学術・技術論文

キャスタ特性を有した複数の人間協調型移動ロボット（DR Helper）と人間との協調による単一物体の搬送

平田泰久[*1*2] 小菅一弘[*1] 淺間一[*3]
嘉悦早人[*4] 川端邦明[*4]

Transportation of a Single Object by Multiple Distributed Robot Helpers with Caster-like Dynamics (DR Helpers) in Cooperation with a Human

Yasuhisa Hirata[*1*2], Kazuhiro Kosuge[*1], Hajime Asama[*3],
Hayato Kaetsu[*4] *and* Kuniaki Kawabata[*4]

In this paper, we propose a decentralized motion control algorithm of multiple mobile robots referred to as DR Helper for transporting a single object in cooperation with a human. DR Helper consists of an omni-directional mobile base, a six-axis body force sensor, a folk lift, and an onboard controller. Each robot is controlled by its own controller as if it has a caster-like dynamics and transports a single object together with other robots based on an intentional force/moment applied by a human. The adaptive dual caster action is also proposed to improve the maneuverability of the system. Experiments using multiple DR Helpers will illustrate the validity of the proposed control algorithm.

Key Words: Human-Robots Cooperation, Distributed Robot Helpers, Caster-like Dynamics

1. はじめに

我が国の社会の少子高齢化は，他の欧米先進諸国と比較しても極めて急速に進んでおり，このままでは西暦2015年には，国民の4人に1人が65歳以上の高齢者になると予想されている．高齢者になると，体力の衰えは無視できなくなるが，高齢者もその意欲と能力に応じて高齢期まで仕事に就くことが期待されている．このような状況における一つの解決策として，人と共存／共生し，人を多面的に支援できる新しいロボットシステムの開発が期待されている．

人間支援のためのロボットシステムは，様々な研究者によって研究されており，いくつかの人間協調型ロボットシステムが提案されている．Kazerooni [1]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，Zhengら [2]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ている．池浦ら [3]は他人と協調するときの人間の運動について解析し，その結果を物体の操りのためのロボットシステムに応用した．

また，福田ら [4]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，Colgateら [5]は，単一物体の搬送のために，Cobotと呼ばれる非駆動型の移動ロボットシステムを開発した．筆者ら [6]は，双腕型移動ロボット“MR Helper”を開発し，人間とロボットによる物体の効率的なハンドリング手法を提案している．

このような従来より提案されてきた人間協調型ロボットシステムの多くは，単一のロボットと人間が協調して作業を実現することを前提としており，器用さを要求されるような複雑な作業の支援や，重量物のハンドリング等におけるパワーアシストシステムとして有効であった．しかし，単一のロボットを利用する場合，そのロボットの性能には限界があり，ロボットの性能を超えた作業の実現は困難となる．例えば，大型物体や重量物の搬送においては，1台のロボットシステムの利用では，可搬重量等の問題から，搬送作業が実現できない場合が発生する．

このような問題を解決する一つの手法として，作業に応じた専用のロボットを開発することが考えられるが，その場合，開発コストの問題や，様々な作業への適応性の低下などが問題となる．また，大型物体や重量物を搬送するために，大きなロボット

原稿受付 2002年4月15日
*1東北大学大学院
*2科学技術振興事業団，さきがけ研究21
*3東京大学
*4理化学研究所
*1Tohoku University
*2PREST, JST
*3The University of Tokyo
*4The Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN

を用いるような場合には，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，本研究では，様々な作業に柔軟に対応でき，かつ安全性を考慮したロボットシステムについて考える．

人間との共存／共生を前提としたロボットは，安全性や人に対する威圧感などを考慮すると必然的に小型であることが望まれるが，小型のロボットは，作業範囲が狭い，出せるパワーが小さいなどの能力に限界がある．そこで，筆者らは，ロボットに移動機能を持たせることにより作業空間を広げるとともに，比較的小型の複数の移動ロボットと人間が協調して効率的に様々な作業を実現するロボットシステムを開発する．

複数の移動マニピュレータと人間が協調して作業を実現するシステムは，Khatib [7] によって提案されているが，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．そこで，筆者ら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にとどまり，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について考え，人間の操作力に基づいて複数の移動ロボットと協調して大型物体や重量物を搬送する制御系を提案する．

2. Distributed Robot Helpers

複数の移動ロボットと人間が協調して作業を実現するために，筆者らは，**Fig. 1** に示すような "Distributed Robot Helpers" と呼ばれる分散型ロボットシステムを提案してきた [8]．そして，このロボットシステムの有効性を示すために，"DR Helper" と呼ばれる人間協調型全方向移動ロボットを開発し，複数の DR Helper と人間が協調して単一物体を搬送する制御系を提案した [8]．

この制御系では，各ロボットは外力に対してあるダンピング特性を持つように制御され，人間は各ロボットによって把持された物体に操作力を加えることにより，物体の操りを実現した．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生成するシステムは，テレオペレーションの分野でよく知られており [9]，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 [10]．

しかし，文献 [8] で提案された制御系は，あらかじめ，各ロボットの把持点間の位置や姿勢の幾何学的関係が既知であるという仮定に基づいて設計されている．この仮定は，実験室のようなモデル化がしやすい場所，既知形状の物体を操るような場合にはあまり問題にならないが，屋外や家庭内などの一般的な環境で未知形状物体を操ろうとする場合には現実的ではない．また，移動ロボットを用いて協調搬送を行う場合には，車輪などの滑りによるデットレコニングの信頼性の低さのために，たとえ幾何学的関係が既知であろうとも，搬送中に各ロボット間で座標系の較正を行わなければならない場合がある．

一般的に複数の移動ロボットを協調的に用いる場合には，ロボットの車輪と地面との間の滑りを考慮し，各ロボットの避けられない位置や姿勢の誤差に対してロバストになるような協調制御系を設計しなければならない．また，未知形状物体を操ることを考えると，物体の大きさや各ロボット間の幾何学的関係が未知であっても，協調搬送が実現できる制御系が望まれる．

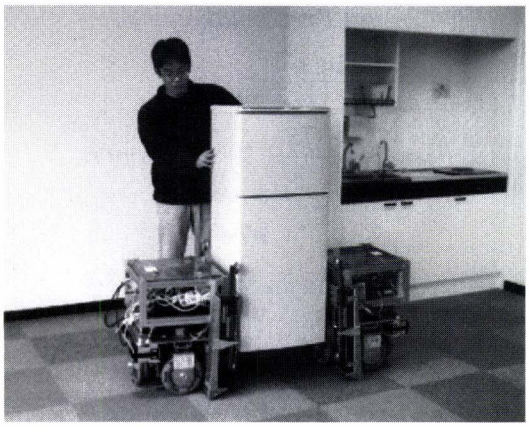


Fig. 1 Distributed robot helpers

そこで，本研究ではより一般的な環境において，複数のロボットシステムを用いることを考え，物体の大きさや各ロボット間の位置や姿勢の幾何学的関係を必要とせずに，複数の移動ロボットと人間が協調して搬送作業を実現する制御系を提案する．

3. キャスタ特性を利用した物体の協調搬送

複数の分散制御された移動ロボットと人間が協調して搬送作業を実現するために，本研究では，主に二つの問題について考える．一つは，人間とロボットとの協調問題であり，もう一つは，複数のロボット間の協調制御問題である．まず，初めに，人間とロボットの協調問題について考える．本研究では，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，人間が物体に加える力／モーメント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．各ロボットをこのように制御したとき，人間の運動特性が外力に対して受動性を有していると仮定すると，人間とロボットの安定な作業が実現できる [10]．

次に，各移動ロボット間の協調制御問題に関して考える．マニピュレータの場合と異なり，移動ロボットによるデッドレコニングを用いた位置の推定は必ずしも有効ではない．そのため，DR Helperのような移動機構を有したロボットにおける協調制御系は，その位置や姿勢の誤差に対してロバストになるように設計しなければならない．そこで，本研究では，人間とロボットの協調問題と複数移動ロボットの協調制御問題の二つの問題を解決するために，**Fig. 2** に示すようなキャスタの運動に注目する．

いま，Fig. 2に示されるようなキャスタが複数取り付けられた物体の運動について考えよう．人間がこの物体に力／モーメントを加えるとすると，各キャスタは，**Fig. 3** に示すように，物体に加わった力の方向に回転し，その方向に物体を動かすことができる．このとき，各キャスタの取り付け位置は，物体の重量が安定して支えられている限り，特に考慮する必要はない．

ここで，もし各ロボットが搬送物体の重量を安定してサポートし，さらに実際のキャスタの特性を満たすように運動を行うとすると，その物体は，複数のキャスタによって支えられているのと同様であると考えることができる．したがって，人間は

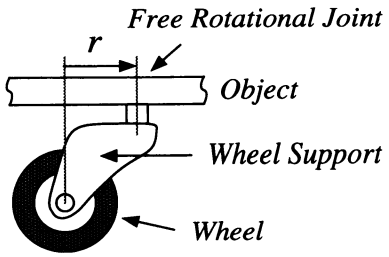
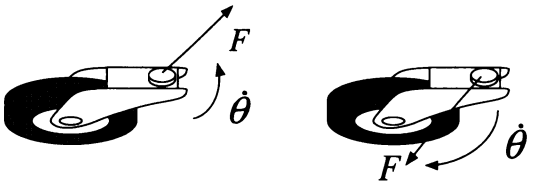


Fig. 2 Real caster



(a) (b)

Fig. 3 Caster motion

複数のロボットによってサポートされた物体に操作力を加えることにより，各ロボットと協調して物体の操りを実現することが可能となる．

また，キャスタの取り付け位置を考慮する必要がないという実際のキャスタの特徴を利用して，移動ロボットの制御系を設計すれば，各ロボットは他のロボットの位置や姿勢の情報を用いることなく，協調搬送が実現できると考えられる．キャスタの運動は人間の加える力／モーメントや他のロボットによって加えられる外力に基づいて受動的に生成される．したがって，物体の搬送中にロボットの車輪と地面との間に滑りが生じ，ロボットに実現されたキャスタの向きが，他のロボットと異なったとしても，キャスタの受動性の特性から，自動的にキャスタの向きを進行方向に倣わせ，座標系の較正を必要とせずに協調搬送を継続できる．

そこで，以下本論文では，初めに各ロボットにキャスタの運動特性を持たせる制御系について考える．そして，次に，人間の搬送物体の操作性向上のために，キャスタの運動特性を変化させ，結果的に物体の運動特性を搬送作業に基づいて変化させる制御系を提案する．最後に，提案した制御系を複数のDR Helperに適応し，人間と複数の移動ロボットによる単一物体の協調操り実験を行い，その有効性を示す．

4. 各ロボットの制御系

本章では，初めに各ロボットにキャスタの特性を実現するために，キャスタの構造およびその運動特性について考える．そして，その運動特性に基づいて，各ロボットにキャスタの特性を実現する制御系を提案する．

4.1 キャスタの運動特性

キャスタはFig. 2に示すように，車輪とフリージョイント，そして，それらをつなぐオフセットを有した車輪サポートから構成される．キャスタと搬送物体との接続は，フリージョイントを介して行われ，キャスタの運動は，搬送物体に働く力／モーメント，すなわちフリージョイントに働く力／モーメントに基づいて生成される．このときフリージョイントに働く力／モーメントに基づいて，キャスタの運動は3種類の運動によって特徴づけられる．

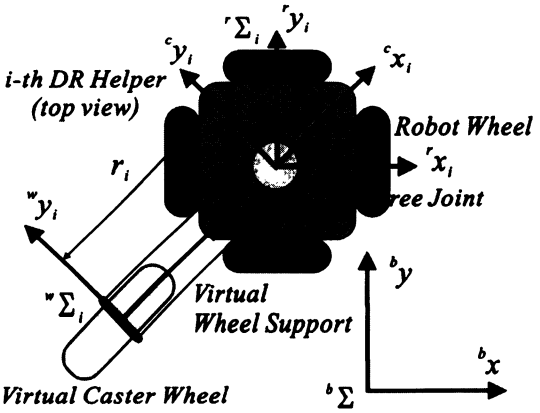


Fig. 4 Coordinate system

一つは，フリージョイント部においてキャスタの車輪の進行方向に働く力に基づいて生成される運動であり，この場合，キャスタの車輪が車軸回りに回転することによって，その進行方向にフリージョイントが並進運動を行う．二つ目は，フリージョイント部においてキャスタの車輪の進行方向と垂直な方向に働く力に基づいて生成される運動である．フリージョイント部にキャスタの車輪の進行方向に垂直な力が加わると，キャスタの車輪と地面との接触点には，車輪サポートのオフセットに基づいてモーメントが発生する．この場合，その接触点回りに加わるモーメントの大きさに基づいて，キャスタの車輪がその接触点回りに回転し，結果として，フリージョイント部がその接触点回りに回転運動を行う．三つ目の運動は，フリージョイント部に働くモーメントに基づく搬送物体自身の回転運動である．このとき，キャスタの車輪や車輪サポートの運動には影響を及ぼさず，フリージョイントのみが回転することによって，搬送物体が回転する．

4.2 速度ベースキャスタ運動

本節では，全方向移動ロボットであるDR Helperが仮想的にキャスタの運動特性を持つように，前節で示したキャスタの三つの運動特性を実現することを考える．ここでは，ロボットが力覚センサを搭載し，その位置において搬送物体を把持するものとする．そして，その把持点と仮想的に実現するキャスタのフリージョイント部が一致するようにロボットの制御系を設計する．

初めに，DR Helperにキャスタの運動特性を実現させるために，**Fig. 4**に示すような座標系を定義する．ここで，各座標系の添字 i は i 番目のロボットであることを表す．${}^{b}\Sigma$ はベース座標系であり，他の座標系の姿勢を記述する座標系である．${}^{r}\Sigma_i$ は，その原点がロボットに搭載された力覚センサの位置と一致し，ロボットに固定されたロボット座標系である．${}^{c}\Sigma_i$ は，キャスタ座標系と呼び，その原点とロボット座標系との原点が一致し，原点回りに自由に回転することができるものとする．${}^{w}\Sigma_i$ は，ロボットに仮想的に実現するキャスタの車輪に取り付けら

れた車輪座標系であり，キャスタの車輪と地面との接触点回りに自由に回転する．

ここで，キャスタ座標系と車輪座標系の x 軸は常にキャスタの車輪の進行方向と一致するものとし，その原点間の距離はFig. 4に示すように，キャスタのオフセット r_i とする．これにより，キャスタ座標系と車輪座標系は，オフセット r_i の間隔を有して常に平行となる．また，ベース座標系における，ロボット座標系，キャスタ座標系，車輪座標系の回転角度は ${}^{r}\theta_i$，${}^{c}\theta_i$，${}^{w}\theta_i$ と定義する．

いま，DR Helperの全方向移動を実現させる各車輪は，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仮定する．このとき，各ロボットに前節で示した三つのキャスタの運動特性を実現することを考える．初めに，キャスタの運動特性の一つであるキャスタの車輪の進行方向への並進運動に関しては，車輪座標系の x 軸方向に働く力 ${}^{w}f_{xi}$ に基づいて，次式の特性を満たすように各ロボットを制御する．

$$ {}^{w}f_{xi} = {}^{w}D_{xi}\,{}^{w}\dot{x}_i \tag{1} $$

ここで，${}^{w}D_{xi} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{w}\dot{x}_i \in R$ は車輪座標系における x 軸方向のロボットの実際の速度を表す．

次に，ロボットに仮想的に実現されるキャスタの車輪と地面との接触点における回転運動を模擬するために，車輪座標系に働くモーメント ${}^{w}n_i$ に基づいて，次式の特性を満たすように各ロボットを制御することを考える．

$$ {}^{w}n_i = {}^{w}D_{\theta i}\,{}^{w}\dot{\theta}_i \tag{2} $$

ここで，${}^{w}D_{\theta i} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{w}\dot{\theta}_i \in R$ は車輪座標系の回転角速度を表す．

最後に，キャスタの三つ目の運動特性である，フリージョイントの特性を表すことを考えよう．各ロボットが物体をしっかり把持することにより物体の重量をサポートすると，ロボットと物体との間の幾何学的関係は変化しない．しかし，各ロボットがフリージョイントの特性を有している場合，ロボットが把持している物体に働く力／モーメントに基づいて，そのフリージョイント回りに回転運動を行わなければならない．

そこで，各ロボットに働くモーメント ${}^{r}n_i$ によって，各ロボットを次式の特性を満たすように制御する．

$$ {}^{r}n_i = {}^{r}D_{\theta i}\,{}^{r}\dot{\theta}_i \tag{3} $$

ここで，${}^{r}D_{\theta i} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{r}\dot{\theta}_i \in R$ はロボットの実際の回転速度を表す．ただし，このとき，各ロボットの ${}^{r}\theta_i$ と ${}^{c}\theta_i$，${}^{w}\theta_i$ は独立に変化する．

次に式(1)～(3)で表されたキャスタの運動特性を，実際に各ロボットにおいてどのように実現するかについて考える．各ロボットは，把持点すなわちキャスタ座標系とロボット座標系の原点に力覚センサを搭載している．この力覚センサの情報に基づいて各ロボットを制御するため，式(1)～(3)の運動特性をキャスタ座標系もしくはロボット座標系で記述することを考える．

そこで，初めに，車輪座標系とキャスタ座標系における，力／モーメントと速度の関係を求めると次式のようになる．

$$ {}^{c}f_{xi} = {}^{w}f_{xi}, \quad {}^{c}f_{yi} = \frac{{}^{w}n_i}{r_i} \tag{4} $$

$$ {}^{c}\dot{x}_i = {}^{w}\dot{x}_i, \quad {}^{c}\dot{y}_i = r_i\,{}^{w}\dot{\theta}_i, \quad {}^{c}\dot{\theta}_i = {}^{w}\dot{\theta}_i \tag{5} $$

式(4)，(5)の関係より，式(1)～(3)で表される運動特性を書き換えると，次式のようになる．

$$ \begin{bmatrix} {}^{c}\dot{x}_i \\ {}^{c}\dot{y}_i \\ {}^{r}\dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{c}D_{xi} & & 0 \\ & {}^{c}D_{yi} & \\ 0 & & {}^{r}D_{\theta i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{c}f_{xi} \\ {}^{c}f_{yi} \\ {}^{r}n_i \end{bmatrix} \tag{6} $$

ここで，${}^{c}D_{xi}$，${}^{c}D_{yi} \in R$ は正の減衰係数を表し，次式のような特性を持つ．

$$ {}^{c}D_{xi} = {}^{w}D_{xi}, \quad {}^{c}D_{yi} = \frac{{}^{w}D_{\theta i}}{r_i^2} \tag{7} $$

また，キャスタの車輪サポートの回転運動を実現するために，次式よりキャスタ座標系の回転角速度を導出する．

$$ {}^{c}\dot{\theta}_i = \frac{r_i}{{}^{w}D_{\theta i}}\,{}^{c}f_{yi} \tag{8} $$

式(8)で導かれた回転角速度に基づいて，キャスタ座標系を回転させる．

いま，DR Helperの全方向移動を実現させる各車輪が，式(6)に示されるロボットの速度から導出される各車輪の目標角速度に基づいて回転し，かつ式(8)で導出された回転角速度に基づいてキャスタ座標系が回転すると仮定すると，各ロボットは仮想的にキャスタの特性を持つことになる．これにより，各ロボットによって把持された物体は，複数のキャスタによって支えられた状態と同等の特性を持ち，人間がその物体に力／モーメントを加えることにより，容易に物体の操りを実現することができる．

このとき，各ロボットは，ロボット自身に加わる力／モーメントに基づいて受動的な運動を生成するように制御されるため，物体の大きさや，各ロボット間の幾何学的関係等を必要とせずに，協調搬送を実現できる．また，車輪と地面との間に滑り等が発生し，あるロボットのキャスタ座標系の向きが瞬間的に変化したとしても，人間が進行方向に操作力を加えている限り，キャスタの受動性の特性により，自動的にキャスタの座標系が搬送物体の進行方向への向きへと修正される．これにより，各ロボット間で座標系の較正等を行わなくても，搬送作業を継続することができる．

5. 操作性の向上

実際のキャスタの特性を模擬した移動ロボットと人間による物体の協調搬送は，人間の操作力に基づいて搬送物体の運動が生成可能であるといったことや，各ロボット間の幾何学的関係が未知でよいというような利点がある．しかし，人間の操作性に関しては，必ずしもよいとはいえない場合がある．

実際のキャスタにおいてよく知られているように，作業中のある瞬間における各キャスタの車輪の向きや，そのキャスタのオフセットの大きさによっては，搬送物体の運動特性が複雑となり，人間はその物体をうまく操れない場合がある．そこで，本

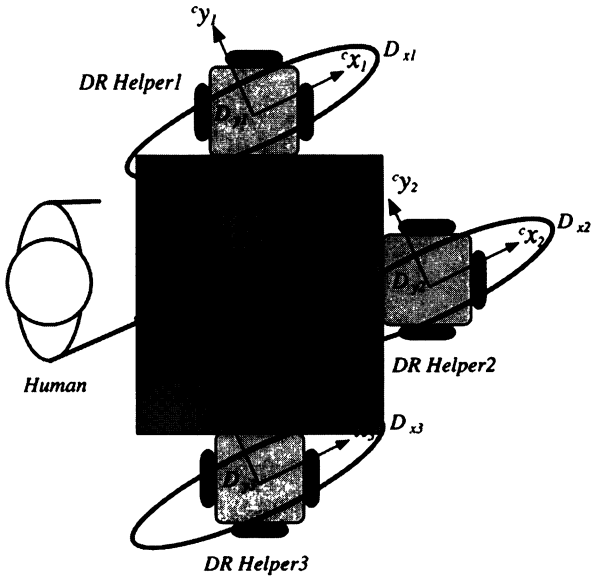


Fig. 5 Maneuverability of system

章では，ロボットに仮想的に実現されたキャスタの運動特性を作業状態に応じて変化させることによって，結果的に搬送物体の運動特性を変化させ，人間の操作性をより向上させる制御系を提案する．

5.1 適応キャスタアクション

実際，ロボットのみかけの運動特性は，式 (6)，(8) における減衰係数やキャスタのオフセット r_i によって変化する．そこで，本研究では，これらのパラメータを作業に応じて変化させることによって，結果的に搬送物体の運動特性を変化させ人間の操作性の向上を実現することを考える．

人間による物体の操り作業を考えると，人間が物体に意図して加えた力の向きに関しては滑らかな運動を生成し，それ以外の方向には，不必要な運動を生成しないシステムが理想的である．いま，各ロボットはキャスタの運動特性を模擬しており，そのキャスタの車輪が人間が意図して物体に加えた力の向きに瞬間的に回転するものと仮定する．このとき，**Fig. 5** に示すように各ロボットをキャスタの進行方向の向きに速度が発生しやすいように，異方的なダンピング特性を実現することができれば，人間の操作性を向上させることができると考えられる．

そこで，本研究では，キャスタ座標系の y 軸方向に関する減衰係数 ${}^cD_{yi} \in R$ を変数 k_i $(k_i \geq 1)$ に基づいて ${}^cD_{yi} = k_i\ {}^cD_{xi}$ となるように指定することを考え，式 (6) を次式のように修正する．

$$\begin{bmatrix} {}^c\dot{x}_i \\ {}^c\dot{y}_i \\ {}^r\dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^cD_{xi} & & 0 \\ & k_i\ {}^cD_{xi} & \\ 0 & & {}^rD_{\theta i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^cf_{xi} \\ {}^cf_{yi} \\ {}^rn_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

このとき，式 (8) で表されたキャスタ座標系の回転角速度を求める式は，式 (7) より次式のように修正される．

$${}^c\dot{\theta}_i = \frac{1}{r_i k_i\ {}^cD_{xi}}\ {}^cf_{yi} \quad (10)$$

式 (9)，(10) を用いて各ロボットを制御することにより，ある瞬間のキャスタ座標系の向きにおいて，任意にロボットのダンピング特性を指定することが可能となる．

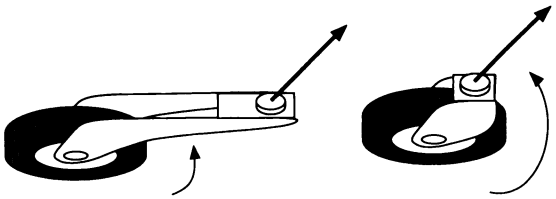


Fig. 6 Adaptive caster action

また，各ロボットを前述のように制御し，かつキャスタのオフセット r_i を変化させると，各ロボットの運動特性を大きく変化させることができる．例えば，**Fig. 6** (a) に示すようにキャスタのオフセット r_i を大きくすれば，式 (10) よりキャスタ座標系の回転速度は小さくなり，進行方向に垂直な力成分 ${}^cf_{yi}$ より生じるロボットの運動への影響を小さくすることができる．これにより，直進運動の安定性が増す．

一方，Fig. 6 (b) に示すようにオフセット r_i および k_i を小さくすると，式 (10) よりある力がロボットに働いたときのキャスタ座標系の回転速度は大きくなり，力の加わった方向に瞬間的に回転する．これにより，ロボットがあたかも等方的なダンピング特性を有しているかのように運動を生成することができ，結果としてロボットの全方向移動を実現することができる．

作業に応じてロボットに実現されたキャスタのオフセットを変化させ，その運動特性を変化させることができれば，それらのロボットによって把持された物体の運動特性を変化させることが可能となり，人間の操作性が向上すると考えられる．本研究では，このような，作業に応じてキャスタの運動特性を変化させ結果的に物体の操作性を変化させる手法を適応キャスタアクションと呼ぶ．

ここで，適応キャスタアクションの一例として，搬送物体の速度に応じてオフセットを変化させる手法を紹介する．一般的な物体の操り作業では，移動距離の長い搬送作業と，細かい位置決め作業とに大別される．長い距離の搬送作業においては，安定した直進運動を実現することが有効であり，また，細かい位置決め作業等では，搬送物体を全方向に動かすことができれば，人間の操作性が向上する．

そこで，本研究では，各ロボットの進行方向への速度 ${}^c\dot{x}_i$ が大きいときには長い距離の搬送作業をしているものとして，Fig. 6 (a) に示すように r_i を大きくし，安定した直進運動を実現させる．これにより，人間は外乱などの影響を大きく受けることなく，搬送物体を目的地まで容易に搬送することができる．

搬送物体が目的地に近づくと，人間は物体の搬送速度を遅くし，正確な位置決め作業を行おうとする．そこで，Fig. 6 (b) に示すように，${}^c\dot{x}_i$ に基づいてキャスタのオフセット r_i および k_i を小さくすることにより，各ロボットの全方向運動を可能にさせる．これにより，搬送物体の全方向移動がほぼ実現し，人間が物体に加える操作力に基づいて搬送物体を容易に配置することができる．

5.2 適応デュアルキャスタアクション

前節で示したような，適応キャスタアクションを用いると，作

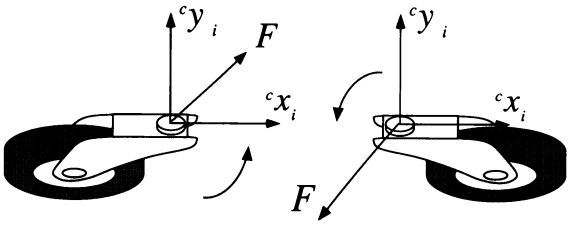


Fig. 7 Adaptive dual caster action

業に応じて，物体の操作性を大きく向上させることが可能となる．しかし，ロボットがFig. 5に示すような異方的なダンピング特性を持ち，かつキャスタのオフセットが大きい場合，人間の操作性が損なわれるおそれがある．

これは，実際のキャスタにおいてよく知られているが，Fig. 3 (b) に示すような $^cf_{xi} < 0$ となる場合である．このとき，各ロボットのキャスタ座標系は90度以上回転することなしにロボットに加えられた力の向きにキャスタ座標系の x 軸を向けることはできない．この場合，異方的なダンピング特性を有したキャスタが，その進行方向を力の向きに一致させるまでの間の物体の運動特性は非常に複雑となり，結果的に物体の操作性が著しく低下する．

この問題を解決するために，本研究では，仮想的に実現されたキャスタの車輪の位置すなわちオフセットの正負をキャスタ座標系の x 軸に働く力 $^cf_{xi}$ の正負に基づいて，**Fig. 7** に示すように変化させる手法を提案する．すなわち，式（10）を次式のように書き直すことにより，キャスタ座標系の回転速度を生成する．

$$^c\dot{\theta}_i = \frac{1}{R_i k_i \, {}^cD_{xi}} {}^cf_{yi} \tag{11}$$

ここで

$$R_i = \begin{cases} r_i, & for \quad {}^cf_{xi} \geq 0 \\ -r_i, & for \quad {}^cf_{xi} < 0 \end{cases} \tag{12}$$

である．本研究では，この手法を適応デュアルキャスタアクションと呼ぶことにする．適応デュアルキャスタアクションを用いることにより，各ロボットはそのキャスタ座標系の x 軸を，ロボットに働く力の向きに90度以上回転させることなく一致させることができ，人間による物体の操作性をより向上させることができる．

6. 実　　験

提案した制御アルゴリズムを，Fig. 1に示すように複数の人間協調型全方向移動ロボットDR Helperに適用することにより，人間と協調した単一物体の搬送実験を行った．DR Helperは，浅間ら[11]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[12]，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，PC/AT互換機とバッテリを搭載し，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できる．

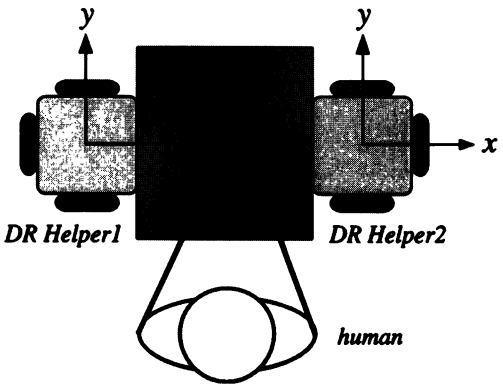


Fig. 8 Experimental system

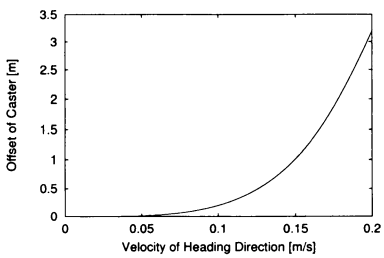


Fig. 9 Offset of caster r_i

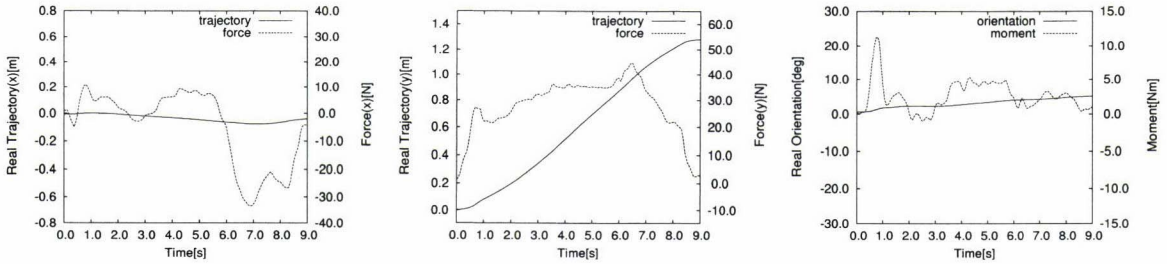
本実験では，適応デュアルキャスタアクションの有効性を示すために，2台のDR Helperを **Fig. 8** に示すように配置し，人間の操作力に基づく物体の操り実験を行った．初めに，距離の長い搬送作業実験を行い，次に細かい位置決め作業実験を行った．このとき，キャスタのオフセット r_i は，5章で提案した適応デュアルキャスタアクションに基づいて次式のように指定した．

$$r_i = 2000 \, {}^c\dot{x}_i^4 + 0.001 \tag{13}$$

式（13）は **Fig. 9** のような特性となり，ロボットの速度が遅い場合にはキャスタのオフセットが小さくなり物体の全方向移動を実現し，速度が速くなるにつれてキャスタのオフセットを大きくし物体の搬送における直進の安定性が増すように設計した．

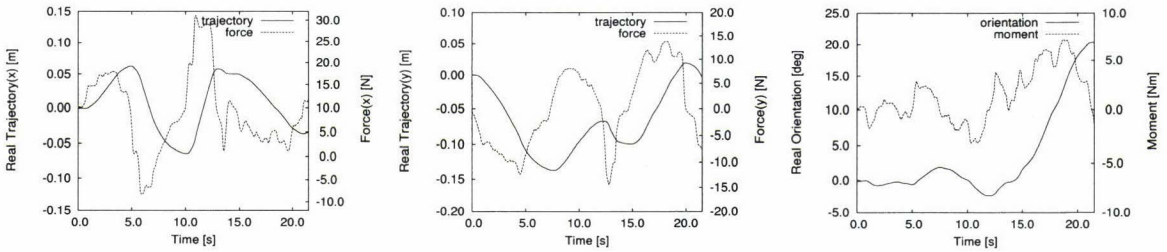
搬送作業実験および位置決め作業実験の結果をそれぞれ **Fig. 10**, **Fig. 11** に示す．これらは，特にFig. 8のDR Helper1に働いた力／モーメントと，その力／モーメントによって式 (9), (11) に基づいて生成されたロボットの実際の運動を表したものである．ロボットに働く力／モーメントはロボットに搭載されたボディフォースセンサによって計測されるため，搬送物体を介した人間による操作力と他のロボットとの相互作用によって発生する力／モーメントの合力となる．また，ロボットの運動はロボットのアクチュエータ部に搭載されたエンコーダによって得ることができる．

搬送作業実験では，Fig. 8に示す座標系の y 軸方向に，人間が力を加えることにより行った．また，適応デュアルキャスタアクションの有効性を示すため，搬送作業中に x 軸方向に大きな力を意図的に加えた．そのときの結果をFig. 10に示す．Fig. 10から分かるように，搬送途中で進行方向の垂直の向き（x 軸）に，大きな力が加わっているにもかかわらず，ロボットは，そ



(a) x-axis (b) y-axis (c) rotation

Fig. 10 Experimental results of transporting an object



(a) x-axis (b) y-axis (c) rotation

Fig. 11 Experimental results of arranging an object

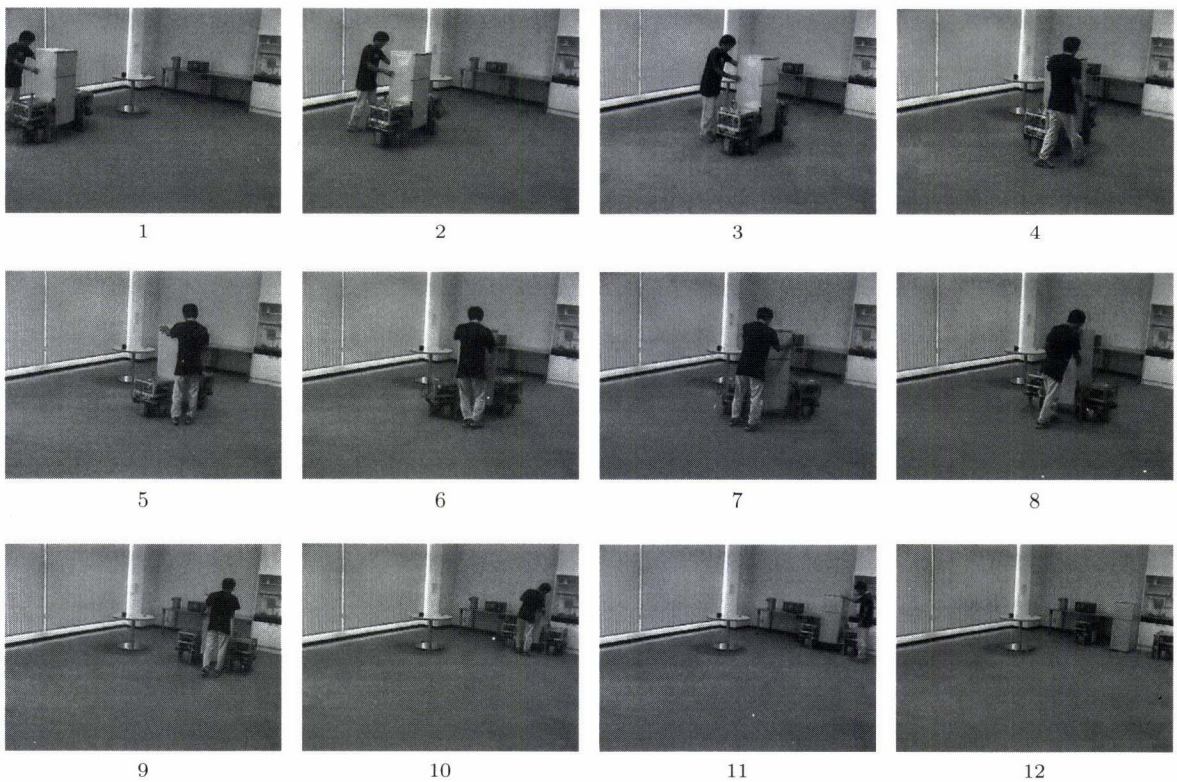


Fig. 12 Example task by DR helpers

の力にほとんど影響を受けずに，y 軸方向への搬送を実現していることが分かる．

また，位置決め作業実験では，人間が物体に任意に力／モーメントを加えることによって，物体の操り作業を行った．Fig. 11 に示すように，ロボットはロボットに働く力／モーメントの大きさ，方向に基づいて運動を行っている．これにより，物体は

ロボットに働く力／モーメントに基づいて並進・回転運動を行い，全方向への物体の操りが実現できることが分かる．

また，実験の一例として，2台のDR Helperを用いて，実際に家庭用の冷蔵庫を搬送し，目的地に設置する実験を行った．この結果を**Fig. 12**に示す．この実験では，長い距離の搬送作業と細かい位置決め作業を組み合わせて行うことにより，結果的に目的地に物体を搬送・設置するという一連の作業が連続的に実現可能であることを示している．これらの実験結果より，人間は複数の移動ロボットと協調してうまく物体のハンドリングを実現できていることが分かる．

7. おわりに

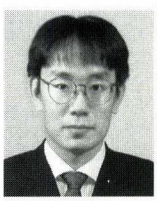
本論文では，複数の分散制御された移動ロボットと人間が協調して作業を実現するロボットシステム“Distributed Robot Helpers”に基づき，単一物体を操るための制御系を提案した．この制御系は，適応デュアルキャスタアクションと呼ばれ，それぞれのロボットがキャスタの運動特性を模擬するように制御され，かつ，作業の目的に応じて制御パラメータを変化させることにより人間の負担を軽減した単一物体の操りを実現するものである．この制御手法を用いることにより，人間が容易に物体の操りを実現できることはもちろんであるが，各ロボット間の幾何学的関係や物体の大きさ等を必要とせずに，複数の移動ロボットを協調的に用いることが可能となる．また，移動ロボットにおいて問題となる，車輪と路面との滑りの問題も解決することができる．本研究では，提案した制御系を複数の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．

本論文で提案する手法では，キャスタの運動はロボットに加わる力／モーメントに対して受動的に生成される．ここで，物体の複雑な操り等を実現しようとした場合，キャスタの車輪の進行方向が人間の意図した方向と異なるおそれがあり，その場合，物体の運動特性は非常に複雑となり，物体の操作性が低下する恐れがある．受動的なキャスタの利点を生かしつつ，人間の意図に基づいてキャスタの進行方向を能動的に変化させることにより物体の操作性をさらに向上させることが今後の課題である．

なお，本研究の一部は平成12年度～平成14年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（A）(2)(12305028)，奨励研究（A）(13750408）の援助を受けて行われた．ここに感謝の意を表す．

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, pp.1632–1642, 1989.
[2] O.M. Al-Jarrah and 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.
[3] R. Ikeura, H. Monden and H. Inooka: “Cooperative Motion Control of a Robot and a Human,” IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp.112–117, 1994.
[4] T. Fukuda, T. Ueyama, K. Kosuge and F. Arai: “Self-organizing Cellular Robotic System —Communication Architecture with Two Master Cells in Cellular Robotic Network—,” Proc. 1991 American Control Conference, 3, pp.2256–2261, 1991.
[5] J. E. Colgate, W. Wannasuphoprasit and M. A. Peshkin: “Cobots : Robots for Collaboration with Human Operators,” Proc. of the Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition, DSC-vol.58, pp.433–439, 1996.
[6] K. Kosuge, M. Sato and N. Kazamura: “Mobile Robot Helper,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.583–588, 2000.
[7] O. Khatib: “Mobile manipulation : The robotic assistant,” Robotics and Autonomous Systems, 26, pp.175–183, 1999.
[8] 平田泰久，初雁卓郎，小菅一弘，浅間一，嘉悦早人，川端邦明：“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”，日本機械学会論文集（C編），vol.68, no.668, pp.181–188, 2002.
[9] R.J. Anderson and M.W. Spong: “Bilateral Control of Telemanipulators with Time Delay,” IEEE Trans. on Automatic Control, vol.34, no.5, pp.494–501, 1989.
[10] K. Kosuge, H. Yoshida, D, Taguchi and T. Fukuda: “Robot-Human Collaboration for New Robotic Application,” Proc. of IEEE IECON’94, pp.713–718, 1994.
[11] 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.
[12] Y. Hirata, K. Kosuge, T. Oosumi, H. Asama, H. Kaetsu and K. Kawabata: “Coordinated Transportation of a Single Object by Omni-Directional Mobile Robots with Body Force Sensor,” Journal of Robotics and Mechatronics, pp.242–248, 2000.



平田泰久（Yasuhisa Hirata）

1975年5月18日生．1998年東北大学工学部機械知能工学科卒業．2000年東北大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了．同年東北大学大学院工学研究科助手．2002年11月より科学技術振興事業団さきがけ研究21“相互作用と賢さ”領域研究員（兼任），現在に至る．複数ロボットの協調，ロボットヘルパー，パワーアシストシステム，歩行支援システム等の研究に従事．2001年日本ロボット学会研究奨励賞受賞．IEEE，日本機械学会等の会員．（日本ロボット学会正会員）



小菅一弘（Kazuhiro Kosuge）

1955年10月2日生．1980年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了．同年4月日本電装株式会社（現株式会社デンソー）入社．1982年10月東京工業大学工学部助手．1990年9月名古屋大学工学部助教授を経て，1995年3月より東北大学大学院工学部教授，1997年4月より東北大学大学院工学研究科教授（大学院重点化による配置換），現在に至る．この間，1989～1990年MIT客員研究員，1998～2001年IEEE Robotics and Automation Society Vice President．工学博士．ロボット，メカトロニクス，マン・マシンシステム，知能機械などの研究に従事．1998年Nakamura Prize for IROS’97 Best Paper，1999年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞，2002年日本機械学会賞（論文）等受賞．IEEE，日本機械学会，計測自動制御学会等の会員．（日本ロボット学会正会員）



淺間 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．同研究所生化学システム研究室研究員，工学基盤研究部技術開発促進室長を経て，2002年分散適応ロボティクス研究ユニットリーダー．現在，東京大学人工物工学研究センター教授．自律分散型ロボットシステム，創発ロボットシステムの研究や複数自律移動ロボットの協調技術，知的データキャリアとその応用技術の開発等に従事．1995年日本機械学会ロボメック賞，RoboCup-98 Japan Open人工知能学会賞（UTTORI United Team），2001年日本機械学会ロボメカ部門学術業績賞，日本産業デザイン振興会2002年グッドデザイン賞（新領域デザイン部門）等受賞．IEEE，日本機械学会，計測自動制御学会等の会員．工学博士（東京大学）．

（日本ロボット学会正会員）



川端邦明（Kuniaki Kawabata）

1970年2月3日生．1994年法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了．1997年法政大学大学院工学研究科電気工学専攻後期博士課程修了．博士（工学）．同年，理化学研究所基礎科学特別研究員として生化学システム研究室勤務．2000年理化学研究所工学基盤研究部基盤技術開発室研究員．2002年理化学研究所分散適応ロボティクス研究ユニット研究員．自律分散ロボットシステム，移動ロボット，環境知能化デバイスに関する研究に従事．2002年計測自動制御学会システム・情報部門部門賞奨励賞受賞．IEEE，電気学会，日本機械学会，計測自動制御学会，人工知能学会，日本原子力学会等の会員．（日本ロボット学会正会員）



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の研究に従事．2002年分散適応ロボティクス研究ユニットへ移籍．先任技師として現在に至る．日本機械学会．精密工学会等の会員．

（日本ロボット学会正会員）