人と双腕型移動ロボット “Mr Helper” による物体の協調搬送*

小 菅 一 弘^{*1}, 須 田 理 央^{*1}, 風 村 典 秀^{*2}
佐 藤 学^{*3}, 角 谷 啓^{*4}

Cooperative Transportation of Object by Mobile Robot Helper and Human

Kazuhiro KOSUGE, Rio SUDA^{*5}, Norihide KAZAMURA,
Manabu SATO and Hiromu KAKUYA

^{*5} Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Tohoku University,
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

In this paper, we propose a mobile robot helper and its motion control algorithm for handling an object in cooperation with a human. First, we introduce a prototype of the mobile robot helper, “Mr Helper”, which consists of two manipulators and an omni-directional mobile base. We then propose a control algorithm for handling an object in cooperation with a human. The control algorithm specifies the apparent dynamics of the manipulated object so that the human could handle the manipulated object together with the robot. Load sharing by “Mr Helper” and a human is also realized by introducing a lifting-up/down system. The control algorithm is experimentally applied to the “Mr Helper”, and the experimental results illustrate the validity of the proposed control algorithms.

Key Words: Robot, Mobile Manipulator, Human-Robot Cooperation

1. は じ め に

ロボット技術の発展にともない、ロボットは産業用ロボットとして様々な分野で用いられるようになった。少子高齢化が急速に進みつつあり、これらのロボット技術を用いて我々の生活の中でいろいろな仕事を手助けしてくれるようなロボットの登場が期待されている。例えば家庭やオフィス、医療・福祉分野、建設作業現場などで利用できる様なロボットである。

しかし、産業用ロボットに代表される、既に実用化されているロボットのほとんどは、人間から隔離された環境下で、予めプログラムされた作業のみを行うのに対し、我々の生活を支援するロボットでは、人間と共に作業を遂行する状況が想定され、予め作業の全てをプログラムしておく事は難しい。しかし、ロボットが人間と協調して作業を行なうことを前提し、システ

ロボットと人間の協調作業には様々な形態が考えられるが、本論文では、図1(a)、図1(b)に示すような人間とロボットによる単一物体の協調ハンドリング問題について考える。図1(a)は搬送する物体の重量をロボットが全て支持する場合であり、図1(b)は物体の重量をロボットと人間とで支持する場合である。

人間とロボットの協調については、いくつかの研究がなされてきた。Kazerooniなどは人間が重量物をハンドリングできるようにヒューマンエクステンダを提案した⁽¹⁾。池浦などは人間のインピーダンス特性に基づくロボットの制御系を提案した⁽²⁾⁽³⁾。Zhengらは人間とロボットによる物体のハンドリングを行う際の負荷の分配について考察した⁽⁴⁾。O.Khatibらは、人の生活環境下での利用を前提としてロボットを目指し、移動マニピュレータを提案した⁽⁵⁾。著者らは仮想ツールダイナミクスに基づく人間のパワーアシストシステム⁽⁶⁾や、複数のマニピュレータと人間による単一物体の協調ハンドリングシステムを提案してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本論文では、人間と双腕型移動ロボットによる物体の協調搬送問題を考える。著者らは、双腕マニピュレータと人間による物体の協調ハンドリングシステムを提案し、実際に2台の産業用ロボットを用いて、その有

* 原稿受付 2002年6月3日。

^{*1} 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)。

^{*2} 三菱電機(株)(☎100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号)。

^{*3} ソニー(株)(☎141-0001 東京都品川区北品川6-7-35)。

^{*4} (株)日立製作所(☎101-8010 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地)。

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

Fig. 1 Load Supported by (a)Robot, (b)Human and Robot

効性を示して来た⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本論文ではこのシステムを拡張する。双腕マニピュレータに移動ベースを付加することでロボットシステムの作業領域は拡大される。

移動ベースを付加したことでシステムは冗長自由度を有する事になるが、本論文では移動ベースと双腕マニピュレータの見掛けの動特性を制御することにより、冗長自由度を意識することなく、人と双腕型移動ロボットによる単一物体の協調搬送を実現する。

以下本論文では、まずはじめに人間と協調して物体を搬送する双腕型移動ロボットの実験用プロトタイプ“Mobile Robot Helper”（以下、Mr Helper と呼ぶ）の概要を説明する。次に物体をハンドリングするための新しい制御アルゴリズムを提案する。最後に、提案する制御系を Mr Helper に用いて実験を行い、その有効性を説明する。

2. 人間とロボットの協調

図 1(a), 図 1(b) に示すような物体の協調ハンドリング作業を行うためのロボットシステムについて考える。人間とロボットが協調して作業を行うには、人間は作業に対する意志や指令をロボットへ伝えなければならない。本論文では、ロボットと人間は操作する物体を介して相互に伝達される力に基づきコミュニケーションを実現する事を考える。具体的には、作業者はロボットによって支持されている物体に対してその物体を動かしたい方向に操作力を加えることで物体の運動を指定し、ロボットはその力に基づいて運動を生成する。

例えば、図 1(a) に示す協調作業では、ロボットは物体の重量を完全にサポートするため、作業者は物体に操作力を加えるだけで物体を操作することができる。また、図 1(b) に示す協調作業では、ロボットは物体の重量を部分的にサポートしているので、作業者は物体の重量の一部分を負担するだけで容易に物体を操作することができる。

Fig. 2 MR Helper

Fig. 3 Coordinate Systems

本論文ではこれら 2 つの協調作業形態について考え、作業者が物体に加える操作力のみを用いて人とロボットが協調作業を遂行できるロボットシステムを構築する。

3. Mobile Robot Helper

双腕型移動ロボット“Mobile Robot Helper”を図 2 に示す¹。このロボットは広瀬らによって設計された全方向移動ベース“The Vuton”⁽⁹⁾と移動ベースに搭載されたボディ、及びボディに取り付けられた 2 台の 7 自由度冗長マニピュレータ（三菱重工製 PA-10）から構成されている。各マニピュレータの手首部には操作する物体にかかる人間の操作力を計測するために 6 軸の力・トルクセンサ（Nitta 製 IFS-90M31A）が取り付けられている。

また、頭部にはステレオカメラ、移動ベースの周囲には 16 個のソナーセンサが取り付けられているが、本研究では使用していない。ロボット全体の運動制御は 1 台のオンボード PC で実行する。

4. 制御アルゴリズム

4.1 座標系の定義 図 3 に、単一物体を把持する Mr Helper を示す。システムの運動を記述するため、

¹本ロボットはオムロン（株）と東北大学で共同開発したものである。

Fig. 4 Mobile Base Control Model

座標系を図3に示すように定義する。\$\Sigma_{global}\$ は、作業空間内に定義された絶対座標系である。ロボットの運動を記述するための代表点を、ロボットの移動ベースに取り付け、移動ベース代表点と呼ぶことにする。移動ベース代表点に移動ベース座標系 \$\Sigma_{base}\$ を定義する。図に示すように \$\Sigma_{base}\$ はボディの前方向に \$x\$ 軸をとり、鉛直上向きに \$z\$ 軸をとる。移動ベースは \$\Sigma_{global}\$ の \$x-y\$ 平面の移動と \$z\$ 軸まわりの回転のみを行うものとする。物体代表点には物体座標系 \$\Sigma_{obj}\$ を定義する。\$\Sigma_{base}\$ および \$\Sigma_{obj}\$ は、図3に示すようにそれぞれ移動ベースと物体に固定され、それらと共に運動する。\$\Sigma_{global}\$ に関する \$\Sigma_{base}\$ のポーズ（原点の位置と座標系の姿勢）を表す一般化座標を \$X_{base} (= [x_{base} \ \theta_{base}]^T \in R^6)\$ とし、\$\Sigma_{global}\$ に関する \$\Sigma_{obj}\$ のポーズを表す一般化座標を \$X_{obj} (= [x_{obj} \ \theta_{obj}]^T \in R^6)\$ とする。また、\$\Sigma_{global}\$ に関する \$\Sigma_{base}\$ から \$\Sigma_{obj}\$ へのポーズを表す一般化座標を \$X_{arm} (= [x_{arm} \ \theta_{arm}]^T \in R^6)\$ とする。\$X_{base}\$, \$X_{arm}\$ は、ロボットに搭載されたセンサからの情報で計算できると仮定する。

4.2 移動ベースの制御 移動ベースは3自由度を有する全方向移動メカニズムである。この移動ベース上にはロボットのボディが搭載され、ボディには2台の7自由度冗長マニピュレータが搭載されている。移動ベースの運動とマニピュレータの運動は互いに干渉する。

本論文では、マニピュレータの運動によって生じる干渉力によって、移動ベースが作業平面上を自由に移動するように、以下の特性をもつように移動ベースを制御する（図4）。

$$F_{base} = M_{base} \Delta \ddot{X}_{base} + D_{base} \Delta \dot{X}_{base} \quad (1)$$

$$\Delta X_{base} = X_{base} - X_{base^d} \quad (X_{base} \in R^6) \quad (2)$$

ここで、\$M_{base}\$, \$D_{base}\$ は、それぞれ移動ベースの見掛けの慣性行列、粘性係数行列である。これらは全て正定行列であるものとする。\$F_{base} (\in R^6)\$ は移動ベースに働く力/モーメントベクトルである（マニピュレー

Fig. 5 Manipulator Control Model

タの運動によって生じる力を含む）。また、\$X_{base^d} (= [x_{base^d} \ \theta_{base^d}]^T \in R^6)\$ は、\$\Sigma_{global}\$ に関する \$\Sigma_{base}\$ の目標ポーズを表す一般化座標である。

4.3 マニピュレータの制御 人とロボットによる単一物体の協調ハンドリングを実現するために、ロボットの双腕で物体を把持させ、把持された物体に仮想的なダイナミクスを持たせることを考える。この時、前述したように人は物体に力・モーメントを加えて物体の運動を指定するものとする。

通常、物体に加わる力・モーメントは、アームの手首部に設置された力センサによって計測された力・モーメントを座標変換することによって求められる。しかし、物体の代表点が手首の力センサから離れている場合、手首で計測された力・モーメントに含まれるノイズが物体の代表点への力の座標変換によって増幅され、その結果、物体の代表点においてセンサの分解能が低下するという問題が発生する。

この問題を解決する物体のハンドリングの実現手段として、我々は複数ロボットによる長尺物の協調制御アルゴリズムを提案した⁽¹⁰⁾。提案した方法は、幾何学的条件を用いることによって操作する物体の見かけのインピーダンスを各マニピュレータの把持点におけるインピーダンスの調節によって実現するもので、各マニピュレータは力センサに非常に近い把持点まわりに制御されるため、長尺物のハンドリングにおいても力の座標変換による影響を受けない。

本論文では、このアルゴリズムを用い、図5に示すように各マニピュレータの把持点のインピーダンスを調節することによって、移動ベースに対する物体の見かけのダイナミクスを制御することにする。このとき、物体の見かけのダイナミクスが以下のように表されるとする。

$$F_{ext} = M_{obj} \Delta \ddot{X}_{arm} + D_{obj} \Delta \dot{X}_{arm} + K_{obj} \Delta X_{arm} \quad (3)$$

$$\Delta X_{arm} = X_{arm} - X_{arm^d} \quad (X_{arm} \in R^6) \quad (4)$$

ここで、\$M_{obj}\$, \$D_{obj}\$, \$K_{obj}\$ は、それぞれ物体の見掛けの

慣性行列, 粘性係数行列, 剛性行列である. これらは全て正定行列であるとする. $F_{ext} (\in R^6)$ は物体に働く力/モーメントベクトルである (移動ベースの運動によって生じる力を含む). また, $X_{armd} (= [x_{armd} \ \theta_{armd}]^T \in R^6)$ は, Σ_{global} に関する Σ_{base} から Σ_{obj} への目標ポーズを表す一般化座標である.

各マニピュレータのインピーダンスパラメータは, 作業に違和感が無いように試行錯誤的に決定された物体の見かけのインピーダンスを基に, 既知である把持点と物体代表点との幾何学的関係を用いて, 小菅らの方法⁽¹⁰⁾により, 物体の見かけのインピーダンスを実現するように決定される.

なお, 本研究で用いるマニピュレータは7自由度を有するが, 本システムでは, マニピュレータの冗長自由度を Seraji らが提案したように作業空間において肘角度を指定するために用いている⁽¹¹⁾. また, 物体の重量は物体把持後にキャンセルされ, マニピュレータは操作力のみに基づいて運動するものとする.

4.4 移動ベースと双腕マニピュレータの協調 本節では, 前節で議論した移動ベースの運動とマニピュレータの運動の協調問題について考える. 人とロボットによる協調作業システムを実現するには, 物体の操作性や人間の動特性を含んだ全体のシステムの安定性が問題となる.

小菅らは複数ロボットが人間と協調して物体をハンドリングする際に操作する物体のインピーダンスを制御する方法を提案し, 受動性の観点からその全体のシステムの安定性を考察した⁽⁸⁾. また, 物体の操作性の観点から人間の操作力に基づいて物体の運動をどのように生成すればよいかについても考察した⁽¹²⁾. 本論文で述べる人とロボットによる協調作業のためのアルゴリズムは, これらの考察に基づき設計する.

前節で示したように, 本システムでは移動ベースとマニピュレータのインピーダンス特性が指定されている. 物体の見かけのダイナミクスは, 各マニピュレータのインピーダンスを調節することによって指定されることに注意されたい. 結果として, 物体のダイナミクスは図6に示すように移動ベースのダイナミクスとマニピュレータのダイナミクスの直列結合となり, システム全体の動特性は以下の式によって表すことができる.

$$F = M\Delta\ddot{X} + D\Delta\dot{X} + K\Delta X \quad (5)$$

ここで,

$$\Delta X = \begin{pmatrix} \Delta X_{base} \\ \Delta X_{arm} \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} 0 \\ F_{ext} \end{pmatrix}$$

Fig. 6 Coordination with Mobile Base and Manipulators

$$M = \begin{bmatrix} M_{base} & 0 \\ 0 & M_{obj} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{base} + D_{obj} & -D_{obj} \\ -D_{obj} & D_{obj} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{obj} & -K_{obj} \\ -K_{obj} & K_{obj} \end{bmatrix}$$

本システムは物体に加わる外力に対して受動的な要素が結合されたものである. 従って, システム全体の安定性は受動性の観点から証明できる⁽¹³⁾. 物体の操作性はインピーダンスパラメータを適当に選ぶことで調節することができる. 移動ベースの運動とマニピュレータの運動はこれら2つのインピーダンス要素の直列結合によって自動的に協調して生成される.

5. 物体の持ち上げ動作

搬送物体の大きさや質量がロボット単体では把持できないほど大きい場合, 人とロボットによる搬送物体重量の負荷分配が必要となる. ここで, 図1(b)に示されるような, 搬送物体の重量を人間とロボットとで分担する場合について考え, ロボットと人間による物体の協調持ち上げ動作を実現することによって, 物体重量の分担を実現する.

人間とロボットによる物体の持ち上げ動作を, ロボットの手首角度の変化を用いて実現することを考える. 図1(b)に示すように, 人間が物体1を持ち上げる際, ロボットの手首には上向きの並進力とモーメントが加わる. ロボットのマニピュレータの手先は作業空間の全方向に対して(3)式を満たすように制御されているため, 物体の持ち上げ動作によってロボットの手首が回転する. 我々はこのロボットの手首角度の変化をゼロにするよう制御することで, 人間とロボットによる物体の協調持ち上げ動作を実現する. このアルゴリズムによってハンドリングする物体の重量は人間とロボットとで分担され, 人間に掛かる負荷は軽減され

Fig. 7 Concept of Lifting-up/down of Object

る。ここで、物体の持ち上げ動作中には、物体重量の鉛直下向き成分がマニピュレータの運動へ影響を与えないように制御系を構成するものとする。

図7に持ち上げ動作の概要を示す。図7中の $\Delta\bar{x}$ は人間の手の位置とロボットの手の位置の相対位置の変化である。 $\Delta\theta_{wrist}$ はロボットの手首角度変化である。 $\Delta\bar{x}$ と $\Delta\theta_{wrist}$ との間の関係は図7から次のように表される。

$$\Delta\bar{x} = l \sin \Delta\theta_{wrist} \quad (6)$$

ここで、 $l(>0)$ は操る物体の長さである。式(6)を微分することによって次の関係を得ることができる。

$$\Delta\dot{\bar{x}} = l(\cos \Delta\theta_{wrist}) \Delta\dot{\theta}_{wrist} \quad (7)$$

$\Delta\theta_{wrist}$ をゼロにするために、以下に示されるようにロボットの手の首角度変化の時間微分 $\Delta\dot{\theta}_{wrist}$ が、以下の関係を満たすように手首の目標位置を制御することを考える。

$$\Delta\dot{\theta}_{wrist} = -K\Delta\theta_{wrist} \quad (8)$$

ここで、 K は正の係数である。式(8)から、 $\Delta\theta_{wrist}$ は次式で表される。

$$\Delta\theta_{wrist} = \exp(-Kt) \quad (9)$$

$\Delta\theta_{wrist}$ は K を適当に選ぶことですばやくゼロに収束することが分かる。

物体の長さは搬送する物体によって異なり、また物体の長さが正確には分からない場合も考えられる。そこで、物体の実際の長さが分からない場合にも適用できるようにこのアルゴリズムを拡張する。そこで、まず仮の物体の長さ $l_0(>0)$ を持つモデルを考える。この場合における、人間の手の位置とロボットの手の位置との間の関係は次のように表される。

$$\Delta\bar{x} = l_0 \sin \Delta\theta_{wrist} \quad (10)$$

一方、実システムにおける人間の手の位置とロボットの手の位置との間の関係は式(6)で表される。式(6)と

Fig. 8 Block Diagram of Lifting-up/down

No.1 Handling a Box

No.2 Load Sharing

Fig. 9 Experiment

(a) Displacement in x direction

(b) Applied Force in x direction

Fig. 10 Experimental Results 1

(10)から、式(6)によって表される物体の持ち上げ動作は実際の物体の長さ l と物体の仮の長さ l_0 の比 l/l_0 によって影響を受ける。このアルゴリズムのブロック線図を図8に示す。この場合 $\Delta\dot{\theta}_{wrist}$ は次のように表される。

$$\Delta\dot{\theta}_{wrist} = -\frac{l_0}{l} K \Delta\theta_{wrist} \quad (11)$$

式(11)から $\Delta\theta_{wrist}$ は次のようになる。

$$\Delta\theta_{wrist} = \exp\left(-\frac{l_0}{l} K t\right) \quad (12)$$

式(12)から、 $\Delta\theta_{wrist}$ の収束時間は l/l_0 によって物体の実際の長さが分かっている場合と異なる。しかし、 $\Delta\theta_{wrist}$ はゼロに収束することがわかる。これにより、物体の正確な長さがわからない場合においても持ち上げ動作のアルゴリズムが有効であることがわかる。

6. 実 験

本論文で提案した制御系の有効性を示すために、“Mobile Robot Helper”を用いて2種類の実験を行った。図9(a)に示すような、ロボットが搬送物体の重量を全て支持する場合の実験と、図9(b)に示すような、人間とロボットとで物体の重量を分配する場合の実験である。制御系はPentium(200MHz)を用いて実現した(サンプリング周期: 512[Hz])。実験に

Fig. 11 Experimental Results 2

用いたインピーダンスパラメータを表1に示す。なお、前者の実験に用いた搬送物体（箱）の質量は7.0[kg]、後者の実験に用いた搬送物体（机）の質量は7.2[kg]である。操作力を決定するために物体の質量が必要であるが、本実験ではロボットと人が物体を持ち上げたあとに、力センサのオフセットをゼロとすることで物体の質量の影響をキャンセルした。なお M_{obj} は、物体の位置決め作業における操作性に違和感が無いように試行錯誤的に決定した。

6.1 実験結果 最初の実験結果の一例を図10に示す。図10(a)は左右のマニピュレータの手先と移動ベースによる x 軸方向への運動を示したものである。図10(b)は、物体に加えられた x 軸方向の力を示したものである。図10(a)(b)から移動ベースとマニピュレータが作業者によって物体に加えられる力の方向に協調して運動していることがわかる。

2番目の実験結果の一例を図11、図12に示す。図11(a)(b)より、人間が物体を持ち上げることによって生じた手首角度によってアームが上下に運動していることがわかる。さらに、図11(c)(d)より、移動ベースとマニピュレータが物体に加わる力の方向に協調して運動していることがわかる。以上より、人とロボットによる単一物体の協調搬送がうまく行われていることがわかる。

ロボットによる物体の持ち上げ動作を用いてロボッ

Table 1 Parameter List for Experiment

$M_{obj} = 25[\text{kg}]$	$M_{base} = 200[\text{kg}]$
$D_{obj} = 250[\text{Ns/m}]$	$D_{base} = 500[\text{Ns/m}]$
$K_{obj} = 50[\text{Ns}^2/\text{m}]$	$K_{base} = 0[\text{Ns}^2/\text{m}]$

トと人による搬送物体重量の分配を行う際には、個々が分担する重量は物体の重心位置に依存するが、実験で用いた机の重心は、机のほぼ中央に存在している。図11(e)より、左腕におよそ20[N]、右腕におよそ15[N]の負荷がかかっていることがわかる。実験に使用した机の負荷は7.2[kg] = 70.6[N]であることや机の重心位置から、ロボットがほぼ半分の重量を支えていることになる。

図12に人間とロボットによる協調搬送の一例を示す。

7. 結 論

本論文では、双腕型移動ロボット“Mr Helper”を提案し、人と双腕型移動ロボットによる単一物体の協調搬送のための制御系を提案した。提案した制御系は、ロボットに把持された物体と移動ベースの見掛けの動特性を制御することにより、人とロボットによる協調搬送を実現するものであり、冗長自由度も含んだロボットがある動特性を持つことができるようにシステムを制御するものである。

本制御系により、システムが有する冗長自由度を意識することなく、人とロボットによる物体の協調搬送を可能にするシステムが実現できる。また、物体の持ち上げ動作をロボットに付加する事により、協調搬送物体の重量を人間とロボット間で分担するシステムが構築できることを示した。最後に Mr Helper に用いて実験を行い、その有効性を説明した。

本論文で提案したシステムでは、物体の操りは人間の操作力のみに基づいて実現されている。人間同士の協調作業では、力情報以外の情報も用いて、なめらかな協調作業を実現している。今後は複数種のセンサ情報を用いて、ロボットと人間のより密な協調作業の実現を目指したい。

文 献

- (1) H.Kazerooni. "Human Machine Interaction via the Transfer of Power and Information Signals". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1632-1642, 1989.
- (2) R.Ikeura, H.Monden, and H.Inooka. "Cooperative Motion Control of a Robot and a Human". *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 112-117, 1994.
- (3) R.Ikeura and K.Mizutani. "Control of Robot Cooperating with Human Motion". *IEEE International Workshop on*

Fig. 12 Example on Exp.2

Robot and Human Communication, Vol. 2, pp. 525–529, 1999.

- (4) O.M.Al-Jarrah and Y.F.Zheng. "Arm Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 895–900, 1997.
- (5) Khatib.O and K. Yokoi. "Robots in Human Environments:Basic Autonomous Capabilities". *The International Journal of Robotics Research*, pp. 685–695, 1999.
- (6) 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男. "仮想ツールダイナミックスに基づくマン・マシン系の制御". 日本機械学会論文集 C 編, pp. 1337–1343, 1994.
- (7) K.Kosuge, Y.Fujisawa, and T.Fukuda. "Dynamic Control for Robot-Human Collaboration". *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 398–401, 1993.
- (8) K.Kosuge, H.Yoshida, D.Taguchi, and T.Fukuda. "Robot-Human Collaboration for New Robotic Applications". *Proceedings of IEEE IECON*, pp. 713–718, 1994.
- (9) 広瀬, 天野. "大負荷高効率全方向移動車両の開発". ロボティクスメカトロニクス講演会'93 講演論文集, pp. 350–355, 1993.
- (10) K.Kosuge, S.Hashimoto, and K.Takeo. "Coordinated Motion Control of Multiple Robots Manipulating a Large Object". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 208–213, 1997.
- (11) H.Seraji, M.Long, and T.Lee. "Motion control of 7-DOF arms: the configuration control approach". *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 9, No. 2, pp. 125–139, 1993.
- (12) K.Kosuge and N.Kazamura. "Control of a Robot Handling an Object in Cooperation with a Human".

IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 142–147, 1997.

- (13) R.J.Anderson and M.W.Spong. "Bilateral control of teleoperators with time delay". *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 494–501, 1989.