

# 仮想世界を利用した移動ロボットの遠隔操作システムの開発

非会員 鈴木 剛 (理 研)  
 非会員 関 根 武 (味の素)  
 非会員 藤 井 輝 夫 (東大生研)  
 正 員 浅 間 一 (理 研)  
 非会員 遠 藤 勲 (理 研)

## Development of a Mobile Robot Teleoperation System utilizing Virtual World

Tsuyoshi Suzuki, Non-member (RIKEN), Takeshi Sekine, Non-member (Ajinomoto), Teruo Fujii, Non-member (The University of Tokyo), Hajime Asama, Member (RIKEN), Isao Endo, Non-member (RIKEN)

The paper discusses the problems in teleoperation systems for mobile robot in a multi-robot environment and the utilization of a virtual world in such systems. In order to achieve smooth operation of the mobile robot through the communication link, we should consider the data transfer in the systems. To compensate the incomplete data sets, virtual images can be generated by computer graphics when the information on the working environment can be acquired beforehand. In this paper, we construct a teleoperation system with the virtual world. Performance of the system is examined through the experiments with an actual mobile robot. And it is shown that the virtual robot can be operated by a human operator in almost the same manner as the teleoperated real robot

キーワード：遠隔操作，仮想環境，ネットワーク・ロボティクス，移動ロボット，マルチロボット

### 1. はじめに

自律したロボットや計算機など複数台の要素機構から構成されるマルチロボットシステムは、各要素間の様々な協調行動により多様な状況に対処する柔軟性や、システム内のいくつかの要素が故障しても他の要素が作業の代替を行うなどの耐故障性が期待されるシステムである<sup>(1)(2)</sup>。そのため、原子力施設の保全作業などに代表される極限環境下での多様かつ複雑な作業を自動化するシステムとして注目を集めている。これに関する従来の研究では、ロボットの自律化に主な力点が置かれていたが、システムの自律的機能によって可能な作業は一般に定型的・ルーティン的なものに限られる。非常時の処置のような非定型的な作業も含む全ての作業をロボット群に自律的に行わせることは技術的に困難であり、むしろ作業に対して適宜人間が介入し、ロボット群の機能を補いながら作業を遂行することを目指す方が現実的かつ柔軟なシステムの実現につながる。更に、近年では、インターネットに代表されるネットワーク技術の発達が著しく、広域ネットワークを利用したロボットの遠隔操作が可能であるため、このような群ロボットとの協調を念頭においた遠隔操作技術は、極限環境下での作業だけでなく、遠隔医療や福祉など社会における様々な分

野への応用が期待できると考えられる。

群ロボットの遠隔操作に関して、例えば、長谷川らは、マイクロロボット群を直感的な動作で操作するインタフェースを提案している<sup>(3)</sup>。しかし、ロボットに作業を行わせるときは、ロボットを個別に操作する必要があり、作業時に群の効果を生かせていない。また、森島らの抽象的指令を用いた群ロボット操作インタフェース<sup>(4)</sup>や、Adamsらの複数の移動マニピュレータと人間との協調による物体のハンドリングシステム<sup>(5)</sup>なども提案されているが、これらのシステムでは、人間は作業計画を行うのみで、ロボットに詳細な指令を与えることができない。マルチロボットシステムの特性を考えると、人間がシステムの状況を判断し、それに合わせてロボット群に自律的に作業させたり、人間の指示通りに群や個々のロボットを操作したりする柔軟性が必要となる。このような観点から、我々は、現在までに、マルチロボットの遠隔操作を目的として、通信を利用した群ロボットのモニタリング手法の開発<sup>(6)</sup>や、WWW(World Wide Web)のブラウザを利用した複数ロボットの遠隔操作システムの開発<sup>(7)(8)</sup>などを行ってきた。また、Kawabataらは、自律機能を付加したロボットの直接的遠隔操作システムを開発した<sup>(9)(10)</sup>。

しかし、マルチロボット環境下では、送受信する情報量

がロボット台数に比例して増加するため、遠隔操作時にネットワークの負荷が増大する。また、複数ロボットが存在するため作業環境が複雑でありシステム全体の状況を把握し難いことに加え、個々のロボット操作時には環境内で行動している他のロボットが移動障害物にも成りうるため、これらの動きも考慮しなければならないなどの問題があった。そこで、本論文では、このような問題を解決するために、仮想世界を用いたマルチロボット遠隔操作システムの開発を行う。現在までに、仮想世界を利用したロボット遠隔操作に関する研究がいくつかなされている。Hirukawaらは、WWR (World Wide Robotics) を提唱し、VRML (Virtual Reality Making Language)等のモデリング言語によって構築した仮想世界を用いて、どこからでも遠隔操作を行えるシステムの研究を行った<sup>(11)</sup>。また、Massonらは、仮想世界上で操作プログラムを作成し、遠隔地でバッチ処理的に作業を行わせるシステムを構築した<sup>(12)</sup>。しかし、これらは、いずれもオフラインでの遠隔操作であり作業実行時に時間遅れ等の影響を無視できるなどの利点があるが、マルチロボット環境のように、他のロボットや環境とのインタラクションによってシステム状態が動的に変化するシステムには適していない。

本論文では、複数ロボットを含む遠隔環境を仮想世界上でシミュレートすることにより、システムの情報を分散するとともに、遠隔操作時の情報遅延や欠落を補完する。また、実世界情報をモニタリングすることにより仮想世界情報を修正し両世界間の情報に整合性を持たせる。これらによりマルチロボット環境下でオンラインで遠隔操作可能なシステムの構築を目指す。特に本論文では、同一環境内に複数台のロボットが存在するような状況での遠隔操作を対象として議論を進めていく。

## 2. 遠隔操作システムの構成

図1に構築した仮想世界を利用した遠隔操作システムの構成を示す。システムの詳細について次に述べる。

### <2.1> 移動ロボットの概要

様々な作業要求に応じてロボット間で協調行動を実現するためには、環境に応じて柔軟に動作できる移動機能が要求される。そこで我々は、汎用の移動プラットフォームとして、平面内のあらゆる方向に移動可能な全方向移動ロボットの開発を行ってきた<sup>(13)</sup>。この移動ロボットの外観を図2に示す。ロボットの制御にはPCを使用しており、リアルタイム・マルチタスクOSであるVxWorksを搭載している。また、電源としてバッテリーを搭載しており、ネットワークとの接続には無線LANを使用しているため、自律かつ自立的な行動が可能である。このロボットにCCDカメラを搭載し、操作員に実際の映像を提供することができるようにした。CCDカメラはロボット搭載のPCからRS-232Cを介してパン/チルト/ズームの制御が可能である。CCDカメラからの画像は、ロボット上の計算機

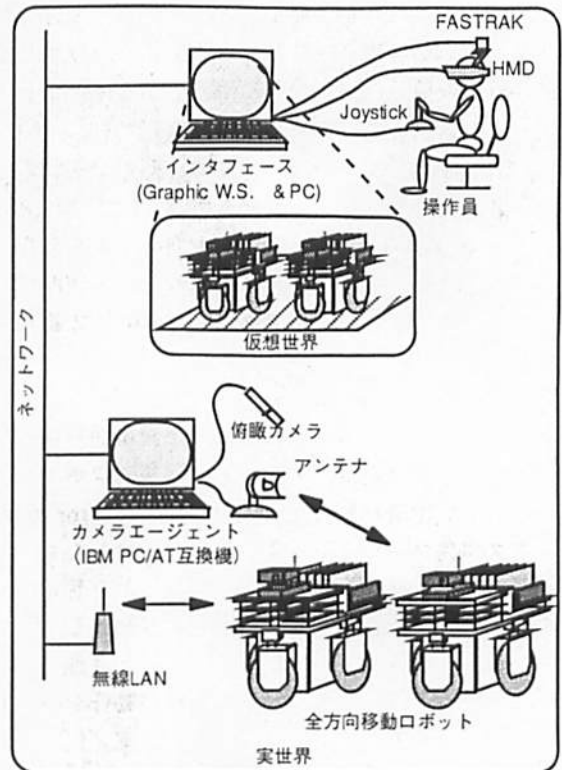


図1 遠隔操作システムの構成  
Fig. 1. Scheme of Teleoperation System

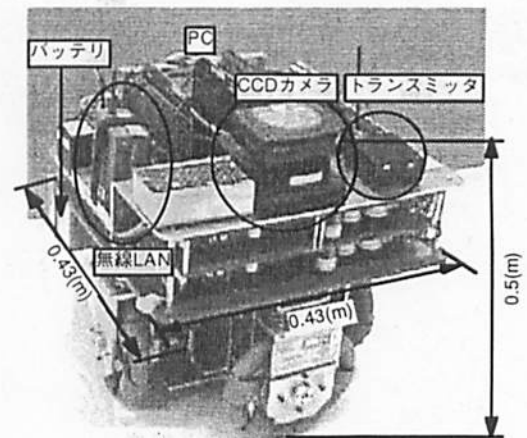


図2 全方向移動ロボットの外観  
Fig. 2. Omni-directional Mobile Robot

の負担を減らすため、トランスミッタによってネットワーク上のPCにつながれたアンテナに送信し、俯瞰カメラの映像と同様にネットワークに流される。これらの映像は、WWWのブラウザで見ることができる。

### <2.2> 操作デバイス

全方向移動ロボットの操作には、移動特性を考慮してジョイスティックを用いることとした。ジョイスティックの前・後・左・右の2自由度を使ってロボットの並進移動を行い、また、ジョイスティック上のボタンを押しながら左右に倒すことによって時計/反時計方向の回転を行う。ロボットへの指令はジョイスティックの変化によって、並進0.05, 0.10, 0.15[m/s], 回転10, 20, 30[deg/sec]の各3段階の

速度値で与えられる。これにより、ロボットの動作に対応した全方向への移動指令が可能である。また、ロボット上のカメラの雲台操作には、操作員が使用するHMD (Head Mounted Display)上に搭載したFASTRAK(磁気センサ)を用いた。FASTRAKは物体の3次元位置を磁界の変化から検出するシステムである。本システムでは、FASTRAKを用いて、操作員の頭部の上下/左右2方向のみの角度を検出し、その値を指令値とした。カメラ雲台の回転速度は約15 [deg/s]、移動分解能は1 [deg]である。操作画面と操作環境を図3に示す。

### <2.3> 仮想世界

仮想世界は、仮想ロボットおよび仮想環境から成る。仮想ロボットと仮想環境は、実際の全方向移動ロボットとロボットが動く実環境を基に、SGIのOpen Inventor 3Dグラフィックス作成ツールを用いて3Dモデル化したものである。本研究では、プラント内の監視作業などを想定しているため、ロボットの動く基本的な環境は既知としてモデルを構築した。仮想ロボットは、実ロボットとは独立した要素(プロセス)であり、実ロボットと同様の動作を行うことができる。また、通信機能を持っており、実/仮想ロボットや他のプロセスとの情報交換が可能である。図4に仮想世界の例を示す。

### <2.4> 遠隔操作システムのソフトウェア構成

図5は、本システムのソフトウェアモジュールの構成を



図3 操作環境  
Fig. 3. Environment for Teleoperation

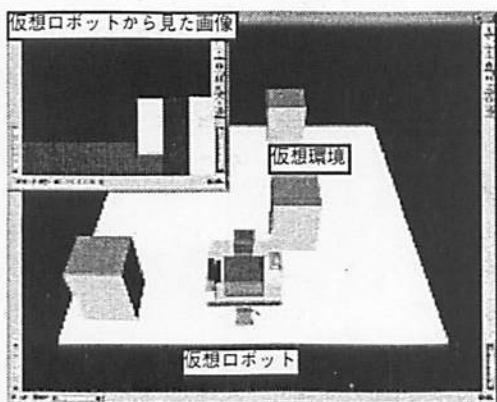


図4 仮想世界  
Fig. 4. Virtual World

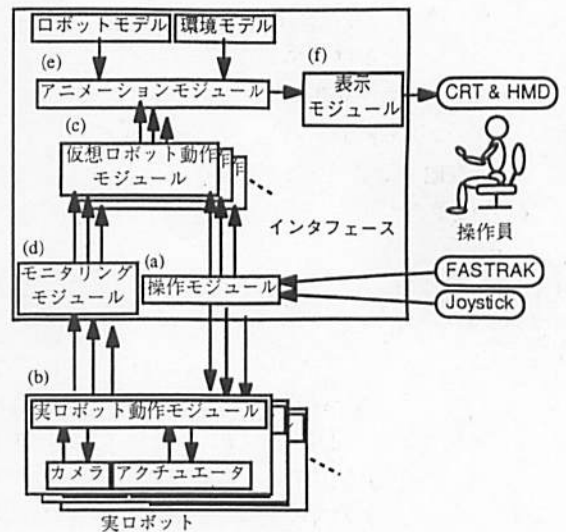


図5 ソフトウェアモジュール構成  
Fig. 5. Scheme of Software for Teleoperation

示したものである。各モジュールについて以下に述べる。なお、各アルファベットは、図中のものと対応する。

- (a) 操作員が操作を行うと、操作モジュールがジョイスティック、および、FASTRAKのデータを読み込み、操作対象となる実ロボット、および、仮想ロボットへ同時に送信する。
- (b) 実ロボット上では、操作データを基に実ロボット動作モジュールがアクチュエータおよびカメラの制御を行う。また、エンコーダ値とカメラから得られた画像データをモニタリングモジュールに送る。
- (c) 一方、操作システム内では、仮想ロボット動作モジュールがロボットの動作を実世界と同時進行でシミュレートする。また、モニタリングモジュールから送られてきた実ロボットの情報(画像、IDや位置等のロボットの状態)を基に、仮想ロボットの情報を更新する。ただし、操作員からの連続した操作入力がある時に更新を行うと、データの不整合や誤操作の原因となる可能性がある。そこで、操作システム内の仮想ロボット動作モジュールがジョイスティックの入力値の変化を監視し一定の時間入力がなかった場合に仮想世界情報を更新することとした。ここで、ロボット操作は20[msec]のサンプリングタイムで行われ、仮想ロボットと実ロボットの通信は50 [msec]間隔で行われる。また、本システムは、著者らの研究室のネットワーク環境上に構築されており、ネットワーク上では最大約150[msec]の時間遅れが確認されている。そこで、仮想世界情報の更新は、ジョイスティックからの入力が1[sec]以上なかった場合に行うこととした。これは、本システム中の時間遅れを考慮しても、実ロボットの最新情報が得られる十分な時間である。また、仮想世界では、実ロボットに対応する仮想ロボットモジュールを増やすことによって、環境内に存在するロボット



の台数が増えた場合にも、仮想ロボットを表示することができる。

- (d) モニタリングモジュールは環境内に存在する全てのロボットの情報をモニタリングし、それぞれ対応する仮想ロボット動作モジュールに送る。
- (e) アニメーションモジュールは、仮想ロボット動作モジュールから送られてきた座標値を基に、環境モデルとロボットモデルのデータを読み込み、3Dグラフィックのシミュレーション画面として構成する。
- (f) 3Dのシミュレーション画面、および、実世界(俯瞰、および、実ロボット上のカメラ)の画像は、表示モジュールによってCRT、および、HMD上に表示される。

### 3. 遠隔操作実験

#### <3.1> 仮想世界を用いた操作性の比較

ここでは、構築した仮想世界の有用性を確認するために、図6に示す環境において、操作員がロボットを中央の初期位置から破線で示す経路に沿って操作し、再び初期位置に戻すという作業を(A)実世界に取り付けた固定俯瞰カメラおよび実ロボット上のCCDカメラからの映像のみを用いて操作した場合と、(B)仮想世界を併用して操作した場合とで比較した。俯瞰カメラの設置については、死角の生じないよう環境中のあらゆる箇所にカメラを設置するのは困難であること、また、非定型作業までを考慮して適切な位置にカメラを設置するのは不可能であることなどを考慮し、一方向からのみの俯瞰とした。実験は、同じ作業を各5回行い、それぞれの操作にかかった平均時間を比較した。図7に実験の様子を示す。(a)は俯瞰カメラからの映像、(b)は仮想世界の映像である。また、実験結果、および、実ロボットの移動軌跡を、それぞれ表1、および、図8に示す。(A)の方法で操作した場合、ロボットが図6中のP点を過ぎると、図7(a)に示すように、俯瞰カメラからの映像では、中央部分の壁によって死角を生じるためロボット位置の把握が困難となった。そのため、ロボット上のCCDカメラからの映像のみを頼りに操作しなければならず、図8(A)の円内のようにP点でロボットの向きを変え

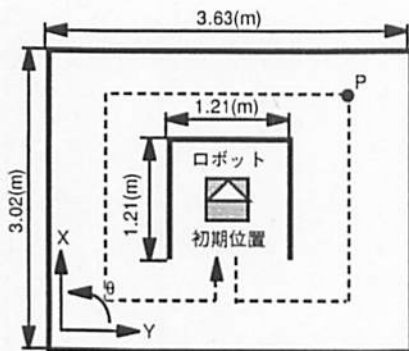
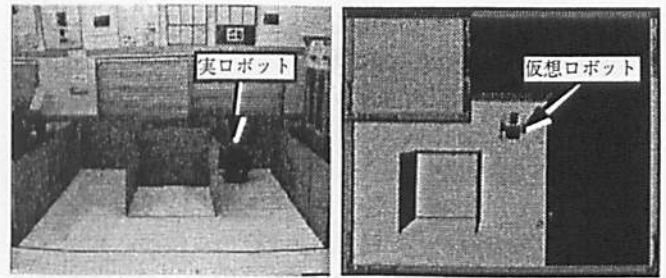


図6 実験環境  
Fig. 6. Experimental Environment

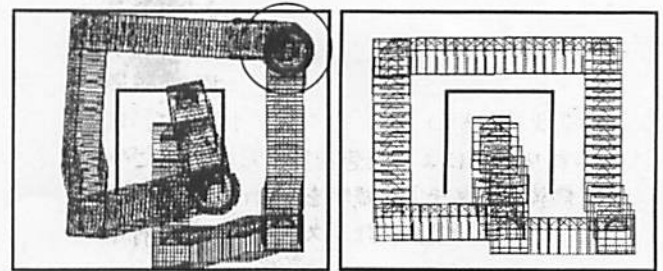


(a) 俯瞰カメラからの映像 (b) 視点を変更した仮想世界  
図7 操作画面の例

Fig. 7. Example of Operation Window

表1 実験結果  
Table 1. Experimental Result

回数	(A)仮想世界なし	(B)仮想世界あり
	時間(sec)	時間(sec)
1	109.6	71.4
2	77.8	65.8
3	80.4	65.6
4	76.4	63.4
5	79.0	74.4
合計時間(sec)	423.2	340.6
平均時間(sec)	84.64	68.12



(A)仮想環境なし (B)仮想環境あり  
図8 実ロボットの移動軌跡

Fig. 8. Trajectory of the Robot in the Real World

作業を実行した。それに対して(B)の方法で操作した場合、図7(b)のように仮想世界の視点を変更して操作することができるため、P点に来てもロボットの向きを変えずに環境を推測しながら操作することが可能であった。従って、図8(B)のように効率良くロボットを動作させることが可能となり、その結果、表1に示すように作業時間が短縮されたことが確認できた。また、図8(A)では、移動の際に経路を細かく修正しているにも関わらず、次の目標点を決定し難いため壁などに衝突しているのに対し、(B)の場合、次の目標点までの移動経路を推定しやすく、安定した操作が行えていることが確認できた。

#### <3.2> マルチロボット環境下での遠隔操作

ここでは、ロボットの位置情報に着目し、実ロボット情報のモニタリングとそれに基づく仮想ロボット情報の補正の効果について確認した。実験は、図9に示すように、操作対象となるロボットの他に、同一環境内を走行するロボットが存在する状況で行い、ロボット#2が一定速度で実線の経路を走行している状況で、操作員が仮想世界を用いながらロボット#1を破線で示す経路に沿って操作した時の

実ロボットおよび仮想ロボットの位置を比較した。図10に実験の様子であり、(a)は俯瞰カメラからの映像、(b)は仮想世界の映像を示している。図11はロボット#1について、実ロボットと仮想ロボットの位置の変化を表したものである。各X, Y,  $\theta$ 方向は図6のものと対応する。また、図中\*印は、X軸の補正点のひとつを拡大したものである。ここでは、仮想ロボットの位置の変化を示す破線が実ロボットの位置変化を示す実線に46(sec)付近で重なっていることから、この時点で位置の補正が行われたことが確認でき、実世界の情報が仮想世界に反映されていることがわかる。その他、図11中の各円内で、それぞれ位置の補正が行われたことが確認できた。また、図12は、2台の実移動ロボットの移動軌跡である。実世界の情報を仮想世界に反映することで、操作対象であるロボット#1が、走行している他のロボット#2と壁との間の狭路を通過できていることがわかる(円内)。これらより、実世界情報のモニタリングによる仮想世界情報の補正の効果が確認できた。

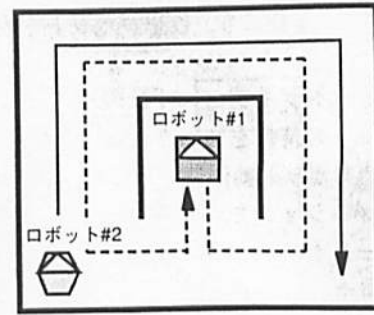
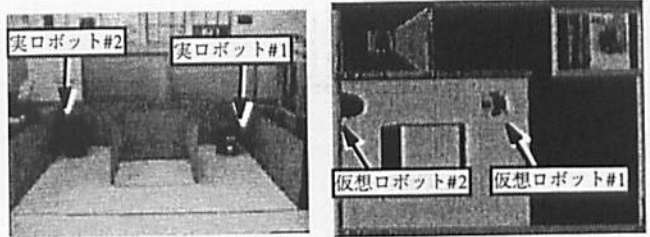


図9 実験環境

Fig. 9. Experimental Environment



(a) 俯瞰カメラからの映像 (b) 仮想世界の映像

図10 操作画面の例

Fig. 10. Example of Operation Window

#### 4. おわりに

本論文では、マルチロボット環境下での移動ロボットの遠隔操作を目的とし、仮想世界を用いたロボットの遠隔操作システムについて述べた。マルチロボット遠隔操作における仮想世界の利用について述べるとともに、実世界情報のモニタリングによる仮想世界情報の修正について議論し、遠隔操作システムの提案を行った。また、全方向移動ロボットを対象に遠隔操作システムの構築を行った。構築したシステムを用いて遠隔操作実験を行い、本システムの有用性を確認した。

現状ではモニタリング情報として、主に実ロボットの内外界センサ情報を用いているため、実世界での外乱などの影響による誤差までを仮想世界に反映するのは困難である。従って、ロボットの外界センサ等の情報もモニタリングし

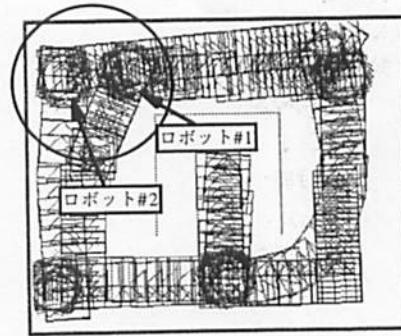


図12 実移動ロボットの軌跡

Fig. 12. Trajectories of the Robots in the Real World

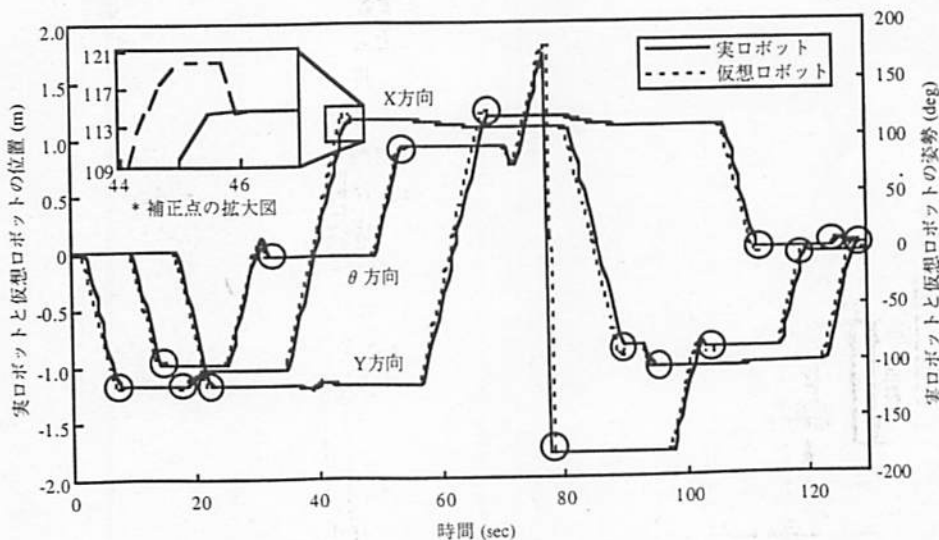


図11 ロボット#1における実ロボットと仮想ロボットの位置・姿勢

Fig. 11. Comparison of Position Data between Real and Virtual Robot about Robot #1

正確な位置情報を得る必要がある。また、本論文では、ロボットを目的地までの移動させることを目標としたため、オペレータの操作入力を基準に仮想世界情報の更新を行ったが、ロボットに行わせる作業内容により最適な補正方法やタイミングは異なると考えられる。また、ロボットの情報だけでなく、障害物などのロボットが得た環境情報もモニタリングし、動的に仮想世界の修正も行えるほうが望ましい。今後、このような実世界のモニタリング方法、および、それを用いた仮想世界の構築などについて検討するとともに、複数ロボットを操作対象とした遠隔操作システムの開発を行う予定である。

(平成11年12月17日受付, 同12年3月3日再受付)

文 献

- (1) H. Asama: *Distributed Autonomous Robotic Systems*, Springer-Verlag, 3 (1994)
- (2) M. Ito: *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer-Verlag, 3 (1996)
- (3) 長谷川, 佐藤, 野原, 松井: 日本ロボット学会誌, 14, 4, 567 (平8)
- (4) 森島, 平井: 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 999 (平6)
- (5) J. A. Adams, R. Bajcsy, J. Kosecka, V. Kumar, R. Mandelbaum, M. Mintz, R. Paul, C. Wang, Y. Yamamoto and X. Yun: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, 200 (1995)
- (6) 鈴木, 横田, 浅間, 嘉悦, 遠藤: 日本機械学会論文集C, 62, 602, 21 (平8)
- (7) T. Suzuki, T. Fujii, H. Asama, K. Yokota, H. Kaetsu, N. Mitomo & I. Endo.: *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer-Verlag, 50 (1996)
- (8) T. Suzuki, T. Fujii, H. Asama, K. Yokota, H. Kaetsu & I. Endo, *Advanced Robotics*, 11, 8, 781 (1998)
- (9) K. Kawabata, T. Ishikawa, T. Fujii, T. Noguchi, H. Asama & I. Endo: *Proce. of the Int. Conf. on Field and Service Robotics*, 158 (1997)
- (10) 川端, 石川, 浅間, 嘉悦, 遠藤: 電学論C, 118, 11 (平10)
- (11) H. Hirukawa, T. Matsui & S. Hirai: *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1801 (1997)
- (12) Y. Masson & R. Fournier: *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1813 (1997)
- (13) H. Asama, M. Sato, L. Bogoni, H. Kaetsu & I. Endo: *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2, 1925 (1995)

鈴木 剛



(非会員) 1969年1月2日生。1994年東洋大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。1998年埼玉大学大学院理工学研究科生産科学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同年, 理化学研究所工学基盤研究部奨励研究員。現在, 同協力研究員。群ロボット遠隔操作に関する研究に従事。日本機械学会, 精密工学会, 日本ロボット学会等の会員。

関根 武



(非会員) 1974年9月30日生。1999年東京理科大学大学院工業化学専攻修了。現在, 味の素株式会社生産技術研究所エンジニアリング技術部に勤務。仮想世界を利用した遠隔操作システムに関する研究に従事。

藤井 輝夫



(非会員) 1964年4月5日生。1988年東京大学工学部船舶工学科卒業。1991年~1993年日本学術振興協会特別研究員。1993年東京大学大学院博士課程修了。博士(工学)。同年, 東京大学生産技術研究所客員助教授。1994年同助教授。1995年より理化学研究所生化学システム研究室勤務。1999年より東京大学生産技術研究所海中工学センター助教授。生化学および生物学のためのマイクロシステム, 自律分散型ロボットシステム, モジュラー型ロボットの研究開発に従事。AAAS, INNS, IEEE, 日本生物物理学会, 日本造船学会, 日本ロボット学会等の会員。

浅間 一



(正員) 1959年1月18日生。1984年東京大学大学院工学系研究科機会工学修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補。生化学システム研究室研究員, 工学基盤研究部副主任研究員を経て, 現在同部技術開発促進室室長。1999年埼玉大学大学院理工学研究科客員助教授。工学博士(東京大学)。自律分散型ロボットシステム, 複数移動ロボットの協調, 群知能, ロボットによる保全技術, バイオプロセスの知能化技術の開発に従事。1995年日本機会学会ロボメカ講演会Best Poster賞, RoboCup-98 Japan Open 人工知能学会賞(UTTORI United Team)等受賞。Distributed Autonomous Robotic Systems(Springer-Verlag)の第1, 2巻の編者。IEEE, ニューヨーク科学アカデミー, 日本機会学会, 精密工学会, 日本ロボット学会等の会員。

遠藤 勲



(非会員) 1940年8月14日生。1970年東京大学工学研究科博士課程修了。理化学研究所化学工学研究室勤務。現在同主任研究員。1989年より埼玉大学理工学研究科客員教授兼任。生物工学, 特にバイオプロセスエンジニアリングに関する研究に従事。1978年科学工学協会論文賞受賞。1994年ヘルシンキ効果大学名誉工学博士。ニューヨーク科学アカデミー, アメリカ化学工学会, アメリカ化学会, 化学工学会, 日本ロボット学会等の会員。