

人間と複数の移動ロボットによる大型物体のハンドリング*

平田 泰久^{*1}, 小菅 一弘^{*2}, 浅間 一^{*3}
嘉悦 早人^{*4}, 川端 邦明^{*4}Handling of a Large Object by Multiple Mobile Robots
in Cooperation with a HumanYasuhisa HIRATA^{*5}, Kazuhiro KOSUGE, Hajime ASAMA,
Hayato KAETSU and Kuniaki KAWABATA^{*5} Department of Bioengineering and Robotics, Tohoku University,
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

In this paper, we propose a decentralized control algorithm of multiple mobile robots which have been developed for manipulating a large or a long object in cooperation with a human. In this algorithm, each robot is controlled as if it has a caster-like dynamics around a representative point attached to the object and the manipulation of the large or the long object is realized easily in cooperation with a human. The proposed control algorithm is experimentally applied to two omnidirectional mobile robots referred to as DR Helper and experimental results illustrate the validity of the proposed control algorithm.

Key Words: Robot, Moving Robot, Motion Control, Coordinated Motion Control, Handling, Virtual Caster-Like Dynamics

1. はじめに

現在、工場内はもちろん、医療・福祉現場や家庭、オフィス等の新しいフィールドでのロボットの利用が期待され、人間と共存・共生し、人間を多面的に支援できる新しいロボットシステムの研究・開発が数多く行われている^{(1)-(6)etc.}。著者らもロボットヘルパーと呼ばれる人間協調型ロボットシステムを開発し、物体のハンドリングを例に取り、人間と協調した効果的な物体の操りを実現する手法を提案してきた⁽²⁾⁽⁴⁾。

特に、文献⁽⁴⁾では比較的小型な複数台の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、全方向移動ベースを有した分散型ロボットヘルパー“DR Helper”を開発した。そして、図1に示す

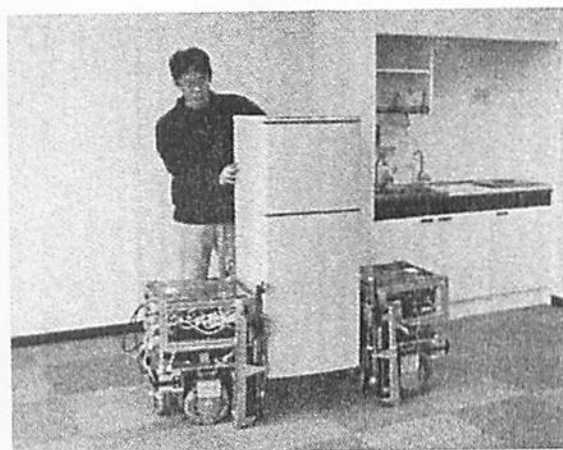


Fig. 1 Handling an Object with Robot Helpers

ような複数の DR Helper と人間が協調して単一物体の操りを実現するための分散制御系を提案してきた。

この制御系では、全方向移動ロボットが物体をしっかり把持し、各ロボットが図2に示すような、通常家具等に取り付けられるキャスタと同等の運動特性を持つように制御される。これにより、ロボットによって把持された物体は、複数のキャスタが取り付けられた

* 原稿受付 2003年7月9日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科、科学技術振興機構さきさき研究21(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。^{*2} 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)。^{*3} 正員、東京大学人工物工学研究センター(☎153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1)。^{*4} 正員、理化学研究所分散適応ロボティクス研究ユニット(☎351-0198 和光市広沢2-1)。

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

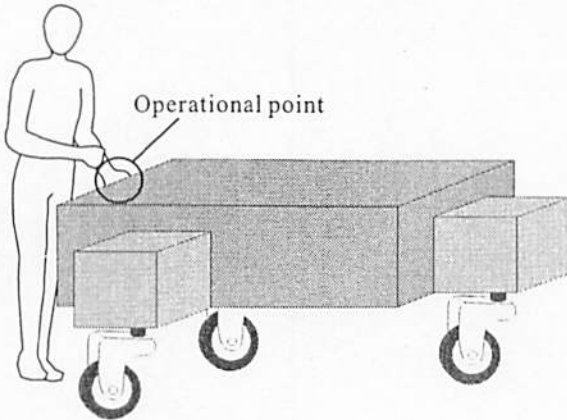


Fig. 2 Manipulation using Multiple Casters

物体と同様の運動特性を示し、人間は物体に加える操作力に基づいて、その物体を容易に操ることが可能となる。

しかし、この制御系では、各ロボットに実現された仮想的なキャストの向きが物体の運動方向と一致しない場合、その物体の動特性が非常に複雑になるという問題がある。特に、長尺物や大型物体の操りにおいては、この複雑な動特性のため、人間が物体に力/モーメントを加える点（本論文ではオペレーションポイントと呼ぶ）に、物体の目的の運動を実現させるための正確な力/モーメントを加えることが難しくなり、結果として長尺物や大型物体の操りが困難となる。このような特性に基づく操作の難しさは、ストレッチャやキャスト付の大型の机を1人で操る場合においてよく知られている。

そこで、本研究では、このような長尺物や大型物体を複数の移動ロボットと人間が協調して効果的に操る手法について考え、それらを実現する複数の移動ロボットのための分散協調制御系を提案する。以下、本論文では、はじめに、提案する制御系を説明し、次にその概念を実現するための各ロボットの制御系を提案する。最後に、提案する制御系を実際に人間協調型全方向移動ロボット Dr Helper に適用し、物体の操り実験を行い、その有効性を確認する。

2. 単純な動特性に基づく物体の操り

長尺物や大型物体の操りを実現する一つの手法として、環境情報を利用することが考えられる。著者らは文献⁽⁵⁾において、環境情報を有した複数の移動ロボットと人間との協調による物体のハンドリング手法を提案してきた。環境情報を利用し、その環境情報に基づいて移動ロボットを適切に制御すると、狭い場所や障害物の多い場所でも長尺物や大型物体を容易に操るこ

とが可能となる。しかし、環境情報を得るための視覚センサ等のハードウェアやその画像処理手法の確立等、実用的な観点からは多くの問題が存在する。そこで、本研究では、環境情報を用いることなく、人間が物体に加える操作力のみによって効果的に物体のハンドリングを実現する手法について考える。

荒井ら⁽⁶⁾は、人間とマニピュレータによる長尺物の操りを実現するため、マニピュレータの手先に非ホロノミック拘束を持たせる制御系を提案した。これにより、人間は長尺物にモーメントを加えることなく、並進力のみで物体の操作が可能となり、容易な長尺物の操りを実現した。また、著者ら⁽⁷⁾は、D.E. Whitney により提案された RCC デバイスの概念⁽⁸⁾を拡張し、双腕マニピュレータによる、ペグ・イン・ホール作業を容易に実現する手法を提案した。この手法は、ペグの先に制御系を設計する代表点を設定し、その代表点回りにあるインピーダンス特性を持つようにロボットを制御するというものである。

これらの研究から、長尺物の操り作業や Peg-in-Hole のような複雑な作業を実現するためには、操る物体にある代表点を設定し、その点回り非ホロノミック拘束やインピーダンス特性といった単純な動特性を持つような制御系を設計することが有効であることがわかる。そこで、本研究では、図3に示されるように物体にある代表点を設定し、物体がその代表点回りにある単純な動特性を持つように複数の移動ロボットを制御する手法を提案する。特に、本論文では、移動ロボットに著者らが開発した人間協調型全方向移動ロボット“DR Helper”⁽⁴⁾を用いるものとし、複数の全方向移動ロボットのための制御系を提案する。

3. 制御アルゴリズム

本章では、複数の全方向移動ロボットに把持された物体に仮想的にキャストの動特性を持たせることを考え、それを実現するための各移動ロボットの制御手法を提案する。

3.1 キャスタの運動特性 著者らは複数の移動ロボットを用い協調して物体のハンドリングを実現するために、各ロボットの物体の把持点に仮想的にキャストの運動特性を持たせる制御系を提案してきた⁽⁴⁾。本制御系では、加わる力に対して受動的なキャストの運動特性を利用するため、移動ロボットにおいては避けることができない、車輪と路面とのすべりに大きな影響を受けること無く協調搬送を実現することができた。しかし、前章でも述べたように、各把持点に実現された仮想的なキャストそれぞれが、物体の運動方向

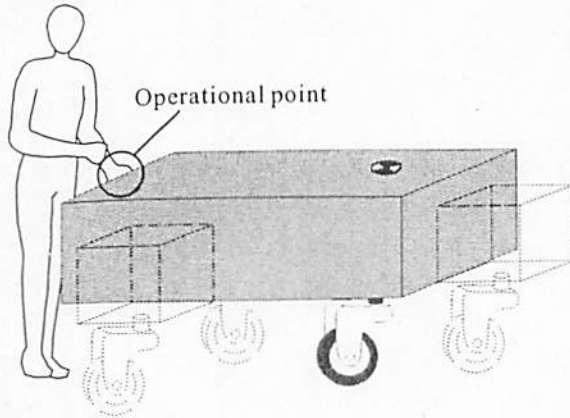


Fig. 3 Manipulation using a Caster

と異なる方向を向いた場合、その物体の動特性は非常に複雑になり、人間の操作力による物体の操りは困難となる。

ただし、複数の移動ロボットを協調的に用いるためには、力に対して受動的なキャストの運動特性が非常に有効である⁽⁴⁾。また、著者らが提案している“適応キャストアクション”⁽⁴⁾という手法を用いると、キャストの運動特性を任意に変化させることができ、結果的に物体の運動特性を変化させ、比較的小型の物体に関しては、1人の人間でも容易に操ることが可能となる。そこで、本研究では、このような安定性と操作性の向上が容易に実現可能なキャストの概念を用いることを考え、各ロボットの把持点回りにおいて、このキャストの運動特性に近い動特性を実現するように制御系を設計し、結果的に図3に示すような物体の代表点の一つの仮想的なキャストが存在するかのような各ロボットの制御手法を提案する。

物体の代表点にキャストという比較的単純な運動特性を実現し、その代表点の位置を作業に応じて適切に選ぶことによって、人は容易に長尺物や大型物体の操りが可能となる。また、著者らが提案した適用キャストアクションの手法を用いることにより、物体の代表点の運動特性を作業に応じて任意に変化させることも可能となり、その操作性をより向上させることができると考えられる。さらに、各ロボットはその把持点においてキャストの運動特性と近い動特性を持つように制御されることから、車輪と地面とのすべりにロバストな制御系を設計することも可能となる。

3.2 座標系 複数の全方向移動ロボットをそれぞれの把持点回りで制御することによって、結果的に物体の代表点回りに仮想的なキャストの運動特性を持たせるために、本節では、はじめに、物体や各ロボットに図4に示すような座標系を設定する。 ${}^b\Sigma$ はベ-

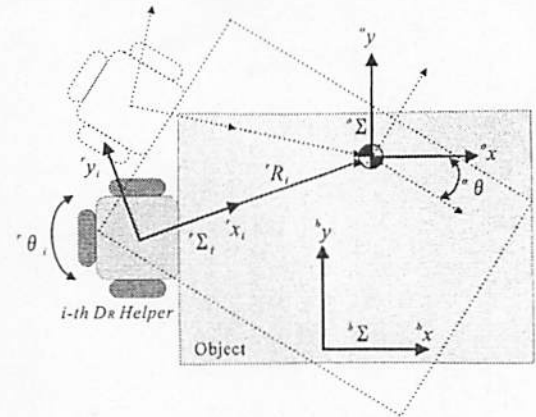


Fig. 4 Relationship between Robot and Object

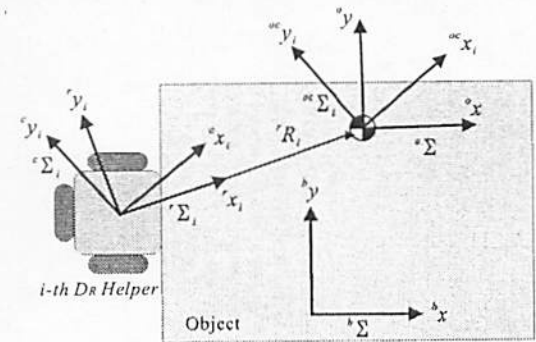


Fig. 5 Caster Coordinate Systems

ス座標系であり、物体や各ロボットの運動を記述するための座標系である。 ${}^o\Sigma$ は物体座標系であり、これは物体の代表点に設定され、物体とともに運動する座標系である。 ${}^r\Sigma_i$ はロボット座標系であり、 i 番目のロボットの把持点に取り付けられた座標系である。ただし、ロボット座標系の x 軸は、その延長線が物体の代表点と一致するものとする。また、各ロボットは物体をしっかり把持し、各座標系間の幾何学的関係は変化しないものと仮定する。ここで、物体と i 番目のロボットのベース座標系に関する回転角度をそれぞれ ${}^o\theta_i$ 、 ${}^r\theta_i$ とする。

さらに、各ロボットと物体の代表点にキャストの運動特性を実現するため、ここでは、各ロボットと物体の代表点にそれぞれ図5に示すようなキャスト座標系 ${}^c\Sigma_i$ 、 ${}^{oc}\Sigma_i$ を設定する。ここで、各キャスト座標系の x 軸は仮想的に実現されるキャスト車輪の進行方向とする。すなわち、キャスト座標系の原点回りの回転は図6に示されるキャストの車輪サポートの回転運動を表す。キャスト座標系のベース座標系に関する角度を ${}^c\theta_i$ 、 ${}^{oc}\theta_i$ とし、各ロボットと物体の代表点のキャスト座標系の各軸は常に平行である(${}^c\theta_i = {}^{oc}\theta_i$)とする。

3.3 各ロボットの制御系 本節では、各ロボットの把持点回りで運動制御系について考える。はじ

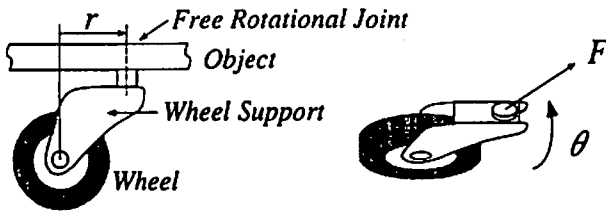


Fig. 6 Caster

めに、各ロボットに働く並進力に基づいて、その進行方向を回転させる仮想的なキャストの運動について考えよう。いま、全方向移動ロボットの車輪が指定した速度で回転するものと仮定し、各ロボットに働く並進力に基づいて仮想的に実現されるキャストの車輪の進行方向の運動を実現するため、次式の特性を満たすように各ロボットを制御する。

$${}^c \dot{x}_i = \frac{{}^c f_{xi}}{{}^c D_{xi}} \quad (1)$$

ここで ${}^c D_{xi} \in R$ は正の減衰係数を表し、 ${}^c \dot{x}_i \in R$ はキャスト座標系の x 軸方向への速度を表す。また、 ${}^c f_{xi}$ はキャスト座標系の x 軸に加わる並進力とする。

次にキャストの車輪サポートの運動を実現するため、キャスト座標系に働く力に基づいて、車輪サポートの回転速度すなわちキャスト座標系の回転速度 ${}^c \dot{\theta}_i$ を次式を用いて導出する。

$${}^c \dot{\theta}_i = \frac{1}{{}^c D_{yi} r_i} {}^c f_{yi} \quad (2)$$

ここで ${}^c D_{yi} \in R$ は正の減衰係数であり、 r_i はキャスト車輪の車軸とフリージョイントとの距離すなわち図6に示すキャストのオフセットを表す。 ${}^c f_{yi}$ はキャスト座標系の y 軸方向に働く並進力である。ここで、車輪サポートの回転に基づく仮想的なフリージョイントの運動を実現するため、導出されたキャスト座標系の回転角速度に基づいて、次式の特性を満たすように各ロボットの運動を生成する。また、キャスト座標系を原点回りに ${}^c \dot{\theta}_i$ に基づいて回転させる。

$${}^c \dot{y}_i = r_i {}^c \dot{\theta}_i \quad (3)$$

ここで、 ${}^c \dot{y}_i \in R$ は各ロボットのキャスト座標系の y 軸方向への速度を表す。

ここで、式(1)~(3)で示される各ロボットの運動特性を整理すると次式ようになる。

$$\begin{bmatrix} {}^c \dot{x}_i \\ {}^c \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^c D_{xi} & 0 \\ 0 & {}^c D_{yi} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^c f_{xi} \\ {}^c f_{yi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)で導出される並進速度に基づいて並進方向へのロボットの運動を実現し、かつ式(2)で導出された

キャスト座標系の回転角速度に基づいてキャスト座標系を原点回りに回転させると、各ロボットの把持点には、その把持点に加わる並進力に関してのみキャストと同等の運動特性を実現したこととなる。それゆえ、各ロボットの車輪にすべり等が生じたとしても、人間が物体の搬送における目標方向に操作力を加え続けている限り、キャストの受動的な特性から自然にキャストがその方向に倣い、各ロボット間における座標系の較正等は必要ない。

次に、人間が物体を介して各ロボットに加える力に基づいて、物体の代表点の姿勢 θ を制御することを考えよう。ここでは、人間が物体に加える並進力および、人間が意図せずに加えたモーメントまた各ロボット間で物体を介して発生する力/モーメントに基づいて、各ロボットをその把持点回り次式の特性を満たすように制御する。

$$\begin{bmatrix} {}^r \dot{y}_i \\ {}^r \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^r D_{yi} & -{}^r D_{yi} {}^r R_i \\ -{}^r D_{\theta i} / {}^r R_i & {}^r D_{\theta i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^r f_{yi} \\ {}^r n_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで ${}^r D_{yi}, {}^r D_{\theta i} \in R$ は正の減衰係数、 ${}^r f_{yi}, {}^r n_i \in R$ はロボット座標系に加わる力/モーメント、 ${}^r \dot{y}_i, {}^r \dot{\theta}_i \in R$ はロボット座標系におけるロボットの速度、 ${}^r R_i \in R$ をロボット座標系の原点から物体座標系の原点までの位置ベクトルとする。すなわち、各ロボットはそれぞれに設定された座標系において式(4)、(5)で導出される速度を実現するように制御される。

ただし、各ロボットに式(5)の特性を実現するためには、各ロボットは物体の代表点までの距離 ${}^r R_i$ をあらかじめ知る必要がある。このためには、代表点の位置をあらかじめ各ロボットに与えることや、物体の代表点に何らかの印を付け、視覚センサ等で認識を行う手法等が考えられる。また、著者らが文献⁽⁹⁾において提案している、複数のロボット間の位置や姿勢の幾何学的関係を推定する手法を用いれば、比較的簡単に代表点の位置を決定することが可能となる。

4. 物体の動特性

4.1 物体の代表点におけるみかけの動特性 本節では、各ロボットを前節で示した式(4)、(5)の特性を満たすように制御した時の、物体の代表点回りのみかけの動特性を導出する。いま、各ロボットが物体をしっかり把持し、物体とロボットとの間に相対運動が生じないと仮定すると、ロボットに加わる力/モーメントに関して次式の間係を得ることができる。

$${}^o c f = \sum_{i=1}^n {}^c f_i \quad (6)$$

$${}^o n = \sum_{i=1}^n (-{}^r R_i {}^r f_{yi} + {}^r n_i) \quad (7)$$

ここで、 ${}^c f_i = [{}^c f_{xi}, {}^c f_{yi}]^T$ である。また、 ${}^o f \in R^2$, ${}^o n \in R$ は物体のキャスト座標系および物体座標系において人間とすべてのロボットから加えられる力/モーメントを表す。

これらの関係から、 n 台のロボットによって把持された物体の代表点回りのみかけの動特性は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} {}^o f \\ {}^o n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n {}^c D_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n 2({}^r D_{\theta i} + {}^r R_i^2 {}^r D_{yi}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^o \dot{x} \\ {}^o \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 ${}^c D_i = \begin{bmatrix} {}^c D_{xi} & {}^c D_{yi} \end{bmatrix}$ は正の減衰係数からなる行列である。また、 ${}^o \dot{x}$, ${}^o \dot{\theta}$ は物体に設定されたキャスト座標系および物体座標系における物体の代表点の実際の速度・角速度を表し、次式のように表される。

$${}^o \dot{x} = [{}^c \dot{x}_i \quad {}^c \dot{y}_i]^T \quad (9)$$

$${}^o \dot{\theta} = {}^r \dot{\theta}_i = -\frac{{}^r \dot{y}_i}{{}^r R_i} \quad (10)$$

ここで、物体の代表点のみかけの動特性を指定するため、減衰係数を次式のように書き直す。

$${}^c D_i = {}^o D_i \quad (11)$$

$${}^r D_{\theta i} = \frac{{}^o D_{\theta i}}{2} - {}^r R_i^2 {}^r D_{yi} \quad (12)$$

このとき、結果として導出される物体の代表点のみかけの動特性は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} {}^o f \\ {}^o n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n {}^o D_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n {}^o D_{\theta i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^o \dot{x} \\ {}^o \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(11),(12)を用いて減衰係数を指定し、各ロボットを式(4),(5)の特性を満たすように制御することにより、結果的に物体の代表点における運動は式(13)に示されるような動特性を持つこととなる。この動特性は、物体の代表点が物体の代表点に加わる力/モーメントに基づいて、速度を生成するというものであり、そのときの物体の代表点のキャスト座標系の x 軸すなわち、仮想的なキャストの進行方向は、式(2)に基づいて決定される。これは、結果的に物体の代表点においてキャストの特性を実現したのと等価であると考えことができ、これにより、人間は物体の代表点に操作力を加えることにより、容易に大型物体の操りを実現することができる。

4.2 適応キャストアクション ロボットのみかけの運動特性は、各ロボットの制御を実現する減衰係数やキャストのオフセットによって変化する。中でも特に、キャストのオフセット r_i の変化は、その運動特性に大きく影響し、結果として搬送物体の代表点の運動特性を大きく変化させる。

r_i を大きくすればキャスト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より生じる物体の代表点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、 r_i を小さくすれば、ある力が物体の代表点に働いたときのキャスト座標系の回転速度は大きくなり、物体の代表点の全方向移動が可能となる。

このように、ロボットの制御パラメータを変化させ、キャストの運動特性を変化させる手法を、適応キャストアクションと呼ぶ。本研究では、ロボットの進行方向の速度に基づいてキャストのオフセットを変化させることにより、搬送物体の代表点の運動特性を変化させ、人間の負担をより軽減した単一物体の操りを実現する。

5. 実験

提案した制御アルゴリズムを図7に示される2台のDR Helperに適用することにより、図8に示されるような人間と協調した単一物体の操り実験を行った。DR Helperは、浅間ら⁽¹⁰⁾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⁽¹¹⁾、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できる。

この実験では、はじめに、搬送物体に代表点を設定し、人間が物体の代表点から離れた点に力を加えることにより、代表点回りの回転運動を実現させる。次に、ベース座標系 Σ_b に対して x 軸方向へ力を加え搬送作業を行う。最後に、物体の姿勢を一定に維持しながらベース座標系 Σ_b の y 軸方向への搬送作業を行うため、代表点近傍から y 軸方向に力を加え搬送作業を実現する。

本実験では、適応キャストアクションとして、キャストのオフセットを次式の特性を満たすように変化させる。

$$r_i = 2000 {}^c \dot{x}_i^4 + 0.001 \quad (14)$$

このような関数を用いると、ロボットに実現された仮

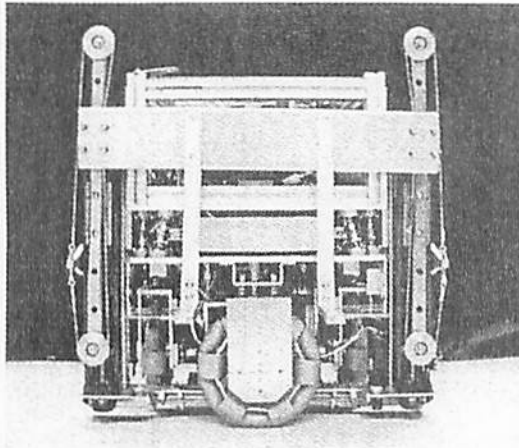


Fig. 7 DR Helper

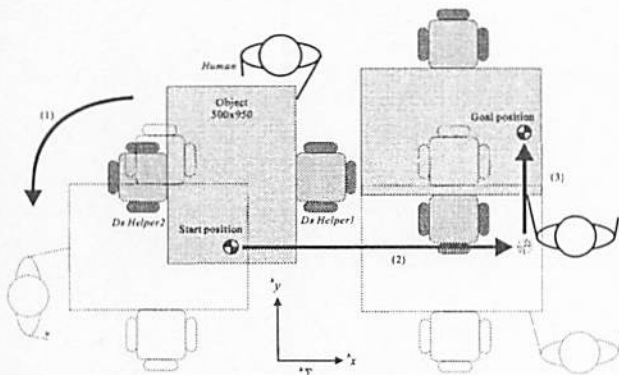


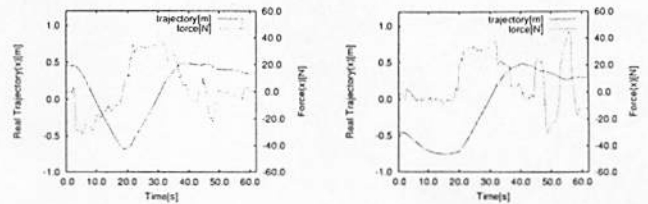
Fig. 8 Experimental Setup

想的なキャストの進行方向への速度が遅いときには、キャストのオフセットが小さくなりロボットの全方向移動が実現し、結果的に物体の代表点での全方向移動が実現しやすくなる。また、ロボットに実現された仮想的なキャストの進行方向への速度が速いときには、その進行方向の運動の安定性が増し、物体を遠くへ搬送しようとした場合には有効である。

実験結果を図9, 図10に示す。図9(I), (II)は各ロボットに加わる力・モーメントとそのときの運動を表したものであり、図9(III)は各ロボットと物体の代表点の軌跡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。

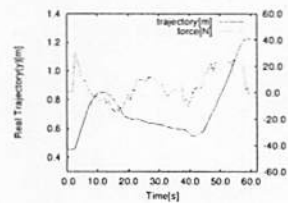
図9(I), (II)より、ロボットは加わっている力/モーメントに基づいてそれぞれ運動を生成していることがわかる。また、図9(III)より、(1)の軌跡において物体がほぼ代表点回りに回転しており、(2)の軌跡にお

いて x 軸方向に直進し、最後に (3) の軌跡において物体の姿勢を維持しながら y 軸方向に並進していることがわかる。このときの実験の様子を図10に示す。これらの実験結果より、多少の運動誤差はみられるものの、ほぼ物体の代表点回りにて目的の運動を実現していることがわかる。

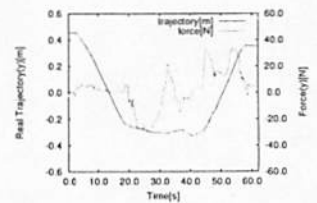


(a) x-axis

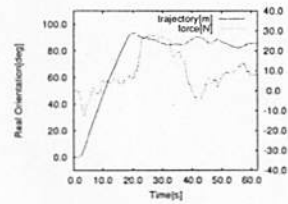
(a) x-axis



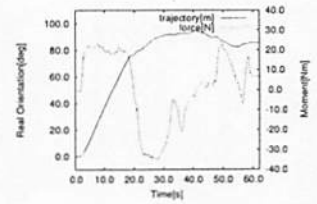
(b) y-axis



(b) y-axis



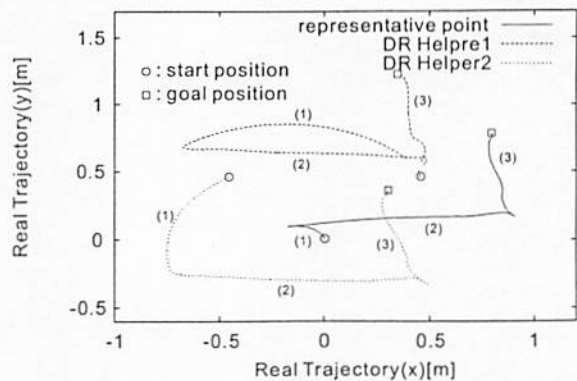
(c) rotation



(c) rotation

(I) DR Helper1

(II) DR Helper2



(III) Real Trajectory

Fig. 9 Experimental Results

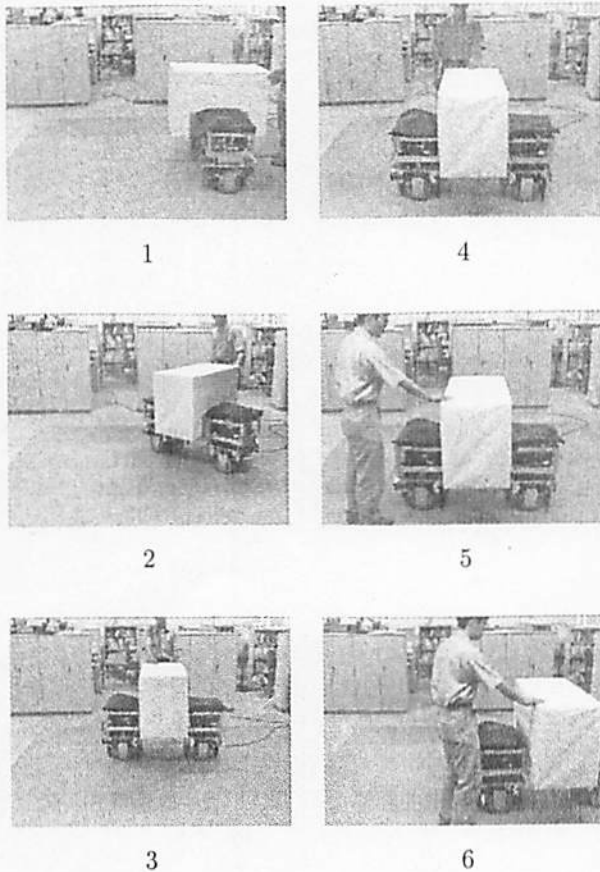


Fig. 10 Example of Experiments

6. お わ り に

本論文では、複数の移動ロボットと人間が協調して長尺物や大型物体を操るための分散協調制御系を提案した。この制御系では、全方向移動ロボットを各ロボットの把持点回りで制御することにより、結果的に物体に設定されたある代表点回りにキャストの特性を実現するというものである。物体に代表点を設定し、その代表点回りに単純な動特性を指定することによって、人間は物体に操作力を加えることにより、容易な長尺物や大型物体の操りを実現することができる。提案した制御系は2台のDR Helperに適用され、物体の協調操り実験を行うことによりその有効性が示された。

物体の代表点の位置や適応キャストアクションのパラメータは、行う作業や人間の癖、環境情報等に基づいて変化させると、より効率的に物体の操りを実現することができると考えられるが、これらに関する考察は今後の課題とする。

References

(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, M. Sato, N. Kazamura, "Mobile Robot Helper", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.583-588, 2000.
- (3) O. Khatib, "Mobile manipulation : The robotic assistant", *Robotics and Autonomous Systems*, No.26, pp.175-183, 1999.
- (4) Y. Hirata, K. Kosuge, "Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.458-463, 2000.
- (5) Y. Hirata, T. Takagi, K. Kosuge, H. Asama, H. Kaetsu, K. Kawabata, "Map-based Control of Distributed Robot Helpers for Transporting an Object in Cooperation with a Human", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3010-3015, 2001.
- (6) H. Arai, T. Takubo, Y. Hayashibara, K. Tanie, "Human-Robot Cooperative Manipulation Using a Virtual Nonholonomic Constraint", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.4064-4070, 2000.
- (7) K. Kosuge, H. Yoshida, T. Fukuda, M. Sakai, K. Kanitani, K. Hariki, "Unified Control for Dynamic Cooperative Manipulation", *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1042-1047, 1994.
- (8) D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", *Trans. of ASME, Journal of Dynamics System Measurement and Control*, Vol.104, pp.65-77, 1982.
- (9) K. Kosuge, H. Seki, "Estimation of Position and Orientation of Multiple Robots Handling an Unknown Single Object in Coordination", *Proc. of 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.984-989, 1999.
- (10) 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*, Vo.14, No.2, pp.249-254, 1996.
- (11) 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*, pp.242-248, 2000.