のDR Helperと人間が協調して搬送作業をうまく行っていることがわかる。

## 6. おわりに

本稿では、複数の分散制御された移動ロボットと人間が協調して作業を実現する、Distributed Robot Helpersと呼ばれるロボットシステムを提案した。協調作業の一例として単一物体の操り問題を取り上げ、人間と複数移動ロボットが協調して単一物体を操るための制御系を提案した。提案したアルゴリズムを2台のDR Helperに適用し、人間と協調して単一物体を操る実験を行い、その有効性を示した。

## 参考文献

- 1) H.Kazerooni: Human Machine Interaction via the Transfer of Power and Information Signals, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1632/1642 (1989)
- 2) K. Kosuge, H. Yoshida, D. Taguchi, T. Fukuda: Robot-Human Collaboration for New Robotic Application, Proc. of IEEE IECON'94, 713/718 (1994)
- 3) K. Kosuge, M. Sato, N. Kazamura: Mobile Robot Helper, Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation 583/588 (2000)
- 4) P. Akella, M. Peshkin, E. Coigate, W. Wannasuphprasit, N. Nagesh, J. Wells, S. Holland, T. Pearson, B. Peacock: Cobots for the automobile assembly line,

- Proc. of in the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automatioon, 728/733 (1999)
- 5) O. Khatib: Mobile manipulation: The robotic assistant,  
Robotics and Autonomous Systems 26 175/183 (1999)
  - 6) 浅間 一, 佐藤 雅俊, 嘉悦 早人, 尾崎 功一, 松本 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, 14-2 249/254 (1996)
  - 7) Y. Hirata, K. Kosuge, T. Oosumi, H. Asama, H. Kaetsu, K. Kawabata: Coordinated Transportation of a Single Object by Omni-Directional Mobile Robots,  
Journal of Robotics and Mechatronics, 12-3 242/248 (2000)
  - 8) K. Kosuge, H. Yoshida, D. Taguchi, T. Fukuda: Robot-Human Collaboration for New Robotic Applications,  
Proceedings of IECON'94, 713/718 (1994)
  - 9) D J. Stilwell, J S. Bay: Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots,  
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 766/771 (1998)
  - 10) K. Kosuge, T. Oosumi, M. Satou, K. Chiba, K. Takeo: Transportation of a Single Object by Two Decentralized-Controlled Nonholonomic Mobile Robots,  
Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2989/2994 (1998)
  - 11) Günther K. Schmidt, Kianush Azarm: Mobile robot path planning and execution based on adiffusion equation strategy  
Advanced Robotics, 7-5 479/490 (1993)
  - 12) 桜井 明(監修), 菅野 敬祐, 吉村 和美, 高山 文雄: Cによるスプライン関数, 99/147, 東京電機大学出版局(1993)

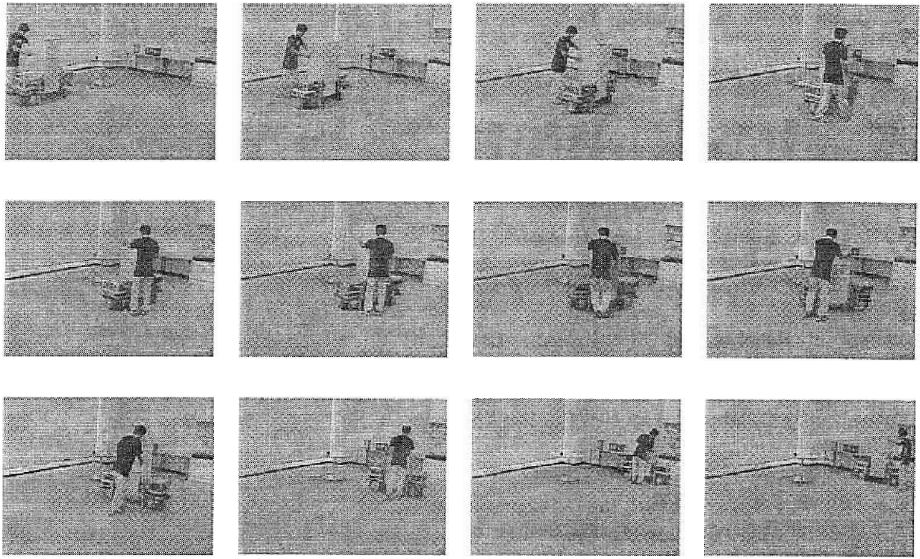


Fig. 12 Example Task by DR Helpers

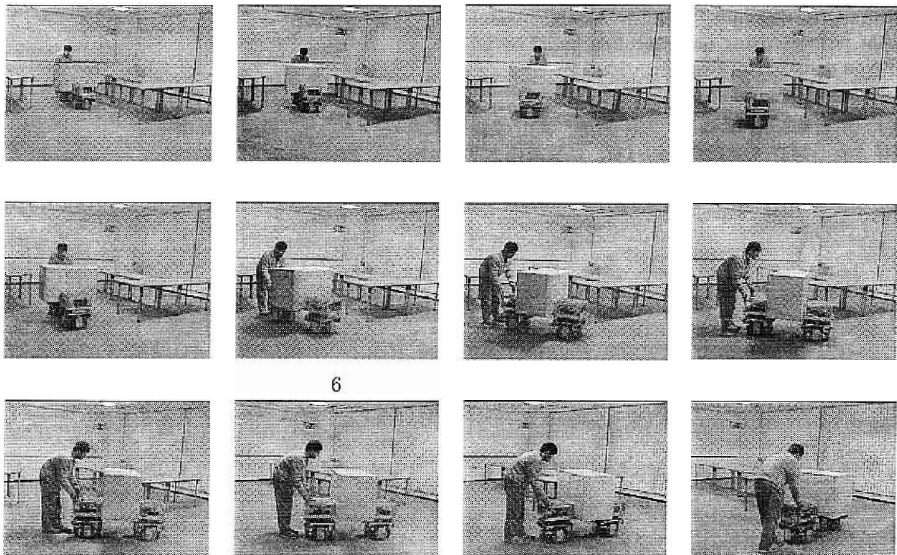


Fig. 13 Example Task by DR Helpers with Map