

双腕型移動ロボットヘルパー(M_R Helper)

Dual-Arms Mobile Robot Helper (M_R Helper)

○須田 理央*, 小菅 一弘*

○Rio Suda*, Kazuhiro Kosuge*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : ロボット(robot), 人間機械協調(Human Robot Cooperation),
軌道計画(Path Planning), スプライン(spline)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 工学研究科 機械知能工学専攻 小菅研究室
須田 理央, Tel.: (022)217-4035, Fax.: (022)217-4035, E-mail: suda@irs.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒言

来たるべき少子高齢化社会における, 労働力の不足が懸念されている. ロボット技術を利用することにより, このような問題を解決しようと, 医療, 看護, 福祉等の分野で盛んに研究が行われている.

しかし, 人間の行う作業は複雑で, これをプログラム化し作業を完全にロボットに任せることは現状では難しい. 完全に作業を自律化させることを前提とするより, 人と協調して作業することを前提とする方がより現実的であると考えられる. そこで著者らは, 物体のハンドリング問題に対し, 人との協調作業を前提としたロボットヘルパーを提案してきた. その概念をFig. 1に示す.

人間とロボットによる物体の協調ハンドリング問題については, 多くの研究がなされてきた. Zhengらは, 人と協調し, 単一物体を操るロボットに於ける負荷の分配に付いて考察した¹⁾. O.Khatibらは, 人の生活環境下での利用を前提としてロボッ

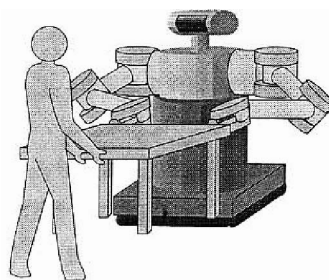


Fig. 1 Robot Helper

トを目指し, 移動マニピュレータを提案した²⁾. 池浦らは人間のインピーダンス特性に基づく制御系を提案した³⁾.

著者らも人間をパワーアシストする制御方法を提案してきた⁴⁾. また, インピーダンス制御に基づき, 複数のマニピュレータと人間による単一物体の協調搬送のための協調制御アルゴリズムや⁵⁾⁶⁾, 移動マニピュレータと人間による物体の協調搬送システムを提案してきた⁷⁾. これらの協調搬送シ

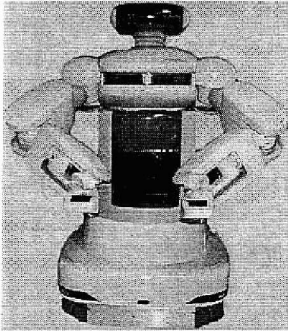


Fig. 2 MrHelper

システムでは、ロボットが把持する物体に対し、作業者が力・モーメントを与え、その操作力で物体の運動を指示するものであった。

物体の搬送問題を考えると、作業者の介入はできる限り少ない方が好ましい。そこで本論文では、通常は、ロボットが単独で物体を把持し、作業者に追従することにより目的地まで物体搬送を行い、精密な位置決めや複雑な操りを行いたい場合のみ、作業者がロボットと物体を協調ハンドリングするシステムを提案する。

以下、2章では本研究で用いるロボットヘルパー、“Mr Helper”の概要を説明し、3章で提案するシステムの構成について述べる。4章では、作業者が、ロボットと、物体を協調ハンドリングするため制御アルゴリズムについて説明する。5章では、物体を把持したロボットが、作業者に追従するための制御アルゴリズムを提案する。6章では4,5章で説明した、2つの制御の制御則を変えること無く、統合する手法を説明する。最後に、提案するシステムを“Mr Helper”に適用し、実験を行い、その有効性を確認する。

2. 双腕型移動ロボット“MrHelper”

Fig. 2に双腕型移動ロボットヘルパー、“MrHelper”を示す。“MrHelper”は全方向移動ベース“The Vu-

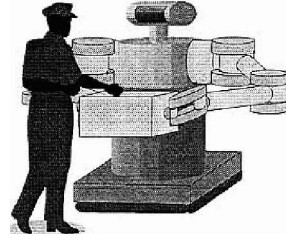


Fig. 3 Cooperative Handling Mode

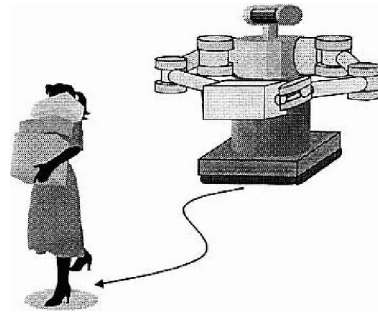


Fig. 4 Autonomous Mode

ton”と、7自由度を持つ2本のアーム(三菱重工業製 PA10)から構成されている。2本のアームそれぞれの手首には、物体に加わる力・モーメントを計測するために6軸力・モーメントセンサが取り付けられている。また、頭部には作業者の位置座標を計測するために、ステレオカメラ(Pointgrey社“Triclops”)を搭載している。ロボット内部にはPCベースのシステムが搭載され、システム全体の制御に用いられる。

3. システム構成

3.1 2つの制御モードからなる協調作業

本稿で提案するシステムは、ロボットと作業者とが協調して物体を操る協調ハンドリングモード (Fig.3)と、ロボットが単独で物体を把持し、作業者に追従することにより、物体の搬送を行う作業者追従モード (Fig.4)とから構成され、2つのモー

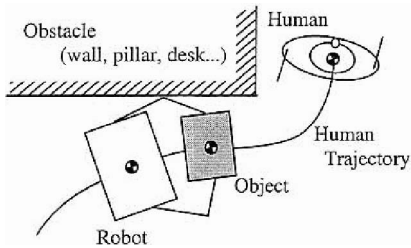


Fig. 5 Tracking of Human Trajectory

ドはロボットと作業者ととの距離関係により切り替えられるようになっている。

協調ハンドリングモードでは、ロボットが把持している物体の見かけの動特性を制御することにより、作業者とロボットとによる物体の協調ハンドリングを実現する。

作業者追従モードでは、ロボット自身が、ロボット頭部に搭載されたカメラから一定時間間隔で得られる作業者の位置座標を用い、追従すべき軌道を実時間で生成し、生成された軌道に沿って単独で物体を搬送する。

一般に、作業者は、障害物を回避できるが、ロボットは、作業者に追従するだけでは障害物に衝突する可能性がある。そこで、Fig.5に示すように、作業者の通った軌跡をロボットに追従させることにより、ロボットが障害物に衝突する可能性を低減することを考える。

災害時のレスキュー活動を目的とし、ロボットを人に追従させるという概念は、大須賀らによって提案⁸⁾されているが、本稿では、物体のハンドリング問題を考え、作業者追従モードと協調ハンドリングモードを融合することにより、より自然な物体の協調搬送システムを提案する。

3.2 座標系の定義

提案するシステムでは、それぞれにモードに於ける座標系を、Fig.6に示すように定義する。

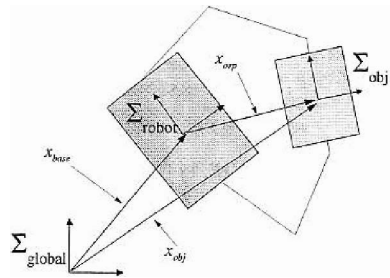


Fig. 6 System Coordinate

ロボットの運動を記述するためのロボット代表点を、ロボットの移動ベースに取り付け、ロボット代表点にロボット座標系 Σ_{robot} を設定する。さらにオブジェクトの運動を記述するためのオブジェクト代表点をオブジェクトに取り付け、オブジェクト代表点にオブジェクト座標系 Σ_{obj} を設定する。

次に、絶対座標系 Σ_{global} の原点から Σ_{robot} の原点への位置姿勢ベクトルを $x_{base} \in R^6$ とし、 Σ_{global} の原点から Σ_{obj} の原点への Σ_{global} に関する位置姿勢ベクトルを $x_{obj} \in R^6$ とする。そして Σ_{robot} の原点から Σ_{obj} の原点への、 Σ_{robot} 座標系に関する位置姿勢ベクトルを $x_{orp} \in R^6$ とし、以後、ORPベクトルと呼ぶことにする。

次に座標系の回転角度の表記を定義する。ロボット座標系 Σ_{robot} は、移動ベースの正面進行方向を x 軸の方向とし、鉛直上向きに z 軸方向をとる。この座標系の回転角は zyx オイラー角 (α, β, γ) を用いて表記する。

また、ロボットの把持する物体に外力が掛かっていない、ある時間に於けるシステムの状態を”初期状態”とする。さらに、オブジェクト座標系 Σ_{obj} は、初期状態に於いて、ロボット座標系 Σ_{robot} と同じ傾きを持つものとする。

なお、 j 座標系に関するベクトルを i 座標系に関するベクトルに変換する回転行列を iR_j と表すこととする。

x_{base} は移動ベースに取り付けられたエンコーダ

から計算され、 x_{orp} はアームの各モータに取り付けられたレゾルバからの情報を用いて、運動学を計算することで得られる。

4. 協調ハンドリングモード

本章では、協調ハンドリングモードについて、簡単に説明する。

4.1 移動ベースの制御

移動ベースには、ロボットのボディが搭載されている。さらに、2つの7自由度冗長マニピュレータがロボットのボディに搭載されている。そのため、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。協調ハンドリングモードでは、互いの干渉によって移動ベースが移動する際、移動ベースが xy 平面上を自由に移動できるように、さらに、移動ベースの位置によって力がベースに加わることが無いように剛性項を取り除き、絶対座標系に対してダンピング特性を持つように制御される。

4.2 マニピュレータの制御

本論文では、マニピュレータの制御に⁹⁾で提案した手法を用いる。これは、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ある。その結果、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、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インピーダンスを制御することにする。

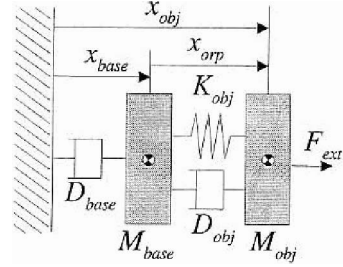


Fig. 7 Dynamics of Cooperative Handling Mode

4.3 協調ハンドリングモードにおける物体の見掛けの動特性

協調ハンドリングモードでは、マニピュレータがロボットのボディに搭載されているため、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。従って、本研究では、物体のインピーダンスはFig.7に示すように移動ベースのインピーダンスとマニピュレータのインピーダンスの直列結合で表し、このモデルに従って、以下に説明する制御則を満たすように各アームと移動ベースを制御することにする。本研究では、Fig.7に示すモデルに従って、ORPベクトルを用いて、オブジェクトと移動ベースの動特性を指定する。

$$M_{obj}\Delta\ddot{x}_{orp} + D_{obj}\Delta\dot{x}_{orp} + K_{obj}\Delta x_{orp} = F_{ext} - M_{obj}\ddot{x}_b \quad (1)$$

$$M_{base}\Delta\ddot{x}_{base} + D_{base}\Delta\dot{x}_{base} - D_{obj}\Delta\dot{x}_{orp} - K_{obj}\Delta x_{orp} = 0 \quad (2)$$

ここで、

$$\Delta x_{base} = x_{base} - x_{base_d} \quad (x_{base} \in R^6) \quad (3)$$

$$\Delta x_{orp} = x_{orp} - x_{orp_d} \quad (x_{orp} \in R^6) \quad (4)$$

$M_{obj}, M_{base}, D_{obj}, D_{base}, K_{obj}$ は、それぞれオブジェクトと移動ベースの見掛けの慣性、粘性、剛性行列である。 $F_{ext} (\in R^6)$ は物体に働く力/モーメントベクトルとする。

また、 x_{base_d} は絶対座標におけるロボットの目標位置姿勢ベクトルであり、 x_{orp_d} は、目標 *ORP* ベクトルである。*ORP* ベクトルを指定することで、ロボット座標系に対する把持物体の位置姿勢の指定が容易になる。

次に、 x_{orp_d} と x_{base_d} を決定する。このモードに於いては、初期状態に於ける \sum_{robot} の原点から \sum_{obj} の原点への位置姿勢を物体のインピーダンス中心とする。つまり、この時、目標 *ORP* ベクトルは初期状態での *ORP* ベクトルとなる。

また、移動ベースを伴うロボットは、マニピュレータの操作範囲を補償する目的から、 \sum_{global} に対してダンピング特性のみを持つようする。このモードでは、移動ベースのインピーダンス中心を、初期状態における x_{base} ベクトルで表す。ロボットは z 軸回りにのみ回転を行うので、 $\beta, \gamma = 0$ となる。さらに、ロボットは鉛直上方向には動作しないものとして、 $z = 0$ とする。

5. 作業者追従モード

本章では、作業者追従モードについて説明する。

5.1 想定する環境

ロボットが作業者を追従するにあたり、ロボットが作業者の位置を認識しながら、ロボット自身が、作業者の移動軌跡を自己の軌道としてリアルタイムで生成することを考える。軌道生成に際し、想定する環境を以下の様に定める。

- 作業者は2次元平面内を移動し、ロボットは作業者の移動した軌跡に追従する。
- 作業者が通過した軌跡の近傍には障害物は無く、ロボット単体による物体の搬送が可能である。
- 作業者の絶対座標はロボットによりある時間間隔で認識され、軌道生成に必要な点列とし

て保存される。

この様な環境下で、ロボットを人の軌跡に追従させるためには、人の位置座標を基にロボットの軌道を実時間で逐次的に生成し、それまでの軌道と連続性を保つように新しい軌道を付加して行く必要がある。

5.2 軌道曲線

作業者追従モードにおいて、人の位置座標は、ロボット頭部に取り付けられた3眼ステレオカメラを用いて一定時刻毎に計測される。カメラからの人の位置座標は離散的にしか得られないので、得られた位置座標間を補間して軌道を生成する必要がある。また、人の位置座標は、絶対座標系に対して時空間的に散在したデータとして計測されるため、全ての点を通る軌道では振動的になる。その場合、ロボットが、軌道に追従できず、ロボットの動作に滑べりが生じる。その結果、デッドレコーディングに誤差が生じるため、ロボットの軌道には適さない。離散的なデータ点を補間する手法としてはクロソイド曲線、スプライン曲線、ベジェ曲線などを用いる方法¹⁰⁾がよく知られているが、本稿では、B-スプラインを基底関数とするスプライン関数を用いることで、滑らかな軌道を生成する問題について考える。

時々刻々と増加する人の位置座標データ(以下、データ点と呼ぶ)の全てを使って、実時間で軌道の生成を行うのはメモリ消費量や計算時間の長さを考えると現実的ではない。従って、軌道生成に用いたの古いデータ点を削除し、新たなデータ点を軌道へ付加することで、データ点数を一定とし、軌道計算する。ただし、データ点の付加・削除を施しても、軌道上にあるロボットの位置、速度は不変でなければならない。

一般にスプライン曲線は、データ点の付加・削除を行うと、その影響が全ての曲線に及ぶ。そこ

で本稿ではB-スプラインがもつ局所台の性質を用い、データ点の付加・削除がロボットの位置座標や速度に変化を与えないように軌道を生成する。

5.3 軌道生成

まずロボットの絶対座標から見たロボットの位置ベクトル $\mathbf{x}_{base} = [x_{base} \ y_{base}]^T$ を、時間を表すパラメータ t を用いて以下のように表すとしよう。

$$\mathbf{x}_{base}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} x_{b_i} B_{i,K}(t) \quad (5)$$

$$y_{base}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} y_{b_i} B_{i,K}(t) \quad (6)$$

x_i, y_i はある時間間隔でカメラから得られる N 個の作業者の位置座標(データ点)であり、 K は差分商の階数、 $B_{i,K}(t)$ は $(K-1)$ 次 B-スプラインである。B-スプラインを基底関数とするスプライン曲線では制御点(線形結合係数)を制御することにより全ての点を通る曲線を生成することもできる。

本稿では、制御点にデータ点(人の位置座標点)を用いて、データ点を滑らかにするスプライン曲線を生成する。パラメータ t は、 i 番目のデータ点に対し $i \leq t < i+1 (i=0, 1, \dots, N-2)$ の範囲をとる。また節点は Shoenberg-Whitney の条件を満たすように次式の様に設定する。

$$t_{j+K} = (t_j + t_{j+K})/2 \quad (j=0, 1, \dots, N-1-K) \quad (7)$$

ロボットの現在位置を軌道の始点とするために、最初の K 個の付加節点は多重節点にする。また、軌道の終点に於いて、最後に得られたデータ点とするために、最後の K 個の付加節点も多重節点にする。

これらの条件とスプラインの諸性質から、既存の軌道へのデータ点の付加・削除による影響が及ばない、軌道内の曲線セグメント U を求める。さらに、ロボットが常に曲線セグメント U 上に存在するように、ロボットの軌道は連続的に生成する。

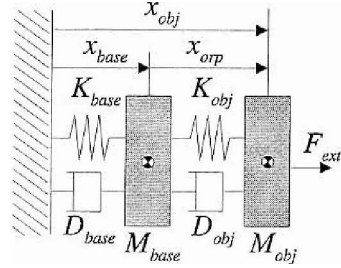


Fig. 8 Dynamics of Autonomous Mode

5.4 ロボットの制御

作業者追従モードに於いて、システムは Fig.8 のようなモデル図に示す、次式の動特性を満たすように制御される。

$$M_{obj} \Delta \dot{x}_{orp} + D_{obj} \Delta \dot{x}_{orp} + K_{obj} \Delta x_{orp} = F_{ext} \quad (8)$$

$$M_{base} \Delta \ddot{x}_{base} + D_{base} \Delta \dot{x}_{base} + K_{base} \Delta x_{base} = 0 \quad (9)$$

x_{obj_d} を軌道上の点として適切に指定すれば、 x_{obj_d} と x_{base_d} を用いて計算することにより得られる x_{orp_d} を用いることにより、オブジェクトと移動ベースの両方を軌道に乗せることができる。しかし本稿では、ロボットの姿勢に関わらず、オブジェクトは障害物に接触しないと仮定し、軌道上の目標点を移動ベースだけに与えている。この場合、ORP ベクトルは、協調ハンドリングモードで定義した、初期状態の物体把持姿勢における ORP ベクトルを用いる。さらに、ロボットの姿勢は、ロボット座標系に於ける x 軸方向が、軌道の接線方向に一致するよう、次式のように制御する。

$$\mathbf{x}_{base_d}(t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} x_i B_{i,K}(t) \\ \sum_{i=0}^{N-1} y_i B_{i,K}(t) \\ 0 \\ y_i D_i B_{i,K}(t) \end{bmatrix}$$

D_i はパラメータ t についての微分演算子である。

6. 制御モードの統合

前章までに説明した、2つの制御モードの切替えをシームレスに行うために、それぞれの制御則を変えることなく、2つの制御系を融合して、提案する本システムを構築する。以下に、融合システムを実現するためのモード切替えを、具体例で説明する。まず、現在、作業員追従モードであるとする。次に、作業員とロボットの距離がある閾値以下になることでロボットは軌道生成を停止し、協調ハンドリングモードへ切り替わる。そして人から搬送物体に働く操作力に応じて搬送物体の運動を指定することにより、協調ハンドリングを実現する。人とロボットの距離が閾値以上になると、再び作業員追従モードに切り替わり、ロボットは人に追従し、単独で物体の搬送を行う。この融合システムの動特性モデルを次式のように表す。

$$M_{obj}\Delta\ddot{x}_{orp} + D_{obj}\Delta\dot{x}_{orp} + K_{obj}\Delta x_{orp} = F_{ext} - SM_{obj}\Delta\ddot{x}_{base} \quad (11)$$

$$M_{base}\Delta\ddot{x}_{base} + D_{base}\Delta\dot{x}_{base} + (I - S)K_{base}\Delta x_{base} - SD_{obj}\Delta\dot{x}_{orp} - SK_{obj}\Delta x_{orp} = 0 \quad (12)$$

ただし、 I は単位行列、 S は制御モード選択行列で、協調ハンドリングモードに対しては1、作業員追従モードに対しては0をとる。

7. 実験

提案する制御アルゴリズムの有効性を確認するため、“Mr. Helper”を用いて実験を行った。

実験システムの概要を以下に述べる。アルゴリズムは、PentiumIII(700MHz)を用いたシステム上にVxWorks(サンプリング周波数:512Hz)を動作させ、“Mr. Helper”の制御することにより実現した。また、ステレオビジョンは、Triclopsと、PentiumIII(600MHz)を用いたシステム上にLinux(2.0.36)

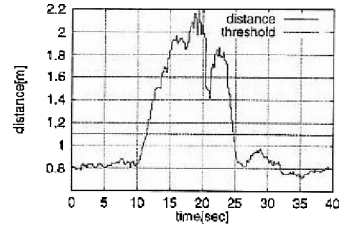


Fig. 9 Distance

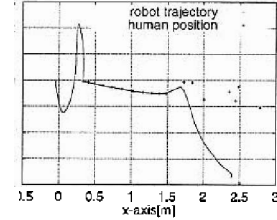
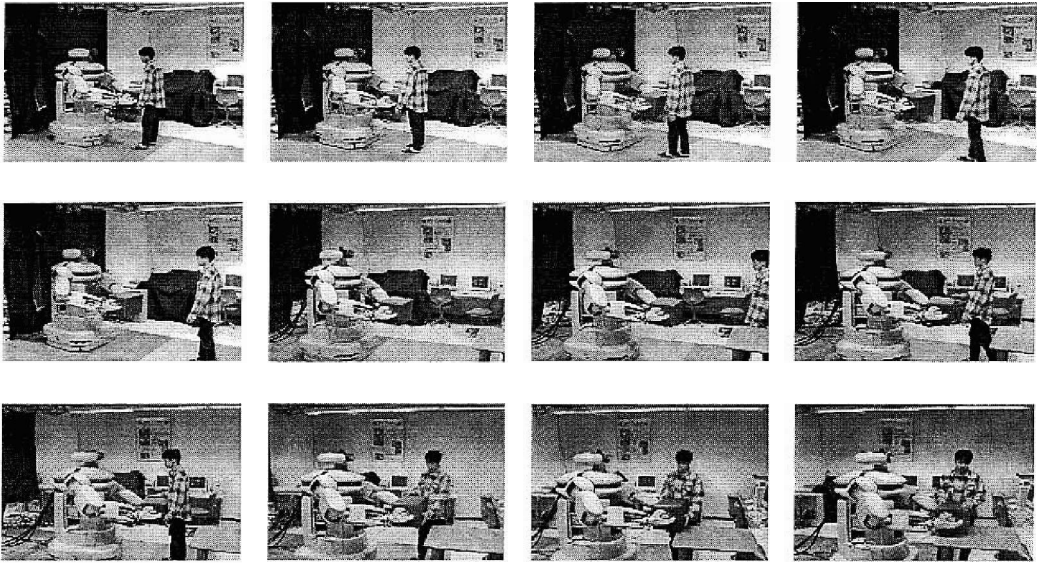


Fig. 10 Trajectory

を動作させ、画像処理を行わせることにより実現した。

実験は、2つの制御モードを用いて以下のように行った。初期状態でロボットは、協調ハンドリングモードであり、作業員と協調作業を行う。次に、作業員が物体から手を離してロボットから立ち去ると、ロボットは作業員追従モードに切替わる。作業員が再びロボットに近付くと、ロボットは再び協調ハンドリングモードに切替わり作業員と協調して物体の位置決めを行う。実験の結果をFig.9, Fig.10に示す。また、実験の様子をFig.11に示す。Fig.9はロボットから作業員までの距離と閾値を示している。Fig.10の実線は、絶対座標系における xy 平面上での、実験過程一連のロボットの運動を表し、点は、作業員追従モード中にロボットが取得した、絶対座標系における作業員の運動(位置座標)を表す。この結果から、統合された2つのモードがシームレスに切替わり、一連の作業が遂行されたことが分かる。



(i)

Fig. 11 Example of Experiment

8. 結論

本稿では、2つの制御モードから成る協調作業を考えた。1つ目のモードは、ロボットが単独で物体を把持し、作業者に追従することにより目的地まで物体搬送を行う作業者追従モードである。2つ目のモードは、精密な位置決めや複雑な操りを行いたい場合には、作業者はロボットと物体を協調ハンドリングし、作業を行う協調ハンドリングモードである。これら2つの制御モードを、それぞれの制御則を変えることなく、制御モード選択行列によって融合したシステムを提案した。

提案したアルゴリズムを、“MR Helper”に適用し、その有効性を説明した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Khatib,O and K. Yokoi. "Robots in Human Environments:Basic Autonomous Capabilities". *The*

International Journal of Robotics Research, pp. 685-695, 1999.

- 3) R.Ikeura and K.Mizutani. "Control of Robot Cooperating with Human Motion". *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 525-529, 1999.
- 4) K.Kosuge, Y.Fujisawa, and T.Fukuda. "Control of Robot Directly Maneuvered by Operator". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 49-54, 1993.
- 5) 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.
- 6) K.Kosuge, H.Yoshida, D.Taguchi, and T.Fukuda. "Robot-Human Collaboration for New Robotic Applications". *Proceedings of IEEE IECON*, pp. 713-718, 1994.
- 7) M.Sato and K.Kosuge. "Handling of Object by Mobile Manipulator in Cooperation with Human using Object Trajectory Following Method". *Proceedings of IROS*, pp. 713-718, 2000.
- 8) 大須賀, 徳田. "ロボティックフォロー,第2報,フォローイングモードのための Mold Tube法の提案". 日本ロボット学会予稿集, pp. 737-738, 1997.
- 9) 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.
- 10) 小森谷清, 谷江和雄. "スプライン曲線による車輪型移動ロボットの軌道制御". 日本ロボット学会誌, pp. 1-10, 1989.