

## フォースディスプレイを用いた仮想空間における協調作業

矢野 博明 中川 隆志 岩田 洋夫  
筑波大学構造工学系

計算機内に作り出した、三次元の仮想空間で作業する場合、人の手の動きを計算機に入力するデバイスが必要である。本研究では、フォースディスプレイと呼ばれる、手の動きを入力するだけでなく、仮想物体に触れたときの、反力を提示することのできる入出力デバイスを用いて、仮想空間で作業するシステムを構築している。また、ソフトウェアの面では、仮想空間を容易に構築することができる、仮想空間構築支援システムを開発している。このシステムを用いて、複数人間が同時に仮想空間内で、作業することのできるプログラムを開発した。さらに、仮想物体を用いて造形作業を行なう実験を通して、仮想空間における、協調作業の有効性を検証した。

COOPERATIVE WORK IN VIRTUAL SPACE  
BY USING FORCE DISPLAY

Hiroaki Yano Takashi Nakagawa Hiroo iwata  
Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba,  
Tsukuba, 305 Japan

When we work in virtual space, we need input device for measuring spatial motion of a human hand. In this research, we use force display for input device which generates reaction force from virtual object. We developed an operation system of virtual space. The system supports easy construct of virtual environment. Using this system, we developed a program that enables two users to work simultaneously in the same virtual environment. Through experiments of deformation of virtual objects, effectiveness of cooperative work in virtual space is tested.

## 1. はじめに

計算機内に仮想の空間を作り、その中に人間が入り込み、様々な作業をすることを可能にする技術を人工現実感という。現在、一般的な人工現実感技術では、データグローブのように、計算機に人間の手の3次元の動きを入力するデバイスを用いて手の動きを入力し、仮想世界の映像を出力としてフィードバックしている。しかし、この方式では、計算機は視覚のみのフィードバックで、仮想物体に触れた際に、手などが突き抜けてしまう。その結果仮想空間の認識が困難になり、仮想空間の操作性が著しく低下する。

そこで、本研究では、フォースディスプレイと呼ばれる装置を用いる。フォースディスプレイは、人の手先などに装着し、リンクや糸などを介してアクチュエータからの反力を装着している部位に提示させる装置である。

また、現在の人工現実感では、入出力装置の特異性から、その性能を最大にするためにソフトウェアの最適化がされており、ハードウェア重視のシステム開発が行なわれることが多い。移植性や汎用性などの面で、様々な問題を抱えている。本研究では、入出力装置に対する互換性や、ソフトウェアの移植性、汎用性を保ちつつ、仮想空間の操作に関する統一した環境を提供し、簡単に仮想空間を構築することを可能にするソフトウェア（仮想環境構築支援システム）の開発をおこなった。そしてこのシステムを用いて、複数の人間が同一の仮想空間で同じ仮想物体を移動したり、変形させることのできる協調作業のプログラムを作成し、その評価をおこなっている。

## 2. フォースディスプレイ

### 2.1 フォースディスプレイの役割

人間が外界を認識する場合、目や耳や皮膚の触覚センサといった感覚受容器から得られる受動的な情報だけでは不十分で、自ら能動的に体を動かすことによってえられる情報も必要である。触覚についていえば、皮膚の触覚センサにより触っている触っていないといった受動的な情報と、手

を動かすという運動の情報とを合わせて触覚の情報処理がおこなわれているといわれている。人工現実感の研究においても、手の動きに対する触覚情報の提示の必要性が認識されつつある。このような触覚情報を提示する装置が、フォースディスプレイである。

フォースディスプレイにはいくつかの方式がある[1]が、本研究では、仮想空間内で比較的大きな可動範囲を必要とする作業をすること、仮想物体を手で直接操作するために、なるべく自由度を大きくする必要のあることから、マスターアーム型フォースディスプレイを用いている。

つぎの節からは、本研究で用いた2つのフォースディスプレイについて詳しく述べていく。

### 2.2 パンタグラフ型フォースディスプレイ

本研究で用いたパンタグラフ型フォースディスプレイ[2]は、人間の腕全体の動きに追従するような大きな可動範囲をもつ6軸シリアルリンク型マニピュレータと、糸を用いて親指と人指し指に仮想物体の硬さを表現できるようにした小型フォースディスプレイからなる(図1)。

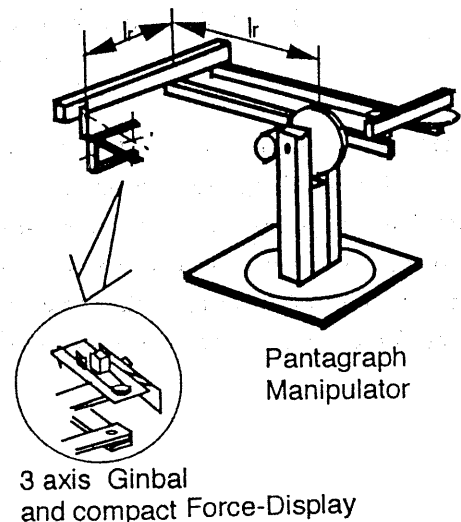


図1. パンタグラフ型フォースディスプレイ

マニピュレータは作業者の腕全体の動きに伴う作業に対応するために、各部の関節位置、腕部のリンク長等を、人間のサイズ及び骨格に合わせた

設計となっている。

具体的には、肩に当たる関節に2軸、肘関節に当たる部分に1軸の計3軸によって、手先の並進に関する動きに追従する。手首の部分には3つの回転軸があり、それらの軸が1点で交わるようにリンクを組み合わせてジンバルを形成し、手首の回転に関する動きに追従できるようになっている。可動範囲は、水平方向には $+60^\circ$ から $-49^\circ$ までの半径60cmの扇状で、鉛直方向には $\pm 55^\circ$ 半径60cmの扇状となっている。

マニピュレータの各軸にはポテンシオメータ及びDCモーターが配してある。ポテンシオメータの値をA/D変換することにより各関節の角度情報を得ることができる。この情報を元にして手先部の位置及び姿勢が計算できる。このときの手先の位置の精度はノイズ等の原因により $\pm 0.5\text{ cm}$ 、姿勢は $\pm 0.5^\circ$ となっている。各軸の角度情報をもとに各軸のモーターに適切なトルクを発生させることで、手先部に任意の大きさの反力を発生させることができる。反力は並進で最大約400g重、回転偶力は最大約 $200\text{ g}\cdot\text{cm}$ となっている。

また、指先に反力を提示する小型フォースディスプレイ[3]は、親指と人指し指の2本の指にそれぞれモーター、クラッチ、ロータリーエンコーダがついており2本の指を閉じる際の反力を調節することによって剛体から弾性体まで様々な硬さのものを表現することができる。糸を用いることにより、人に拘束感を与えることなく、指の動きの計測、反力の提示を行うことができる。モーターによる最大反力は、 $0.215\text{ kg重}\cdot\text{cm}$ である。またクラッチ機構はクラッチをソレノイドコイルを使って開閉している。

尚、カセンサーなどによるフィードバックは行っていない。

### 2. 3 拡張スカラー型フォースディスプレイ

前述のパンタグラフ型フォースディスプレイは、モーター等による慣性が大きくマニピュレー

タの自重を手で支える機構になっていたので、操作性が悪くなってしまった。そこで拡張型フォースディスプレイは、慣性をできるだけ小さくし、マニピュレータの自重をマニピュレータが持つようにし、なおかつ比較的大きな可動範囲をもつように設計がなされている。また、手先部をペン状にしていることにより、ユーザーはペンを握るようにして使うためフォースディスプレイを装着する煩わしさからも解放されている。このフォースディスプレイの模式図を図2に示す。

具体的には、基台から2関節が鉛直方向軸になっているため、マニピュレータの自重をマニピュレータ自身もつようになっている。また、タイミングベルトとディファレンシャル機構を用いて、手先部に反力を提示するモーターを手先部から離し、そのモーターをカウンターウエイトとして利用することにより、手先部に余計な重さがかからないようにしている。

このマニピュレータは6つの軸を持ち、可動範囲は前後方向に約80cm、左右方向に40cmで、デスクトップでの作業に必要な可動範囲を網羅している。各軸にはポテンシオメータとモーターが取付けられている。ポテンシオメータの値から同次変換行列を用いてペン部分の位置を求め、その値をもとにして各モーターに適切なトルクを発生させることで、任意の反力を発生させる。計測の精度としては、ノイズ等の原因により $\pm 0.5\text{ cm}$ 、姿勢は $\pm 0.5^\circ$ となっている。反力は最大約300g重、回転偶力は最大約 $200\text{ g重}\cdot\text{cm}$ となっている。

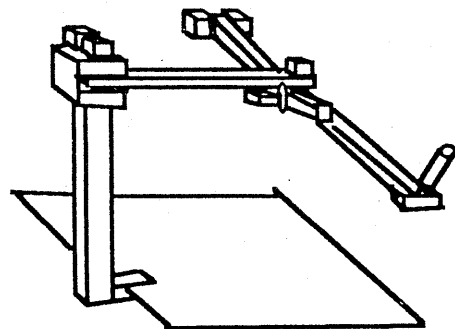


図2. 拡張スカラー型フォースディスプレイ

## 2. 4 フォースディスプレイの制御方式

前述の2つのフォースディスプレイは、それぞれパーソナルコンピュータによって制御されている。フォースディスプレイの各軸についているポテンシオメータの値をA/Dコンバータにより読み込み、同次変換行列を用いて手先部の位置を求める。その値をもとにして手先部に任意の反力を出力させるために、各軸のモーターが出すべきトルクを計算し、PIOからPWM (Pulse Width Modulation) 方式のモータードライバにデータを送信する。

仮想物体に触れた際に発生させる反力の更新と、各モーターに出すトルクデータの更新は同時に行われるとは限らない。一般に人工現実感では、複数の計算機をつかって、仮想空間を構築することが多い。したがって、通信のオーバーヘッド等で、仮想空間全体のアップデートレートは、数Hzから数10Hzになる。これと同じレートでフォースディスプレイを動作させると、ユーザーにとって、極めて違和感のある触覚情報になってしまう。

そこで本研究では、仮想世界の管理をする計算機から反力の目標値を、フォースディスプレイを直接制御する計算機に与え、その値を維持するように高速で計算させる方式をとっている。手先に与える反力の目標値の計算には、2種類のものを用意した。1つは、力ベクトルを与えて手先がいかなる姿勢でもその力ベクトルを発生させる方法で、仮にこれを加速度型とする。もう一種類は、仮想空間内のある1点の座標を与えて、いかなるときもその1点に向かうような反力を発生させる方法でこれを位置型とする。加速度型の場合は、壁など方向性のあるものを表現するのに適しているが、手先の動きに比べて反力の更新が遅いと、壁に手がめり込んでしまったり、発振してしまったりして、かえって不自然に感じてしまう。これに対して位置型は、ある一点に向かうように反力を生成するので、計算機の処理速度がある程度早ければ発振することもない。本研究では、主にこの位置型の反力を用いている。

## 2. 5 フォースディスプレイの効果

フォースディスプレイを用いることによってどれほどの効果があるのかを見る実験を行った。仮想空間に変形可能な仮想の球を浮かべておき、被験者にフォースディスプレイを用いて、全部で5つの凸凹をつくらせてもらう。変形の際には、図3に示すように、仮想物体の表面をつまんだときの位置に引き戻すような反力を提示した。実験は、凸と凹の数の比率をランダムに変えて、スタートの合図をしてから目標とする凸凹が出来上がるまでの時間を計測した。被験者は、男子学生3人で結果を図4に示す。縦軸は実験開始の合図をしてから被験者ができたと判断するまでの作業時間、横軸は実験の場合分けで、左から、反力を提示して行ったもの、反力無しで行ったものである。棒グラフ上の縦の線は、標準偏差である。

実験の結果、反力があるほうが、より変形に要する時間が短くてすむことが分かった。また、標準偏差を見ても、反力ありの方が小さくなってお

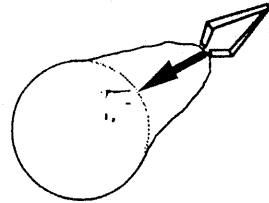


図3. 仮想物体から受ける反力

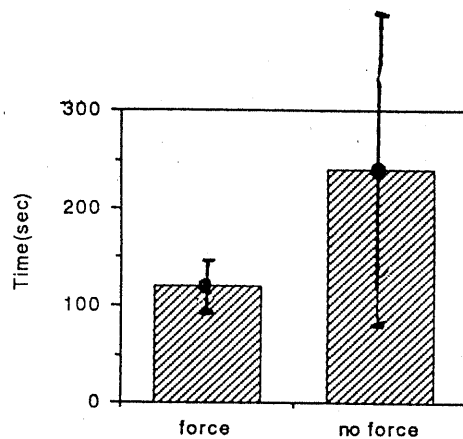


図4. 反力の有無による比較

り、作業時間のばらつきが少ない。被験者を観察していても、反力がない場合、自分の手先が仮想空間内でどこにあるのか非常にわかりづらそうであった。以上の結果からも、仮想物体を扱う場合、反力の提示がより物体の認識を容易にし、操作性の向上につながるということがわかる。

### 3 仮想環境構築支援システム

#### 3.1 仮想環境構築支援システムの概念

現在の人工現実感システムの開発においては、その入出力デバイスなどの特異性から、ハードウェアの性能を高めるために、ソフトウェアの最適化を行うなど、ソフトウェアから見て系統的な開発手法や生産性、柔軟性などが欠ける傾向にある。このことは、より実用的で高度な人工現実感システムの開発に、大きな障害となりうる。

このようなことを避けるために、ソフトウェアの面から、システム開発の基盤を整備する必要がある。

また、実空間で人間が作業する場合、重力や摩擦といった物理現象を無意識のうちに利用している。仮想空間でも、これらのものが操作性に深くかかわってくる。この様な世界を支配する物理法則を実現するためのものが必要である。[3][4]

以上の条件を満たすために、本研究で開発した仮想環境構築支援システムでは、入出力デバイスと通信をする部分、入出力デバイスから来る情報をもとに、ユーザーが何を欲しているのかを解釈し、仮想環境を更新する部分、仮想空間の環境の管理をする部分の、3つの部分にプログラムを分けることとした。こうすることで、入出力デバイスの変更も通信部分を変更するだけででき、仮想空間の、物理法則の変更や仮想空間の操作方法も、それに対応する部分だけを変更するだけで、容易にできるようになっている。また、プロセスを分けたことで、ユーザーが仮想空間に存在しているかどうかにかかわらず、仮想空間では時間が進行していき、仮想空間に自律性を簡単にもたせることができる。

#### 3.2 システム構成

仮想環境構築支援システムは、現在UNIX (HP9000/425t: System V) 上で動作する。仮想空間の映像を3次元グラフィックスライブラリー (Star Base) を用いて記述してあるので、この部分を変更することで、他のグラフィックワークステーションでも動作させることができる。プログラムは、物理法則の管理や、仮想物体の動きの管理やユーザーの管理、映像表示を行う部分 (本体) と、ユーザーの意思を解釈して仮想空間を変更する部分 (アプリケーション) を別のプロセスに分けることにした。本体とアプリケーションの通信はすべて共有メモリを通して行っている。

(図5) のようにすることで、アプリケーションの部分を変更することによって、仮想空間を変更することが簡単にできるようになった (汎用性、生産性)。また、アプリケーションで様々な機能を作り、汎用性のあるものは本体にその制御を移すことで、他のユーザーはその機能を、簡単に利用できる (本体の柔軟性、開発基盤の整備)。

また、本体が起動されていれば、仮想空間内の時間は進行し、物理法則にしたがって仮想空間は変化していく。ユーザーの存在にかかわらず、仮想空間に自律性をもたせることも可能となっている。

この仮想環境構築支援システムのパフォーマンスとしては、ユーザー無しで仮想物体が10個程度の場合、およそ10Hzで動作する。

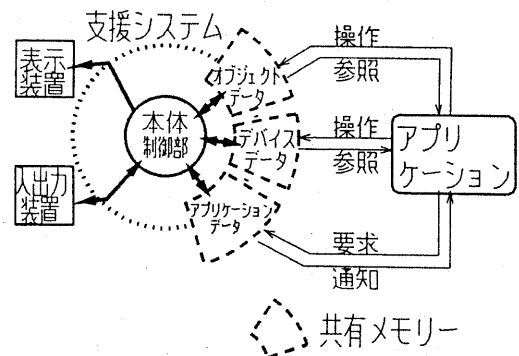


図5. 仮想環境構築支援システムとソフトウェア

ユーザーが一人の場合、7,8 Hz 程度で動作する。ユーザー 2 人の場合、2.5 から 5Hz 程度で動作する。

### 3. 3 仮想物体

仮想物体のデータは、すべて共有メモリ上にあり、支援システムの本体とアプリケーションは、その共有メモリから情報を得て、それぞれの仕事を行なう。(図 5)

仮想物体は、大きく分けるとデバイス、オブジェクトの 2 種類がある。デバイスは、フォースディスプレイなどの入出力装置に関する情報を持っている。そのデバイスの ID、位置、形状、状態、色、カフイードバックに関する情報などがある。形状には、現在、て、ピンセット、ペンが用意されている。オブジェクトは、フォースディスプレイ以外の、仮想空間に存在する仮想物体のデータを格納している。基本的には、オブジェクトの ID、位置、速度、加速度、質量、衝突に関する情報、形状、大きさ、色、干渉に関する情報、性質、所有者、連結等のデータを持っている。性質は、動くもの、動かないもの、あるいは、ボタンやスイッチ、カメラなど、特殊なオブジェクトであることを示す。所有者は、どのデバイスに拘束されているかを示す。

仮想物体に関するデータは、すべて構造体として登録されており、すべての仮想物体に一つの共有メモリが、割り当てられている。このようにすることで、デバイスやオブジェクトの創造と消去が、簡単に行えるようになってきている。

## 4 協調作業

### 4. 1 協調作業の環境

本研究で開発した仮想環境構築支援システムを用いて、複数の人間が、同時に仮想空間内で仮想物体を変形、移動できるシステムを開発した。本研究では、フォースディスプレイとして、パンタグラフ型と拡張スカラー型の 2 種類のものを使用している。そしてそれらを制御するためにそれぞれパーソナルコンピュータ (PC-386VR, PC9801

BX) を使用した。仮想環境支援システムを動作させるワークステーションとしては、HP9000/425t

を用いている。仮想環境構築支援システムとフォースディスプレイは RS232C 及び GPIB によって通信している。通信の内容は手先の位置と姿勢をフォースディスプレイ側から送り、反力の情報を受け取っている。通信はそれぞれおよそ 20Hz, 35Hz で行っている。

このシステムでは、それぞれの人は同じ映像を見ており、始めは仮想空間内に床と物体を操作するときのモード変更のためのボタンが浮いている。仮想空間内にユーザーが入ると、ユーザーの手が表示される。フォースディスプレイを通して手を動かすと、それに応じて仮想空間内の手もリアルタイムで動く。人間は仮想空間にあるものを手でつかむことによって、仮想環境に働きかけをおこなう。仮想空間内にある変形や移動用のボタンをつかむと、手の形が変わり、移動の時は手、変形の時はピンセットになる。自分の手の形によって、現在のモードが分かるようになってきている。変形する範囲は、スライドスイッチによって指定することができるようになってきている。変形は、まず指先を物体の表面への移動する。表面に触れると触れた場所の色が、黒く変わり、その場所に手先を引き戻すような力が、提示される。そこで指を閉じると、物体の表面を掴むことができ、そのまま手を動かして、指を離すと変形することができる。変形の最中は、物体を掴んだ点に手先を引き戻すような反力が、提示される。(図 3)

このような環境で協調作業を行う。(図 6)

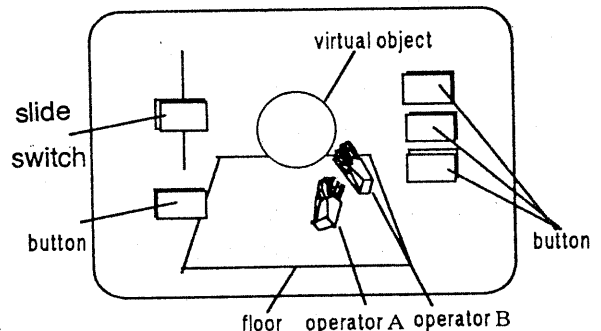


図 6. 協調作業空間模式図

二人の人が仮想空間に入ると、それぞれの手が色違いで表示される。このとき、相手の手をつかむと、自分と相手の手の距離が小さくなるような反力が、お互いに提示される。このようにすることで、あたかも相手に手をつかまれているかのような感覚を起こさせる。

次の節からは、このシステムの評価実験を行ったので、その結果を報告していく。

#### 4. 2 システム評価実験

##### 4. 2. 1 実験1

4. 1で述べたシステムで実験を行った。被験者に仮想物体を変形して、鶴、亀、犬、人の4種類の、変形にある程度の熟練を要する仮想物体を作成してもらった。その際に、被験者に、「もっと右」「もっと左」といった言葉だけでなく、実空間上で実際に被験者の手を取って教える場合、言葉と仮想空間上での手をとって変形の仕方を教える場合、作り方を言葉だけで教える場合の3つの条件を設定して、協調作業の効果を見る実験を行った。実験は、各モデルを各条件つきに1回ずつ、計12回行った。実験の前に、被験者が最低限の仮想空間での作業ができるよう、練習用のモデルを作ってもらっている。

実験の結果を、図7に示す。縦軸は実験開始の合図をしてから被験者ができたと判断するまでの作業時間、横軸は実験の場合分けで、左から、実空間で手をもったもの、仮想空間で手をもつ

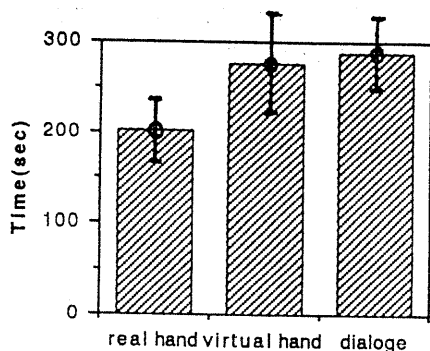


図7. 示唆の種類による比較

たもの、言葉のみで行ったものである。棒グラフ上の縦の線は、標準偏差である。被験者は男子学生3人である。

結果としては、実空間で実際に手を取って教えた場合が、作業時間は顕著に短くなった。仮想空間を通して教える場合と、言葉のみで教える場合では、わずかに仮想空間を通して教えた場合の方が、作業時間は短かったが、顕著な差は見られなかった。これは、仮想空間で相手の手を取ると反力が提示されるが、反力のアップデートが20Hz程度で、フォースディスプレイが細かい振動を起こしてしまい、熟練を要するような細かい作業をする場合、操作性が悪くなってしまうことが、主な原因と思われる。

##### 4. 2. 2 実験2

実験1では、仮想空間内での、作業の仕方を教えるということに対して、協調作業の効果調べる実験を行ったが、ここでは、二人の人間が、役割を分担して、実験1と同じモデルを作成して、仮想空間での協調作業は、有効であるかどうかを見る実験を行った。実験は、実験1と同じ環境で行い、一人に仮想物体の姿勢を変えてもらい、もう一人には仮想物体の変形を行ってもらった。

実験の結果を図8に示す。グラフの縦軸は、実験開始の合図をしてから被験者ができたと判断するまでの作業時間、横軸は実験の場合分けで、左から、作業を分担して行った場合、全部の作業

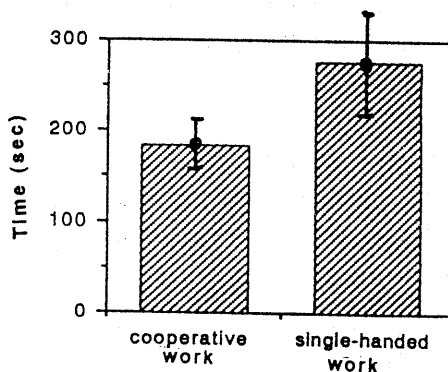


図8. 協調作業の有効性

を一人で行った場合である。棒グラフ上の縦の線は、標準偏差である。被験者は男子学生3人である。一人で行なった場合よりも、二人で行なった場合の方がより作業時間が短くなっていることが分かる。この差は、もっと合理的に作業分担（例えば、一人が仮想物体の右半分の変形をしているときに、もう一人が左半分を変形させるなど）すれば、より顕著に見られるようになると思われる。

#### 4. 2. 3 考察

実験1では、仮想空間内で教示をする場合、現在のシステムではその目的を達成するためには、不向きであることが分かった。フォースディスプレイを用いて共同作業者の手を取る場合、仮想空間内での手と手の距離をなるべく小さくしなければならぬ。そのために、手と手の距離に比例して、手が近づこうとするような方向に反力を生成する必要がある。フォースディスプレイに与える目標反力のアップデートは20Hz程度であった。アップデートが遅くなってしまう原因の一つとして、通信のオーバーヘッドが挙げられる。これは、シングルユーザーで仮想空間にいる場合と比べると明かである。画像表示も遅くなる原因としてあげられるがシングルユーザーの時に多数の仮想物体を表示させても、反力の更新は40から45Hz程度であったことから、通信のオーバーヘッドが予想以上に大きかったものと思われる。このようなアップデートレートで力ベクトルを目標値として与えていたのでは、振動してしまう。本研究では、このようなことを避けるために手をつかんだときは、相手の手の座標値に近づくように、目標提示を行っている。こうすることで、大きな振動は避けることはできたが、相手の手もわずかに動いているので、細かい振動が起こってしまい、細かいポインティングを行う作業にはむかない。このような作業をする場合は、時間的な分解能を高める必要があることがわかった。

実験2では、共同で作業をする場合の効果を見たが、仮想空間においても共同で作業する方が、より早く目標を達成できることがわかった。

## 5 まとめ

本研究では、仮想空間で作業するためのフォースディスプレイを用いて、仮想環境の開発を支援し、環境を管理する仮想空間構築支援システムを開発した。このシステムを用いて、仮想空間で協調作業をするプログラムを開発し、その評価実験を行った。その結果、仮想空間で協調作業をする場合には、時間的な分解能を高める必要があること。しかし、仮想空間内に於いても協調作業することで、より早く目標を達成できることがわかった。

今後は、まずフォースディスプレイとワークステーションの通信のオーバーヘッドをなるべく少なくすること。具体的にはフォースディスプレイ毎に行っているワークステーションとの通信を、1台の計算機で通信を行いその計算機を通して各フォースディスプレイとデータのやり取りをする形態にすることを考えている。また、仮想空間構築支援システムのさらなる機能の拡張を行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] 岩田：“フォースディスプレイ”、計測と制御, Vol30, No6, pp472-477
- [2] 岩田, 中川, 矢野：“広可動範囲フォースディスプレイの開発”、情報処理学会研究報告, Vol.92, No31, pp57-64
- [3] 廣瀬：“人工現実感の生成”、システム/制御/情報, Vol33, No11 (1989)
- [4] 木島, 廣瀬：“人工現実感の研究。一仮想空間エディタ “Vis-Edit”の開発、第7回ヒューマン・インターフェイス・シンポジウム論文集 pp187-190