

# ネットワークを介した人間・ロボット共生に関する研究

柘植英明\* 福田敏男\*\* 新井史人\*\*\*

飯田佳弘\* 西嶋 隆\*

## Cooperative Operation between Human and Robot of Master-Slave System Using Network

Hideaki Tsuge\*, Toshio Fukuda\*\*, Fumihito Arai\*\*\*,  
Iida Yoshihiro\* and Takashi Nishijima\*

あらまし 現在、遠隔操作システムは人が直接作業を行なうことができない多くの場所で利用されているが、操作に相当の訓練が必要であるため、操作性の向上が期待されている。そのなかで、仮想空間を利用した遠隔操作システムは、操作性を改善する一つの方法として注目されている。しかし、仮想環境は、時間遅れが生じるシステムの操作改善や、操作誘導などを目的として利用されており、任意の視点から操作が可能であるという特徴を生かしたシステムについては、ほとんど議論されていない状況にある。我々は、マスタの操作方向、反力方向が、仮想空間内の視点に基づいた仮想ツールの移動方向、反力方向に常に一致する遠隔操作モデルを提案し、その操作性について評価を行なう。さらに、ネットワークを利用したマスタスレーブ型遠隔操作システムの構築を行ない、仮想空間内での作業における操作環境提示手法を検討する。仮想空間内での操作実験により、提案する遠隔操作モデルは、従来手法よりも有効であることを確認した。

キーワード バーチャルリアリティ、遠隔操作、ユーザインタフェース

### 1. はじめに

遠隔操作は、宇宙空間、原子炉内、バイオテクノロジー分野におけるマイクロマニピュレーション等、人間が直接作業を行うことが困難な環境において使用されている[1]。また、生産現場等においては、3K作業(研磨作業等)から作業者を解放するため、遠隔操作を利用するための試み[2]~[4]が行われている。しかしながら、遠隔操作を行うためには、相当の熟練した技能が必要となり、このことが遠隔操作システム導入における大きな問題点の一つになっている。

一方、コンピュータグラフィックス等の発達により、人工的に作り上げた仮想空間の中で、人があたかも現実の世界と同様な体験をする仮想現実感(Virtual Reality: VR)の研究が盛んに行われるようになった。近年では、VRの研究は、単なる映像の提示だけでなく、

触覚や聴覚等を対象とした研究も盛んに行われ、様々な分野への応用が試みられている[5]。

遠隔操作においても、操作性を改善するためにVR技術を利用した遠隔操作に関する研究が行われている[6]~[9]。G.Hirzingerら[6]は、NASAのスペースシャトル用マニピュレータシステム(ROTEX)において、仮想空間内で動作シミュレーションを行うことにより作業データを生成し、そのデータを宇宙作業ロボットへ送信するシステムを提案した。これにより、マスタとスレーブ間の時間遅れから生ずる操作の困難さを改善した。森川ら[7]は仮想空間内の動作シミュレーションにおいて、仮想ガイドを設定することにより、マスタにおける作業指示に関する操作性の改善を図った。堀江ら[8]は、仮想空間を用いた遠隔操作において、実環境から実際にスレーブアームが受ける反力をマスタにフィードバックさせることにより、作業中に環境から受ける反力をオペレータが感じることを可能にし、これにより操作性の改善を図った。E.Natonekら[9]は、CCDカメラからの画像により、対象物の位置・姿勢を計測し、あらかじめ登録した形状データを用いて、リアルタイムに対象物のモデルを仮想空間上に提示する手法を開発した。この手法においては、任

\* メカトロ応用部  
Mechatronics Division

\*\* 名古屋大学先端技術共同研究センター  
Center for Cooperative Research in Advanced Sci. & Tech.,  
Nagoya University

\*\*\* 名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻  
Department of Micro System Engineering, Nagoya  
University

意の視点から作業空間の表示が可能である．これらの研究においては，マスタとスレーブ間の時間遅れから生ずる操作の困難さの改善や操作の誘導および力覚の提示等による操作性の向上を目的に仮想環境を利用しており，作業に対する視点を考慮した操作環境提示については，異なる視点からの画像提示に留まり，作業視点と操作性については積極的な議論はされていない．しかし，仮想環境を使用する利点の1つに，任意の視点からの作業提示が可能であることがあり，これを生かした操作性の向上に関する議論は必要である．

以上を踏まえ，本論文においては，VR技術を利用した遠隔操作のモデルに関して，マスタの操作座標系を仮想空間内の視点座標系に一致させる新たな遠隔操作モデルを提案し，提案したモデルの操作性を評価するために従来手法との比較実験を行う．さらに，ネットワークを利用した遠隔操作システムを構築し，仮想空間内での作業における操作環境提示の手法について検討する．

## 2. 遠隔操作モデル

### 2.1 遠隔操作モデルの提案

本章では，VR技術を利用した遠隔操作モデルに関して，マスタの操作座標系を仮想環境内の視点座標系に一致させる新たな遠隔操作モデルを提案する．図1に提案するモデルの概要を示す．提案モデルにおいては，オペレータは仮想空間に対して，視点（V）を設定する．仮想空間は，あらかじめ登録された実環境に関するモデルと，実環境からの画像データおよびマスタとスレーブに関する位置座標のデータを基に構成され，視点からの画像をオペレータに提示するとともに，視点座標系とスレーブの座標系の関係を示す  $3 \times 3$  変換マトリックス（T：視点操作型マトリックス）を生成する．オペレータがマスタに施した操作量は，視点操作型マトリックスにより，視点座標系から見たスレーブの運動量へ変換さ

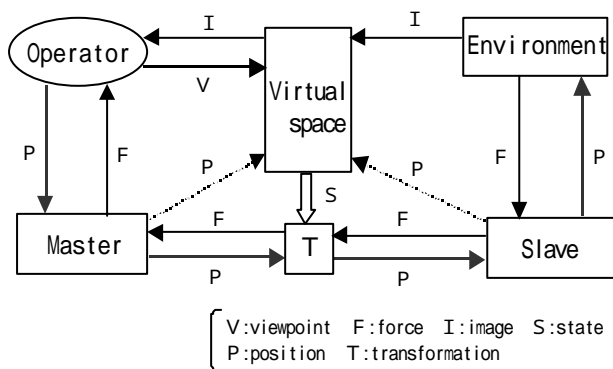


図1 視点を考慮した遠隔操作モデル

Fig.1 Tele-manipulation system using viewpoint Information

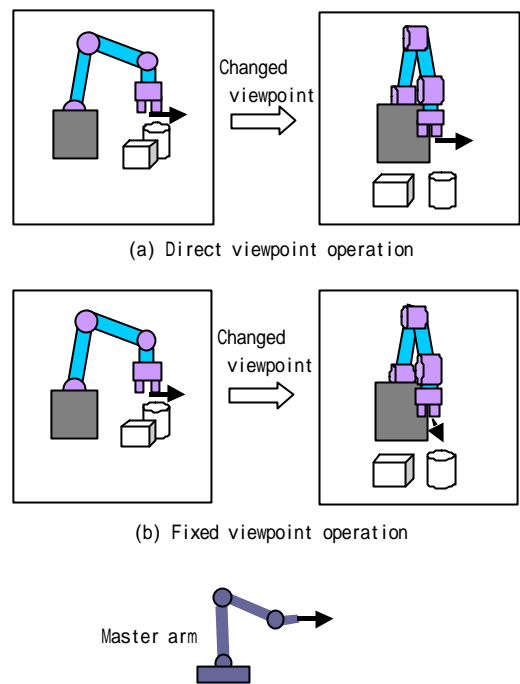


図2 直接視点操作と固定操作

Fig.2 Direct viewpoint operation and fixed viewpoint operation

れる．また，実環境からスレーブが受ける反力は，視点操作型マトリックスにより，視点座標系から見た反力に変換され，マスタへの提示力となる．

提案するモデルの特徴としては，マスタの操作座標系が提示画像に一致しているため，視点が変化しても，オペレータが容易にその操作座標系を理解できることである．さらに，変換マトリックスは，単なる座標間の変換行列ではなく，スケールファクタを含んでいるため，視点が作業の注視点に近い場合や遠い場合に対応した操作量を決定することが可能であることがあげられる．

ここで，本研究で提案する手法を従来手法と区別するために，遠隔操作における操作手法を次のように定義する．

直接視点操作（Direct Viewpoint Operation:DVO）

提示画像の視点に基づいてマスタの操作座標系と仮想アームの操作座標系の方向を一致させた操作系における操作

固定視点操作（Fixed Viewpoint Operation:FVO）

提示画像の視点に関係なくマスタの操作座標系と仮想アームの操作座標系の方向が固定されている操作系における操作

直接視点操作が本論文で提案する操作手法であり，図2 (a)に示すように，視点を变化させても仮想アームとマスタの操作座標系の方向が一致する．固定視点操作は，従来の遠隔操作の中で用いられてきた操作手法であり，図2 (b)に示すように視点を变化させると，仮想アームとマスタの操作座標系の方向が一致しなくなる．

### 3. 遠隔操作モデルの評価

#### 3.1 実験装置

本研究で使用した実験装置の概要を図3に示す。実験装置は、制御用PC、3自由度の力覚提示デバイスおよび液晶メガネからなる。オペレータは液晶メガネを装着し、ディスプレイ上に表示する仮想環境を立体視しながら、力覚提示デバイスを用いて仮想環境中の仮想ツールを操作する。このとき、視点操作はキーボードにより行う。

#### 3.2 課題作業

本研究では、遠隔操作における基本的な作業要素である位置決め作業と倣い作業を含む課題作業として、楕円を指定位置より1周トレースするという作業を設定する。この課題作業を行うために、図4に示すような仮想環境を設定する。仮想環境は、台座、それに垂直な壁面および仮想ツールから構成し、壁面には、課題作業を行うための楕円を描く。楕円の大きさは、長径10.5ピクセル、短径7ピクセルである。

実際の作業は、直接視点操作および固定視点操作により被験者がディスプレイ上に提示した楕円を仮想ツールで指定位置から時計方向に1周トレースすることにより行う。この作業の開始点は図4に示すように楕円最上部（直線と楕円との交点）とする。また、作業中においては、ディスプレイ上に被験者が仮想ツールで描いている軌跡を表示することとする。表示する軌跡は、壁面へ被験者が加える力の大きさに応じてその太さを変化させる。この理由は、被験者が作業開始直後の壁面からの反力に慣れてしまうことにより、仮想ツールへ加える力が徐々

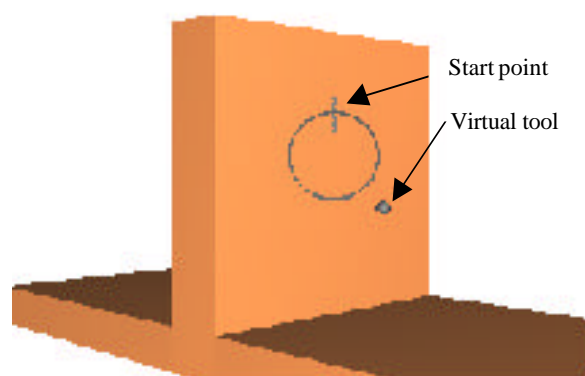


図4 仮想環境

Fig.4 Virtual environment

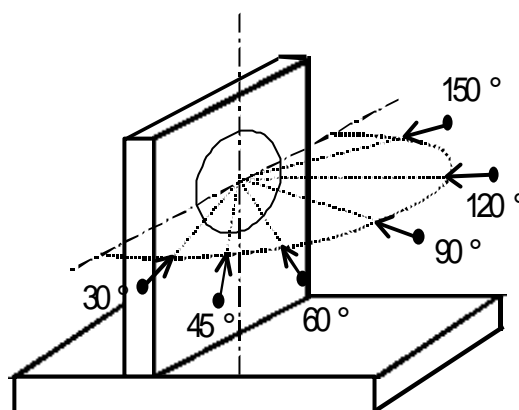


図5 視点角度

Fig.5 View angle in the Virtual environment

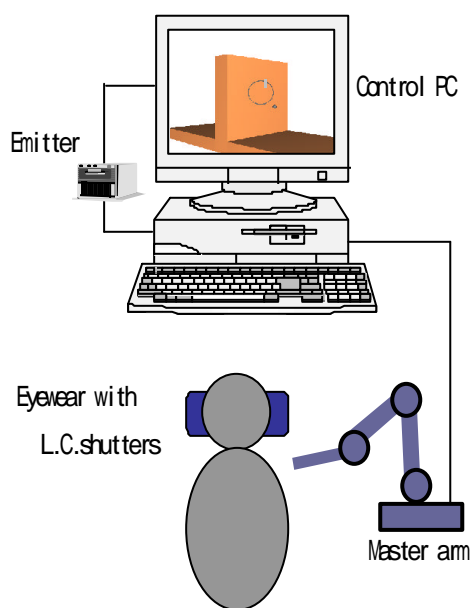


図3 実験装置

Fig.3 Experimental system

に大きくなることを回避するためと被験者間の仮想ツールと壁面との接触力のばらつきを小さくするためである。さらに、楕円上を一定の速さで移動する速度マーカを表示する。これは、被験者間の作業時間のばらつきを小さくするためである。

#### 3.3 実験方法

実験は、経験による影響を避けるため、被験者の半数が直接視点操作、残り半数が固定視点操作から実験をそれぞれ1回づつ行う。実験においては、どちらの視点操作に関しても、最初に視点角度が45°において練習を3回行い、その後に視点角度が30°、45°、60°、90°、120°、150°の順に作業を行う。ここで、視点角度は、壁面と視線がなす角度（図5）であり、実験における注視点は、壁面に描かれた楕円の中心とし、視点と注視点の距離（拡大率）は、どの視点角度に関しても同じとする。また、固定視点操作における、マスタの操作座標系と仮想ツールの操作座標系は、視点角度が45°のときそれらの方向が一致するようにする。これにより、被験者が直接視点操作、固定視点操作のいずれの操作を行っても、視点角度が45°のときは同じ操作となる。

### 3.4 実験結果

10人の被験者が行った作業に関して、作業評価と主観評価を行った結果を以下に示す。

#### (1) 作業評価

作業の評価は、1) 作業開始位置の誤差、2) 提示した楕円とトレースした楕円との誤差(以下 作業誤差)、3) 壁面への仮想ツールの接触力について行った。ここで、1) は位置決め作業の精度、2) は倣い作業における作業の位置に関する精度を評価するための指標として、3) は倣い作業における力の制御に関する特性を評価するために行う。

#### 作業開始位置の誤差による評価

図6に、作業開始位置の目標位置からの誤差の平均と標準偏差を示す。両操作とも視点角度に対する誤差の変化の傾向は、同じになった。しかし、視点角度が、120°と150°においては、固定視点操作による作業開始位置の誤差は、直接視点操作のそれよりも非常に大きくなった。この結果から、直接視点操作は、固定視点操作に比べ位置決め作業精度への視点の影響が小さいことがわかる。

#### 作業誤差による評価

作業誤差は、提示した楕円の中心から円周方向に引いた直線と交差する楕円上の点と、被験者がトレースした軌跡上の点との距離で評価した。図7に、作業誤差の平均と標準偏差を示す。作業誤差においても、視点と作業誤差の関係は、作業開始位置の誤差の場合と同じ傾向になった。特に、視点角度が、150°においては、固定視点操作による作業誤差は、直接視点操作のそれよりも非常に大きくなった。この結果から、直接視点操作は、固定視点操作に比べ作業誤差への視点の影響が小さいと言える。

#### 接触力の評価

図8に作業中の仮想ツールと壁面の接触力の平均と標準偏差を示す。接触力は、両操作における接触力において大きな違いは認められなかった。これは、作業中の接触力は操作方法の違いによる影響が小さいことを示している。

以上の結果から、固定視点操作においてマスタの操作方向と仮想ツールの移動方向が少し異なる場合は、両操作間にはほとんど差異は生じない。これは、オペレータが操作方向と仮想ツールの移動方向のズレを調節して操作を行うことが可能であることを示している。しかし、操作方向と仮想ツールの移動方向のズレが45°を越えたくらいから徐々に混乱が生じはじめ、90°を越えると操作に大きな混乱が生じ、両操作間の操作結果に顕著の差が見られるようになる。これは、操作方向のズレが90°を越えると、マスタの操作方向と提示画像における仮想ツールの移動方向が見かけ上反転し、このことが操作を大きく混乱させると考えられる。また、接触力については、視点に関係なく両操作間に顕著な差は認められ

なかった。これは、被験者に壁面からの反力が提示されていることにより、力を加える方向が容易に把握できるため、力を一定に保って操作を行うためであると考えられる。

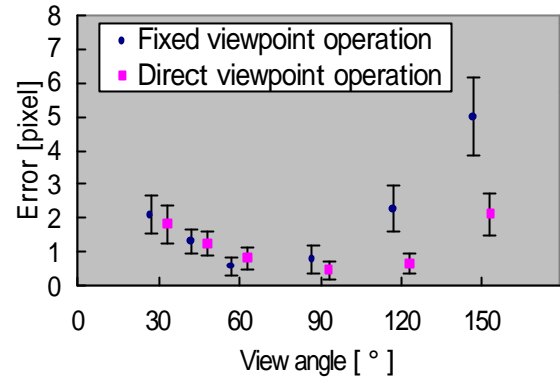


図6 作業開始位置の誤差

Fig.6 Start position error

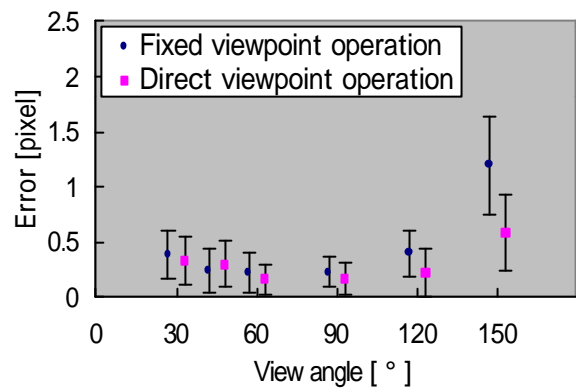


図7 作業誤差

Fig.7 Operating accuracy

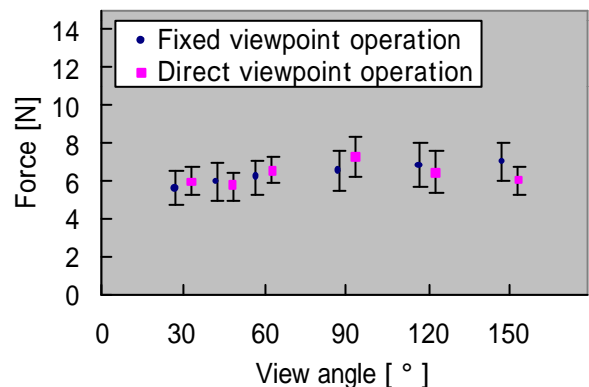


図8 接触力

Fig.8 Reaction force

## 4. ネットワークを利用した遠隔操作システムの開発

### 4.1 システム構成

図9に、ネットワークを利用した遠隔操作システムの概要を示す。本システムは、オペレータが操作を行なうマスタアーム、仮想環境をオペレータへ提示するVR提示用PC、キャリブレーション用の画像を表示する画像提示用PC、および実際に作業を行う移動ロボットから構成されている。移動ロボットは、移動を制御するPCと、アーム、6軸力センサの制御を行なうPCから構成されている。これらの各構成要素は、ネットワークによって接続されており、表1に示すような制御データおよび操作コマンドの送受信を行う。ただし、画像データは、ロボットに取り付けられているステレオCCDカメラから画像表示用PCへ直接取り込んでいる。

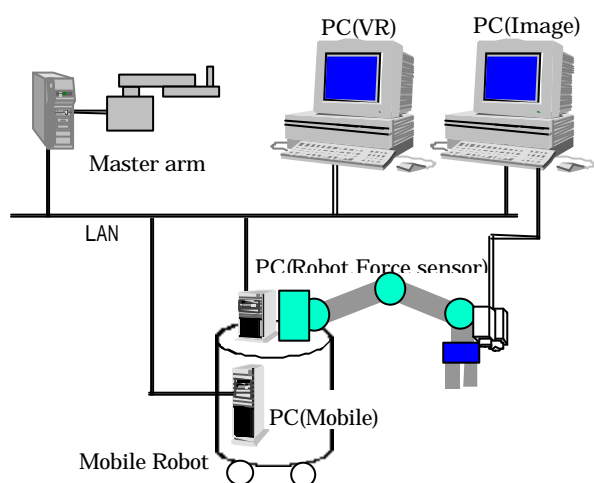


図9 システムの概要

Fig.9 Description of system

表1 制御データおよび操作コマンドの一覧

Chart.1 List of control data and operation command

制御データ, 操作コマンド	説明
T[4][4]	アームの位置・姿勢を表す 4 × 4 同時変換行列
F[6]	アーム先端に加わる外力
・ F[0] ~ F[2]	アーム先端に加わる力
・ F[3] ~ F[5]	アーム先端に加わるモーメント
B[7]	マスタのボタン情報
・ B[0] ~ B[3]	台車の前後移動, 左右回転
・ B[4]	ツールを閉じる
・ B[5]	キャリブレーションの実行
・ B[6]	プログラムの終了
P[2][3]	マーカの座標点 (2 点)
V[4][4]	視点の位置・姿勢を表す 4 × 4 同時変換行列
X[3]	台車の移動量

このシステムでは、オペレータがマスタを操作することにより、マスタアーム先端の位置・姿勢を表す行列 (T[4][4]) は変化する。この行列をロボットが受信することにより、ロボットは移動位置を計算して動作をする。また、マスタアームには、表1に示すような操作コマンド(B[7])を割り当てており、台車移動等の操作を行なう。さらに、ロボットの手先に取り付けられている6軸力センサの値 (F[6]) を受信し、その力をスケーリングして提示する。

### 4.2 ステレオ計測によるキャリブレーション

本システムでは、移動ロボットが作業台に接近し、作業を行うことを想定しているため、移動ロボットと作業台との位置・姿勢の校正 (キャリブレーション) を行う必要がある。本研究では、ステレオ計測により作業台に設置されているマーカを計測し、キャリブレーションを行なうこととした (図10)。

オペレータは台車を操作して作業台に接近し、作業台上のマーカをアームに取り付けられているステレオカメラで捉え、2点のマーカ位置の計測を行う。この位置データ (P[2][3]) をVRディスプレイへ送信し、仮想環境を構築する。その後、オペレータは、構築された仮想環境を見ながら作業を行う。

#### 4.2.1 キャリブレーションの精度

本システムの精度は、キャリブレーション精度に大きく依存する。よって、その測定精度を確認するために、高さ500mmから、大きさ5mm、間隔50mmの2つのマーカについて位置を変えながら50回計測を行った。その結果、高さ方向では、約±2mmの誤差を生じたが、マーカ間隔の誤差は、約±0.5mmであった。

### 4.3 自動視点による操作支援方法の提案

仮想環境内では、オペレータは作業を行いやすい視点を選択して作業を行うことになる。しかし、オペレータにとって、視点操作などの作業に付随する操作は、できる限り自動的に行なわせることが望ましい。これにより、オペレータは実際の作業のみに集中でき、作業をより早

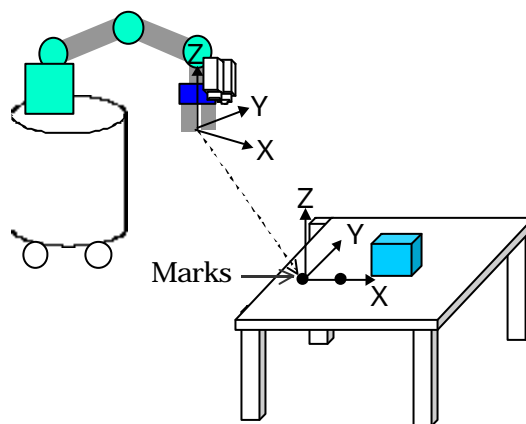


図10 キャリブレーションの概要

Fig.10 Description of carivlation



く遂行することが可能となる。しかし、提示画像の視点を完全に自動とすることは、オペレータの作業意図を理解しない限り、逆に操作性を悪化させることになる。よって、本システムでは、複数のサブ画面に異なる視点からの画像を提示しすることにした。これにより、オペレータは作業を行いやすい視点からの画像を随時選択し、その視点からの作業を行うことができる。

#### 4.3.1 自動視点の計算手法

サブ画面に提示する画像の視点は、以下の5項目の方法により決定する。

- (a)オブジェクト形状重視の視点
- (b)オブジェクトとツールとの相対位置重視の視点
- (c)オブジェクトとツールとの相対姿勢重視の視点
- (d)ツール上からオブジェクトへの視点
- (e)作業内容の重視の視点(タスクに依存)

(a)は、現在の視点から目視できるオブジェクトの面ベクトルの総和と現在の視点・注視点間距離から、オブジェクト形状重視の視点を求めた。(b)は、オブジェクトとツールとの相対位置関係が認識しやすい視点とし、ツールからオブジェクトへ向かうベクトルを認識しやすい視点を求めた。(c)は、(a)の考え方をツールに適用し、それぞれのベクトルの総和と現在の視点・注視点間距離から相対姿勢重視の視点を求めた。(d)は、ツール上からオブジェクトへ向かう視点とした。(e)は、(a)~(c)で求めたベクトルに係数を乗じ、ベクトルの総和を計算し、現在の視点・注視点間距離から視点を求めた。図11に、操作画面の一例を示す。

## 5. まとめ

本研究により、以下の結果を得た。

(1)VR技術を利用した遠隔操作のモデルに関して、マスタの操作座標系を提示画像に一致させる新たな操作

モデルを提案した。提案したモデルの特徴としては、1)マスタの操作座標系が提示画像に一致しているため、視点が変わっても、オペレータが容易にその操作座標系を理解できること、2)変換マトリックスが、スケールファクターを含んでいるため、視点が作業の注視点に近い場合や遠い場合に対応した操作量を容易に変更することが可能であることがあげられる。また、提案したモデルの有効性を確認するため、従来の視点に関係なくマスタの操作座標系が固定されている操作系を使用した場合と提案した操作系を使用した場合の操作性を実験により比較した。その結果、提案したモデルは作業評価において、従来手法に比べ高い評価を得た。

(2)ネットワークを利用した遠隔操作システムを構築し、仮想環境での作業における操作環境提示手法について検討した。

今後は、本システムを利用して、人とロボット各々の特徴を生かすことが可能な遠隔操作システムの開発を目指し、さらに研究を行なう予定である。

## 文 献

- [1] 新井史人, 石川記尉, 小野村陽一, 福田敏男, 前田明, "バイオマイクロマニピュレーションに関する研究", 第16回日本ロボット学会学術講演会, pp1057-1058, 1998
- [2] 小菅一弘, 伊藤友孝, 福田敏男, 大塚まなぶ, "受動性に基づくテレマニピュレータのTask-Oriented制御", 日本機械学会論文集(C編), pp203-208, 1995
- [3] 石光衛, "人工現実感技術を用いた異世界間の操作・加工システム", 日本ロボット学会誌, pp65-76, 1992
- [4] 神野誠, 吉見卓, 阿部朗: "遠隔グライダロボットの研究", 日本ロボット学会誌, Vol10, pp244-253, 1992
- [5] 岩田洋夫, "人工現実感生成技術とその応用", サイエンス社, pp8-107, 1992
- [6] Gerd Hirzinger, Bernhard Brunner, Johannes Dietrich, Johann Heindl, "Sensor-Based Space Robotics-ROTEX and Its Telerobotic Features", IEEE Trans.on Robotics and Automation, pp649-663, 1993
- [7] 森川自, 高梨伸彰, 中村和夫, 木村真一, 土屋茂, 永井康史, "仮想反力帰還型マスタアームによるETS-搭載アンテナ結合機構着脱実験", 第17回日本ロボット学会学術講演会, pp305-306, 1999
- [8] 堀江貴雄, 田中和明, 鄭緯宇, 安部憲広, 何守然, 瀧寛和, "力覚フィードバックを用いた遠隔地のロボットアームの直接教示", 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp31-34, 1998
- [9] E.Natonek, Th.Zimmerman, L.Fluckiger, "Model Based Vision as feedback for Virtual Reality Robotics Environments", IECON, pp110-117, 1995

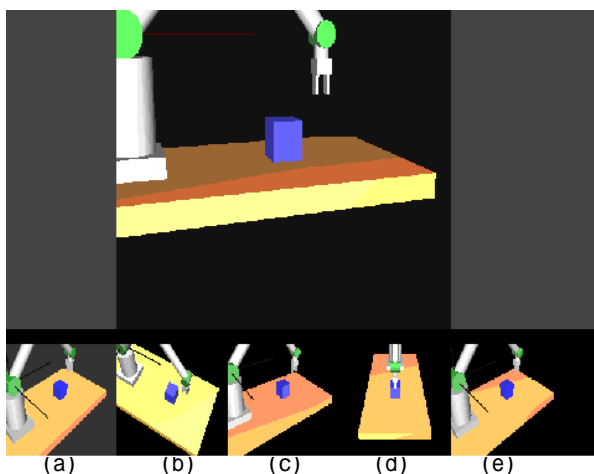


図11 操作画面

Fig.11 Display of operation