

# 協調仮想物体操作のための力覚を用いた インタフェースの試作

野間 春生<sup>†</sup> 宮里 勉<sup>†</sup> 中津 良平<sup>†</sup>

本論文では、実空間における 1 ユーザの両手あるいは複数ユーザの複数操作腕による協調物体操作の有効性に着目し、同様のインタフェースを仮想空間で構築する手法についてまとめている。従来のグローブ式操作入力装置による視覚情報中心の VR システムで複数の手を用いた作業の際には、複数の手がある仮想物体を同時把持した際に発生する腕間の機械的拘束を視覚情報だけでは十分に表現しきれない問題がある。ここでは、“剛体の仮想的な力学的平衡”と“物体の重なり回避処理”を導入し、Force Display による厳密な反力生成を行わずとも、把持しているそれぞれの手先が力覚情報を交換することで、より現実感をともなった協調操作を可能とする手法を提案した。試作した仮想物体操作環境を用いた提案手法の有効性を示すための実験では、1 名および複数名を対象とし、従来の拘束状態を視覚情報だけで提示する手法に比べてより高精度に物体操作を実行できることを確認した。

## Haptic Interface for Cooperative Object Manipulation

HARUO NOMA,<sup>†</sup> TSUTOMU MIYASATO<sup>†</sup> and RYOUHEI NAKATSU<sup>†</sup>

In this study, we focus on precise and natural cooperative object manipulation using two-hand of a user or some hands of some users in a virtual space. In a typical VR system that employs glove like device and feedbacks only visual information, when users hold one virtual object together, such system can not restrict user's hand motion physically. We introduce two virtually expanded physical laws—virtual mechanical equilibrium on a rigid object and exclusive object arrangement—to create realistic cooperative manipulation. We have built a trial system with two hands according to our proposed design and an experimental result shows the effectiveness of our proposed method in the case of two-hands manipulation of a subject. This method is expected to allow users to exchange intentions of manipulation by haptic and visual channels among users.

### 1. 目 的

仮想空間におけるデザイン環境は、VR 技術の応用の最も期待される面である。VR 技術の特徴は、実時間・3次元表示・直接操作に集約されるが、これらを応用するならば、デザイン作業の根本を革変することが期待される。以下に、VR 技術の特徴を導入したデザイン環境を想定してみる。

個々の部品の設計段階では、従来の CAD インタフェースの有する作業性に加えて、手振りや、“もう少し丸く”といった音声入力などを併用したインタフェースを用いて、3次元物体として加工する直感的インタフェースを提供できる。これらの部品の組立ての段階でも、現実を指向した実際の組立て作業を模擬するだけでなく、手振りや音声チャンネルの支援も有効に用

いながら、高精度・高効率に行える。同時に、仮想空間で組み上がった製品の動作確認をするため、対象の操作感覚の体感までも含めて再現し、不具合があれば直ちに設計段階で修正する。これらの作業過程では、現実の共同作業、あるいは、仮想空間内でのエージェントとの連係作業も期待できる。

もちろん、このような究極的な VR 指向の次世代デザイン環境を現段階で実現するには、計算機やデバイスの能力が不十分であり、個々の要素レベルの研究がなされている段階である<sup>1)~4)</sup>。

著者らもここで例示した次世代 CAD のような現実を超えた仮想環境の利用について研究を進めている。その一手法として、完全な情報を提示せずにその一部を自動的に修正しながら多感覚情報として提示することで、実質的には十分な仮想操作感覚の提示方法を検討してきた。

本論文では、VR 技術を応用する際の必須機能である対象物体の移動・接合操作について、後に述べる利

<sup>†</sup> ATR 知能映像通信研究所  
ATR Media Integration & Communications Research  
Laboratories

点を有する1ユーザの両手あるいは複数ユーザの複数操作腕による協調物体操作へと適用する手法についてまとめる。

ここではまず、複数操作腕による操作環境の特徴について述べ、ついで仮想空間への適用にもなって発生する問題点を整理する。実空間での複数腕の使用の際には、物理的な機械拘束によって双方の操作意思が伝達され円滑な協調作業が成立する。一方、仮想空間では本質的にすべての物理法則を記述せねばならず、このような些細な挙動であっても何らかの方法で再現せねばならない。ここでは、力覚情報と映像情報を組み合わせて拡張した仮想的な物理法則によって、ユーザ間の操作意思疎通を視覚情報と力覚情報によって成立させ、実際に同時把持しているかのような感覚を提示する。

さらに提案手法を導入した操作支援システムの実装の方法を述べ、これを用いた提案手法の有効性評価実験結果について示す。結論では提案手法の応用展開として、複数腕による操作を、単なる拘束関係の提示手段にとどめず、情報一般のコミュニケーション手段として展開する方針についてまとめる。

## 2. 仮想空間での協調操作環境

### 2.1 複数腕の操作環境の利点

本論文で対象としている仮想空間での複数腕による協調作業環境は、1名が両手を用いたり、複数名が共同して作業を行う状況である。まず実世界での作業形態から、仮想環境下においても協調操作機能が必要となる要因を考察しておく。

実空間における複数腕の使用は、単独では操作が困難である重量物や大きな物の操作、あるいは、精密位置決め作業や組立て作業などが考えられる。前者に関しては、仮想環境下では重力や慣性といった操作対象の物理的制約を無視できるため、実世界シミュレーションの目的でそれらが必然でない限り仮想環境下から排除可能である。しかし、後者に関しては、VRの最たる特徴である直接操作方式を導入する目的ならば、以下にまとめるような点で実空間と同様に仮想空間でも複数腕の利用は効果的である。なお、展開を明確にするため以下の議論を1名の両手を対象に進めるが、これらは本質的に複数利用者環境へ展開可能である。

#### (1) 物体操作作業の精度の向上

片手で物体の一端を図1(a)のように把持するならば、物体の長さ按比例して他端の位置操作精度は低下する。一方、両端を把持した場合、把持点を支点と作用点として用いれば、高精度に操作できる。仮想空間

への適用では、両手作業に利き腕の概念を導入し、支点と作用点の機能を自動的に割り当てる手法が提案されている<sup>5)~9)</sup>。

#### (2) 自由度の冗長化による把持の効率的制御

空間において操作対象の位置姿勢を確実に制御するには、操作入力器である手先に最低6自由度が必要であるが、この場合は操作対象の位置姿勢に従って一意に手先の状態が決定され、動作に無駄が生じたり特異点に陥りやすい。物体を複数の腕、あるいは、指で把持すれば自由度が冗長化するため、無駄の少ない操作が実現される。

#### (3) 物体操作作業の効率の向上

複数腕で協調する作業では作業効率の向上も期待できる。Buxtonら<sup>10)</sup>はマウスとスライダを用いた両手操作での作業効率が、マウスのみ操作に優ることを示した。両手作業での時間の同期性と受動・能動的な外力の作用が作業の効率に関係深いことを示す結果も報告されている<sup>11),12)</sup>。これらは、両手の協調効果を導入するには、単に両手アイコンを表示するだけでなく、それらの関係を何らかの手段によって提示せねばならないことを示している。

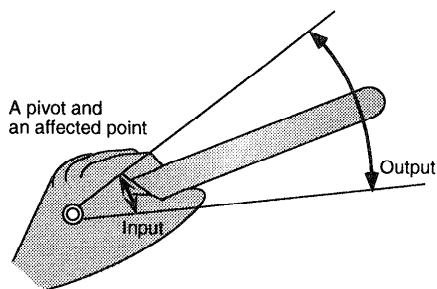
### 2.2 仮想空間における協調物体把持の実現

前節で示したような複数腕での協調物体把持操作を仮想空間で行うには、ユーザの諸感覚に対する適切な情報提示が必要である。

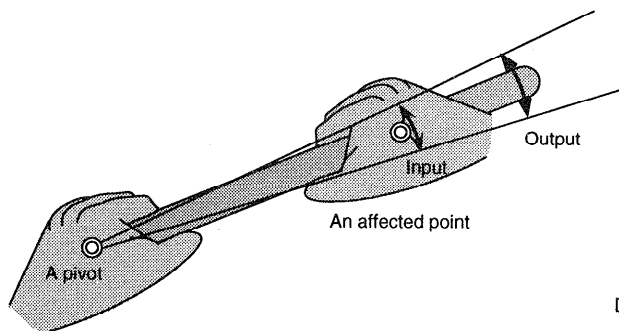
#### 2.2.1 同時物体把持時の機械的拘束条件

実空間で1名の操作者が片手である物体を操作するときには、手先から入力される操作の自由度と物体の自由度が等しく、両者の関係は一意に決まる(図2(a))。一方、複数操作者の $n$ 本の腕が協調して1物体を協調操作する際には、操作する手先の入力する自由度が $6n$ となり物体の自由度よりも多いが、物体が剛体であるために機械的拘束が発生し物体の位置姿勢が一意に決定できる。2本の操作腕の場合を図2(b)に示す。このとき、あるユーザが作用させる力は、自身へ反作用として帰還すると同時に、他者へも伝播する。実空間では共同作業者間の操作意思や作業状態は、この物体を介して伝わる操作反力と音声や表情などの感覚情報を用いて伝達している。

複数の参加者に同じ仮想空間を共有させて実空間同様のコミュニケーションを実現するVRシステムは、多数提案されている<sup>13)~17)</sup>。これら典型的な視覚情報中心のVRシステムは、適当な立体映像表示装置とグローブ型手形状入力装置、磁気式位置姿勢センサーなどから構成され、仮想空間に対しての操作入力はユーザの手から直接入力されるが、操作結果は画像や音響



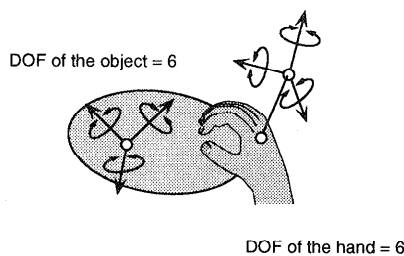
(a) Object manipulation with one hand



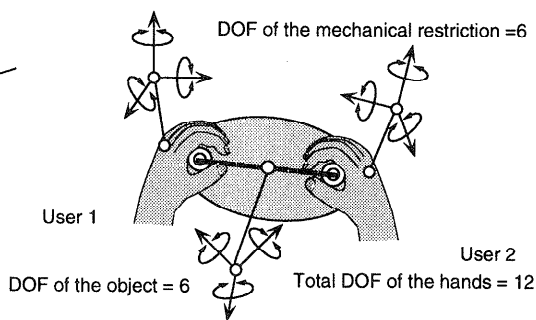
(b) Object manipulation with two hands

図 1 物体操作作業の精度

Fig. 1 Precision in manipulation.



(a) One user holds one object



(b) Two user hold one object together

図 2 操作時の自由度

Fig. 2 Degree of freedom of manipulation.

情報のみで提示されるため、前述の機械的拘束を提示できない。そのため、ある物体がある参加者に把持されている際には他の参加者からの干渉を禁止する排他的な物体把持ルールを導入してこの問題を回避している例が多い。

触力覚への機械的な拘束を導入せずに同時把持を実現する手法も報告されている<sup>5)~7)</sup>。これらでは、把持のタイミングや利き手条件と両手の位置関係から手の操作物体に対する干渉方式を規定し、画像情報による物体挙動の変化により操作モードをユーザに示している。当然ながら、利用者はこの視覚的なフィードバック情報だけで手先の動きを制御しなければならないため、操作が不自然な動きとなる恐れがある。

### 2.2.2 Force Display による機械的拘束の実現

このような不自然な協調操作を根本的に解決するための手法としては、図3のようなロボットアームを用いた Force Display を用いて、ユーザの手先と床面の間に任意の機械的拘束を生成し、仮想的に剛体の拘束を提示する手法があげられる<sup>18),19)</sup>。ところが、Force Display を用いる手法で剛体の拘束条件を厳密に満たすためには、以下のような性能が必要となる。

(1) ユーザの手先の動きを十分に制約する高剛性

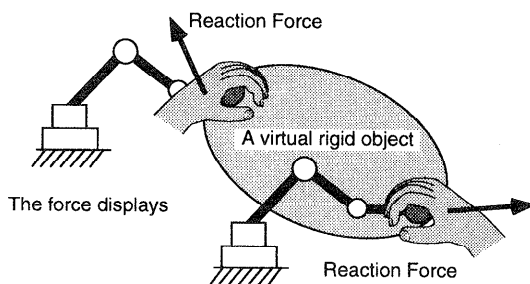


図 3 Force Display による機械的拘束

Fig. 3 Virtual mechanical restriction by force displays.

(2) ユーザの手先の動きに十分に追従する自由度と広い可動範囲

(3) ユーザに安全な装置の使用

これらはいずれも対立する要素である。可動範囲を確保するために大型化した装置は、手先を確実に制約するためにより強力なアクチュエータを必要とし、それにとまって安全性の面で高い信頼性が要求される。文献 18)~20) では厳密な反力提示を行うために、Force Display の可動範囲や自由度を抑えて高出力化するとともに、外力への感度が良好な指先への反力提示を行うことでこの問題を解決している。しかし、利

用者の手先の全到達領域にわたる物体操作や複数腕操作が要求される場面では機器構成にも限界があり、別の解決法が必要となる。

本論文では、このような広範囲空間にわたる協調物体作業を対象として、次章で述べる仮想的に拡張した物理法則を用い、厳密な反力提示を行うことなしに剛な物体の操作感覚を複数腕に提示する手法を提案する。

### 3. 仮想的な機械的拘束条件の導入

本手法では、仮想空間内で拡張された物理法則として“剛体の仮想的な力学的平衡”と“物体の重なり回避処理”を導入し、仮想的に機械的拘束条件を成立させる。提案手法に基づく試作環境を図4に示す。図中の2機の6自由度 Force Display の可動範囲は着座したユーザの手先の移動範囲を追従可能であるが、並進方向の最大出力は約10Nであり、これ以上の操作力や回転運動を完全に拘束できない。しかし提案手法によって、ユーザに仮想的に拘束感を与え、複数腕での協調操作を可能とする。

#### 3.1 剛体の仮想的な力学的平衡

図5(a)に示すように、実世界で1物体を両手、あるいは、複数の操作者の  $n$  本の腕で同時に把持した場合、物体が剛体ならば操作中は把持点間の位置関係はつねに固定される。この状態では、ある操作者が作用させた力はそのまま操作反力として返され（作用・反作用の関係）、他の操作者が作用させる力との釣り合い条件を満たす形で操作対象の運動が決定される（力学的平衡）。

同様のモデルを仮想空間で実現するには、物体と仮想腕の接触を剛性の非常に高いバネ-ダンパー系で定義し、そのシミュレーション結果を Force Display でユーザに提示する<sup>21)~24)</sup>。厳密なモデルを実現するには前項で述べたような理想的な Force Display が必

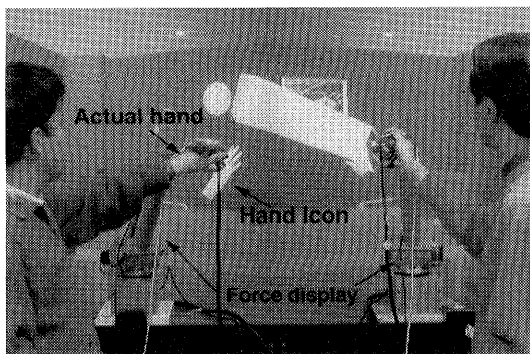


図4 2ユーザによる協調物体操作（添付写真）

Fig. 4 Cooperative manipulation with two users.

要となるが、ここでは出力の不足する Force Display で機械的拘束を実現するために、図5(b)に示すようなバネを介在させる把持モデルを定義する。このモデルでは、視覚的には把持している手先アイコンは把持開始位置に固定したまま、力覚的には剛性の低いバネ要素で結合し、この仮想的に剛なモデルにより反力を決定する。当然ながら、手先アイコンの見掛け上の位置と体性感覚による自身の手先位置の関係に矛盾が発生する。

人間の触力感覚が他の感覚情報と同時に提示されるとき、提示刺激の間に矛盾が存在する際には、錯覚によってその矛盾を吸収して認識する傾向が見られる<sup>25)~27)</sup>。特に仮想空間においては仮想世界内で自身の手先の代理である手先アイコンに注目しており、本手法のような体性感覚情報と視覚情報に矛盾が発生した際にも同様の修正機構によって、体性感覚による手先の動き情報をマスクして剛な感触を提示できると期待できる。

図5(b)の  $n$  本の操作腕で物体を把持している場合について、後述の試作装置で用いたアルゴリズムを解説する。把持開始時の手先  $i$  による把持位置を  $\vec{X}_i$ 、物体の重心  $\vec{C}$ 、物体の基準座標系を同次変換行列  $\mathbf{B}$  によって物体上に固定する。協調把持操作中は、手先  $i$  の実際の手先位置  $\vec{P}_i$  と  $\vec{X}_i$  の間に自然長0で弾性係数  $k_i$  と粘性係数  $D_i$  を有する仮想バネが、自由回転端を介して接続されていると定義し、仮想世界の運動シミュレーションの1ステップごとに以下に示す数値計算により力学的に平衡な位置姿勢を決定する。

数値計算は、運動シミュレーションの前ステップでの物体の位置姿勢と現在の全手先の位置情報を初期値として運動方程式(1)、(2)を差分計算により解き近似的に力学的平衡を得る。

$$\frac{d^2\vec{C}}{dt^2} = \alpha\vec{F} - \beta\frac{d\vec{C}}{dt} \quad (1)$$

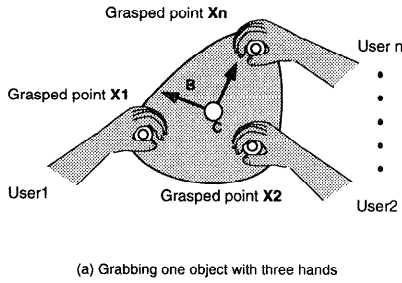
$$\frac{d^2\mathbf{B}}{dt^2} = \gamma\mathbf{E}\vec{M} - \mu\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{E}$  は基本行列、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\mu$  は定数であり、近似が収束する範囲で設定する。手先の物体に作用する外力  $\vec{F}$  と、 $\vec{C}$  を中心とするモーメント  $\vec{M}$  は式(3)、(4)に定義する。

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n k_i(\vec{P}_i - \vec{X}_i) - D_i\vec{X}'_i \quad (3)$$

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = \sum_{i=1}^n (\vec{P}_i - \vec{C}) \times \vec{F}_i \quad (4)$$

ここで  $\vec{X}'_i$  は手先  $i$  の速度のバネ方向の成分を表す。



(a) Grabbing one object with three hands

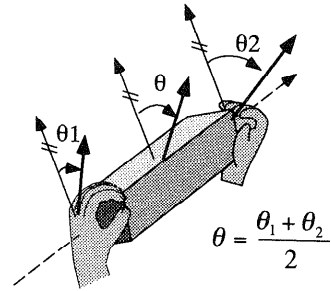
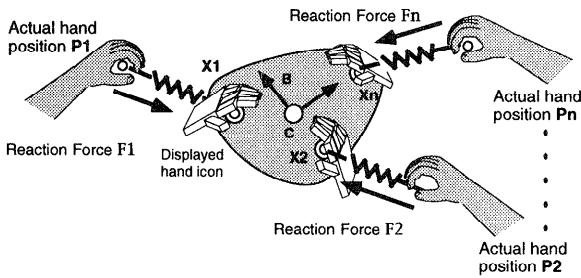


図 6 2本の操作腕による軸方向の回転操作

Fig. 6 Rotational manipulation with two hands.



(b) Manipulating one object with three hands

図 5 剛体の仮想的な力学的平衡

Fig. 5 Virtual mechanical equilibrium on a rigid object.

これらから導かれる差分計算を式(5), (6)に示す。以下の右下添え字  $t$  は近似計算のステップ数を示す。また  $u, p, s, q$  は近似計算を収束させるように設定した定数,  $Rot(\vec{A}, b)$  は  $\vec{A}$  まわりに右ネジ方向に  $b$  度の回転を施す同次変換行列である。

$$\vec{C}_t = \vec{C}_{t-1} + u\vec{F}_t - s\vec{C}_{t-1} \quad (5)$$

$$\vec{B}_t = Rot(\vec{W}, -q|\vec{W}|) \cdot Rot(\vec{M}_t, p|\vec{M}_t|) \cdot \vec{B}_{t-1} \quad (6)$$

上式中で位置と姿勢の変化量に相当する  $\vec{C}_t(t-1)$ ,  $\vec{W}$  は式(7), (8)のように差分計算を行う。

$$\vec{C}_{t-1} = \vec{C}_{t-1} - \vec{C}_{t-2} \quad (7)$$

$$Rot(\vec{W}, |\vec{W}|) = \vec{B}_{t-1} \cdot \vec{B}_{t-2}^{-1} \quad (8)$$

理想的な解は,  $|\vec{F}_i|, |\vec{M}_i|$  とともに 0 となる力学的平衡状態であるが, 近似計算では適当なしきい値に達した段階で平衡と見なす。ここで得られた操作物体の位置姿勢をもとに, 画像情報は把持開始時の手先間の位置関係を保存したまま表示し, 力覚情報では式(3)から算出される  $\vec{F}_i$  をそれぞれの手先  $i$  に出力する。これにより, 図 5(b) のある手先が物体を引っ張れば, 手先位置と把持開始点の間に誤差が生じて物体を引っ張る状態となるとともに, 他のユーザの手先位置関係にも誤差を発生させ操作反力を伝える。

把持腕が  $n$  本のときに, さらに別の腕が協調把持に参加する際には, 上記のパネモデルを 1 組み追加することによる。逆に,  $n$  本の腕による把持状態から, 1 本が把持を解除して  $n-1$  本の腕による把持状態に移行するモデルは,  $n > 2$  の場合は単に該当するパネを解除するのみである。しかし,  $n = 2$  のときには, 最後まで残った手先の位置とその手先アイコンの位置が矛盾している可能性がある。このときには把持物体位置  $\vec{C}$  と手先位置  $\vec{P}_1$  を保存したまま, 把持位置  $\vec{X}_1$  を  $\vec{P}_1$  に変更する処理を行う。

また,  $n = 2$  の把持状態では,  $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{P}_1, \vec{P}_2$  が同一直線軸上に並ぶ状態が力学的平衡状態であるが, この軸まわりの回転運動を提案手法では制御できない。そこで, このような状況では, 図 6 に示すように, 各手先の初期姿勢からの回転のうち, 軸方向についての成分を  $\theta_1, \theta_2$  とし,

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (9)$$

となる  $\theta$  を操作物体の軸方向の回転量として処理している。すなわち, 両者が協調して軸回転させた際には, その回転量と同じだけ軸回転するが, 逆方向に動かした場合にはそれぞれの操作は物体に作用しない。

### 3.2 物体の重なり回避処理<sup>27)</sup>

実世界で 2 物体を接合させる際には, 双方が十分に剛体ならばそれぞれの衝突表面位置が接触するのみで, 互いに重なり合うことはない(排他的物体配置)。CG で表示される仮想世界で実空間のような重なり合うことのない物体の挙動を実現するためには, 物体の衝突検出機構と衝突による物体の動きの拘束を提示する手法を用いねばならない。力覚提示装置を使って面内の移動に操作が拘束される感覚を提示する手法は, 前述のように 6 自由度にわたって十分に固い面を提示するには解決すべき課題が大きい。

ここでは把持物体が他物体へ衝突したことを検知し

た際に、把持している手先の位置姿勢の情報を加味して、把持物体の位置姿勢が衝突した対象面どうしが視覚的には正確に接触するように、物体の運動を管理するソフトウェアが物体の位置姿勢を自動修正しつつ、仮想的に操作反力を提示する手法を採用する(図7)。同時に、拘束面と手先の間に仮想的なバネを配置し、拘束面の状態を直接的に操作者に提示する。つまり、手先にも面に対して与えた力(作用力)に等しい反力(反作用力)を提示する代わりに、正確に面に沿って移動させた際の位置と実際の手先の位置の誤差を拘束

面への作用力として仮定し、この作用力に対する反作用力として操作反力を規定する。また、この自動修正付きの拘束モードから物体を解除するには、吸引力に意識的に逆らうことによる。

これらの機構によって、本来は面に沿って手先は上下しているにもかかわらず、物体の操作は面に沿って平行になされる、同時に面を押した量に比例して操作反力を得るため、直感的に操作対象の動きが拘束されていることを知覚可能であり、ユーザが特に意識して接触すべき面どうしの動きを調整しなくても、正確な操作が実現できる。

3.3 ユーザ 2 名の場合の操作例

提案手法を 2 ユーザによる協調物体操作に適用した例について示す。図 8 は操作の状態遷移を示し、グレーに囲まれた状態は前述の 2 手法を作用させていることを表す。なお、理解を助けるために操作対象物体とともに実空間で対応するユーザの手が描かれているが、前述のように物体把持中は仮想空間内の手先アイコンの位置は物体から離れない。

1 ユーザがある物体を把持している“(a) 1 ユーザが物体操作”状態から、その物体を別の固定面に衝突させると、“(b) 1 ユーザが物体を配置”するモードに遷

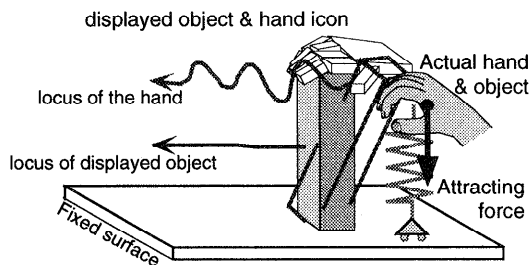


図 7 物体の重なり回避処理

Fig.7 Exclusive object arrangement with visual and haptic methods.

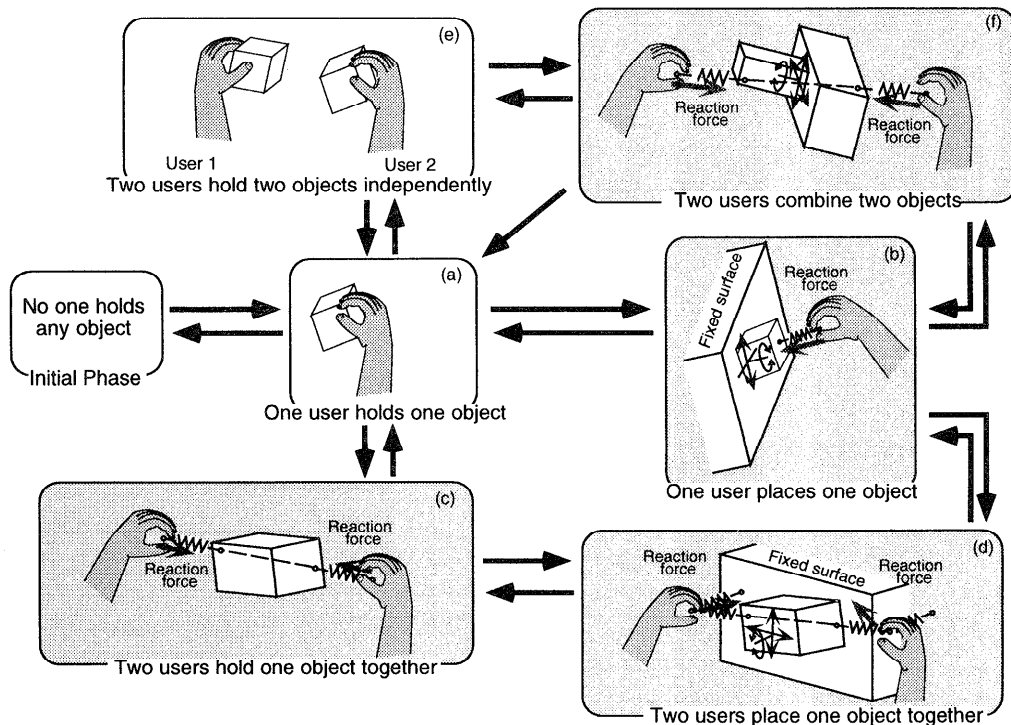


図 8 2 操作腕による物体操作の状態遷移

Fig.8 Transition diagrams of object manipulation in the case of two hands.

移す．ここではユーザは固定面からの操作反力を受ける．

一方、あるユーザが把持している物体を別のユーザが続いて把持すると、“(c) 2ユーザが1物体を協調操作”に遷移し、双方に操作感覚を力覚により伝達する．さらに、この状態から被操作物体を別の固定面に置くと“(d) 2ユーザが物体を協調配置”に遷移する．このときには、被操作物体が固定面に没入することなく固定面上に配置でき、物体を介して協調作業および固定面からの操作反力を相互に伝達している．

また、“(e) 2ユーザが独立に物体操作”している状態からは、それぞれを結合させる“(f) 2ユーザが2物体を協調結合”へ遷移する．ここでは、まず、それぞれの物体の衝突した面のペアより、それぞれの面積を重みとした内分計算から拘束面を決定する．この面に対して、“物体の重なり回避処理”により双方の姿勢の確定をした後に、“剛体の仮想的な力学的平衡”によって全体の位置姿勢を確定する．このとき、双方が面を介して伝達し合う操作反力も同様に仮想バネを用いてモデル化し、各々の手先へ出力する．なお、この拘束固定面の決め方に関しては、ここで採用した手法以外に利き手による把持物体を優先にしたり把持開始時間を参照する手法もあり、目的に応じて比較検討すべきである<sup>5),7)</sup>．

いずれの状態でも、一方の操作が力覚を介して他者に伝達すると同時に、仮想空間内での把持物体の挙動として表示され、自然な協調操作が期待できる．

#### 4. 協調物体操作環境

5章で述べる提案手法の検証実験のために試作した2操作腕による協調操作環境の構成を図9に示す．ここでは画像表示系として、背面投影型スクリーン上に仮想物体と手先アイコンの時分割立体CG表示する典型的なSID (Spatial Immersive Display) の構成をとった．また、運動視への対応と手先の姿勢計測のために、磁気式位置姿勢計測装置を用いた．ユーザの手先の位置計測と力覚提示には、3自由度リンク式ロボットアームによるForce Displayを用いる．ユーザは、3軸自在回転機構を介してForce Displayの先端に接続されるグリップ部を握り、操作反力を得ながら仮想空間内の手先アイコンを自由に動かす．対象物体の把持操作は、グリップに取り付けられているスイッチによって行う．グリップ部の追従領域が半径60cmの半球内に相当し、位置計測精度が0.1cmである．アクチュエータには超音波モータ TOCUS<sup>28)</sup>を用い、グリップ部での操作反力は最大で約10Nである．

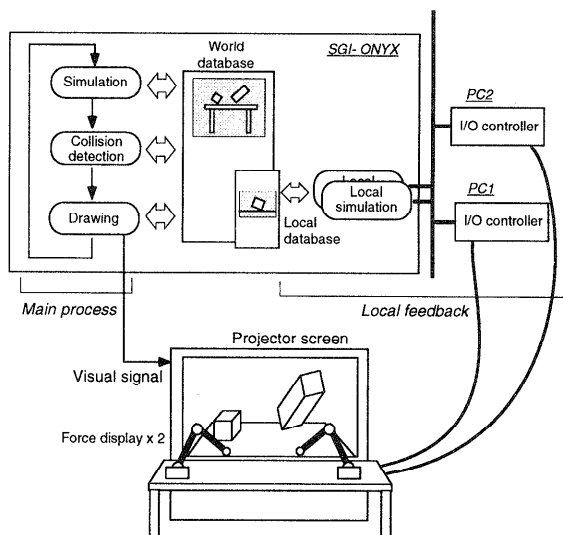


図9 試作システムの構成

Fig.9 Block diagram of the trial system.

#### 5. 評価実験手順

本章では仮想的な機械的拘束条件を導入した協調操作環境の有効性を確認するために行った一連の実験手順について説明する．

##### 5.1 実験環境と条件

ここでは提案手法の有効性を確認するために、試作システムを用い複数腕と片手さらに提案手法と従来手法による協調作業の作業結果を比較した．以下の実験では図10に示すように、仮想空間内でランダムに運動方向を変える円筒形状のターゲットに対し、1名、あるいは、2名の被験者が協力して、円柱型物体をターゲットに追従させる作業を設定した．このタスクではターゲットのランダムな運動に合わせて連続的かつ器用に手先を動かす必要があり、この結果が仮想空間内での一般的な物体操作の効率に反映すると考える．

ここでは、以下に示す操作条件に従って実験を行う．

- Mode-A1**： ハンドルの一端を片手で操作
- Mode-A2**： ハンドルの両端を両手腕で操作
- Mode-A3**： ハンドルの両端を2名で操作
- Mode-F**： 提案手法により、力覚情報を提示
- Mode-NF**： 力覚情報をまったく提示しない．

Mode-A1, A2, A3は厳密な操作反力の伝達を模擬するためのモードであり、仮想物体と同形のハンドルを被験者に把持させている．このハンドルの動きを6自由度位置姿勢追従装置ADLにより計測し、仮想空間内の操作物体の動きに直接反映させる．なお、Mode-A2の片手の把持位置はMode-A1との比較の

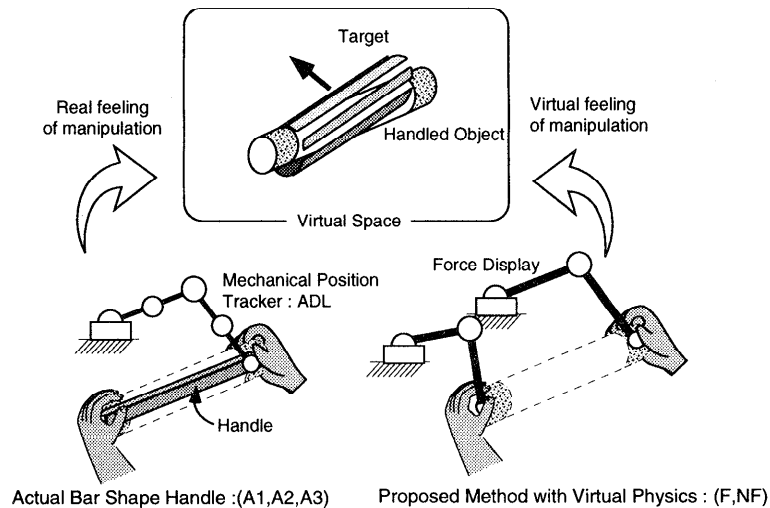


図 10 追跡操作による評価実験の環境  
Fig. 10 Experimental set up of chase task.

ためハンドルの右端とした。これらのモード間の慣性や重力の影響を極力抑えるため、ADLとの接続もこの位置とし、ハンドルには軽量の木製を用いた。また、Mode-NFは従来の典型的VRインタフェースを模しており、手先アイコンは提案方式の一部により位置修正されるが、力覚による拘束情報を一切提示しない。なお、Mode-F、NFでは、仮想物体の複数腕把持による機械的拘束のみを提示しており、重力や慣性補償は提示していない。また、被験者には物体の重なりを仮想空間での両物体の見えからのみ判断させた。

### 5.2 1名の両手による物体操作

ここでは、1名の被験者の両手作業を対象として、実物体による両手と片手、さらに従来のVRと仮想的に操作反力を伝達する提案方式での操作性の比較評価を行う。

被験者にはスタートの合図とともに把持物体をターゲットに重ねるよう指示する。1試行の20秒間の追跡作業中に、ターゲットと把持物体の姿勢の差を表す、それぞれの重心位置の距離誤差、および、ターゲットと把持物体の姿勢の差を表す、それぞれの中心軸の角度差を約400Hzで計測し、試行終了後にそれぞれの平均を記録する。被験者は8名で、前述のMode-A1、A2、F、NFについて十分に習熟した後に、各操作モードごとに5試行、全体で $8 \times 4 \times 5 = 160$ 試行についてデータを計測した。

なおこの実験では、ターゲットの移動範囲は、Force DisplayとADLの可動範囲限界より $80 \times 35 \times 25$ cm (W × H × D)とした。提案手法における仮想バネの剛性を制御が発散しない範囲で10N/cmとした。つま

り、物体上の把持位置から手先が1cm離れるとForce Displayの操作反力の出力が飽和する。また、5.3節の実験と環境条件を合わせるために運動視には対応させず、視点位置を操作空間中央位置に固定した両眼立体視による仮想空間像を提示している。

### 5.3 2名による協調物体操作

2名の被験者で協調してこの追跡タスクを行う場合、提案方式では互いの操作意思が視覚情報に加えて力覚情報によっても伝達できるため、力覚のない状態に比べてより素早く反応し、結果的に追跡精度が向上すると予測された。ここでは、1名の両手物体操作実験の手法を利用して、力覚の有無に対する2名の操作者の協調作業の差異を確認する。

実験の基本的な過程は、前実験と同様である。被験者は前実験の被験者の3名を組み合わせた3組みに対して、A3、F、NFの3条件で、各10試行、全体で $3 \times 3 \times 10 = 90$ 試行について、5.2節と同様に距離と角度の誤差を計測した。被験者の使用する腕については、特に指示を与えず、作業しやすい方の腕を任意に選択させる。また、被験者の左右の位置は5試行ずつ両方で行った。

なお、この試作機では同一のスクリーンを2名の被験者が共有しており、運動視には対応させず、視点位置を中央位置に近似した両眼立体視による仮想空間像を提示した。双方にHMDを用いる手法や時分割で多重視点の立体映像を提示する手法もある<sup>29)</sup>が、いずれも装置が複雑になるため、今回の実験では実装していない。したがって、被験者の手先と手先アイコン位置は見掛け上、厳密には重なっていない。



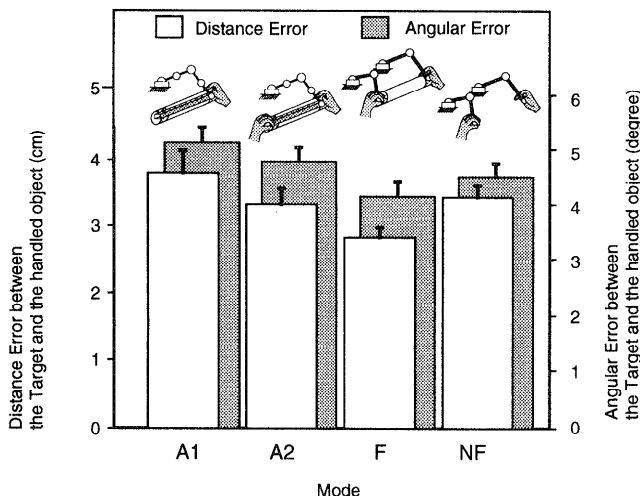


図 11 1名の両手操作時の位置と姿勢誤差  
Fig. 11 Experimental results of one user's manipulation.

## 6. 実験結果と考察

### 6.1 1名の両手による物体操作の結果

1名が把持物体を追随操作させた際の位置誤差と角度を、操作モードごとにまとめた結果を図 11 に示す。棒グラフは全試行の平均値を、エラーバーはその95%信頼区間を示す。それぞれの値が0の場合は完全に重なっていることを示す。操作モードを要因とした分散分析により、位置誤差で  $p(F < 11.8) < 0.001$ 、角度誤差で  $p(F < 11.3) < 0.001$  となり、それぞれに要因ごとの有意差が確認できた。個々のモード間では、位置と角度の双方で Mode-A2 と NF の間でのみ5%の  $t$  検定で有意差がなかった以外は、すべて有意に差が得られた。

まず、Mode-A1, A2 に着目すると、片手での操作では両手の場合に比べて位置も角度も誤差が大きくなり、両手を用いた方がより正確に物体操作ができていることが分かる。前述のように、Mode-A1, A2 間での慣性や重力の影響は極力低減させているため、これは主に 2.1 節で言及した把持点から離れた点の位置合わせ精度低下に起因すると思われる。

次に、Mode-F, NF に着目すると、提案手法によって力覚情報を交換することで位置と角度の操作誤差が減少していることが分かる。試行中の両手先の間隔の時間に対する変化を、Mode-F と Mode-NF について図 12 に示す。これは、ある被験者の典型的な試行であり、横軸は経過時間である。Mode-F では厳密な力覚伝達ではないため、仮想把持物体長の 60 cm 付近で若干の変動を示しつつも間隔はほぼ一定を保っており、

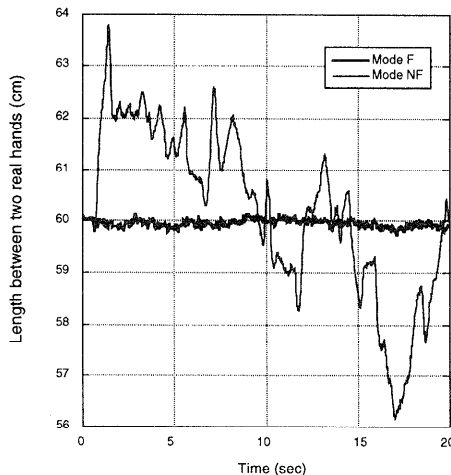


図 12 1名の両手操作時の両手間距離の時間変化  
Fig. 12 Length between two hands from one subject.

両手がつねに協調して連動している。一方 Mode-NF の結果では試行中に設定長の1割程度も変動し、両手の連動動作が崩れていることを示している。提案手法では両手先の間隔の変化に従って手先の移動量に対する把持物体の挙動応答の状態が変化する。結果的に、典型的 VR 環境を模している Mode-NF では両手先感覚の変動に対応できずに操作量が過剰あるいは不足し、操作誤差が増大する原因となったと考える。

Mode-A2 と N, NF との関係については、実物操作と同様の操作感覚を得られる Mode-A2 が誤差が少なくなると予測していたが、結果は最も精度が低下し Mode-NF と同程度となった。試行中の操作状態を調べるため、手先の平均操作速度に着目すると、表 1 に

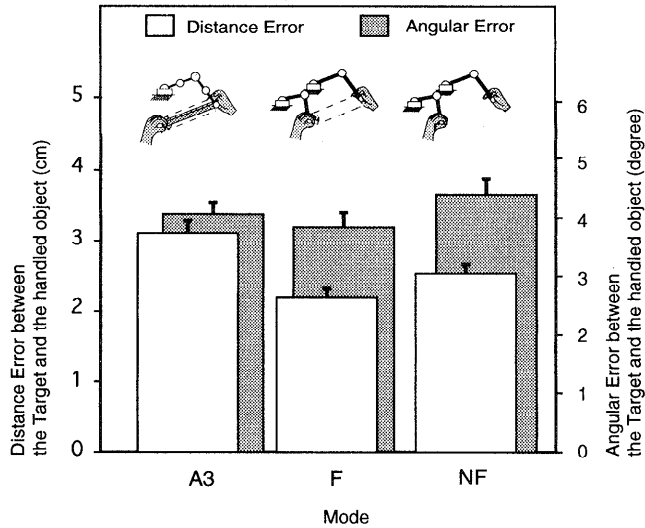


図 13 2名の協調操作時の位置と姿勢誤差

Fig. 13 Experimental results of two users' manipulation.

表 1 被験者の手先の平均速度

Table 1 Average velocity of subject's hands.

Mode	One subjects' two hands	Mode	Two subjects' two hands
A2	10.7	A3	12.2
F	6.3	F	6.0
NF	7.3	NF	6.9

(cm/s)

示すように Mode-A2 では Mode-F, NF の倍程度の速度で動いていた。このため、提案方式の有無よりも計測に用いた ADL と Force Display との機械的な特性の差が操作感覚に反映し手先の移動速度に影響したとも考えられ、これらの厳密な精度比較はできない。別の観点からは、これは手先への適度な操作インピーダンスの制御によって実空間以上の操作能力が期待できることを示している。これらのインピーダンスと操作性に関する考察は今後の課題とする。

### 6.2 2名による協調物体操作の結果

2名で把持物体を協調追従操作させた際の位置誤差と角度を、Mode-A3, F, NF ごとにまとめて図 13 に示す。棒グラフは全試行の平均値を、エラーバーは平均値の 95%信頼区間を示す。操作モードを要因とした分散分析により位置誤差で  $p(F < 40.4) < 0.001$ 、角度誤差で  $p(F < 7.9) < 0.001$  となり要因ごとの優位差が確認できた。各操作モードごとの平均値の  $t$  検定の結果からは、角度における ModeA3 と F 以外は、すべてに有意差が得られた。手先の平均速度についても前実験と同様に表 1 に示す。

表 1 の手先の移動速度データとともに結果は前項での 1 名の実験と同様の傾向を示した。これらによれば、1 名の両手操作実験と同様に、提案方式である Mode-F が従来方式に相当する Mode-NF よりも高い精度で操作できた。また、Mode-A3 の結果についても、前項と同様の理由により厳密な比較はできないが、目安として現実と同程度の作業性が確保できていることが分かる。

1 名による操作では、閉眼状態でも両手の連係動作にまったく問題ないことから推察できるように、両手の操作状況は主に自身の体性感覚から得て、両手の連動は自身に完結した処理で理想的に遂行できると推察できる。一方、2 名による協調作業では、対象と共同操作者の操作の状態を得るために、Mode-F では視覚と力覚情報を、Mode-NF では視覚情報を用いるしかない。この情報伝達量の差が、Mode-F と Mode-NF の操作状況の差に現れていると思われる。

6.1 節と比較した際、協調操作の方がより誤差が少ない結果となったのは、対象物体の長さ起因していると考えられる。この実験では、被験者は主に把持物体の両端の位置合わせに着目して行っていたが、対象物の長さのために同時に双方を注視することは難しく、1 名での操作の場合は操作が遅れる。協調操作の場合はそれぞれの被験者が担当する一端のみに注目して誤差量を修正するため遅れが少なく、結果的に高精度に操作を行えたと考えられる。

## 7. む す び

本論文では、1名あるいは複数人が複数操作腕によって物体を操作することの有効性に着目し、

- 仮想空間における両手操作導入の利点
- 機械的拘束の Force Display による擬似的提示手法の提案
- 提案手法の有効性評価実験

について、まとめた。

2章でも述べたように、VRの特徴である直接操作の概念を応用するにあたっては、両手あるいは協調する複数腕の有効性は期待できる。しかしながら、6章の実験結果が示すように、この利点を生かすためには適当な機械的拘束が必要であるが、従来のグローブ式操作入力装置による典型的VRシステムではこれを表現できない。

ここでは、“剛体の仮想的な力学的平衡”と“物体の重なり回避処理”の2方式を用い、仮想空間の特性を応用して視覚情報と体性感覚情報を適切に組み合わせ、低出力の Force Display をもって擬似的に剛な拘束感覚を提示する手法を提案した。

さらに、提案手法の有効性を示すために行った実験では、1名および2名を対象とした仮想物体操作環境を用い、従来の拘束状態を視覚情報だけで提示する手法に比べてより高精度に物体操作が実行できたことを確認した。ただし、現実の確実なフィードバックを模した実験結果との比較については装置の機械的な差異のためにここでは厳密に議論できなかったが、この結果から操作インピーダンスの差が操作性に何らかの影響を与えたと推察できる。これについては今後の課題とする。

本提案では力覚情報を交換することで、複数腕での仮想物体協調操作のための基本的手法について述べたが、この方式の応用例についてまとめる。

まず、把持対象の自由度を拡張することが考えられる。このアルゴリズムの設計は把持対象物体が完全に剛体であるとの仮定に基づいて行ったため、把持物体として人体の皮膚のような柔軟物体は表現できない。しかし、表示画像と提示力覚情報を適切に組み合わせることにより、本方式を拡張することは可能である。把持対象物体形状をバネモデルで記述し、物体の変形量を Force Display の反力提示が飽和しない限度で制約し、変形画像を修正表示する手法が期待できる。

さらに、対象を物体以外に拡張すれば、仮想空間の特徴である、本来は無形である概念空間を何らかの方法で人間の感覚に適応した具象化可能な点を生かし、

思考活動の結果をネットモデルにより表現して操作するシステムが提案できる<sup>30)</sup>。このそれぞれの参加者のある議論に対する具象化された思考のネットワークを、互いの力感覚を交換しながら文字どおり擦り合わせることで、新たな発想を喚起するような思考支援システムが検討できる。

また、インタフェースとしての拡張も考えられる。これまでは実空間に倣って1利用者につき両手2本であるとの前提で議論をしていたが、これを仮想空間内でさらに増やしたインタフェースも検討できる。日常の作業において、保持のために両手が塞がり何らかの外周支援が必要な状況が多く見られる。仮想世界で実空間指向の操作インタフェースを導入すれば、同様の要求が発生するであろう。そこで、自分の制御下にある副手先アイコンの手法が提案できる。もちろん人間の注意機構では2本以上の手先アイコンの同時使用は難しいため、副手先アイコンの制御はエージェントやスクリプト機構を利用して、あらかじめ機能と動作を設定すべきであるが、適当な注意喚起機構と視線や音声などによるスイッチ機能を用いて、状況に応じて直接操作下の主手先アイコンをそれらの副手先アイコンと直ちに切り替える手法が提案できる。もちろん、これらを複数利用者で共有し、手先管理権を交換することも可能であろう。

仮想空間における活動が創造を目的とする限り、思考活動の結果を表現する手先による対象操作機能は有効な手法である。となれば、ここで提案してきたような複数腕を対象とした操作の支援および拡張手段は必然となるインタフェースである。今後、本論文では言及しきれなかった操作の主観的感覚評価面での検討と前述の応用面への拡張を進めていく。

## 参 考 文 献

- 1) 吉田美寸夫, Yuri Tijerino, 宮里 勉, 岸野文郎: 手振りと言語による仮想物体形状生成インタフェース, TV 学会誌, Vol.50, No.10, pp.1482-1488 (1996).
- 2) 和田 敦, 田中和明, 鄭 降宇, 安部憲広: 仮想空間における機械部品の組み立て可能性と機構の可視化・検証システム, 信学技報, MVE 95-57, pp.19-26 (1996).
- 3) 武田捷一, 丸山 稔, 亀井克之: 物理法則に基づく剛体のシミュレーション手法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J79-DII, No.5, pp.860-869 (1996).
- 4) Kijima, R. and Hirose, M.: Representative Spherical Plane Method and Composition of Object Manipulation Methods, *Proc.*

- VRAIS'96, pp.195-202 (1996).
- 5) 竹村治雄, 清川 清, 岩佐英彦, 横矢直和: 仮想環境没入型モデル VLEGO の拡張したデザイン環境の試作, 信学技報, MVE96-66, pp.39-44 (1997).
  - 6) 宇津宮孝一, 西野浩明, 善岡賢二, 倉岡大輔: 仮想環境における両手電子グローブインタフェース, 信学技報, MVE96-51, pp.41-46 (1996).
  - 7) 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における両手による物体操作に関する研究, 信学技報, MVE96-71, pp.21-28 (1997).
  - 8) Zeleznik, P.C., Andrew, S.F. and Strauss, P.S.: Two Pointer Input For 3D Interaction, *Proc. Interactive 3D Graphics* (1997).
  - 9) Mlyniec, P.: The Virtual Lego Village, *Visual Proc. of SIGGRAPH '96*, p.88 (1996).
  - 10) Buxton, W. and Mayers, B.A.: A Study of Two-Handed Input, *Proc. CHI'86*, pp.321-326 (1986).
  - 11) 井戸正敏: 同時動作時間におけるオクレ補償の研究, 法政大学工学部研究集報, pp. 235-246 (1986).
  - 12) Wiesendanger, M., Kaluzny, P., Kazennikov, O., Palmeri, A. and Perrig, S.: Temporal coordination in bimanual actions, *Proc. Center de recherche en sciences neurologiques (Sensorimotor Control of the Hand)*, pp.591-594 (1993).
  - 13) Noma, H., Kitamura, Y., Miyasato, T. and Kishino, F.: Multi-Point Virtual Space Teleconferencing System, *IEICE Trans. Com.*, Vol.E78-B, pp.970-979 (1995).
  - 14) 鈴木 元: サイバースペース, 信学技報, IE94-110, pp.1-6 (1995).
  - 15) Barrus, J., Waters, R. and Anderson, D.: Locales and Beacons: Efficient and precise support for large multi-user virtual environment, *Proc. VRAIS '96*, pp.204-213 (1996).
  - 16) Carlsson, C. and Hagsand, O.: DIVE - A Platform for Multi-User Virtual Environments, *Computer & Graphics*, Vol.17, No.66, pp.663-669 (1993).
  - 17) Singh, G., Serra, L., Png, W. and Ng, H.: BrickNet: A Software Toolkit for Network-Based Virtual Worlds, *Presence*, Vol.3, No.1, pp.19-34 (1994).
  - 18) 矢野博明, 岩田洋夫: フォースディスプレイを用いた分散環境における協調作業, 第11回ヒューマンインタフェースシンポジウム, Vol.11, pp.389-394 (1995).
  - 19) 石井雅博, 猿渡基裕, 佐藤 誠: 両手同時作業のための仮想作業空間の構成について, 信学技報, HC93-84, pp.31-36 (1994).
  - 20) Massie, T. and Salisbury, K.: Probing Virtual Objects with the PHANToM Haptic Interface, *ASME DSC*, Vol.55, pp.539-546 (1994).
  - 21) Brooks, F.P., Ouh-Young, M., Batter, J. and Kilpatrick, P.J.: Project GROPE-Haptic displays for scientific visualization, *Proc. SIGGRAPH 90*, pp.177-185 (1990).
  - 22) 吉川恒夫, 上田 仁: 摩擦表面を有する仮想物体の3次元動的操作感提示, 第10回ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.187-192 (1994).
  - 23) Thompson, T., Johnson, D.E. and Cohen, F.: Direct Haptic Rendering of Sculptured Models, *Proc. Symposium on Interactive 3D Graphics* (1997).
  - 24) Howe, R.D. and Kontarinis, D.: Task Performance with a Dextrous Teleoperated Hand System, *Proc. SPIE Telemanipulator Technology '92*, Vol.1833 (1992).
  - 25) Hogan, N., Kay, B.A., Fasse, E.D. and Mussa-Ivaldi, F.A.: Haptic Illusions: Experiments on Human Manipulation and Perception of "Virtual Objects", *Proc. Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, Vol.IV (1990).
  - 26) Srinivasan, M.A., Beauregard, G.L. and Brock, D.L.: The impact of visual information on the haptic presentation of stiffness in virtual environments, *ASME DSC*, Vol.58, pp.555-559 (1996).
  - 27) Noma, H., Kitamura, Y., Miyasato, T. and Kishino, F.: Haptic and visual feedback for manipulation aid in a virtual environment, *ASME DSC*, Vol.58, pp.469-476 (1996).
  - 28) 野間春生, 宮里 勉, 岸野文郎: VR研究における力覚提示装置の分類と TOCUS を利用した試作装置の提案, ATR Technical Report TR-C-0140 (1996).
  - 29) 宮里 勉, 野間春生: 大画面表示による仮想空間構築と共存共有臨場感の実現の研究, 信学技報, MVE96-76, pp.61-66 (1996).
  - 30) 野間春生, 角 康之, 宮里 勉, 間瀬健二: Haptic Interface による思考支援システム, 第13回ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.11-16 (1997).

(平成 9 年 6 月 30 日受付)

(平成 10 年 1 月 16 日採録)

**野間 春生**

平成元年、筑波大学第3学群基礎工学類卒業、平成6年、筑波大学博士課程工学研究科修了。同年(株)ATR通信システム研究所入所、知能処理研究室において、人工現実感、臨場感通信、力覚インタフェース等の研究に従事。現在(株)ATR知能映像通信研究所研究員。多感覚へのVR技術の応用が主な研究テーマ。工学博士(筑波大学)、日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、日本ロボット学会各会員

**宮里 勉 (正会員)**

昭和51年電気通信大学電子工学科卒業。昭和53年東京工業大学大学院修士(電子システム)課程修了。同年、国際電信電話(株)(KDD)入社。研究所を経て平成5年より、ATRに出向。現在(株)ATR知能映像通信研究所第五研究室長。工学博士(東工大)。仮想環境を応用したコミュニケーション環境の生成とヒューマンインタフェースが主な研究テーマ。電子情報通信学会、映像情報メディア学会各会員。

**中津 良平 (正会員)**

昭和44年京都大学工学部電子工学科卒業、昭和46年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社(現NTT)武蔵野電気通信研究所入所。昭和55年横須賀電気通信研究所。主として音声認識の基礎研究、応用研究に従事。平成2年NTT基礎研究所研究企画部長、平成3年NTT基礎研究所情報科学研究部長。平成6年よりATRに移り、現在(株)ATR知能映像通信研究所代表取締役社長。マルチメディア要素技術の研究およびマルチメディア技術を応用した通信方式の研究等に従事。工博(京大)。昭53年度学術奨励賞。平成8年IMS'96最優秀論文賞。IEEE、電子情報通信学会、日本音響学会、人工知能学会、情報考古学会、日本バーチャルリアリティ学会各会員。