

人間と複数の分散型ロボットヘルパーとの協調による  
単一物体の搬送\*平田泰久<sup>\*1</sup>, 初雁卓郎<sup>\*2</sup>, 小菅一弘<sup>\*1</sup>  
浅間一<sup>\*3</sup>, 嘉悦早人<sup>\*3</sup>, 川端邦明<sup>\*3</sup>Transportation of an Object by Multiple Distributed Robot Helpers  
in Cooperation with a HumanYasuhisa HIRATA<sup>\*4</sup>, Takuro HATSUKARI, Kazuhiro KOSUGE,  
Hajime ASAMA, Hayato KAETSU and Kuniaki KAWABATA<sup>\*\*</sup>Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Tohoku University,  
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

In this paper, we propose a concept of a human-robots cooperation system referred to as distributed robot helpers and a decentralized motion control algorithm of multiple mobile robot helpers for handling a single object in cooperation with a human/humans. The prototype system of distributed robot helpers referred to as DR Helper consists of an omni-directional mobile base, a six-axis body force sensor, a folk lift, and an onboard controller. Each system is controlled by a kind of a damping motion control law using its own controller. Multiple DR Helpers transport a single object in cooperation with a human based on the operator's intentional force/moment. Experiments using two DR Helpers will illustrate the concept and show the validity of the proposed control algorithm.

**Key Words:** Robot, Moving Robot, Motion Control, Distributed Robot Helpers, Human, Transportation

## 1. はじめに

近年, 先進国の間では, 平均寿命の伸長と少子化の進行により, 超高齢化社会が訪れるといわれている。特に, 我が国においては, 21世紀の半ばには国民の3分の1以上が65歳以上になると予想されており, それに伴い, 健康上何らかの支援を必要とする人の数が増大するであろう。また, 就業人口も減少することから, 広範囲の産業分野において, 人手不足が深刻化すると予想される。このような状況に対応して, 人と共に働き, 人に種々のサービスを提供し得る, 人間共存型ロボットの開発が注目されている。

人間とロボットが協調して作業を実現する研究は数多く行われている。Kazerooniら<sup>(1)</sup>は, 人間の力を増幅させることによって作業を実現する Human Extenderを開発した。小菅ら<sup>(2)</sup>は, 人間の力を増幅するシステ

ムの安定な制御系の設計法や, 人間と協調して単一物体を操るためのインピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータシステムを提案した。池浦ら<sup>(3)</sup>は他人と協調するときの人間の運動について解析し, その結果を物体の搬送のためのロボットシステムに応用した。Zhengら<sup>(4)</sup>はマニピュレータと人間の負荷を分散するシステムを提案した。

しかし, これらの研究は移動機構を持たないマニピュレータによるものであり, 限定された作業範囲でのみしか用いることが出来ない。この問題を解決するために, 移動機構を有したシステムでの研究も行われている。福田ら<sup>(5)</sup>は, マン・ロボット協調作業型システムを提案し, 単一の移動マニピュレータを利用した物体のハンドリングシステムを提案した。Peshkinら<sup>(6)</sup>は, 単一物体の搬送のために, Cobotと呼ばれる非駆動型のロボットシステムを開発した。小菅ら<sup>(7)</sup>は, 双腕の移動マニピュレータシステムを開発し, 単一物体の搬送のために冗長性を利用した制御系を提案した。

これらのシステムは, 1台のロボットと人間が協調

\* 原稿受付 2001年6月19日。

<sup>\*1</sup> 正員, 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。

<sup>\*2</sup> パラマウントベッド(株)(〒136-8670 江東区東砂2丁目14-5)(元: 東北大学大学院)。

<sup>\*3</sup> 正員, 理化学研究所生化学システム研究室(〒351-0198 和光市広沢2-1)。

E-mail: hirata@irs.mech.tohoku.ac.jp

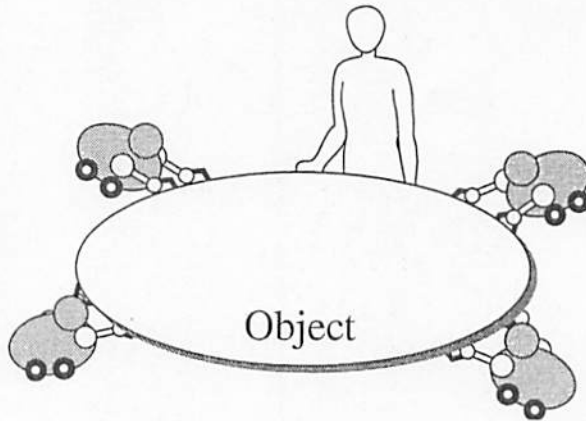


Fig. 1 Handling an Object with Robot Helpers

して作業を実現するものであり、器用さを要求されるような複雑な作業の実現には効果的である。しかし、大きな物体や重い物体の搬送においては1台のロボットの可搬重量が制限され、搬送作業が行えない場合がある。また、大きな物体や重い物体を搬送するために、大きなロボットを用いることは、そのロボット自身の運動エネルギーを大きくすることとなり、安全対策などが困難となる。

そこで、本論文では、図1に示すように、複数の比較的小型の移動ロボットと人間が協調するシステムについて考える。Khatibら<sup>(8)</sup>は複数の移動マニピュレータと人間が協調し、単一物体を操る制御系を提案している。しかし、この制御系を実現するためには、人間の慣性特性などを正確に導出しなければならない。本研究では、人間の特性は加わる力/モーメントに対して受動的であると仮定するとどまり、人間の不確定なダイナミクスを必要としない協調システムを考える。

以下、本論文では、複数の移動ロボットと人間が協調して作業を実現するロボットシステム、Distributed Robot Helpersを提案する。そして、人間と移動ロボットとの協調による作業の一例として単一物体のハンドリング問題を取り上げ、この作業を実現する各移動ロボットのための分散協調制御系を提案する。最後に、人間と複数の移動ロボットによる単一物体の搬送実験を行い、提案するロボットシステム及び協調制御系の有効性を示す。

## 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しようとするとき、図2に示すように複数人の助けを借りる。もし、ロボットがこれらの人間の代わりにすることができれば、我々は多くの人間の助けを借りずに、重い物体や大きな物体の搬送を実現

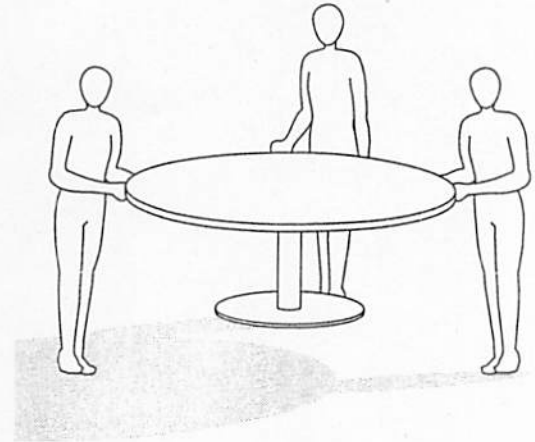


Fig. 2 Handling an Object with Human Helpers

することができる。ロボットヘルパーとは、図1に示すような、人間の代わりにその作業を助けるロボットである。

ある環境において、ロボットヘルパーと人間とが協調して作業を行うことを考えると、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とが有効である。また、ロボットヘルパーを1台の大きく重いロボットによって実現するより、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。なぜなら、ロボットが同じ速度で動いているとき、小型ロボットの運動エネルギーは、大きく重いロボットより小さく、たとえ人間に衝突したとしても、その人間への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移動ロボットにより人間の作業を助けるロボットシステム、Distributed Robot Helpersを提案する。そして、このロボットシステムの有効性を示すために、複数の人間協調型移動ロボットDR Helperを開発した。図3にDR Helperの試作機をしめす。これは、浅間ら<sup>(9)</sup>によって開発されたZENと呼ばれる全方向移動ロボットを基に構成され、ボディフォースセンサと呼ばれる力覚センサ<sup>(10)</sup>、物体のハンドリングを行うためのフォークリフトを装備している。DR Helperはそれぞれ、図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を介してホストコンピュータと通信し、その指令に基づいて動作することも可能である。

本研究では、分散型ロボットヘルパーによって実現可能な様々な作業の中で、単一物体のハンドリング問題を取り上げる。したがって、今回試作したDR Helperは物体のハンドリングを行うためにボディフォースセ

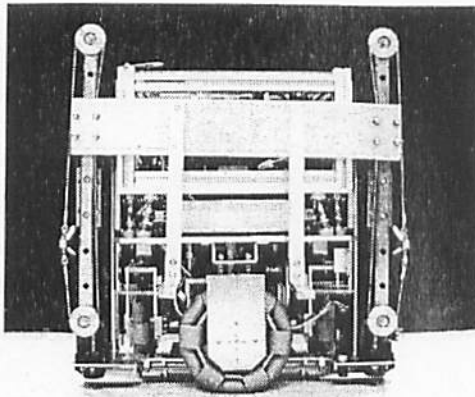


Fig. 3 DR Helper

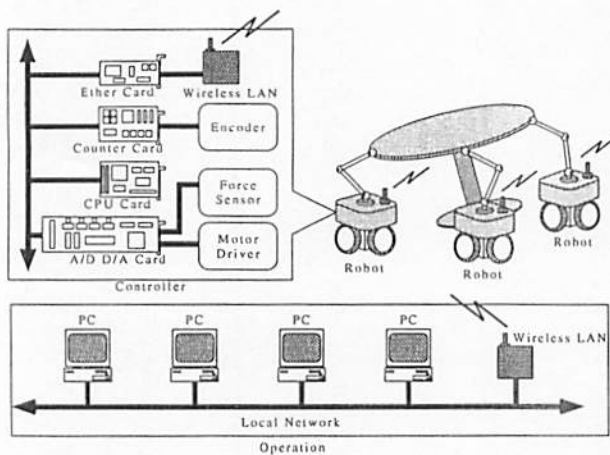


Fig. 4 Controller

ンサやフォークリフトを有するシステムとなっている。しかし、それぞれのロボットにマニピュレータなどを搭載することにより、物体のハンドリングだけでなく、より多くの作業を実現することが可能である。

### 3. 分散制御系

本章では、ホロノミックな移動ロボットである DR Helper がどのように人間と協調して単一物体を操るかを考える。従来、著者らは、複数の移動ロボットによる単一物体の搬送を実現するために、リーダー・フォロワタイプの分散協調制御系を提案してきた<sup>(11)</sup>。これは、リーダーと呼ばれる1台のロボットのみ目標軌道を与え、残りのフォロワと呼ばれるロボットはリーダーの目標軌道を推定しリーダーと協調して物体を搬送するものである。協調搬送を実現するために、各ロボットは物体の代表点回りに、その動特性を変化させずにコンプライアンス制御される。

ロボットと人間による協調搬送を実現するために、

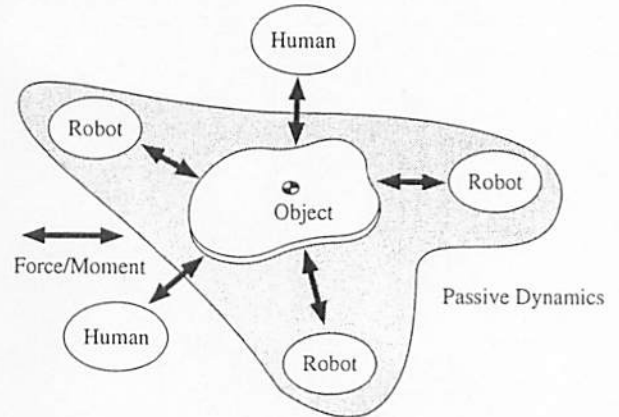


Fig. 5 Interaction between Humans and Robots

従来の制御系のリーダーを人間と仮定し、各ロボットを全てフォロワとして、人間の運動を推定することを考えよう。実際、人間がロボットと同様に、ある一定の機械的コンプライアンス特性を持つように運動することができれば、各ロボットは人間の運動を推定することができる。しかし、人間の動特性を正確に求めるのは困難であり、また、人間がある一定の動特性を持つように運動することも難しい。したがって、従来の複数の移動ロボットによる物体の搬送のための制御系を、そのまま人間と協調のための制御系に適用することはできない。

そこで、本研究では、ロボットを外力に対して受動的に動くように制御し、人間の力に基づいてロボットの運動を決定するシステムを考える。すなわち、図5に示されるように、人間とロボットは操る物体を介してのみ相互作用するものとし、人間が物体に力/モーメントを加えることにより物体の運動を指示する。ロボットは物体を介して得た人間の力に基づいて運動を生成することにより、協調搬送を実現する。このように、ロボットがある外力に対して受動的な運動を実現するシステムは、テレオペレーションの分野で用いられており<sup>(12)</sup>、人間の特性が外力に対して受動的であると仮定すると、安定な作業が実現できることが知られている<sup>(2)</sup>。

外力に対して受動性を有したシステムを実現するために、本研究では、各ロボットにダンピング制御の手法を適用することを考える。各ロボットは、どの方向に対しても指令した速度で動くように速度制御されているものとし、物体に設定された同一の代表点回りに、次式の特性を満たすように制御される。

$$D\dot{x}_i = f_i - f_i^{in} \quad (1)$$

ここで、添字  $i$  は  $i$  番目のロボットを示しており、 $D \in$

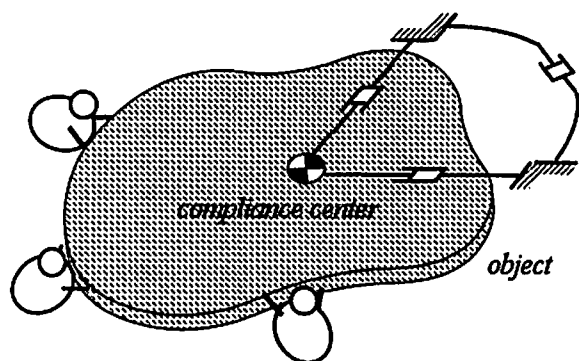


Fig. 6 3-DOF Damping Control

$R^{3 \times 3}$  は正定な減衰係数行列を示す。また、 $f_i \in R^3$  は各ロボットに働く力/モーメントを物体の代表点回りで表したものであり、ロボットに搭載された力覚センサを用いて計測される。また、 $f_i^m \in R^3$  は各ロボットが単一物体を把持するために物体に加える内力の目標値を表し、 $\dot{x}_i \in R^3$  は  $i$  番目のロボットの実際の速度を表す。

式(1)を用いることにより、各ロボットは外力に対して受動的に運動を行うことができる。いま、各ロボットが物体をしっかりと把持し、ロボットと物体の間に相対運動が生じないと仮定すると、各ロボットは同一の代表点回りに制御されるので、物体の運動は図6に示されるように、ある代表点回りの運動として考えることができる。これにより、人間は物体の代表点に力/モーメントを加えることにより、複数の移動ロボットと協調して物体を任意の方向へ操ることが可能となる。

#### 4. 操作性向上

**4.1 運動自由度の限定** 各ロボットに前章で述べたダンピング制御を適用した場合、物体の運動は、人間によって加えられる力/モーメントの大きさとその方向に依存する。したがって、物体の位置決め作業のような運動には非常に有効である。しかし、移動距離が長い搬送作業や物体の代表点回りに大きく回転させる場合などにおいては必ずしも有効ではない。なぜなら、このような長い距離の搬送作業を実現するためには、人間は常に物体の代表点に対して、意図した方向へ正確な力/モーメントを加え続けなければならないからである。

人間の特性を考慮すると、人間は物体の運動を実現するための力/モーメントを、正確にその物体に加え続けることは困難である。したがって、人間が意図する物体の運動方向と物体の実際の運動方向との間にずれが生じてしまう場合がある。この場合、目標の方向

に対する運動のずれは、常に人間が修正しなければならない。そこで、本論文では、このような人間の負担を軽減する制御系を考える。

通常、移動距離の長い搬送作業においては、搬送物体に複雑な運動は要求されない。そこで、搬送作業における人間の負担を軽減し、物体の操作性を向上させるために、ダンピング制御を行う自由度を限定することを考える。すなわち、各ロボットは物体に加えられた力/モーメント情報により、作業者が意図した物体の運動方向を推定し、その方向に対してのみダンピング制御を行うものとする。これにより、物体の運動は1自由度方向のみの運動となり、それ以外の方向へ加えられた力/モーメントの影響を受けることなく、人間は容易に物体を目標の方向へ搬送することができる。

しかし、マニピュレータの場合と異なり、移動ロボットのデッドレコニングは車輪の滑りなどにより必ずしも有効ではない。特に分散制御された移動ロボットにおいて協調作業を実現する場合には、物体の把持点やロボットの車輪に滑りなどが生じると、各ロボットの座標系間の位置及び姿勢が相対的にずれてしまう場合がある。

したがって、各ロボットの運動自由度を限定した場合、各ロボット間の座標系が相対的にずれると、限定された自由度の方向が各ロボット間で異なってしまう。搬送物体の運動を完全に拘束してしまう。これにより、作業者の操作性が悪化するとともに、搬送物体や各ロボットに過大な内力が働き、それらを破壊してしまう恐れがある。

そこで、物体の把持点やロボットの車輪の滑りなどによる各ロボット間の座標系のずれを、ある程度許容するために、物体の目標の運動方向以外の自由度に関しては、図7に示すように、コンプライアンス制御することを考える。すなわち、各ロボットを次式の特性を満たすように制御する。

$${}^m D \dot{x}_i = {}^m f_i - {}^m f_i^m \quad (2)$$

$${}^{lm} D \dot{x}_i + {}^{lm} K \Delta x_i = {}^{lm} f_i - {}^{lm} f_i^m \quad (3)$$

ただし、添字  $m$  は平面3自由度 ( $x, y, \theta$ ) における運動可能自由度方向の変数を表し、添字  $lm$  はそれ以外の軸方向の変数を表す。ここで、 ${}^m D \in R$ 、 ${}^{lm} D \in R^{2 \times 2}$  は正定な粘性係数行列、 ${}^{lm} K \in R^{2 \times 2}$  は正定な剛性係数行列を示す。

また、 ${}^m f_i \in R$ 、 ${}^{lm} f_i \in R^2$  は各ロボットに働く力/モーメントを物体の代表点回りで表したものであり、 ${}^m f_i^m \in R$ 、 ${}^{lm} f_i^m \in R^2$  は物体に加える内力の目標値を表す。 ${}^{lm} \Delta x_i \in R^2$  はロボットの運動誤差であり、

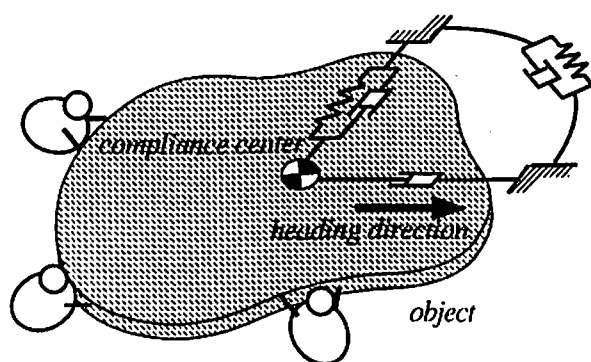


Fig. 7 1-DOF Damping Control

${}^{lm}x_i$  をロボットの実際の軌道、 ${}^{lm}x_{di}$  をロボットの目標軌道とすると次式で表される。

$${}^{lm}\Delta x_i = {}^{lm}x_i - {}^{lm}x_{di} \quad (4)$$

物体の目標の運動自由度以外の方向にコンプライアンス制御をすることによって、ある程度、各ロボット間における座標系の相対的な方向誤差を許容することができる。しかし、各ロボットの座標系間に相対的な方向誤差が存在する状態で長い距離の搬送作業を行うと、式(4)における運動誤差  ${}^{lm}\Delta x_i$  が大きくなり、結果的に物体の運動が拘束される場合がある。このような問題を避けるために、長い距離の搬送作業では、各ロボット間において座標系の校正を行う必要がある。座標系の校正に関しては、著者らが文献<sup>(13)</sup>で提案した、拡張カルマンフィルタを用いた座標系の校正法を適用することにより実現できる。

**4.2 人間の作業意図の推定** 本節では、人間の作業意図をロボットがどのように推定するかを考える。ここでは、人間の作業意図を物体に加えられる力/モーメントの大きさによって判断するものとし、ロボットに搭載された力覚センサの値によってロボットの運動を決定する図8に示されるような搬送モード推定器 (Handling Mode Estimator) を設計する。

本研究では、一般的な環境において人間と複数のロボットによる協調搬送作業を2種類の作業として分類する。一つは、ある目標位置までの長い距離の搬送作業であり、もう一つは目標位置近傍で、その搬送物体を正確に設置するために位置や姿勢を微調整する位置決め作業である。ここでは、各ロボットが2つの作業を、どのようにしてロボットに加えられる力/モーメントから推定するかを考え、その手法の一例を示す。

はじめに、長い距離の搬送作業においては、通常、物体には複雑な運動は要求されないことから、人間はある一定の方向に大きな力またはモーメントを加えると考えられる。そこで、ある一定値以上の力/モー

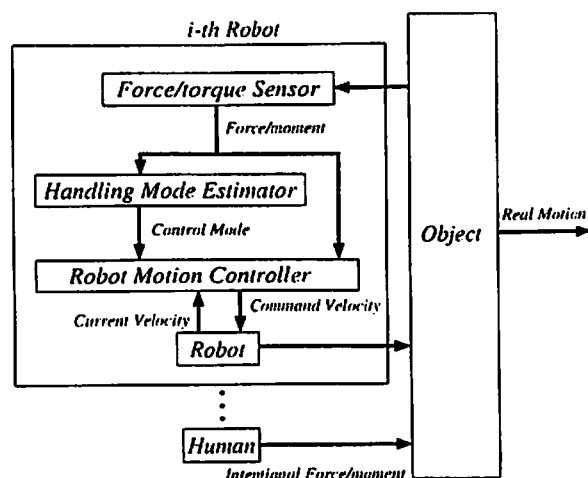


Fig. 8 Structure of System

ントが特定の方向に加えられた場合は、ロボットに搬送作業モードを実現させる。

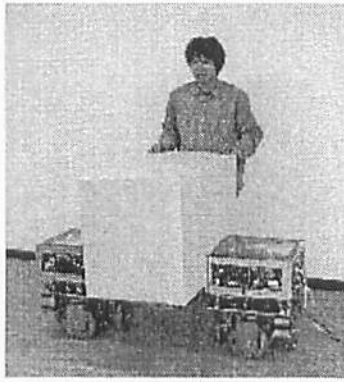
搬送作業モードとは、物体の代表点に座標系を設定し、人間が物体に加える力の方向が  $x$  軸近傍であれば、 $x$  軸方向に対して式(2)の特性を満たすようにダンピング制御を行い、残りの方向すなわち  $y$  軸方向と代表点回りの回転方向に関しては式(3)の特性を満たすようにコンプライアンス制御するというものである。

同様に  $y$  軸方向へ加えられる力が大きな場合は、 $y$  軸方向への搬送作業と仮定し、 $y$  軸方向へダンピング制御、残りの方向へはコンプライアンス制御を行う。また、代表点回りに働くモーメントが大きな場合は、代表点回りの回転に関してはダンピング制御を行い、 $x$  軸、 $y$  軸方向にはコンプライアンス制御を行う。上記の方向以外に大きな力が加わる場合は、式(1)の特性を満たすように全方向に対してダンピング制御を行うものとする。ただし、この場合は運動の自由度を限定することができない。

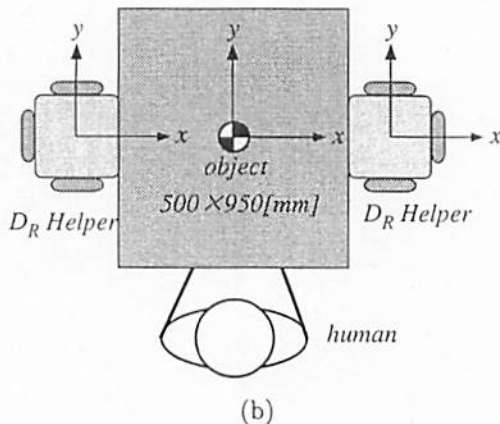
物体の代表点に加わる力/モーメントが小さい場合には、人間は物体の位置や姿勢の微調整を要求しているものとして、各ロボットに式(1)の特性を満たすような全方向へのダンピング制御を行い、位置決め作業を実現させる。このように、人の作業意図に応じて制御モードを切り替えることで、人間の負担を軽減したロボットとの協調作業を実現することができる。

本節では、限定する自由度の方向を物体の代表点に設定された座標系の  $x$ 、 $y$  軸及び原点回りの回転と定義した。しかし、これらの方向は、搬送する物体の形状や人間の位置/姿勢により任意に変化させることができる。また、既知環境での搬送作業においては、式(4)の  ${}^{lm}x_{di}$  に連続的な目標軌道を与えることによって、容易に障害物回避などが実現できる。物体の形状





(a)



(b)

Fig. 9 Experimental System

や人間の位置/姿勢によってどの方向に運動自由度を持たせるかといった問題や地図情報の利用に関しては今後の課題とする。

## 5. 実験

提案したアルゴリズムを2台のDR Helperに適用し、図9に示すような人間とロボットによる単一物体の協調搬送実験を行った。本実験では、移動距離が長い搬送作業を実現するために、全方向に対してダンピング制御を用いた手法と自由度を限定してダンピング制御を行った手法の2つの制御アルゴリズムを用いて比較実験を行った。本実験では、人間が $y$ 軸方向に対して搬送物体に力を加えることにより、2台のロボットと協調して物体を搬送した。搬送距離はともに約1.8[m]である。

制御系の実現にはVxWorksを用い、制御周波数は1024[Hz]とした。また、前章で示した搬送モード推定器における閾値となる力/モーメントは、 $x$ 、 $y$ 軸方向の力に関しては15[N]、代表点回りのモーメントに関しては10[Nm]とした。

全方向ダンピング制御を用いた場合の実験結果を図

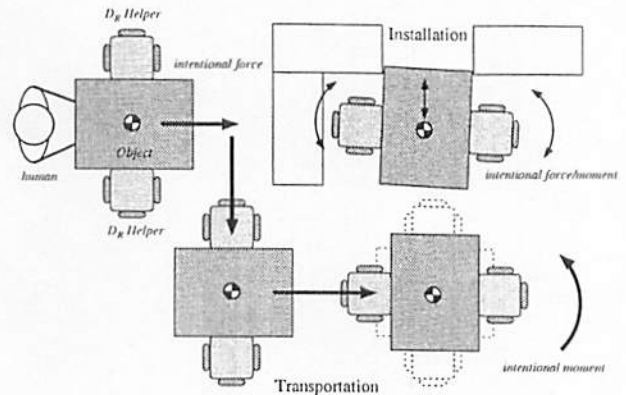


Fig. 12 Installation of an Object

10に示す。これらのグラフは、1台のロボットによって検出された物体の代表点に働く力/モーメントと、その物体の運動軌跡を表している。この実験では、人間が意図せずに物体に加えた $x$ 軸方向への力やモーメントの影響で、 $y$ 軸方向以外の方向へ物体が運動しているのがわかる。

自由度を限定したダンピング制御を用いた場合の実験結果を図11に示す。このグラフも全方向ダンピング制御の実験と同様に、1台のロボットによって検出された、物体の代表点に働く力/モーメントとその物体の運動軌跡を表している。全方向ダンピング制御と比較すると、自由度を限定したダンピング制御を用いた場合には、 $x$ 軸方向や代表点回りに働く微小な力/モーメントの影響で物体がそれらの方向に運動することなく、ほぼ $y$ 軸方向のみへの運動が実現できているのがわかる。

図13に実験の一例を示す。この実験では、物体の代表点に加わる力/モーメントに基づいて4章で提案した手法を各ロボットに適用し、図12に示すような物体の搬送、位置決め実験を行った。はじめに、人間が物体に力/モーメントを加えることにより、障害物を回避しながら、目標位置に物体を搬送している。そして、目標位置では位置や姿勢の微調整を行い、物体のはめ込み作業を実現している。

## 6. おわりに

本稿では、複数の移動ロボットと人間が協調作業を実現するロボットシステムDistributed Robot Helpers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、その作業を実現するDR Helperと呼ばれるロボットを開発し、人間と複数のDR Helperが協調して搬送作業を実現するための分散協調制御系を提案した。この制御系を2台のDR Helperに適用し、単一物体を操る実験を行いその有効性を示した。

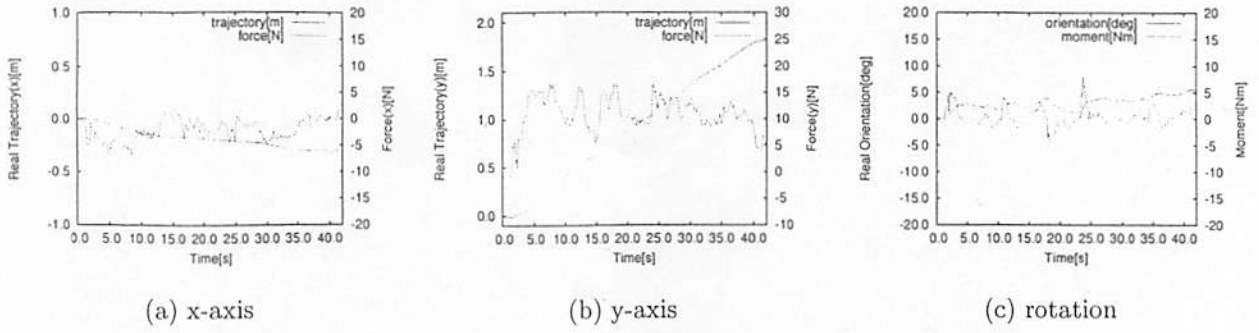


Fig. 10 Experimental Results (3-DOF Damping Control)

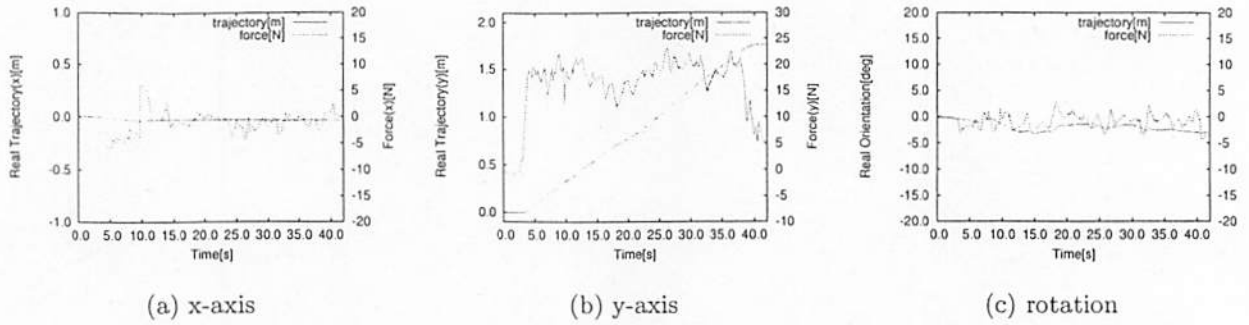


Fig. 11 Experimental Results (1-DOF Damping Control)

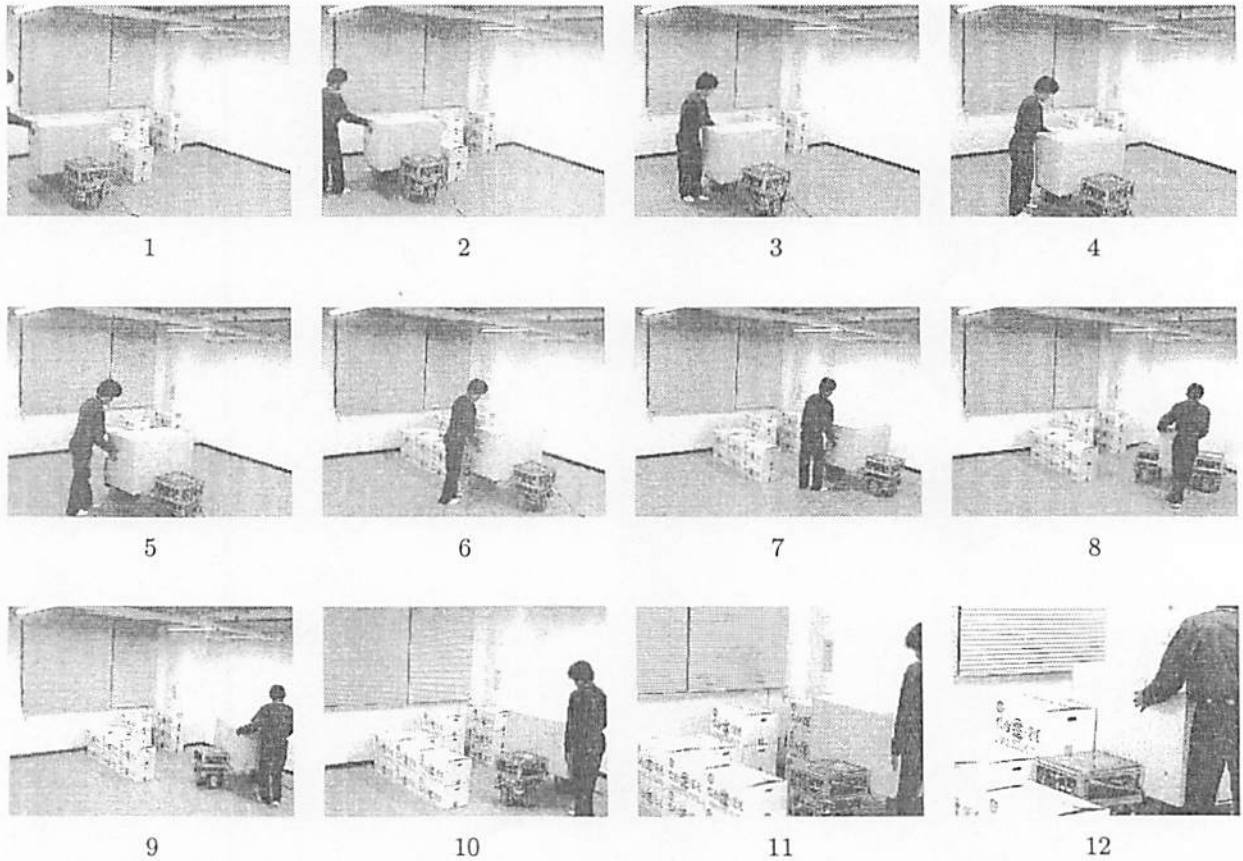


Fig. 13 Example Task by Human and DR Helpers

尚, 本研究の一部は平成 12 年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A)(2)(12305028) の援助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

## 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*, pp.1632-1642, 1989.
- (2) K. Kosuge, H. Yoshida, D. Taguchi, T. Fukuda, "Robot-Human Collaboration for New Robotic Application", *Proc. of IEEE IECON'94*, pp.713-718, 1994.
- (3) R. Ikeura, H. Monden, H. Inooka, "Cooperative Motion Control of a Robot and a Human", *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.112-117, 1994.
- (4) O.M. Al-Jarrah, Y.F. Zheng, "Arm Manipulator Cooperation for Load Sharing Using Variable Compliance Control", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.895-900, 1997.
- (5) 福田敏男, 藤澤佳生, 小菅一弘, 新井史人, 室英治, 星野春夫, 宮崎賢志, 大坪和彦, 上原和雄, "マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究 (第 3 報, マニピュレータ/ヴィークルシステムの定重心制御)", 日本機械学会論文集 (C 編), 58 巻, 551 号, pp.146-152, 1992.
- (6) R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M. Peshkin, "A General Framework for Cobot Control", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1824-1830, 1999.
- (7) K. Kosuge, M. Sato, N. Kazamura, "Mobile Robot Helper", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.583-588, 2000.
- (8) O.Khatib, "Mobile manipulation: The robotic assistant", *Robotics and Autonomous Systems*, 26, pp.175-183, 1999.
- (9) 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.
- (10) Y. Hirata, K. Kosuge, T. Oosumi, H. Asama, H. Kaetsu, K. Kawabata "Coordinated Transportation of a Single Object by Omni-Directional Mobile Robots with Body Force Sensor", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.12, No.3, pp. 242-248, 2000.
- (11) 小菅一弘, 大住智宏, 千葉晋彦, "単一物体を操る複数移動ロボットの分散協調制御", 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.87-95, 1998.
- (12) R.J. Anderson, M.W. Spong, "Bilateral Control of Telemanipulators with Time Delay", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.34, No.5, pp.494-501, 1989.
- (13) 小菅一弘, 関宏之, 大住智宏, 酒井勝, 蟹谷清, "複数マニピュレータの分散協調制御における座標系の較正法", 日本機械学会論文集 (C 編), 64 巻, 623 号, pp.279-285, 1998.