

## 双腕宇宙遠隔操作実験システム

### An Experimental Dual-Arm Space Teleoperation System

○尹 祐根, 高橋 三恵, 妻木 勇一, 内山 勝

○Wookeun Yoon, Mie Takahashi, Yuichi Tsumaki, Masaru Uchiyama

東北大学

Tohoku University

キーワード : 宇宙遠隔操作 (Space Teleoperation), 双腕 (Dual-Arm), テレロボティクス (Telerobotics),  
冗長マニピュレータ (Redundant Manipulator), バーチャルレーダ (Virtual Rader)

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 航空宇宙工学専攻 内山研究室  
尹 祐根, Tel.: (022)217-6973, Fax.: (022)217-6971, E-mail: yoon@space.mech.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

現在, 日本, アメリカ, カナダ, ロシア, ヨーロッパの国々によって, 国際宇宙ステーションの建設が進められている. この国際宇宙ステーションの建設に際しては, 宇宙飛行士の船外活動が数多く予定されている. しかし, 苛酷な宇宙環境の中で直接宇宙飛行士が作業を行う船外活動には多くの危険が伴っている. そこで, 宇宙飛行士の代わりに宇宙空間内において作業を実現できる宇宙ロボット技術の開発が求められている. 中でも, 軌道上のロボットを地上から遠隔操作する宇宙遠隔操作は, 効果的な宇宙開発を実現するために重要な技術である. このような遠隔操作により, 宇宙飛行士の代わりに作業を実現するためには, ロボット側に高度な自律機能, オペレータ側に効果的な遠隔操作支援システムが要求される. また, ロボット側とオペレータ側との通信時間遅れや, 通信容量の制限といった問題も解決しなければならない. 従来, これらの研究は要素技術毎に個々に行われ

てきたが, 実用化するには, 実際的な環境を模擬可能なテストベッドを構築し, 総合的に検証していく必要がある.

本論文では, 双腕マニピュレータの宇宙遠隔操作実験を行うことができる双腕宇宙遠隔操作実験システムを構築したのでその構成を述べる. また, 効果的なオペレータ支援システムのひとつとして, マニピュレータ全体の衝突情報を手先に提示可能なバーチャルレーダについても述べる.

#### 2. 実験システムの構成

本研究では, 宇宙空間で想定される高度で複雑な作業を十分に実行できる双腕宇宙遠隔操作実験システムを構築した<sup>1)</sup>. 本システムは軌道上システム (Space System), 地上システム (Ground System), 開発環境 (Development System) から構成されている. Fig. 1 に双腕宇宙遠隔操作実験システムの構成を示す.

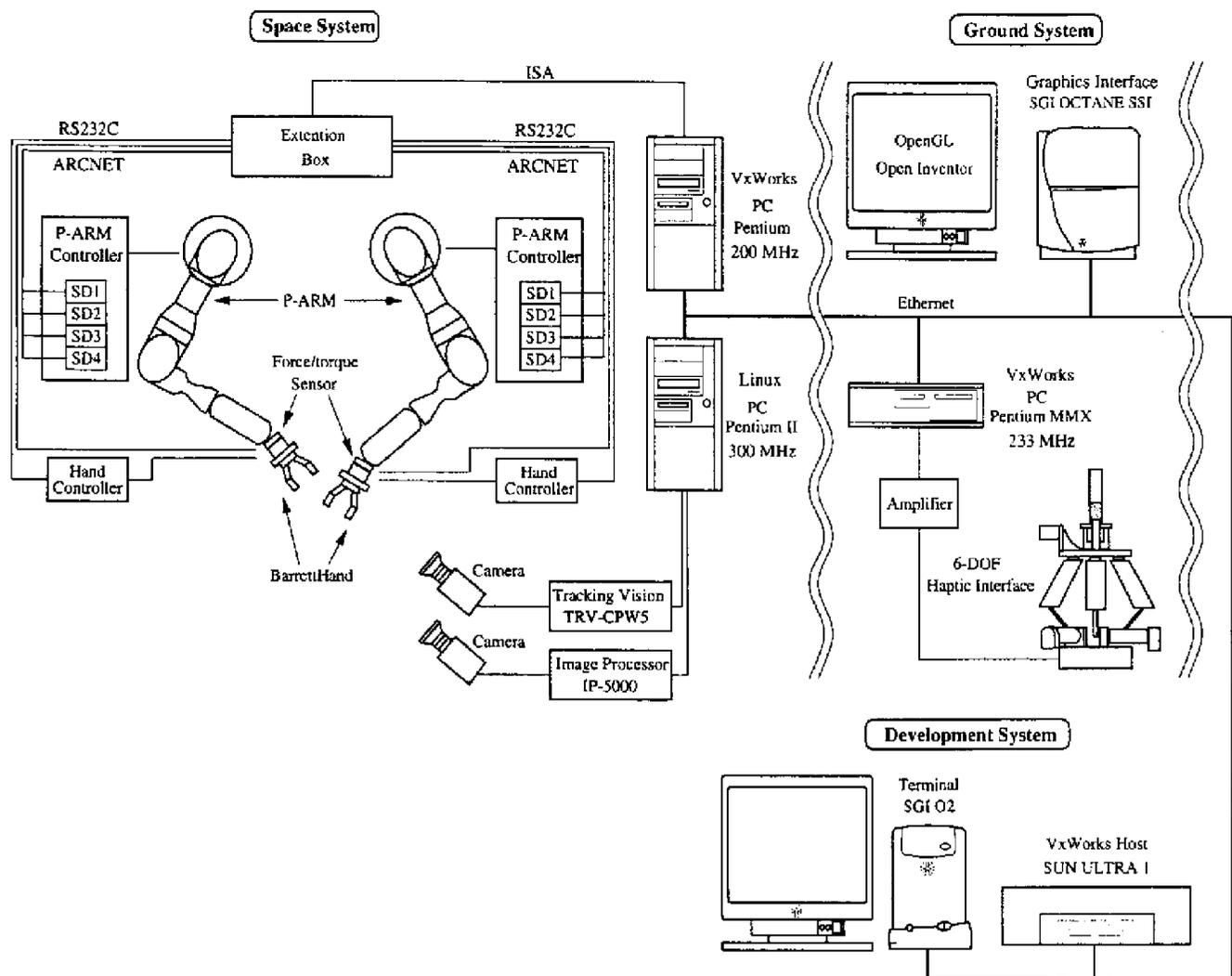


Fig. 1 An Experimental Dual-Arm Space Teleoperation System

## 2.1 軌道上システム

軌道上システムの詳細を以下に示す。

- 双腕 7 自由度スレーブマニピュレータ

### P-ARM

マニピュレータとして、三菱重工業（株）製の 7 自由度可搬式汎用知能アーム (PA-10-ARM)<sup>2)</sup> を双腕で用いている。我々はこれを P-ARM (Paired-ARM) と呼んでいる。また、その概観を Fig. 2 に示す。このアームは AC サーボモータを使用した 7 自由度アームである。腕の長さは 1345 mm、自重 35 kg、可搬質量は 10 kg である。1 本のアームは 4 個のサーボドライバにより駆動される。これら

のサーボドライバをそれぞれ ARCNET を用いて制御用コンピュータと直接つなぐことにより、1 ms 程度のサンプリング周期を可能としている。

- 力覚センサ

P-ARM の先端にニッタ（株）製 6 軸力覚センサ (IFS-67M25A50-140) を取り付けている。

- BarrettHand

ハンドとして、Fig. 3 に示している Barrett Technology Inc. 製の BarrettHand (BH8-250) を用いている。BarrettHand は 3 本指を有しており、全体で 4 自由度を持つハンドである。また、対象物の形にならって自然に把持

できる機構を有しているのので、容易に様々な形の対象物を把持することが可能である。制御用コンピュータからのシリアル通信により制御されている。BarrettHandの自重は1.18 kgである。1本のアームの可搬質量は、アームのみでは10 kgであったが、アームの先端に力覚センサを取り付け、さらにその先にBarrettHandを取り付ける場合には、力覚センサとBarrettHandの自重とモーメントの作用を考慮する必要がある。その結果、P-ARM, 力覚センサ, BarrettHandからなる1本のアーム可搬質量は2.7 kgとなる。

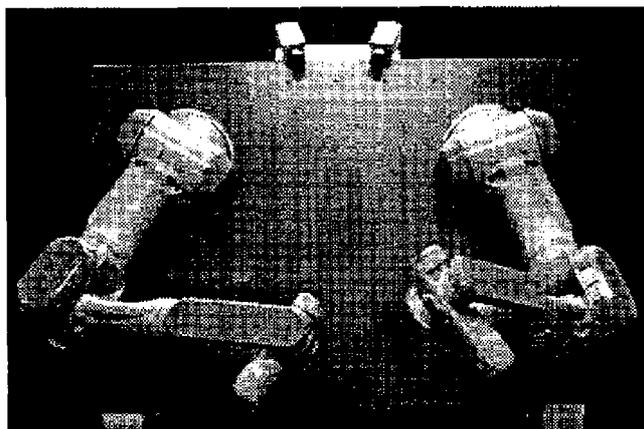


Fig. 2 P-ARM

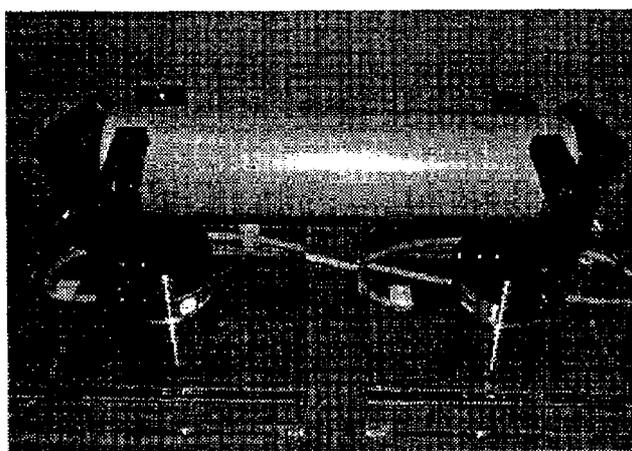


Fig. 3 BarrettHand (BH8-250)

- 画像処理ボード, トラッキングビジョンボード  
画像処理ボードには、日立(株)製のPCIバス版カラービジョンボード(IP-5000)を用いている。また、トラッキングビジョンボードには、富士通(株)製のPCIバス版カラートラッキングビジョンボード(TRV-CPW5)を用いている<sup>3)</sup>。これらのボードはLinuxをOSとするコンピュータに実装されている。カメラは、SONY(株)製のCCDカメラ(DXC-107A)を用いている。今後、カメラを動かすために2つのモータを用いた2自由度のカメラ台を取り付ける予定である。

#### ● 制御システム

P-ARM, および BarrettHand を制御する下位のコンピュータにはリアルタイム OS である VxWorks を用いている。VxWorks をインストールするターゲットコンピュータには、CPU Pentium 200 MHz, メモリ 32 MB の PC を用いている。また、画像処理やトラッキングビジョンの処理を行う上位のコンピュータには、OS として Linux を用いている。Linux をインストールするコンピュータには、CPU PentiumII 300 MHz, メモリ 128 MB の PC を用いている。上位システムの制御周期は下位のシステムに比べ十分長く、リアルタイム性の要求も低いので Linux は適している。上位のシステムでは、より高度な知的システムを構築するため EusLisp を導入する予定である。上位システムと下位システムとの通信は LAN を介して行っている。

## 2.2 地上システム

地上システムの詳細を以下に示す。

- 6自由度小型高性能ハプティックインタフェース

これまでに本研究室では、6自由度小型高性能ハプティックインタフェースを開発してきた<sup>4)</sup>。このハプティックインタフェースをマスターアームとして用いている。このハプティックインタフェースは、広い可動範囲を有していることが特徴のひとつである。直径150 mmの球内で各軸まわり $\pm 70$ 度以上の可動範囲を実現できる。手先出力は10 Nである。Fig. 4にハプティックインタフェースの概観図を示す。

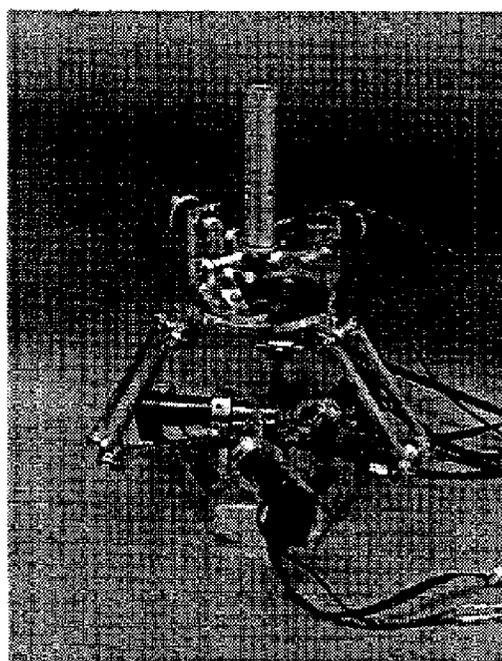


Fig. 4 A 6-DOF Haptic Interface

- オペレータ支援システム

オペレータ支援用グラフィックワークステーションとしてSGI製のOCTANE SSIを用いている。グラフィックモデルは、Open Inventorを用いて作成している。Fig. 5にOpen Inventorを用いて作成したP-ARMのグラフィックモデルを示す。また、LANを介したビデオミーティングシステムを用いることによりスレーブアームの実画像を得ることができる。

- 制御システム

ハプティックインタフェースを制御するコンピュータにはリアルタイムOSであるVxWorksを用いている。VxWorksをインストールするターゲットコンピュータには、CPU Pentium MMX 233 MHz、メモリ32 MBのPCを用いている。ハプティックインタフェースとオペレータ支援システムの通信はLANを介して行っている。

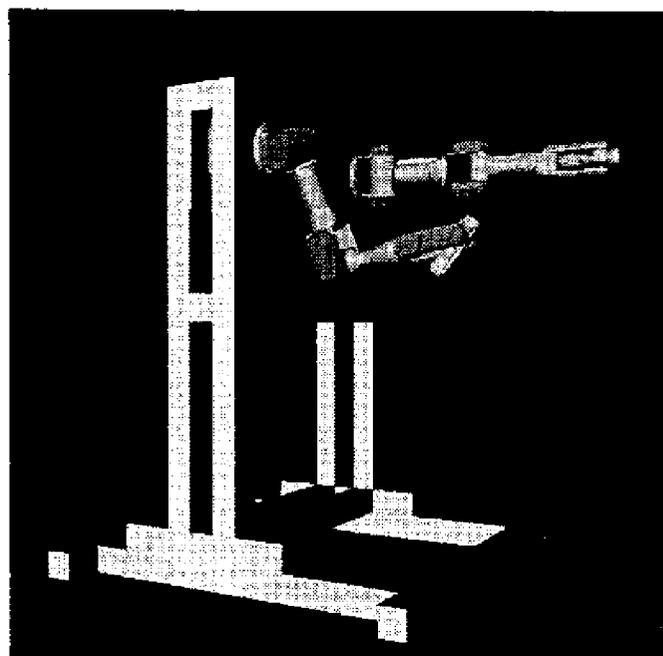


Fig. 5 P-ARM Graphics Model

## 2.3 開発環境

双腕宇宙遠隔操作実験システムの開発用端末として、SGI製のO2を用いている。なお、開発環境と軌道上系は、実験システムとして隣接しており、前述のビデオミーティングシステムによる動画像の通信には、本ワークステーションを利用している。軌道上システム、地上システム、開発環境間の通信はLANを介して行っている。軌道上システム及び地上システムで使用しているVxWorksのホストコンピュータには、SUN ULTRA 1を用いている。

### 3. バーチャルレーダを用いた障害物提示

宇宙遠隔操作では、高い信頼性、操作性、安全性を確保しなければならない。しかし、宇宙ロボットを地上から遠隔操作する場合、通信時間遅れが存在するため、オペレータの操作性は著しく劣化し、作業効率が低下することはよく知られている。そこで、効果的なオペレータ支援によりオペレータの負担を軽減することが必要となる。

通常、遠隔操作においては、オペレータは手先の動きに注目しがちであり、リンクと障害物との衝突を把握することは難しい。一例を Fig. 6 に示す。特に、特異点近傍では手先の動きに比べリンクの動きが複雑で大きいため、オペレータがその動きを予測することは非常に困難である。

そこで、効果的な障害物情報提示のために、これまでバーチャルレーダと呼ばれるヒューマンインタフェースを提案し、本研究室の宇宙遠隔操作実験システム ARS/A (Aerospace Robot System for A-ARM) において実験を行ってきた<sup>5)</sup>。バーチャルレーダとは、リンクの衝突を含むマニピュレータ全体の衝突情報を手先レベルでオペレータに提示するものである。しかし、これまで3自由度マニピュレータにおいてしか検証されておらず、姿勢の変化がある場合には対応できなかった。

ここではこのバーチャルレーダを一般的な6自由度マニピュレータに拡張する場合について述べる。

#### 3.1 バーチャルレーダ

非冗長マニピュレータの場合、手先の位置・姿勢により、マニピュレータのコンフィグレーションは一意に決まる。したがって、周囲の環境を知ることができれば、環境とマニピュレータ全体に対する衝突情報を手先の位置・姿勢にによって表すことができる。したがって、手先が安全に衝突せずに動作できる範囲をあらかじめ知ることができ

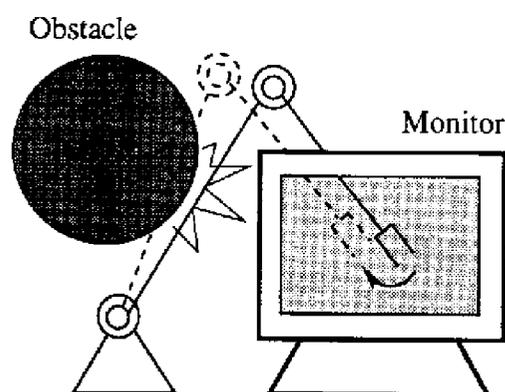


Fig. 6 Collision of Link and Obstacle

る。この際、周囲の環境は、センサ情報からオンラインで求めても、あらかじめ構築したモデル環境に基づいて求めてもよい。この手先の安全可動範囲をオペレータにわかりやすく提示したものがバーチャルレーダである。

Fig. 7 にバーチャルレーダの概念図を示す。バーチャルレーダは図中の半透明な球である。オペレータに必要な情報は、手先近傍における障害物情報なので、手先を中心とした球で障害物情報を表すこととした。この球の大きさは、作業の動きを考慮して考える必要がある。

バーチャルレーダではマニピュレータが環境と衝突する場合、その手先の位置の球を欠けさせることで障害物情報を表す。また手先のアプローチ方向に手先姿勢を示すバーチャルビームを表示する。このビームとバーチャルレーダの交点により、任意の手先姿勢がバーチャルレーダ上に示すことができる。そこで、衝突する手先姿勢を、バーチャルレーダ上に模様のように色をつけることで表す。以上より、マニピュレータを動作させると、それに応じてバーチャルレーダの形は変化し、バーチャルレーダ上の模様も変化していく。

これにより、衝突情報をわかりやすくオペレータに提示することができる。

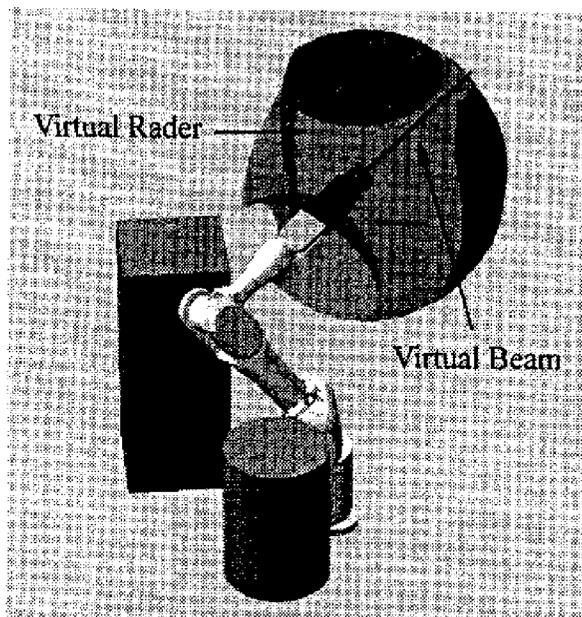


Fig. 7 Concept of Virtual Rader

### 3.2 バーチャルレーダの特徴

バーチャルレーダは、shared intelligence<sup>6)</sup>の考えを用いている。すなわち、オペレータの認識しにくいマニピュレータ全体の衝突情報を計算機がチェックし、計算機には難しい軌道生成をオペレータが行っている。以下に、バーチャルレーダの利点を示す。

- 計算機は軌道の生成には関与しないので、オペレータがマニピュレータを自由に操作することができる。
- 衝突するまでの位置・姿勢の余裕を、オペレータに伝えることができる。
- 手先近傍に表示することができるので、Fig. 6に示すような場合でも、オペレータは作業しながらマニピュレータ全体の障害物情報を把握することができる。

### 3.3 バーチャルレーダの提示

環境は既知であるとし、モデル環境をコンピュータ内に構築している場合について述べる。この場

合、あらかじめすべての位置・姿勢に対応した衝突テーブルを作成することができる。

オペレータの入力指令値を基に、スレーブマニピュレータの位置・姿勢を計算する。あらかじめ製作しておいた衝突判定テーブルから、その姿勢において、衝突しない範囲を球状のバーチャルレーダにより提示する。また、その位置において、姿勢を変化させても衝突しない範囲をバーチャルレーダ上に提示する。これらを仮想環境内あるいはカメラからの実画像上に表示する。したがって、姿勢だけを動かしても、バーチャルレーダの形は変形していき、また逆に位置だけを変化させてもバーチャルレーダの模様は変化する。

オペレータはこのバーチャルレーダの形や模様を見ることにより、安全な軌道や姿勢を探しながら操作する。

最後に、現在実験で用いているバーチャルレーダを示す。Fig. 8はワイヤフレームを用いたバーチャルレーダである。

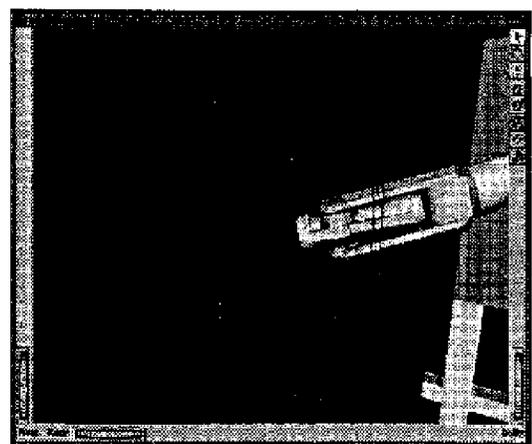


Fig. 8 Example of Wireframe Virtual Rader

## 4. おわりに

本論文では、双腕宇宙遠隔操作実験システムを構築し、詳細を述べた。また、効果的なオペレータ支援のひとつとして、マニピュレータ全体の衝突情報を手先に提示するバーチャルレーダの概念を示し、これを6自由度マニピュレータに拡張する場合について述べた。

## 参考文献

- 1) 尹祐根, 高橋三恵, 鎌田大輔, 妻木勇一, 内山勝: 双腕宇宙遠隔操作実験システムの構築, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1343/1344 (1998)
- 2) 大西典子, 大西献: 可搬式汎用知能アーム登場! — オープンロボットの提案 —, 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 8, 1137/1142 (1994)
- 3) 松本吉央, 坂井克弘, 稲邑哲也, 稲葉雅幸, 井上博允: PCベースのハイパーマシーン: 知能ロボットの汎用カーネル, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 979/980 (1997)
- 4) 妻木勇一, 成瀬仁, 内山勝: 6自由度小型高性能ハプティックインターフェース, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 2BI3-7 (1998)
- 5) M. Takahashi, Y. Tsumaki, D. N. Nenchev and M. Uchiyama: A Teleoperation System with Collision Avoidance Capability Based on Virtual Radar, Proc. 6th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, 154/159 (1997)
- 6) P. Bhatia and M. Uchiyama: Shared Intelligence for Telerobots with Time Delay, Theory and Human Interface with Local Intelligence, Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1441/1448 (1994)