

# 仮想環境へのテレグジスタンスのための一手法

大山 英明\*<sup>1</sup> 常本 直貴\*<sup>1</sup> 前田 太郎\*<sup>2</sup> 舘 暲\*<sup>2</sup>

## A Method for Tele-existence in Virtual Environment

Eimei Oyama\*<sup>1</sup>, Naoki Tsunemoto\*<sup>1</sup>, Taro Maeda\*<sup>2</sup> and Susumu Tachi\*<sup>2</sup>

Tele-existence is an advanced type of teleoperation system that enables a human operator to perform remote manipulation tasks dexterously with the feeling that he or she exists in the remote anthropomorphic robot in the remote environment.

In order to extend the function of a human, an extended tele-existence system with virtual reality technology was proposed. We improved our tele-existence experimental system and made an extended tele-existence experimental system with virtual environments for training of tasks. In this paper, the configuration of the system is reported. The performance of the system is evaluated by experimental operations.

**Key Words:** Virtual Reality, Artificial Reality, Virtual Environment, Tele-existence, Telepresence

### 1. はじめに

テレグジスタンスは、舘らによって提案されたロボットの遠隔制御のための概念である[1]~[3]。遠隔地にいるロボットの得た感覚情報を操作者に送り、ロボットが感覚情報を得た状態と同じ状態で操作者に提示し、また操作者の動きに追従してロボットが動くようにすることによって、操作者はあたかもロボットとなったような感覚で、ロボットを自由に制御でき、遠隔地のロボットに人間の高度な認識能力と柔軟な作業能力を実現できる。テレグジスタンスの概念は、日本で提案されたが[1][2]、同じ時期に、米国では、テレグジスタンスと同様の概念であるテレプレゼンスが提案されている[4]。テレグジスタンス、テレプレゼンス技術は、新しいロボット制御方式として、研究されている[5][6]。

近年、人工現実感或いは仮想現実感と呼ばれる技術が、高速なグラフィクスコンピュータと比較的簡便な人間の関節角計測装置の開発により、急激に発展し、今後のさらなる発展が期待されている[7]。広義の人工現実感、広義のテレグジスタンスと同じ概念である。広義の人工現実感、広義のテレグジスタンスは、人間が、本人とは別の存在を対象として、対象の感覚情報を得、対象の運動を完全に制御することにより、人間がまるで対象となったかのごとく感じるような臨場感を与える

ことである。

狭義の人工現実感と狭義のテレグジスタンス、テレプレゼンスとの違いを述べると、狭義のテレグジスタンス、テレプレゼンスは、遠隔に存在するロボットのような実在と一体化しようとするのに対して、狭義の人工現実感では、コンピュータで生成した仮想空間における仮想的な存在と一体化を図ることがあげられる。以下、本稿では、特に断らないかぎり、テレグジスタンスは狭義のテレグジスタンスを指し、人工現実感、テレプレゼンスは狭義の人工現実感を指すものとする。

舘らは、テレグジスタンスに、人工現実感システムを組み込み、人間の機能の拡張する拡張型テレグジスタンスを提案した[8][9]。また、テレグジスタンスによるロボット制御の有効性を実証するために、テレグジスタンス実験システムを構成した[10]~[12]。今回、人工現実感を利用した人間機能拡張研究の第一歩として、テレグジスタンス実験システムに、作業訓練用の人工現実感システムを組み込み、拡張型テレグジスタンス実験システムを構成した[13]。これにより、オペレータはコンピュータの中の仮想的な存在にも、いろいろな場所に実在するスレーブシステムにも、自由に一体化することができる。本論文では、この拡張型テレグジスタンス実験システムの具体的構成について報告し、実験システムの性能を評価するための作業実験について述べ、人工現実感システムを利用した作業訓練によって、オペレータの作業能力を向上させることができることを示す。

原稿受付 1993年10月16日

\*<sup>1</sup>工業技術院機械技術研究所

\*<sup>2</sup>東京大学先端科学技術研究センター

\*<sup>1</sup>Mechanical Engineering Laboratory

\*<sup>2</sup>RCAST, The University of Tokyo

## 2. 拡張型テレグジスタンス実験システム

1章で述べたように、広義のテレグジスタンスと広義の人工現実感とは同じ概念であり、狭義のテレグジスタンスと狭義の人工現実感でも、実際のシステム構成において、多くの共通部分が存在する。二つのシステムにおいて、オペレータの動作入力装置、オペレータへの情報提示装置は、ほぼ共通であり、スレープロボットを仮想環境を生成するための環境シミュレータと交換することによって、テレグジスタンスシステムを容易に人工現実感システムに改造できる。しかし、今回の目的は、単純な人工現実感システムを構成することではなく、人工現実感システムを利用して、オペレータの作業能力を拡張できるような拡張型テレグジスタンスシステムを構築することである。

以下の節では、拡張型テレグジスタンス実験システムの具体的な構成について述べる。

### 2.1 システム構成

Fig. 1 に拡張型テレグジスタンス実験システムの具体的な構成を示す。本システムは、マスターシステムおよびスレープロボットから成るテレグジスタンス実験システムと、グラフィックスシステムと環境シミュレータから成る人工現実感システムによって構成される。

以下の節では、拡張型テレグジスタンスシステムを構成するサブシステムについて述べる。

### 2.2 テレグジスタンスマスターシステム

Fig. 2 にテレグジスタンスマスターシステムを示す。マスターシステムは、視覚情報を提示し、かつ首の動作を計測する6自由度の動きが可能なヘッドマウントディスプレイと7自由度のマスターアーム、スレープロボットの水平位置・姿勢を操作するジョイスティック、それらを固定する回転可能な台座より構成される[11]。マスターシステムは舘と前田が設計し、安川電機が製作した。

視覚情報を提示するヘッドマウントディスプレイは、特別に設計したリンク機構によって支えられ、釣り合いが完全に保たれており、重力による拘束を人に与えない。オペレータの頭部位置姿勢計測はリンク機構の回転部に取り付けられたエンコーダによって行う。

ディスプレイは液晶ディスプレイであり、その解像度は垂直方向240画素、水平方向720画素であり、水平方向の解像度は視力換算で0.3に相当する。視野角は40度であり、二つのディスプレイで構成する視覚系の眼間距離は65[mm]である。視覚系の眼間距離、焦点距離等のパラメータはスレープロボットのステレオカメラと同様である。人工現実感システムのために市販されているヘッドマウントディスプレイには、広い視野角を確保するために、画像を歪めるものも存在するが、ロボットオペレータの機能拡張のための人工現実感システムでは、視野角よりも、実環境と仮想環境の整合性を重視し、実環境の画像とそれを忠実にモデル化した仮想環境の画像が一致するように、提示系を構成している[3]。

マスターアームはエンコーダによる計測により、高速に関節角の位置情報を出力する。これは、ロボットアームの関節角

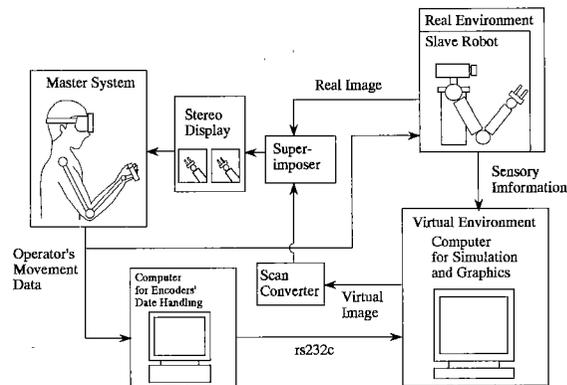


Fig. 1 System configuration

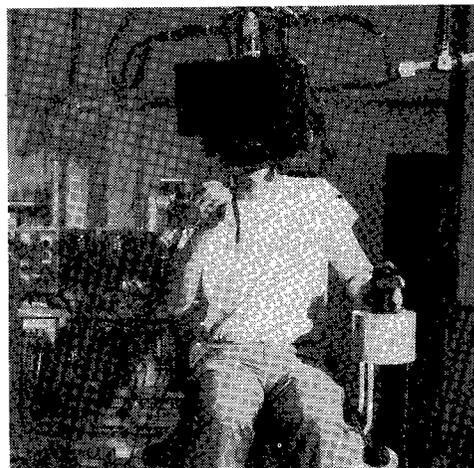


Fig. 2 Master system

に直接的に対応しており、複雑なキネマティクス、逆キネマティクスの計算なしに、ロボットの関節角位置制御が可能である。接触作業を行うために、スレープロボットには、作業座標系におけるインピーダンス制御系を組み込んであるが、そのための計算も簡略化できる[14]。スレープアームの先端は最高3[m/sec]で動く。通常の作業において、実画像の場合マスターアームに対して、スレープアームの運動の遅れを感じる事はほとんどない。

ジョイスティックは3自由度であり、スレープロボットの水平位置2自由度と姿勢の1自由度を制御できる。

マスターシステムのエンコーダ出力をグラフィック用ワークステーションへ送る場合には、エンコーダ出力をパーソナルコンピュータ(PC-9801 VX)で読み、19200[bps]のRS-232cを用いて、送っているため、データ送信時には遅れが生じる(1回の転送に10[msec])。これは、今後、より高速な通信方式を用いることによって、改善する予定である。

### 2.3 グラフィクス生成システム

グラフィクスとシミュレーションのためのコンピュータとして、シリコングラフィクス社製IRIS 120 GTX(メインCPU: ミップス社製R 2000×2(16[MHz]), 浮動小数点演算用CPU: R 2010×2(16[MHz]), グラフィクスのための専用ハ

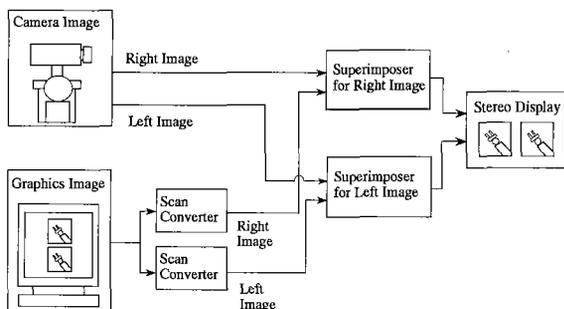


Fig. 3 Circuit diagram of display system

ードウェアを持つ)を用いている。グラフィクス表示のための物体の形状データは、サーフェスモデルを基にしている。IRISはサーフェスモデル表示の隠面処理を行うzバッファアルゴリズムを実行するためのzバッファをハードウェアに持ち、照明計算もハードウェアによって行う。また、ダブルバッファリング機能により、画像のちらつきを防ぐ。

IRISの3次元ベクトルの表示能力は、毎秒40万本であり、隠面処理と照明計算を行った面積が100画素の3次元多角形の表示能力は毎秒10万個である。

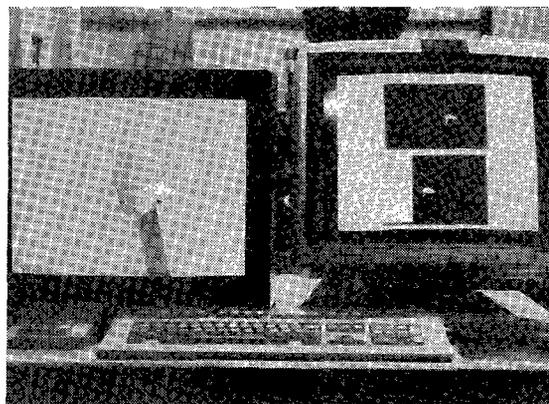
#### 2.4 画像提示装置

本節では、グラフィクスコンピュータによって生成された仮想環境画像を、ステレオディスプレイに表示するためのシステム構成について述べる。

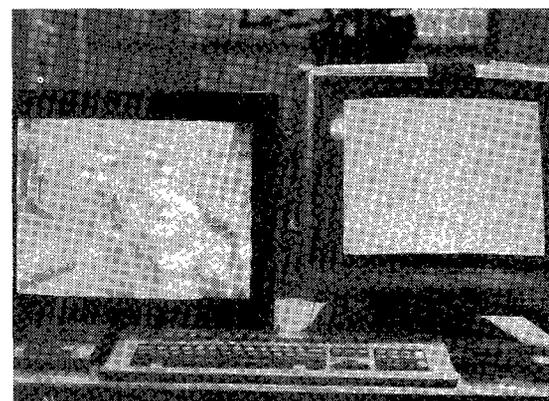
グラフィクスコンピュータの出力は、スキャンコンバータ(フォトン社製:FSC-64000)によって、カメラ画像のRGB出力に同期して、スーパーインポーザ(自作)に入力される。この出力には、スーパーインポーザによって、カメラからの実画像との重ね合わせが可能である。Fig. 3に回路の概略を示す。

スキャンコンバータには、グラフィクス画面の任意の長方形領域を切り取る機能がある。人工現実感システムには、ステレオ表示のために2台のグラフィクスコンピュータを利用するものもあるが、本システムでは、ステレオ表示のためのグラフィクスコンピュータを1台で済ませている。左目用と右目用の画像をグラフィックコンピュータのディスプレイに同時に表示し、スキャンコンバータの画面切り取り機能を用いて、左目用と右目用の両方のディスプレイに信号を分配している。ディスプレイは液晶ディスプレイ(シャープ製LQ6RA01, 5.7[inch], 240×720[pixels])である。グラフィクスコンピュータの画像とモニタ画面の写真をFig. 4に示す。

ロボットを制御するオペレータの機能を拡張するための人工現実感システムにおいては、実画像と仮想環境画像とを、自由に切り替えたり、重ね合わせて表示する必要がある。本システムでは、スーパーインポーザによって、これを行っている。重ね合わせ表示は、スーパーインポーザのブルーバック合成機能によって実現する。そのためグラフィクス表示には、純粋な青色を用いることはできない。Fig. 4(a)は、モニタ上に、仮想環境の画像を表示したものであり、Fig. 4(b)は実環境の画像を表示したものである。Fig. 5は、仮想環境と実環境の画



(a) Virtual image



(b) Real image

Fig. 4 Picture of graphics display

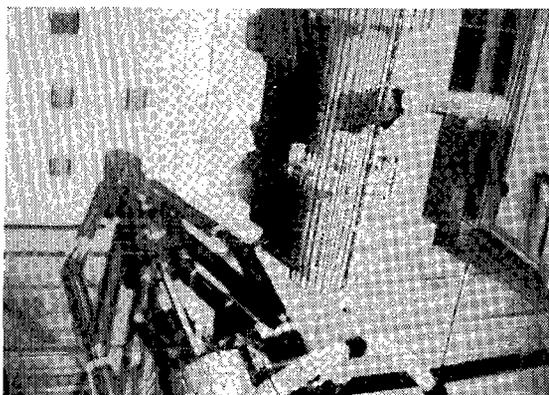


Fig. 5 Virtual image and real image

像を重ねて表示したものである。仮想環境はワイアフレームモデルによって、表示している。

#### 2.5 トレイグジスタンススレーブシステム

スレーブロボットは、トレイグジスタンス実験システムのロボットである[10]~[12]。3自由度の首関節, 7自由度のアーム, 1自由度の開閉ができるハンド, 床面に対して垂直な軸回りの回転が可能な胴体によって構成され、水平面上の位置、垂

直軸回りの回転を制御できる移動装置の上に設置されている。

スレーブロボットのアームは、手首関節に6自由度フォースセンサーを持ち、作業座標系上で設定された機械的なインピーダンスを実現するようにインピーダンス制御される[14]。これによって、種々の接触作業が可能になっている。

### 3. 仮想環境を利用した作業訓練システム

トレイグジスタンス実験システムを用いて、いろいろな作業を行うことにより、トレイグジスタンスによるロボット操作の有効性が確認された。その作業のうち、疑似プラント環境中での作業のための訓練システムを、人工現実感技術を用いて実現した。

#### 3.1 形状モデルの作成

環境の設計データ等が得られない場合、人工現実感システムにおいて、コンピュータグラフィクスと同様に、環境モデルの作成は、労力のかかる仕事である。

IRISのグラフィクスシステムは、システムの構成時(1990年)において、比較的低レベルの画像表示関数しかサポートされておらず、物体を階層的に定義すること等はできず、物体間の関係はプログラム言語によって記述しなければならない(現在では、IRISには、オブジェクト・オリエンテッドなグラフィクス・ライブラリが整備されている)。プログラム言語による記述は冗長な部分が多く、複雑な図形を記述するプログラムは長くなりがちである。

筆者らは、人間の助力により、カメラ画像と形状モデルを対応付け、物体の位置、姿勢、内部パラメータ等を推定するモデルベース画像計測システムを開発した[15]。モデルベース画像計測システムのモデリング機能を用いて、形状モデルの作成を行った。直方体、円筒、トーラスといった基本図形に変換を施すことによって図形を定義する。モデルの階層表現によって、立体図形記述の労力を減らすことができた。IRISのグラフィクスの基本データ構造はサーフェスモデルである。表示の際には、すべての物体の形状を多面体近似によって表現する。モデリング機能は、簡易言語表現を基に、サーフェスモデルのデータを計算し、C言語のサブルーチンとして、表示プログラムを出力する。サーフェスモデルは、面を構成する頂点座標を時計回りに並べた面データの集合で表現した。モデルベース画像計測システムの図形記述言語は、実験目的で開発したため、機能は低いが、トレイグジスタンス実験環境の記述には十分である。

将来における本格的な仮想環境の利用においては、CADシステムの設計データから仮想環境を構成するための形状データを入手することが必要となる。コンピュータグラフィクスのためのデータ形式の標準化が望まれる。

#### 3.2 仮想環境シミュレータの情報処理

人工現実感システムの情報処理の中心を構成するのが、仮想環境シミュレータである。その処理内容を以下に示す。

##### (1) オペレータの動作のデータの獲得

人間の動作を計測するためのセンサからデータを受け取る。

##### (2) 仮想ロボットの状態更新

センサデータを関節角に変換し、仮想ロボットの頭部やマニピュレータの状態を更新する。

##### (3) オペレータの動作の認識

仮想ロボットのハンドと可動物との接触関係を調べ、接触があれば、以前の状態と現在の状態とを基に、オペレータの動作の目的を認識する。

現在のシステムでは、オペレータへの力フィードバックは無いため、例えば、物体を持つ場合等、指が物体にめり込むといった不自然な状態をオペレータが取ることになる。このような現実とは異なる状態でも、オペレータが物体を持っているという状態を認識する必要がある。

##### (4) 仮想環境の更新

ハンドと接触している可動物体を、(2)の動作認識に基づいて動かす。この際、環境の整合性を保つために、仮想ロボットの状態も修正する必要がある。続いて、接触していない可動物体を物理法則に従って動かす。例えば、物体が中に浮いている場合、重力の法則に従って、物体を動かす。可動物体が他の可動物体または環境に接触した場合、運動の状態に応じて、可動物体または他の可動物体の運動状態を変化させる。

##### (5) (1)から(4)までの手順の繰り返し

ロボットオペレータの機能拡張のための仮想環境システムにおいては、仮想環境は、可能な限り正確に実環境をシミュレートする必要がある。しかしながら、厳密にシミュレートすると、画像の更新回数が減り、現実感が損なわれるため、処理を大幅に簡略化して実行している。簡略化した情報処理については3.3.2項で述べる。プログラミング言語はCである。

### 3.3 作業訓練環境

#### 3.3.1 7自由度スレーブマニピュレータ

トレイグジスタンス実験システムを構成するスレーブロボットのモデルを、アームの設計データを基に、仮想環境中に構成し、オペレータが仮想環境中のスレーブロボットと一体化できるようにした。実物のスレーブロボットのカメラからはロボットの頭部や胴体は見えないため、7自由度のマニピュレータアームのみをモデル化し、仮想アームを作成した。実物のスレーブアーム、仮想スレーブアーム、マスターアームは相似形であり、スレーブロボットはマスターアームの関節角を実現するように制御される。よって、マスターアームの関節角を、そのまま仮想アームの関節角の実現値とした。ハンドの開閉は、マスターアーム先端のグリップの開閉に一致させた。ジョイスティックからの信号によって、スレーブロボットの位置、姿勢を自由に制御できるようにした。

IRISのグラフィクスシステムは、グラフィクス表示の際、視点を自由に設定することができる。視点の設定は、仮想環境と実環境の整合性を保つために、スレーブロボットのステレオカメラと同一のものとした。

スレーブロボットアームを構成する多角形の数は136枚である。人間の動作の通り、マスターアームを動かす場合、1秒間あたりに表示できるスレーブアームのステレオ画像は15.3コマである。

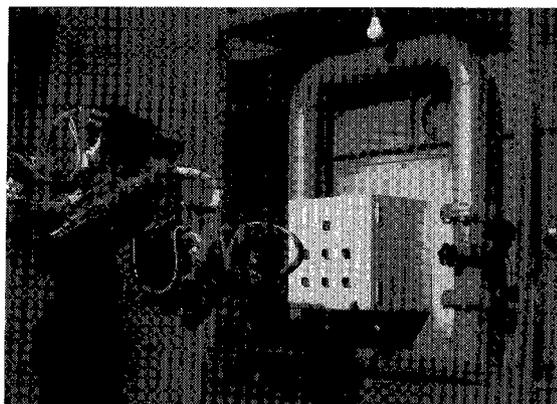


Fig. 6 Experimental environment

### 3.3.2 模擬プラント環境

筆者らはテレレジスタンスによるロボット制御の有効性を検証する実験を行うために、模擬プラント環境を作成した[11]～[13]. この環境は、工場内の部屋を想定し、制御ボックス、パイプ、レバー、換気扇などによって、構成されている。Fig. 6にこの環境と作業を行うスレーブロボットの写真を示す。写真の右の方に見えるレバーを、模擬プラント環境の正面方向を向いている回転軸の回りに回すことができる。また左の箱にあるボタンは、換気扇や電灯のスイッチになっている。この環境で行う作業の訓練のために、作業訓練用の仮想環境を作成した。

Fig. 7にモデルベースト画像計測システムで用いていた図形記述のための簡易言語による実験環境の定義の一部を示す。この記述では、色の定義を省略している。ロボットの作業場には、自然環境のような非常にモデル化しにくい場所もあるが、工場内のように設計データから環境モデル作成を比較的容易に行うことができる場所がある。今回の模擬プラント環境は、比較的モデル化の容易な環境であった。

Fig. 8に模擬プラント環境のグラフィクス画像を示す。この画像を構成する多角形の数は570枚である。

実物の環境と同様に、仮想環境中の環境においても、レバーと、ボタンを操作することができる。ボタンが押されたことは、コンピュータのピープ音で知らせるものとする。ロボットのハンドが、レバーに接触した時、レバーはハンドの位置に従って動く。ハンドとレバーの接触の判定は以下のようにして行う。ハンドの開閉を無視して、ハンドを一つの塊とみなす。レバーに10[mm]の肉付けを行い、それを内部に含む直方体を想定する。ハンドの形状を五角形の平板によって近似し、その平板と直方体に重なりがあるかどうかによって、判別を行う。ハンドとレバーが接触したと判別される場合、レバーの回転軸を法線とする、平面にハンドの先端点を垂直に射影し、その射影された先端点の回転軸回りの角度 $\theta$ にオフセットを加えて、レバーの回転角を定める。

模擬プラント環境とスレーブアームによって構成される仮想環境画像のステレオ表示を、画像表示以外の情報処理も含めて、1秒間に平均して10.4回行うことができる。

通常のテレビジョン画像において、人間が見て、画面上の物

```
Experimental.Environment {
    Parameters a;
    Lever {
        Transformations {
            scale 0.03,0.18,0.03;
            move 0.0,0.11,0.0;
            rotate a,0,0;
            move -0.175,0.15,1.0;
        }
        DataModel cube.dat;
    }
    Box {
        Transformations {
            move -0.09,-0.15,1.0;
        }
        Model ebox.mdl;
    }
    Fan {
        Transformations {
            scale 0.08,0.40,0.40;
            move -0.04,0.0,1.20;
        }
        DataModel cube.dat;
    }
}
```

Fig. 7 Description of experimental environment

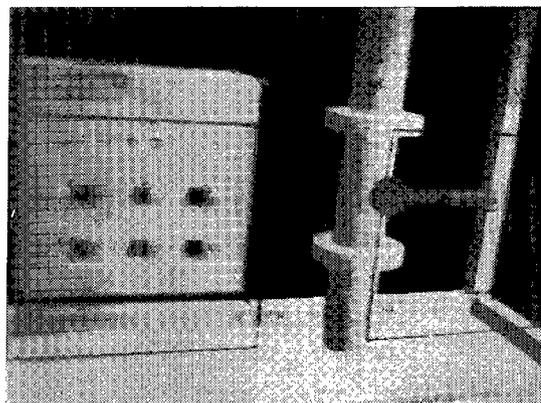


Fig. 8 Displayed image of the environment

体の動きを滑らかに感じるためには、15コマ/秒以上の描画速度が必要とされている。人間が見て、画面上の物体の運動が、滑らかに感じられる描画速度は、画面上の物体の移動速度と関係があり、物体の移動速度が速ければ、描画速度も速くしなければならない[16][17]. 逆に、移動速度が遅ければ、描画速度は遅くても良いと考えられる。

10.4コマ/秒の描画速度で滑らかに知覚される画面上の移動速度の上限は、参考文献[16][17]の動画の速度と必要毎秒像数との関係から、視角で表現して約10度/秒と見積もることができる。作業空間に静止した物体が画面中心にある時、その画面上での移動速度は、頭部の垂直回転角速度、および水平回転角速度の二乗和の平方根にほぼ一致する。熟練者による実際の作業において、頭部の回転角速度を測定した。視角で表現する

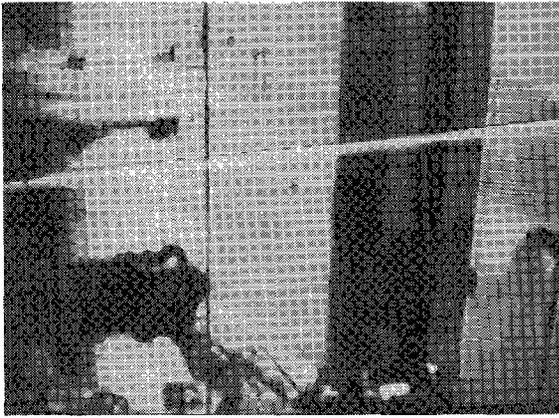


Fig. 9 Real image of lever handling

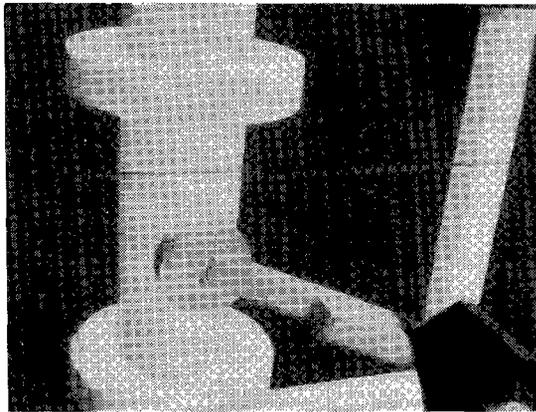


Fig. 10 Displayed images of lever handling

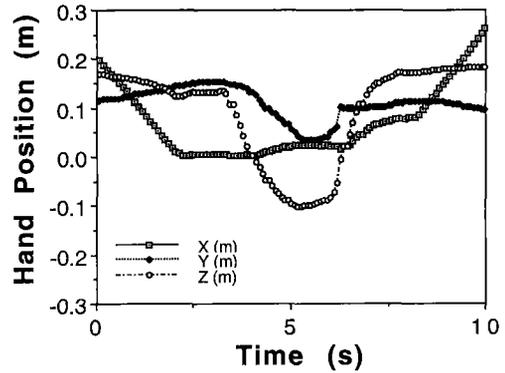
と、平均 3.5 度/秒、最大 16.8 度/秒であり、時間領域の 96% で、10 度/秒を下回っていた。よって、大部分の時間領域においては、画像は滑らかに見えるものと期待できる。

### 3.4 仮想環境における作業訓練

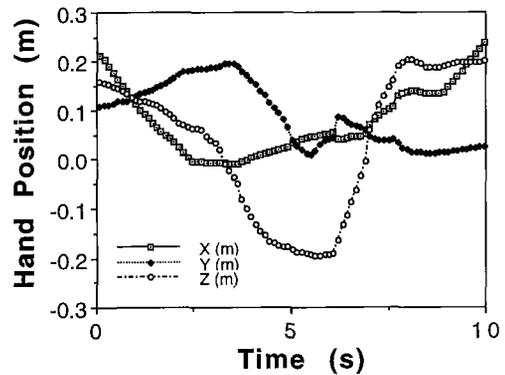
模擬プラント環境におけるレバー回転作業について、仮想環境での作業訓練の様子を仮想環境画像とスレーブロボットのハンドの軌跡で示す。

仮想環境中に構成した模擬プラント環境において、レバー回転作業を行った。Fig. 9 は、実際の作業中にオペレータが見る画面と仮想環境画像を重ねて表示したものである。Fig. 10 に、仮想環境中でレバーを回す様子を示す。レバーの回転により、オペレータは動作の結果を認識できる。

Fig. 11 に、熟練者によるレバー回転作業におけるスレーブロボットのハンドの位置の軌跡を示す。座標原点はレバーの回転軸上の一点に固定されており、 $x$  軸は回転軸に位置し、 $z$  軸は垂直軸に一致し、 $y$  軸は他の軸と右手系を構成するように定義されている。Fig. 11(a) は、実環境中でのハンド位置の軌跡であり、Fig. 11(b) は仮想環境中でのそれである。実環境中でのハンド位置の軌跡と仮想環境中でのそれは、非常に良く似ており、仮想環境が実環境を十分良く近似していると期待できる。



(a) Real environment



(b) Virtual environment

Fig. 11 Trajectory of hand position

## 4. 評価実験

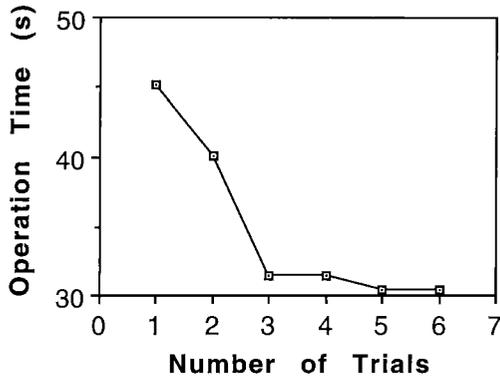
仮想環境を利用した作業訓練の効果を評価するために、テレインジスタンス実験システムに触れたことのない被験者に、前章で述べたレバー回転作業を行わせ、作業時間の測定を行った。

### 4.1 作業内容

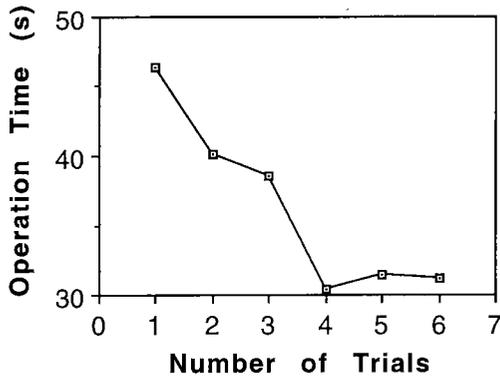
まず、実環境での作業内容について、具体的に述べる。実環境での作業の前に、スレーブロボットの位置・姿勢は、模擬プラント環境の中心から見て、正面に距離 1[m] の位置に、模擬プラント環境の中心方向を向くように、初期化されている。レバーを回転させるためには、スレーブロボットは前方に約 0.8[m]、右に約 0.2[m] 水平移動する必要がある。

被験者は作業の前に、15 秒間、マスターアームを前後、左右、上下に動かしてスレーブアームの操縦法を覚え、さらに 15 秒間、ジョイスティックによってスレーブロボットの位置を前後、左右に動かし、姿勢を変化させ、スレーブロボットの位置・姿勢の操縦法を覚え、その直後に作業を開始する。作業の具体的な内容は以下の通りである。

- (1) ジョイスティックによって、スレーブロボットの位置・姿勢を制御し、レバー回転作業が可能な位置・姿勢を取らせる。
- (2) マスターアームによって、スレーブアームを制御して、レバーを回転させる作業を行う。
- (3) ジョイスティックによって、模擬プラント環境より正



(a) Real environment



(b) Virtual environment

Fig. 12 Change of operator's performance

面方向に一定距離 (0.8[m]) だけ離れる。

(1)から(3)にかかる時間を作業時間として、測定する。参考までに述べると、熟練者に8回作業を繰り返させて、作業時間を測定する実験を行った結果、熟練者の作業時間は、平均27.5秒、標準偏差0.5秒であった。

#### 4.2 作業訓練による学習の様子

予備実験として、実環境における作業の繰り返しによる作業時間の推移と、仮想環境における作業の繰り返しによる作業時間の推移を測定した。

Fig. 12(a)に実環境における作業訓練による作業時間の短縮の様子を示し、Fig. 12(b)に仮想環境における作業訓練による作業時間の短縮の様子を示す。どちらも、訓練を進めるにつれ、作業時間が短くなっており、3、4回程度の繰り返しで飽和している。

仮想環境における作業時間の推移は、実環境のそれと類似しており、仮想環境における作業が、実環境の作業に十分近い感覚で行えるものと期待できる。

#### 4.3 仮想環境を利用した作業訓練の効果

4.1節の作業について、スレーブロボットの操縦を行ったことの無い被験者をランダムに二つのグループに分け、一つのグループでは、作業内容を説明し、4.1節の通り、マスターアームおよびジョイスティックの操縦訓練を行った後、実環境にて作業を行わせた。もう一つのグループでは、作業内容を説明

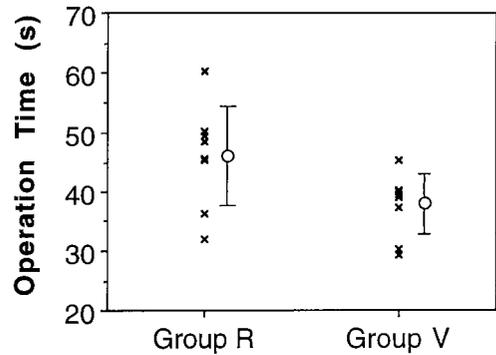


Fig. 13 Result of evaluation experiment

し、仮想環境中で3回の作業訓練を行った後に、前述のグループと同様、操縦訓練の後、実環境にて実際の作業を行わせた。各グループ8名の被験者によって、実環境における作業時間を計測し、仮想環境による作業訓練の効果を見積もった。

Fig. 13に、二つのグループの作業時間の測定結果と平均値、標準偏差を示す。図中のGroup Rは、仮想環境における訓練無しに、作業を行ったグループを指し、Group Vは、仮想環境において作業訓練を行ったグループを指している。図中の×印は各被験者の実験結果を示し、図中の円は各グループの平均値を示し、その上下方向の直線の長さは、標準偏差を示している。Group Rの作業時間の平均値 $m_R$ は46.0秒、標準偏差 $\sigma_R$ は8.1秒であった。一方、Group Vの作業時間の平均値 $m_V$ は37.6秒、標準偏差 $\sigma_V$ は5.0秒であった。仮想環境を利用したグループは、そうでないグループと比べて、8秒程度作業時間が短くなっている。

この結果を基にt検定を行った。Group Rの自由度 $f_R$ およびGroup Vの自由度 $f_V$ は、それぞれ7で、全体の自由度 $\nu$ は14である。統計量 $t$ は、以下のように計算される。

$$t = |m_R - m_V| / \sqrt{\sigma_R^2/f_R + \sigma_V^2/f_V} = 2.315 > 1.761$$

t分布表により片側検定、危険率5%レベル、自由度14のt値は1.761である。計算値2.315は1.761より大きく、危険率5%レベルで、仮想環境において作業訓練を行ってから実環境で作業を行う場合の作業時間は、そうでない場合の作業時間に比べて、有意に短いと結論できる。危険率2.5%レベルでのt値は2.145であり、危険率2.5%レベルでも同様の結論を得る。

仮想環境を利用しない被験者の意見によると、アームの操作等は、人間の動作をそのままスレーブロボットで実現するテレレジスタンス制御のため、数秒で慣れることができたが、スレーブロボットの位置操作は、ジョイスティックで行っているため、習熟が難しく、また、スレーブハンドの大きさが、人間の手とは異なっているため、レバーとスレーブアームの両方を見て、適切な距離を判断することも難しく、作業可能な位置にロボットを移動させることに時間がかかった、とのことである。仮想環境での訓練により、画面上の環境とスレーブアームの位置から、作業可能なロボットの位置を認識できるようになり、作業をより確実に遂行できるようになったものと推測される。

## 5. おわりに

狭義のテレグジスタンスシステムと狭義の人工現実感技術を融合した拡張型テレグジスタンスシステムによって、オペレータは、計算機内の仮想ロボットにも、遠隔地のスレーブロボットにも自由に一体化でき、オペレータの作業能力を拡張することができる。今回、仮想環境を利用した作業訓練に着目し、拡張型テレグジスタンス実験システムを構築した。本論では、このシステムの構成について報告し、さらに、実験システムを評価するために作業実験を行い、仮想環境を利用した作業訓練によって、オペレータの作業能力を向上させることができることを示した。

煙等によって、視覚情報が使えない場合も、仮想環境画像を用いて作業を遂行することが期待される。不可視環境下での作業や予測環境の利用等、実環境と仮想環境の一致が要求される場合には、ロボットから送られてくる情報のより複雑な情報処理が必要となる。それらは今後の課題である。

## 謝 辞

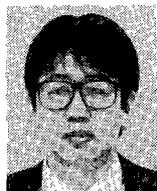
作業実験に協力して下さった東大先端研館研究室並びに東大教養学部心理学教室下條研究室の皆さまに深謝致します。

## 参 考 文 献

- [1] 館暉, 谷江和雄, 小森谷清: “感覚情報呈示機能をもったマニピュレータの操縦方式”, 特許 1348263 号, 出願 1981 年 1 月 14 日.
- [2] 館暉, 阿部稔: “テレグジスタンスの研究第 1 報”, 第 21 回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 167-168, 1982.
- [3] S. Tachi et al.: “Tele-existence (I)—Design and evaluation of a visual display with sensation of presence—”, Proceedings of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipula-

tors (RoManSy 84), pp. 245-254, 1984.

- [4] D. L. Akin, M. L. Minsky et al.: “Space application of automation: Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS)-Phase II,” NASA Contract Report 3734, 1983.
- [5] 館暉, 荒井裕彦, “テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価”, 日本ロボット学会誌, vol. 7-4, pp. 314-326, 1989.
- [6] J. D. Hightower, E. H. Spain et al.: “Telepresence: A hybrid approach to high-performance robots,” Proceedings of '87 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), pp. 563-573, 1987.
- [7] S. S. Fisher et al.: “Virtual environment display systems,” ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, pp. 1-11, 1986.
- [8] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: “Tele-existence simulator with artificial reality,” Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robotics and System (IROS'88), pp. 719-724, 1988.
- [9] 館暉: “テロボティクスとテレグジスタンス”, 計測と制御, vol. 28-12, pp. 1059-1064, 1989.
- [10] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: “Development of anthropomorphic tele-existence slave robot,” Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 385-390, 1989.
- [11] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: “Tele-existence master slave system for remote manipulation,” IEEE International Workshop on Intelligent Robotics and Systems (IROS '90), pp. 343-348, 1990.
- [12] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: “Tele-existence master slave system for remote manipulation (II),” Proceedings of the 29th IEEE conference on decision and control, pp. 85-90, 1990.
- [13] 常本直貴, 館暉, 大山英明: “テレグジスタンスの研究 第 25 報—作業用仮想環境の構築—”, 日本ロボット学会第 8 回学術講演会予稿集, no. 2, pp. 565-566, 1990.
- [14] 井上康幸, 館暉: “マスタースレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一手法”, 日本ロボット学会誌, vol. 10-4, pp. 490-500, 1992.
- [15] 大山英明, 館暉: “モデルベースト画像計測システム”, 機械学会論文集(C), 56 巻-521 号, pp. 109-115, 1990.
- [16] 電子通信学会編: “電子通信ハンドブック”, pp. 1402, オーム社, 1979.
- [17] 宮原誠: “動画像に対する視覚特性と画質の関係およびそのテレビ信号帯域圧縮への応用”, NHK 技研, vol. 27-4, pp. 141, 1975.



大山英明 (Eimei Oyama)

1962 年 10 月 23 日生。1987 年 3 月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月通産省工業技術院機械技術研究所入所。ロボット工学部バイオロボティクス課所属。テレグジスタンス, 人間の運動制御のモデル化, 神経回路, 非線形最適化等の研究に従事。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



前田太郎 (Taro Maeda)

1965 年 2 月 3 日生。1987 年東京大学工学部計数工学科卒業, 同年通産省工業技術院機械技術研究所入所, ロボット工学部バイオロボティクス課研究員を経て, 1992 年 9 月より東大先端科学技術研究センター助手。人間の知覚特性とそのモデル化, 神経回路モデル, マンマシンインターフェイス, テレグジスタンスなどの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 神経回路学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



常本直貴 (Naoki Tsunemoto)

1960 年 11 月 21 日生。1988 年 3 月東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。同年 4 月通産省工業技術院機械技術研究所入所。物理情報部バイオメカニクス課所属。ヒューマン・インターフェースの研究に従事。高分子学会, 日本生物物理学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



館 暉 (Susumu Tachi)

1946 年 1 月 1 日生。1973 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 東京大学助手。1975 年通産省工業技術院機械技術研究所入所, 遠隔制御課長, バイオロボティクス課長を歴任。1979 年より 1980 年, マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989 年, 東京大学助教授。1992 年, 東京大学教授。国際計測連合学会 (IMEKO) ロボティクス会議議長。SICE フェロー。パイスベクトルを用いる信号処理, 盲導犬ロボット, テレグジスタンスなどの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会などの会員 (日本ロボット学会正会員)