ロボット間の幾何学的関係を必要としない 複数移動マニピュレータによる単一物体のハンドリング

平田 泰久^{*1*2} 久米 洋平^{*1} 沢田 拓郎^{*1}
王 志東^{*1} 小菅 一弘^{*1}

Handling a Single Object by Multiple Mobile Manipulators without Using Geometric Relations among Robots

Yasuhisa Hirata^{*1*2}, Youhei Kume^{*1}, Takuro Sawada^{*1},
Zhi-dong Wang^{*1} and Kazuhiro Kosuge^{*1}

In this paper, we propose a decentralized control algorithm of multiple mobile manipulators handling a single object in coordination. In this algorithm, the grasping point of each robot is controlled as if it has a virtual 3-D caster dynamics and the handling of a single object by multiple mobile manipulators is realized based on a leader follower type control algorithm without using the geometric relations among robots. The proposed control algorithm is experimentally applied to multiple mobile manipulators, and the validity of the proposed control algorithm is illustrated by the experimental results.

Key Words: Multiple Mobile Manipulators, Coordinated Motion Control, Virtual 3-D Caster Dynamics

1. はじめに

現在、ロボット技術の発展により、ヒューマノイドをはじめとした人間型ロボットの研究 [1] [2] や移動マニピュレータに関する研究 [3] [4] 等が盛んに行われている。人間のように腕を持ち、さらに移動が可能であるシステムには様々な作業の実現が期待されている。また、そのようなロボットを複数台用いて協調させることができれば、ロボットを用いた作業の可能性が非常に広がると考えられる。

複数台のロボットを協調的に用いる研究は数多く行われており、双腕マニピュレータによる物体のマニピュレーションに関する研究 [5] [6] や複数台の移動ロボットを用いた物体搬送手法 [7] ~ [9] 等が提案されている。さらに、複数の移動マニピュレータを用いることにより物体の協調操りを実現する研究も近年提案されつつある [10] [11]。

複数の移動マニピュレータを協調して用いることができれば、1 台のロボットでは実現できないような大型物体のハンドリングや、複雑な作業を行うことが可能となる。また、システム全体での可搬重量が大きくなり、ロボット 1 台当たりの負担を軽

くすることができる。さらに、複数の移動マニピュレータと物体が閉リンク機構を構成するため、システム全体の機械的剛性を高めることができ、安定した作業が実現できる。

しかしながら、このような物体の協調ハンドリングを実現する制御系のほとんどは、操る物体の大きさや、各ロボットの把持点間の位置・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。このような仮定は、例えば実験室のような既知環境で、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、工場内はもちろん家庭内や屋外等の環境で、様々な形状の物体を操るような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、車輪等のデッドレコニングの信頼性の低さのために、たとえ操る物体の大きさや、各ロボット間の幾何学的関係が既知であろうとも、車輪等の滑りの影響を考慮した制御系の設計が必要となる。

そこで本研究では、操る物体の大きさや、各ロボットの把持点間の位置・姿勢の幾何学的関係を必要とせず、かつ移動ベースの車輪の滑り等に対してもロバストとなるような、複数の移動マニピュレータを用いた単一物体の操りのための分散協調制御系を提案することを考える。そして、提案した制御系を、複数台の単腕型移動マニピュレータや双腕型移動マニピュレータに適用し、実際に物体の操り実験を行うことにより、その有効性を確認する。

原稿受付 2004 年 4 月 15 日

^{*1}東北大学大学院

^{*2}科学技術振興機構、さきがけ研究 21

^{*1}Tohoku University

^{*2}PREST, JST

2. キャスタの運動

本研究では、操る物体の大きさや、各ロボットの把持点間の位置・姿勢の幾何学的関係を必要とせずに、複数の移動マニピュレータを用いて単一物体の操りを実現するために、キャスタの運動に注目する。一般に、家具等には **Fig. 1** に示すようなキャスタが取り付けられていることが多い。このようなキャスタは、車輪とフリージョイント、そして、それらをつなぐ車輪サポートから構成され、キャスタが取り付けられた物体に力を加えると、力の加わった方向にキャスタが回転し、その方向に物体を容易に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、物体が安定に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をしっかり把持し、さらにキャスタのように動作することができれば、その物体は複数のキャスタに支えられているのと同様であると考えられ、搬送物体の大きさや、各ロボットの把持点間の位置・姿勢の幾何学的関係が未知であっても、協調搬送を実現することができると考えられる。

このような概念に基づき、筆者らは二次元平面上において、複数の全方向移動ロボットをキャスタの特性を持つように制御することにより、複数移動ロボットによる単一物体の協調搬送を実現するための制御系を提案してきた [9]。しかしながら、この制御系は、二次元平面上の運動に限定して設計されているため、三次元空間内における物体の操り問題には適用することができない。

そこで本研究では、この制御系を拡張し、各ロボットの把持点を三次元空間内において仮想的にキャスタのような特性を持つように制御することにより、操る物体の大きさや、各ロボットの把持点間の位置・姿勢の幾何学的関係を必要とせず、単一物体を操るための分散協調制御系を提案する。ここでは、キャスタの特性を生かして物体のハンドリングを実現するため、**Fig. 2** に示すような、リーダー・フォロワ型の分散協調制御系を適用す

Fig. 1 Real caster

Fig. 2 Multiple mobile manipulators with virtual 3-D caster

ることを考える。

本手法では、リーダーと呼ばれるロボットに物体の目標軌道を与え、リーダーは与えられた目標軌道に基づいて物体に力・モーメントを加える。残りのフォロワと呼ばれるロボットは、その把持点に仮想的にキャスタの運動特性を持つように制御され、三次元空間内においてリーダーが加える力・モーメントによって結果的に把持点に加わる力の方向にそのキャスタの進行方向を回転させる。そして、その方向にリーダーの運動を推定することにより、リーダーと協調して単一物体の操りを実現する。

このようなキャスタ特性を利用した三次元空間内での物体の操りは、点接触を前提とした多指ハンドにおける物体の操り問題と似た性質を持ち、複数の点接触に基づいて物体に対して力・モーメントを発生させ、並進と回転を伴った物体の操りを実現することができる。また、キャスタ特性を利用したリーダー・フォロワ型の協調制御系を設計することにより、複数移動マニピュレータによる未知形状物体の操りが可能となる。その他、たとえば車輪の滑りなどにより、各ロボットに設定された座標系に相対誤差が生じたとしても、各ロボットに実現されたキャスタの車輪の角度は、キャスタの特性により自動的に物体の運動方向へ修正され、ロボット間で通信などを用いて座標系の較正をする必要なく協調搬送を継続することができる。以下、このような三次元空間内における仮想的なキャスタのことを仮想 3-D キャスタと呼ぶことにする。

3. 仮想 3-D キャスタ

本稿では、各フォロワの物体の把持点において仮想 3-D キャスタを実現し、リーダーによって加えられる力の方向に、仮想的に実現されるキャスタ車輪の進行方向を回転させ、その方向に物体の操りを実現することを考える。初めに、仮想 3-D キャスタの構造について考えよう。通常実際のキャスタは、**Fig. 1** に示すように、フリージョイントと車輪、そしてそれらをつなぐ車輪サポートから構成される。仮想 3-D キャスタの場合、実際のキャスタとはほぼ構成は同じとなるが、三次元空間内での運動を可能とするため、**Fig. 3** に示すように、キャスタの車輪は三次元空間内において常に車輪の進行方向（車輪から球面ジョイントへの方向）への並進運動とキャスタ車輪の仮想的な接地点での回転運動を行うことができる特殊な車輪とする。また、一般のキャスタにおけるフリージョイント部分は球面ジョイント

Fig. 3 Virtual 3-D caster motion

Fig. 4 Coordinate systems for virtual 3-D caster

のような構造とする。

次にこのような仮想 3-D キャスタの構造において実現される運動特性について考えよう。仮想 3-D キャスタは実際のキャスタと同様に、キャスタの球面ジョイント部に加わる力・モーメントに基づいて運動を生成する。その時のキャスタの運動は三つの特徴を持つ。一つは、Fig. 3 (a) に示すようなキャスタの球面ジョイント部に働く車輪の進行方向の力に基づく、キャスタ車輪の並進運動である。二つ目は Fig. 3 (b) に示すような、球面ジョイント部に働く車輪の進行方向に対して垂直な力に基づく、キャスタ車輪の仮想的な接地点回りの回転運動である。もう一つは、Fig. 3 (c) に示すような球面ジョイント部に加わるモーメントに基づく、球面ジョイント部の回転運動である。

本研究では、このような運動特性を持った仮想 3-D キャスタの球面ジョイント部の運動特性を各フォロワの把持点に実現するために、Fig. 4 に示されるような三つの座標系を定義する。一つは、仮想 3-D キャスタの車輪に取り付けられた車輪座標系 Σ_w であり、二つ目は仮想 3-D キャスタの球面ジョイント部に取り付けられ、車輪サポートとともに運動する車輪サポート座標系 Σ_s である。三つ目は仮想 3-D キャスタの球面ジョイント部に取り付けられ、球面ジョイント部に働くモーメントに基づいて運動を生成する球面ジョイント座標系 Σ_f である。ここで、車輪座標系と車輪サポート座標系の x 軸は仮想的に実現される 3-D キャスタ車輪の進行方向を向くように定義される。また、これらの座標系の運動と球面ジョイント座標系の運動は完全に独立している。

ここで、この三つの座標系に基づいて、仮想 3-D キャスタの運動を各フォロワの把持点（単腕型移動マニピュレータにおいてはマニピュレータの手先とし、双腕型移動マニピュレータにおいてはある代表点）に実現することを考える。初めに、キャスタの球面ジョイント部に働く力に基づいて、キャスタ車輪の進行方向への並進運動とキャスタ車輪の仮想的な接地点回りの回転運動を実現しなければならない。ここで、車輪サポート座標系に働く力・モーメントを $F_s = [f_s^T \ n_s^T]^T \in R^6$ 、車輪座標系に働く力・モーメントを $F_w = [f_w^T \ n_w^T]^T \in R^6$ とおくと、 Σ_w に働く力・モーメントと Σ_s に働く力・モーメントには次式の関係が成り立つ。

$$F_w = {}^wT_s F_s \quad (1)$$

ただし、 wT_s は車輪座標系と車輪サポート座標系との間の力・モーメントの関係を表す行列であり、次式のように定義される。

$${}^wT_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 L はキャスタの車輪と球面ジョイントの距離すなわち仮想 3-D キャスタのオフセットを表す。また、球面ジョイントに働く力・モーメントは、キャスタ車輪に対してその進行方向以外には影響を及ぼさないものとする。

いま、キャスタの車輪に加わる力・モーメントに基づいて、車輪の進行方向への運動とキャスタ車輪の仮想的な把持点回りにおける車輪サポートの回転運動を実現するために、各マニピュレータを次式の特性を満たすように制御する。

$$F_w = M_w \ddot{X}_w + D_w \dot{X}_w \quad (3)$$

ここで、 $M_w, D_w \in R^{6 \times 6}$ はそれぞれキャスタ車輪の慣性、粘性行列であり、対角行列となる。 $\dot{X}_w, \ddot{X}_w \in R^6$ は車輪座標系に関するキャスタ車輪の速度、加速度を表す。

実際、各フォロワは、仮想 3-D キャスタの球面ジョイント部の運動を実現するため、式 (3) で示されたキャスタの車輪の運動を、仮想的な球面ジョイント部に取り付けられた車輪サポート座標系の運動に変換する必要がある。車輪サポート座標系における速度、加速度を $\dot{X}_s, \ddot{X}_s \in R^6$ とし、車輪座標系における速度、加速度 $\dot{X}_w, \ddot{X}_w$ との関係の求めると次式のようになる。

$$\dot{X}_s = {}^sC_w \dot{X}_w, \quad \ddot{X}_s = {}^sC_w \ddot{X}_w \quad (4)$$

ただし、 sC_w は車輪サポート座標系と車輪座標系との間の速度、加速度の関係を表す行列であり、次式のように定義される。

$${}^sC_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & L \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

これにより、球面ジョイントに働く力に基づいた仮想 3-D キャスタの運動は、車輪サポート座標系において次式で表される。

$${}^wT_s F_s = M_w ({}^sC_w)^{-1} \ddot{X}_s + D_w ({}^sC_w)^{-1} \dot{X}_s \quad (6)$$

ここで、各ロボットのマニピュレータの手先の並進運動を式 (6) より導出される並進加速度、速度に基づいて行い、また、車輪サポート座標系を式 (6) より導出される回転角加速度、角速度に基づいて回転させる。

次に、仮想 3-D キャスタの球面ジョイントにモーメント $N_f \in R^3$ が働く場合について考えよう。フォロワの把持点に実現された仮想的なキャスタの球面ジョイント部は、その部分に働くモーメントに基づいて運動を生成しなければならない。そこで、各フォロワの把持点を次式の特性を満たすように制御する。

$$N_f = I_f \ddot{\Theta}_f + D_f \dot{\Theta}_f \quad (7)$$

ここで、 $I_f, D_f \in R^{3 \times 3}$ はそれぞれ球面ジョイント座標系の x, y, z 軸回りの回転に関する球面ジョイントの慣性、粘性行列であり、対角行列となる。また、 $\dot{\Theta}_f, \ddot{\Theta}_f \in R^3$ はそれぞれ球面ジョイント座標系のそれぞれの軸に関する球面ジョイントの回転角速度、角加速度を表す。

すなわち、各フォロワの把持点を式 (6), (7) に示す特性を満たすように制御し、かつ、式 (6) を満たすキャストの車輪の回転角加速度、角速度に基づいて車輪座標系および車輪サポート座標系を回転させれば、各フォロワの把持点に仮想的に 3-D キャスタの球面ジョイント部の運動を実現することができる。これにより、各フォロワは把持点に加わった力の方向に仮想的に 3-D キャスタを向け、その方向に運動を行う。

また、筆者らは文献 [12] において適応デュアルキャストアクションという手法を提案している。この手法は、キャスト特性を利用する状況や行う作業に応じて、キャストのオフセットの大きさやその位置を変化させるものである。キャストのオフセットを変化させると、ロボットの運動特性を大きく変化させることが可能となり、物体の協調搬送に適用した場合には、結果的に物体の運動特性を大きく変化させることが可能となる。

本研究では、リーダーが物体に加える力・モーメントに基づいて、フォロワに実現されたキャストは瞬間的にリーダーが加えた力・モーメントの方向へ向きを変化させ、その方向においてリーダーの軌道を推定することが必要である。そこで、フォロワは進行方向への速度が小さいとき、すなわち搬送作業開始時においては、キャストのオフセット L を小さくする。この場合、ある力がフォロワに加わったときの車輪サポート座標系の回転角速度は大きくなり、仮想 3-D キャスタはリーダーの進行方向に瞬間的に回転する。

また、各ロボットの進行方向への速度が大きくなってくると、それに基づいてキャストのオフセットを大きくする。これにより、各ロボットの進行方向以外の向きに加わる力の影響を小さくすることができ、安定した協調搬送が実現できる。その他、フォロワに加わる力が 90 度以上反転する場合には、オフセットの位置をキャストの車軸に対して瞬間的に反転させる。すなわちオフセットの正負を反転させる。これにより、通常、実際のキャストにおいてよく知られている 90 度以上キャストの車輪を回転させ目標角度に一致させるといった動作を行うことなく、少ない回転で目標の角度に一致させることができる。

適応デュアルキャストアクションの有効性を示すために、本研究では Fig. 5 に示すようなシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、Fig. 5(a) に示すように、通常のキャストのようにオフセットが変化しない場合と、適応デュアルキャストアクションを用い、フォロワの速度に応じてキャストの大きさが変化する場合とでの比較実験を行った。そのときの結果が Fig. 5(b) である。本シミュレーションでは、10 [s] ごとにフォロワに加える力の向きをある基準に対して 135 [deg] から 180 [deg], 270 [deg], 90 [deg] と変化させながら走行させ、そのときの実際のキャスト角度を示したものである。

通常のキャストを用いた場合には、キャストの角度変化が大

(a) Caster offset

(b) Caster angle

Fig. 5 Adaptive dual caster action

きく目標の角度に追従する時間を要してしまっているが、適応キャストアクションを用いた場合には、非常に短い時間で目標角度と一致していることが分かる。特に 20 [s] においてはキャストのオフセットの正負が反転することにより、瞬間的に目標角度と一致している。このような適応デュアルキャストアクションの特性により、フォロワに実現された仮想 3-D キャスタはほぼ瞬間的にリーダーの加える力・モーメントの方向にその進行方向を向けるため、次章で紹介する軌道推定手法を用いることにより、より容易にリーダーの目標軌道を推定することが可能となる。

4. 協調搬送

本章では、仮想 3-D キャスタの特性を持った複数の分散制御された移動マニピュレータによる単一物体の協調操り問題について考える。

4.1 各ロボットの制御系

4.1.1 マニピュレータの制御

各フォロワの仮想 3-D キャスタが文献 [12] で提案した適応デュアルキャストアクションの手法を用いて、力の加わった方向に瞬間的に向くと仮定する。このとき、複数の移動マニピュレータによる単一物体の操りを実現するためには、各フォロワが仮想 3-D キャスタの進行方向に関してどのようにリーダーの運動を推定すればよいかについて考えればよい。

各フォロワが仮想 3-D キャスタの進行方向にリーダーの運動を推定するために、本研究では、式 (6), (7) で表される仮想 3-D キャスタの特性を拡張し、筆者らが提案しているリーダー・フォロワタイプの分散協調制御系 [7] を適用することを考える。この制御系は、ロボット間に発生する運動誤差が生じて、その影響を吸収できるように、各ロボットをコンプライアンス制御し、ロボット間の運動誤差に基づいて、各フォロワがリーダーの目標軌道を推定し、協調搬送を実現するというものである。そこで、式 (6) で表された各フォロワの把持点の仮想 3-D キャスタの

特性を，進行方向に関してのみあるコンプライアンスを持つように，次式に示すようなインピーダンス制御系に修正する．

$${}^iM_x {}^i\ddot{\Delta x} + {}^iD_x {}^i\dot{\Delta x} + {}^iK_x {}^i\Delta x = {}^if_x \quad (8)$$

ただし， ${}^iM_x, {}^iD_x, {}^iK_x \in R$ はそれぞれ， i 番目のフォロワの把持点の仮想 3-D キャスタの進行方向に関する慣性係数，粘性係数，剛性係数， ${}^if_x \in R$ は i 番目のフォロワの把持点の仮想 3-D キャスタの進行方向に作用する力である． ${}^i\Delta x \in R$ は， i 番目のフォロワの把持点の仮想 3-D キャスタの進行方向に関する運動誤差であり，次式のように表される．

$${}^i\Delta x = {}^ix - {}^ix^e \quad (9)$$

ここで， ${}^ix \in R$ は i 番目のフォロワの仮想 3-D キャスタの進行方向に関する実際の軌道を表し， ${}^ix^e \in R$ はリーダーの推定軌道を表す．

また，リーダーに関しては，その把持点回りに次式に示されるようなインピーダンス特性を満たすように制御する．

$${}^lM {}^l\ddot{\Delta X} + {}^lD {}^l\dot{\Delta X} + {}^lK {}^l\Delta X = {}^lF \quad (10)$$

ただし， ${}^lM, {}^lD, {}^lK \in R^{6 \times 6}$ はそれぞれ，リーダーの把持点の慣性行列，粘性行列，剛性行列， ${}^lF \in R^6$ はリーダーの把持点に作用する力・モーメントを表す．また， ${}^l\Delta X \in R^6$ はリーダーの把持点の運動誤差であり，次式のように表される．

$${}^l\Delta X = {}^lX - {}^lX^d \quad (11)$$

ここで， ${}^lX \in R^6$ はリーダーの実際の軌道を表し， ${}^lX^d \in R^6$ はリーダーの目標軌道を表す．ただし，議論を簡単にするため，目標軌道を指定するためにリーダーの把持点に設定される座標系の x 軸は，常に目標軌道の接線方向と一致するものと仮定する．

4.1.2 マニピュレータと移動ベースの協調制御

本項では，マニピュレータと移動ベースの協調制御系について考える．ここでは，移動マニピュレータの冗長自由度を生かし，マニピュレータの手先の位置・姿勢および見掛けの動特性を変化させずに移動ベースの運動を制御するという Fig. 6 に示すようなマニピュレータと移動ベースの協調制御系を提案する．

この手法では，マニピュレータの手先の運動は絶対座標系に対して記述され，また，移動ベースの運動は，マニピュレータの把持点の位置を移動ベースが存在する二次元平面上に射影し

た点において記述する．そして，各マニピュレータは前項で示された仮想 3-D キャスタ特性もしくはあるインピーダンス特性を持つように制御され，移動ベースは次式の特性を満たすように制御される．

$${}^kM_{base} {}^k\ddot{X}_{base} + {}^kD_{base} {}^k\dot{X}_{base} + {}^kK_{base} {}^k\Delta X_{base} = {}^kF_{base} \quad (12)$$

ここで， $k = l, i$ とし，リーダーおよび i 番目のフォロワを表す． ${}^kM_{base}, {}^kD_{base}, {}^kK_{base} \in R^{3 \times 3}$ はそれぞれ移動ベースの慣性，粘性，剛性行列であり， ${}^kF_{base} \in R^3$ は移動ベースに加わる力である． ${}^k\Delta X_{base} \in R^3$ は移動ベースに働く力に基づいて生成される運動誤差であり，次式のように表される．

$${}^k\Delta X_{base} = {}^kX_{base} - {}^kX_{base}^d \quad (13)$$

ここで， ${}^kX_{base} \in R^3$ は実際の移動ベースの位置・姿勢である．また， ${}^kX_{base}^d \in R^3$ は Fig. 6 に示される移動ベースの目標の位置・姿勢であり，マニピュレータの把持点からある一定の距離を保った点を二次元平面上に射影した点の位置・姿勢とする．

このような制御系を用いると，理論的にはマニピュレータの運動は移動ベースに影響を及ぼすが，移動ベースの運動はマニピュレータの運動に影響を及ぼすことはない．したがって，移動ベース部に搭載された外界センサ等によって，移動ベース自身が障害物回避運動等を行った場合，その回避運動がマニピュレータの可動範囲内であれば，マニピュレータによって把持された物体の動特性には影響を及ぼすことがなく，仮想 3-D キャスタ特性を利用した物体の操りを実現することができる．

4.2 協調制御アルゴリズム

本節では，各フォロワが仮想 3-D キャスタの進行方向にリーダーの運動をどのように推定するかについて考える．ここでは議論を簡単にするために，フォロワが 1 台の場合について考える．筆者らは，複数の移動ロボットにより単一物体を協調搬送するためにリーダー・フォロワ型の分散協調制御系を提案してきた [7]．この制御系では，各ロボットの把持点間の幾何学的関係が既知である必要があった．しかしながら，この制御系を 1 自由度運動に限定して用いる場合には，各ロボットの把持点間の幾何学的関係を用いることなく，制御系を設計することができる．

ここで，リーダーの把持点に，ある目標軌道が与えられた場合を考える．このとき，リーダーは与えられた目標軌道に基づいて物体に力を加え，それによりフォロワの把持点は，操る物体を介して加わった力の方向に仮想的に 3-D キャスタを向け，結果的に物体はその方向に 1 自由度運動を行う．したがって，この運動に対して，従来のリーダー・フォロワタイプの分散協調制御系 [7] を適用すれば，フォロワは仮想 3-D キャスタの進行方向に関してリーダーの運動を推定し，リーダーと協調して物体を操ることができる．以下，フォロワが仮想 3-D キャスタの進行方向にリーダーの運動をどのようにして推定するかについて簡単に概要を述べる．

フォロワが推定すべきリーダーの目標軌道 ${}^lx^d$ とフォロワが仮想 3-D キャスタの進行方向に推定した目標軌道 ${}^ix^e$ との差（フォロワの推定誤差）を Δx_{d1} とし，次式のように定義する．

Fig. 6 Cooperation model (1-DOF model)

Fig. 7 Estimator

$$\Delta x_{d1} = {}^1x^d - {}^1x^e \quad (14)$$

ここで、文献[7]の方法と同様にして、フォロワの推定誤差 Δx_{d1} を求めると、次式が得られる。

$$\Delta x_{d1} = 2 {}^1\Delta x \quad (15)$$

ただし、 ${}^1\Delta x \in R$ は式 (9) で示されたフォロワの把持点の仮想 3-D キャスタの進行方向に関する運動誤差である。このとき、フォロワはそれ自身で観測できる ${}^1\Delta x$ に基づいて、 Δx_{d1} を計算することができる。

ここで、 Δx_{d1} から ${}^1x^e$ を推定するために、Fig. 7 (a) に示すような伝達関数 G_1 を考える。Fig. 7 (a) は Fig. 7 (b) に示すフィードバックシステムに等価変換することができ、このとき、Fig. 7 (b) が安定となるように伝達関数 G_1 を設計すれば、フォロワは ${}^1x^d$ を正確に推定することができる。本研究では、伝達関数 G_1 を次のように設計する。

$$G_1 = \frac{a_1 s + b_1}{s^2} \quad (16)$$

ここで、推定パラメータが $a_1 > 0$, $b_1 > 0$ のとき、文献[7]にて示されるように、このフィードバックシステムの安定性が保証される。これにより、フォロワは仮想 3-D キャスタの進行方向に、リーダーの運動を推定することができる。

また、本論文で提案した分散協調制御系は、文献[7]で提案されている仮想リーダーの概念を用いることにより、2 台以上のフォロワを用いた場合にも容易に拡張することができる。したがって、操る物体の大きさや、各ロボットの把持点間の幾何学的関係を用いずに、複数の移動マニピュレータにより単一物体を操ることが可能となる。

5. 実験

本論文で提案した制御系の有効性を示すために、Fig. 8 (a) に示すような単腕型の移動マニピュレータと、Fig. 8 (b) に示すような双腕型の移動マニピュレータを用いて物体の協調操り実験を行った。本実験で用いる単腕型移動マニピュレータと双腕型移動マニピュレータは、それぞれ全方向移動ベースに三菱重工工業製の PA-10 を搭載し、またボディにはボディフォースセンサ [13] と呼ばれる力覚センサを搭載している。また、各マニピュレータの手先には力覚センサが搭載されている。

5.1 単腕型移動マニピュレータによる物体の操り

初めに、3 台の単腕型移動マニピュレータを用いた物体の協調搬送実験を行った。この実験では、リーダーの把持点に Fig. 9

(a) Robots with single arm (b) Robots with dual arms

Fig. 8 Experimental system

Fig. 9 Experiments using three mobile manipulators

に示す座標系 Σ_0 の $\bar{x}_0$ 軸方向に 1.5[m] を 20[s] で移動するという目標軌道を与えた。ただし、その他の位置・姿勢は初期位置・姿勢を一定に保つような目標軌道を与えた。

この実験において、各フォロワの手先に実現された仮想 3-D キャスタの初期角度は、Fig. 9 (a) に示すように設定した。ここで、リーダーに目標軌道が与えられ運動が開始すると、各フォロワには $\bar{x}_0$ 軸方向に力が働く。このとき、各フォロワの把持点において実現された仮想 3-D キャスタは、適応デュアルキャスタアクションの手法を用いることによって、Fig. 9 (b) に示すように $\bar{x}_0$ 軸方向に瞬間的に回転する。そして、提案した軌道推定法により、各フォロワはその仮想 3-D キャスタの方向にリーダーの運動を推定し、リーダーと協調して物体を搬送することができる。

実験結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) はリーダーの手先の $\bar{x}_0$ 軸に関する目標軌道および $\bar{x}_0$ 軸に関するフォロワの推定軌道を示す。また Fig. 10 (b) は各ロボットの手の $\bar{x}_0$ 軸に加わる力を表す。Fig. 10 (c) ~ (h) は各ロボットに搭載されたエンコーダによって計測された各ロボットの手の実際の軌道である。Fig. 10 から、各フォロワは、ほぼリーダーの運動を推定し、リーダーと協調してうまく物体の協調搬送を実現していることが分かる。搬送が終了する近辺において、多少の誤差を見ることが出来るが、これはフォロワの移動ベースと地面との間に滑りが生じており、エンコーダから得られる情報からは絶対位置が検出できないため、結果として誤差として表れてしまっていると考えられる。しかし、リーダーに物体の目標軌道として Fig. 11 (a) のような目標軌道を与えた場合の 2 台のロボットを用いた搬送実験の一例を Fig. 12 (a) に示すが、この実験からも分かるように、たとえ車輪等に滑りが生じても物体を落とすことなく 2 台が協調してうまく物体の搬送を行うことができています。

5.2 双腕型移動マニピュレータによる物体の操り

単腕型移動マニピュレータを用いた協調操り実験では、マニピュレータの手先を把持点とし、その回りに仮想 3-D キャスタ

を設計することにより物体の操りを実現した。この制御系を双腕型移動マニピュレータに適用するために、本研究では各ロボットにある代表点を設定し、その代表点回りにおいて、仮想 3-D キャスタを設計することを考える。通常この代表点の位置はどこに設定しても構わないが、本研究では、移動ベースと 2 本のマニピュレータの幾何学的関係を考慮し、ある平面内のマニ

ピュレータの可動範囲が最大となる位置に代表点を設定した。

Fig. 11 (b) に示すような 2 台の双腕型移動マニピュレータを用いた物体のハンドリング実験の様子を Fig. 12 (b) に示す。これらの実験においてもフォロワはリーダーとの位置関係や物体の大きさ等の情報を用いることなく、仮想 3-D キャスタの特性を利用して協調搬送を実現している。この実験により複数台の双

Fig. 10 Experimental results

(a) Handling using mobile robots with single manipulator (b) Handling using mobile robots with dual manipulators

Fig. 11 Desired trajectory of experiments

Fig. 12 Example of experiments

腕型移動マニピュレータを用いても物体の効果的なハンドリングが実現できていることが分かる。

6. お わ り に

本論文では、複数の分散制御された移動マニピュレータを三次元空間内において仮想的にキャストの運動特性を満たすように制御することにより、各移動マニピュレータ間の幾何学的関係や物体の大きさ等を必要とせず、三次元空間内での単一物体のハンドリングを実現する協調制御系を提案した。この制御手法を用いることにより、未知形状物体の操りが可能となるとともに、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影響を大きく受けることなく、一般的な環境で複数の移動マニピュレータを用いた物体のハンドリングが実現できる。本研究では、提案した制御系を複数台の単腕型移動マニピュレータや双腕型移動マニピュレータに適用し、単一物体の協調ハンドリング実験を行うことにより、その有効性を確認した。

参 考 文 献

- [1] J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagimi, M. Inaba and H. Inoue: "Motion Planning for Humanoid Robots Under Obstacle and Dynamic Balance Constraints," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.692-698, 2001.
- [2] S. Kajita, T. Nagasaki, K. Yokoi, K. Kaneko and K. Tanie: "Running Pattern Generation for Humanoid Robot," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2755-2761, 2002.
- [3] 大隈久: "移動マニピュレータの制御", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.7, pp.904-907, 1995.
- [4] 見浪護, 羽多野正俊, 朝倉俊行: "未知凹凸路面を走行する移動マニピュレータの走行中の作業", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.7, pp.1004-1011, 1997.
- [5] 小菅一弘: "複数のマニピュレータによる協調制御", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.4, pp.439-443, 1992.
- [6] 内山勝: "複腕協調制御", 計測と制御, vol.30, no.5, pp.389-394, 1991.
- [7] 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.
- [8] 太田順, 武衛康彦, 新井民夫, 大隈久, 陶山毅一: "2 台の移動ロボットの協調による搬送制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.2, pp.263-270, 1996.
- [9] 平田泰久, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明: "ロボット間の幾何学的関係を必要とせず物体の搬送を実現する複数移動ロボットの分散協調制御", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.69, no.677, pp.204-211, 2003.
- [10] O. Khatib, K. Yokoi, K. Chang, D. Ruspini, R. Holmberg and A. Casal: "Vehicle/Arm Coordination and Multiple Mobile Manipulator Decentralized Cooperation," Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.546-553, 1996.
- [11] H. Osumi, M. Terasawa and H. Nojiri: "Cooperative Control of Multiple Mobile Manipulators on Uneven Ground," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3198-3203, 1998.
- [12] 平田泰久, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明: "キャスト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", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.7, pp.776-784, 2003.
- [13] 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, vol.12, no.3, 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 年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。同年同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、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)

沢田拓郎 (Takuro Sawada)

1977 年 6 月 15 日生。2001 年東北大学工学部機械知能工学科卒業。2003 年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。同年 4 月より、(株)ソニー・コンピュータエンタテインメント入社。現在に至る。在学中は、移動マニピュレータの協調制御に関する研究に従事。

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) (現 (株)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 月より東北大学工学部教授。現在に至る。この間、1989~1990 年 MIT 客員研究員。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。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)

久米洋平 (Youhei Kume)

1976 年 4 月 28 日生。2000 年東北大学工学部機械知能工学科卒業。2002 年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。同年松下電器産業 (株) 入社。2004 年より社会人ドクターとして東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻入学。現在に至る。複数移動ロボットの協調制御に関する研究に従事。

王 志東 (Zhi-dong Wang)

1965 年 10 月 24 日生。1992 年東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻博士後期課程修了。同年 4 月同大学情報科学研究科助手。1998 年同大学情報科学研究科講師。2001 年より同大学大学院工学研究科助教授。現在に至る。この間、2000~2001 年ペンシルベニア大学客員研究員。博士 (工学)。分散ロボットシステム、自律移動ロボット等の研究に従事。日本機械学会、IEEE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)