

3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法

舟橋 健司[†] 安田 孝美^{††} 横井 茂樹^{††} 鳥脇純一郎[†]

A Model for Manipulation of Objects with Virtual Hand in 3-D Virtual Space

Kenji FUNAHASHI[†], Takami YASUDA^{††}, Shigeki YOKOI^{††}, and Jun-ichiro TORIWAKI[†]

あらまし 本論文では、計算機により仮想空間内に定義された物体を手によって操作する際の物体と手との相互作用、およびその物体の挙動の一モデルを提案し、一般的な仮想手による複数の物体（剛体）の対話操作システムについて述べる。本システムの機能により、操作者は仮想物体を実世界に近い感覚で把持、移動、投げるなどの操作を行うことができる。仮想物体の挙動を忠実に表現するためには、厳密な物理法則を導入する必要があるが、現在の一般的なグラフィックワークステーションの計算処理能力ではリアルタイム性を保持したまま正確な物理計算を行うことは困難である。このため、従来では手のジェスチャにより物体操作を判断するなどして実際の挙動とは程遠い操作が実現されていた。本研究では各指と物体との相互把持判定を含むより自然な新しい物体操作のためのモデルを考案した。本モデルでは、手による物体操作の基本である物体を把持、移動、離すといった動作が考慮されている。更に、簡略化した重力、慣性も導入されているため、仮想物体は対話操作可能な計算コストで、自然な挙動を示すことが可能である。

キーワード 仮想物体操作、仮想手、実時間処理、把持判定、幾何学的モデル

1. ま え が き

近年の技術進歩により、コンピュータ上にデータとして定義された仮想空間がCGにより可視化され、VR技術により実空間のように体験することが可能になってきている。このような仮想空間は人間にとって利用可能な新しい空間として今後の技術開発に期待が高まっている。仮想空間は今後さまざまな用途が広がると思われるが、そのためには人間にとって実空間と同じように利用することが望まれる。仮想物体を操作するには、キーボードやマウスなどにより操作することも可能である。しかし、人間が実世界で物体を操作する場合は手を使って操作することが多いため、実空間での物体の操作と同じような操作で仮想空間中の物体操作ができることが望まれる。例えば、医学での手術シミュレーションについて見れば、手術自体の設計や可能性評価であれば、手術プロセスと同じような動作により手術のシミュレーションをする必要がない。しかし、手術自体の事前の訓練を考えると実際の術技

が模擬できることが望まれる。このようなことは、産業分野での設計や訓練、教育などの用途でも同様である。

このような状況の中で、操作者の手に対応して動く、仮想空間内に定義された手（仮想手）による物体の直接操作に関する研究が行われている[1]～[8]。これらは、例えば手と物体との干渉判定に関しては2本の指先のみの判定に限定する、あるいは、把持の判定方法において親指が必ず物体と干渉している必要がある、など実際の手の操作の特徴をとらえてはいるが、極めて限定された操作方法である。例えば文献[2]、[3]では、細部に注目した干渉判定により把持への過程や把持している状態のリアルな映像生成が行われているが、ある状態で物体を把持しているか否かの判定は、親指を含む2本以上の指が干渉していれば把持で、それ以外は非把持、というように非常に単純化している。

また、手と物体の干渉問題の研究の一つに、計算機によりロボットを制御する研究もあるが[9]、これは計算機により実世界のロボットハンドを駆動するというように、操作の方向が逆である。

ところで、対話操作を行わないシミュレーション、あるいはマウスなどによる仮想物体の対話操作に関す

[†] 名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻, 名古屋市
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603
Japan

^{††} 名古屋大学情報文化学部, 名古屋市
School of Informatics and Sciences, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8601
Japan

る研究も多数行われている[10]～[14]。しかしこれらは、1点により物体の操作を行うなどの実現方法であるため、両側から固定するといった手の動作の代表である「把持」への直接的な応用は困難である。

本論文では、力覚フィードバックのない環境において、センサを取り付けたグローブを入力装置として仮想の手をコントロールし、仮想空間中の物体を実空間と同じような動作により操作するためのソフトウェアについて述べる。本研究では、仮想手の動作をより細かく制御できる、指の動作まで含めた仮想物体の操作モデルを開発することにより、実物体操作に近い動作により仮想物体操作を行うためのモデル化とソフトウェアの開発を行った[15]、[16]。ここで、仮想手による物体操作の実現に物理法則による方程式を用いると、方程式を解くという問題だけではなく、状況により刻一刻と変化する方程式自体の生成が必要となる。また、有限要素法などを利用した場合、連立方程式の解を求めることが必要となるため連続的な動作の計算に多大な時間がかかり、動作のリアルタイム性が損なわれてしまう。そこで、仮想手の記述や、手と物体の干渉状態、物体の運動などについて、幾何学的な構造に注目して単純化したモデルを導入することにより実際にソフトウェアとして実現可能な仮想手による物体操作のシステムを開発した。ここでは人間がデスクトップで何らかの作業を行うことを想定して、デスクトップに複数のブロックを置いた仮想環境において仮想手により、物体を移動したり投げたりといった操作を自由に適用できるシステムを目標としている。そのため、仮想物体と仮想手の相互作用のみではなく、操作後の仮想物体の動きや、床への物体の衝突なども考慮したシステムになっている。

2. 物体操作システムの基本方針

本章では、複数のブロックが置かれたデスクトップ環境において、手で物体を自由に移動できるように解決すべき問題点について整理し、基本方針を明らかにする。

まず、対話操作が可能でなければならない。動画像に関する画質に関しては、一般的に24 frame/sというようにさまざまな研究があるが[17]、例えば文献[14]でも述べられているように、仮想空間における対話操作の実現には少なくとも12 frame/s程度の描画更新が必要である。そこで本研究では、12 frame/sをリアルタイム処理の指標とし、目標の一つとする。

次に、手で物体を操作するためには、仮想空間内に存在する手と物体を定義する必要がある。これについては3.1で詳しく述べるが、手と物体は点でのみ干渉するものとする。この場合、さまざまな物体操作は

- (1) 1点により押す
- (2) 複数点により把持する
- (3) 複数点により押す

に分類できる。しかし、実際には操作(1)、(2)を行うことが多く、また、操作(3)はそれぞれの接触点の位置関係により非常に複雑な挙動を生じる。そこで、3.2において、操作(1)、(2)を中心とした相互作用モデルの導出を行う。

また、操作対象となる物体が複数ある場合には、各時点においては操作されていない物体も存在するため、仮想空間中の重力や物体同士の干渉などを考慮する必要がある。実際の状況を考察した場合、物体同士の干渉は、把持した物体による他の物体の間接操作や、物体の積み重ねなどにみられるように重要であるが、複雑な問題であり、その処理に多くの計算時間も必要である。本研究では、手による物体の直接操作（その後離す）の実現を目的としているため、物体同士の相互作用は大幅に簡略化して扱う(4)。

3. 手による物体操作

3.1 仮想空間における手と物体

仮想手と物体との干渉判定を行うために、各指の先端および関節に、具体的にこれらの点において干渉が起こっているか否かを調べる「判定点」を設定する(図1)。更に、隣り合う判定点を結ぶ線分を母線と

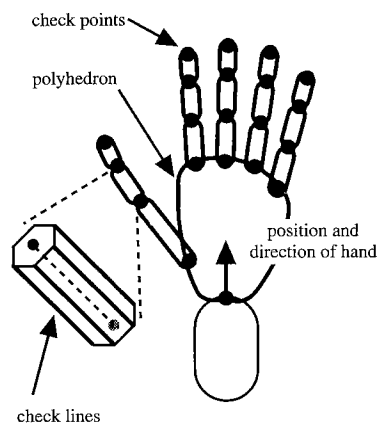


図1 仮想手のモデル
Fig. 1 Model of virtual hand.

する多角柱の、母線に平行なろう線すべて（以下では、これらを「判定線分」と総称する）と物体との干渉も検出することにより、「指の表面」の部分においても物体操作を可能とする。また、各指を上述の多角柱により、手のひらを多面体により表示する。実際の操作において、手のひらによる物体との接触は少ないため、手のひらにおける物体との干渉は考慮していない。しかし、必要な場合には手のひらの部分に判定点と判定線分を設定することは可能である。

また以下では、手首に基準点を設定し、これを空間内の仮想手の位置とし、この点におけるベクトルの方向およびそれを軸とする回転を手の方向、そして位置および方向の変化を手の動きとする。

操作対象である仮想物体に関しても、柔らかい物体の場合に両側から押し合うと、変形と把持が互に関係した複雑な問題になると考えられるため、多面体によって表現される剛体に限定する。また、可動部分をもたず、固定されていないものとする。物体を構成する各面、りょう線はそれぞれ、仮想手の個々の判定点、判定線分と干渉し得る。

3.2 手と物体の相互作用モデル

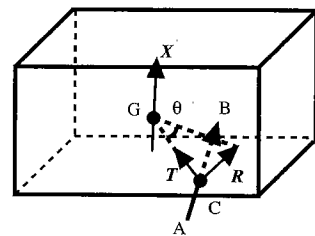
本節では、片手と、一つの物体との相互作用モデルについて述べる。図2に物体の操作状況を判定するための一連の処理概要を示す。前節で述べたように、手と物体の干渉を点のみに限定するとその状況は、非接触、1点による接触、複数点による接触に分けて考えることができる。更に複数点接触の場合には、把持、非把持の状況が考えられる。そこで、外接球などによる干渉の概略判定の後、(A)物体の各面と各指の判定点との衝突点の検出、および、(B)物体の各りょう線と各指の判定線分との衝突点の検出の両方を独立に実行する。次に、物体の挙動を(A)と(B)で検出された衝突点

の数およびその位置に従い決定する。もし手と干渉していないならば、物体は4.1で述べるように、重力、慣性に従った運動を行う。このとき、直前まで手と干渉していた（例えば、把持されていた）ならば、操作されていた物体が離されたことになる。

(1) 1点で接触の場合 仮想手が1点のみで物体と干渉している場合、その物体は手により押されている。例えば図3に示すように、指の先端に位置する判定点が、点Aから点Bへ移動したとする。ここで、衝突点および物体の重心をそれぞれ点C、点Gとする。すなわち、物体表面上の点Cは点Bへ移動する。ところで、3次元物体の移動は一般に平行移動と回転移動の2成分に分けて考えることができる。ここで物体を質量が重心に集中している質点と考え、物体は干渉点から重心方向へ平行移動すると考える。また回転に関しては、物体の一部が固定されているなど他の拘束条件がない場合、物体の重心を回転の中心とする。そこでまず、物体表面上の点Cの移動ベクトル \vec{CB} を、次式に従いベクトル T とベクトル R に分ける。

$$\vec{CB} = T + R, \quad \vec{CG} \parallel T, \quad T \perp R. \quad (1)$$

次に物体をベクトル T だけ平行移動する。また、ベクトル R による点Cの移動を、重心Gを中心、ベクトル X を軸とし角度 θ 回転することにより近似表現する。但し、



AB: Locus of collision point C

T: Element of translation

θ : Rotation angle decided by R

X: Rotation axis through the center of gravity G

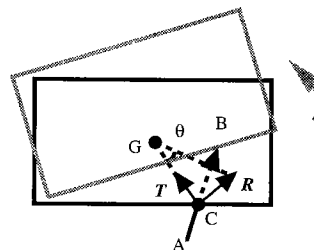


図3 1点による押す操作

Fig. 3 Pushing an object on a point.

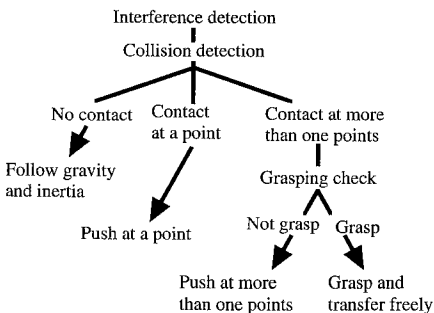


図2 手と物体の相互作用モデル

Fig. 2 Interaction model.

ベクトル X ，角度 θ は次式による．

$$\theta = \arctan \frac{\|\mathbf{R}\|}{\|\overrightarrow{\mathbf{CG}}\|}, \quad \mathbf{X} = \mathbf{R} \times \mathbf{T}. \quad (2)$$

$\overrightarrow{\mathbf{CB}} \parallel \overrightarrow{\mathbf{CG}}$ のときには， $\mathbf{T} = \overrightarrow{\mathbf{CB}}$ ， $\mathbf{R} = \mathbf{0}$ となり，平行移動のみ，また， $\overrightarrow{\mathbf{CB}} \perp \overrightarrow{\mathbf{CG}}$ のときには， $\mathbf{T} = \mathbf{0}$ ， $\mathbf{R} = \overrightarrow{\mathbf{CB}}$ となり， $\mathbf{X} = \mathbf{R} \times \overrightarrow{\mathbf{CG}}$ を軸とした回転のみとなる．

(2) 2点以上で接触，把持の場合 仮想手が2点以上で物体と触れていたならば，仮想手が物体を把持しているか，把持せずに押しているかを判定する必要がある．この場合も摩擦等の力の関係によらず，物体と手の位置により判定する．実世界における点接触，例えば針などの先端により把持することは，接触する位置，摩擦，力の方向などにより滑る，回転するなどの状況が起こり得る．ところで，実際の手により把持を行う場合は，厳密には面による接触であり，手の摩擦係数に大きな違いはない．また，故意に物体が回転するような接触により把持を行うことは少ないため，2点により把持が行えるか否かを物体の接触する面の向きにより判断できる．

そこで，物体のそれぞれの接触面，りょう線の法線のうちいずれか二つのなす角が決められたしきい値以上ならば，仮想手は物体を把持しているとする．すべての組合せの法線のなす角がしきい値を超えない場合，仮想手は複数点により物体を押していることになる．但し，物体の重心からりょう線へ下ろした垂線をその擬似法線とし，単に法線という場合は面の法線お

よびりょう線の法線を指すものとする（図4）．例えば図4のように3点で干渉している場合，三つの法線 N_1, N_2, N_3 により決まる $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ のうち一つでもしきい値以上ならば，物体は把持されているとする．更に，指が物体の中に入り込んでいる場合，接触点を物体表面に移動させるようにその指の各関節の角度を補正する[16]．また，各時点で把持と判定されることが，把持の継続となる．

ここで用いた把持判定しきい値は90度とした．これは，物体表面の状態にもよるが立方体の隣り合う二つの面により把持が可能であり，実際に小さな物体をこのように把持することがあるためである．また，この値を変化させることにより，物体の質量，指との間の摩擦の違い等による把持の容易さの変更が可能である．

物体が仮想手によって把持されている場合，その物体は手との相対位置が変化しないと考え，手の動きに追従し移動するものとする．

(3) 2点以上で接触，非把持の場合 上述の判定により物体が把持されていないならば，仮想手の複数箇所により押されている．しかし，実世界でのこの物体の挙動は，それぞれの接触点（独立に動く各指）の位置関係により非常に複雑であり，これを力学的に解くことは，点接触のみの物体同士の干渉問題と同等であり現実的ではない（4.3参照）．そこで複数箇所により押されている仮想物体の挙動は，手の動きに対応した平行移動のみに限定した．机上において物体を移動する場合，指先による細かな操作よりも主に物体を把持するため，これは現実的な簡略化である．

4. 仮想環境

4.1 重力，慣性および摩擦

仮想物体操作を実現するには操作の対象となっていない物体，すなわち仮想手と接触していない物体についてもその挙動を考える必要がある．更に，それらの物体が常に操作対象になり得るような計算方法でなければならない．本モデルでは，重力，慣性を簡略化した形で導入している．具体的には，手または他の物体との干渉が検出されなかった物体の時刻 t における重心の位置 $\mathbf{P}(t)$ は，時刻 $t-\Delta t$ の位置 $\mathbf{P}(t-\Delta t)$ に変化分 $\mathbf{P}(t-\Delta t) - \mathbf{P}(t-2\Delta t)$ と重力による加速として $g\Delta t^2$ を加えるものとし

$$\mathbf{P}(t) = 2\mathbf{P}(t-\Delta t) - \mathbf{P}(t-2\Delta t) + g\Delta t^2 \quad (3)$$

により決定する．ここで， g は下向きの重力加速度ベクトルであり，描画更新間隔 Δt は描画更新レート F (frame/

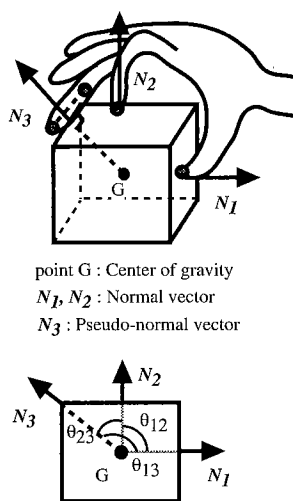


図4 擬似法線および把持判定

Fig. 4 Pseudo-normal vector and grasping check.

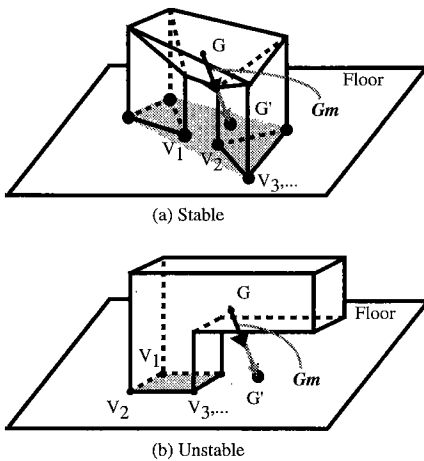
s)の逆数である。すなわち、物体を投げた場合などは、 $(\mathbf{P}(t-\Delta t) - \mathbf{P}(t-2\Delta t)) / \Delta t$ が初速度となる。回転に関しても、重心を中心とする相対的な回転を継続する。また、床など他の物体と干渉した後は慣性は保存せず、物体は跳ね返らないものとする。更に摩擦に関しても、力学的な計算は行わず、物体は滑らないものとする。このような仮定を設けることにより、仮想手の影響下でない動いている物体に対しても操作が可能となり、また、把持した物体を投げる操作が実現できる。

4.2 落下物体と床との干渉

本節では、落下中および床との衝突後の物体の挙動について述べる。物体は床との干渉が検出されるまでは、上述した重力、慣性に従い移動する。落下した物体が時間 Δt の間に床面に入り込んでしまった場合、物体の最も深く床に入り込んでいる頂点が床面上にくるように、上方向へ平行移動することにより補正する。具体的手順は以下のようなものである。まず物体の頂点（接点）で床面上にあるものを V_i ($i=1, \dots$, 接点数) とすると、接点 V_i により定まる多角形の凸包が求まる（図5）。ここで物体の重心 G の移動ベクトル \mathbf{Gm} 方向への、 G の床面上の射影点 G' を求める。すなわち、

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{P}(t-\Delta t) - \mathbf{P}(t-2\Delta t), \quad (4)$$

$$\mathbf{Gm} \parallel \overrightarrow{GG'}. \quad (5)$$



V_1, V_2, \dots, V_i : Vertices of an object on the floor
point G' : Projected point of the center of gravity G
in the direction of moving vector \mathbf{Gm}



: Convex-hull area decided by V_1, V_2, \dots, V_i

図5 床面における物体の安定判定
Fig. 5 Stability check of an object on the floor.

重心 G が接点 V_i によって決まる凸包の内側へ射影されるならば (G がこの凸包内にあれば), この物体は床面上で安定しており, それ以上動かないものとする (図5(a)). 射影点 G' が, 凸包の外側に位置するならば, この物体は安定していないと判定する (図5(b)). この場合, 物体は安定と判定されるまで床面との関係に対応して定まる挙動を示す. 図6に示すように, ここでは床面との接点数により以下に示す三つの状態を考える[15].

(1) 1点 V_1 による接触 (図6(1)) 点 V_1 を点 C とする (図6(1)). 指先など1点による押す操作と同様に, ベクトル \mathbf{Gm} を次式に従い滑り, 跳ね返りの成分となるベクトル \mathbf{T} と, 回転成分であるベクトル \mathbf{R} に分ける.

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{T} + \mathbf{R}, \quad \overrightarrow{CG} \parallel \mathbf{T}, \quad \mathbf{T} \perp \mathbf{R}. \quad (6)$$

但し, ベクトル \mathbf{T} による移動は行わず, 接触点は移動しないものとする. また, 物体は重力により重心のみに力を及ぼされていると考えている. ここで物体を, 点 C を中心, ベクトル \mathbf{X} を軸とし, 角度 θ だけ回転移動する. $\mathbf{Gm} \parallel \overrightarrow{CG}$ のときは, バランスのとれた状態であり移動は行わない. 但し, ベクトル \mathbf{X} , 角度 θ は次式による.

$$\theta = \arctan \frac{\|\mathbf{R}\|}{\|\overrightarrow{CG}\|}, \quad \mathbf{X} = \mathbf{R} \times \mathbf{T}. \quad (7)$$

(2) 2点 V_1 と V_2 による接触 (図6(2)-a, b) 点 V_1 および V_2 を通り, 直線 $\overline{V_1V_2}$ に垂直な直線をそれぞれ床面

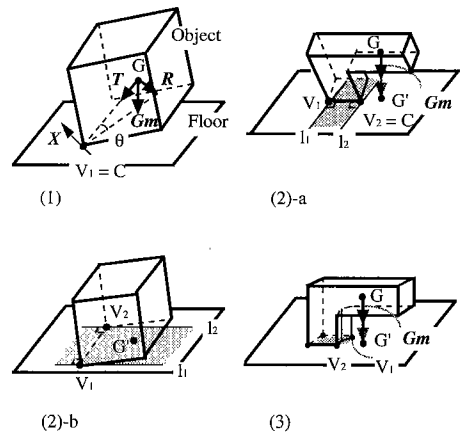


図6 床面における物体の挙動
Fig. 6 Motion of an object on the floor.

上に求める．重心Gのベクトル Gm 方向への射影点 G' が、この2本の直線の間に位置しないならば（図6(2)-a）、点 V_1 、 V_2 のうち射影点 G' に近い点を点Cと定める．この物体の挙動は上述の(1)により表現する．射影点 G' が2本の直線間に位置するならば（図6(2)-b）、物体の床面と接触している2点が移動しない、すなわちこの2点を結ぶ直線を軸に回転すると考える．この場合も(1)と類似の方法で、直線 $\overline{V_1V_2}$ を軸として物体を回転する．

(3) 3点以上の V_i による接触（図6(3)）射影点 G' が接点 V_i によって決定される凸包に含まれない、すなわち物体が不安定な場合、すべての接点が移動しないのではなく、2点若しくは1点を残し、他は床から離れる方向へ移動するものとする．そこで凸包の頂点のうち、最も点 G' に近い二つの点を点 V_1 、 V_2 とすることで物体の挙動は上述した(2)により求められる．

4.3 物体同士の干渉

物体同士の干渉は、把持した物体による他の物体の間接操作や、物体の配置作業を実現するためには考慮すべき問題である．しかし文献[12]でも述べられているように、互いに干渉し合っている剛体の力学的な解法はNP完全になる場合がある．そこで、多くの物体同士が衝突した場合にも、物体と手や床との干渉時と同様な方法で、それぞれの物体を逐次移動していくことが考えられる．しかしその結果、直接操作していなかった物体が手と干渉した場合に、操作者の手を拘束することなく仮想空間内の矛盾を解消することは容易ではない．

ところで、本研究は仮想手による物体操作を実空間と同じような動作により実現することを目的としている．そこで、現時点では物体同士の干渉に対して以下の簡略化を行う．仮想手が物体に触れて動かした結果、その物体に他の物体が干渉するならば、それらはすべて同様に平行移動のみとする．また、複雑に積まれた多数の物体の安定状態の計算は実時間処理の範囲では困難であり、把持操作の感覚を低下させる要素となる．そのため、互いに干渉している物体がともに手と干渉していないならば、それらの物体をその場で静止させることにしている．

5. 実験例

5.1 実験システムの構成

上述したモデルを用いることにより、仮想手による物体操作システムを、グラフィックワークステーション

（SGI Onyx RE2, R8000）上で、C言語により実現した．本システムは図7(a)に示すような構成となっている．操作者の各指の関節の角度、手首の角度等はグローブタイプの入力装置（同図中央、手に装着）により入力される．これは18センサを有し、それぞれ8 bit (0～255)の値を得ることが可能であり、0.5 degree/valueに設定している．手の位置および方向は低周波の磁界を利用したモーションセンサ（同、手首に装着）により入力される．これは、位置、角度データに関してそれぞれ、静的精度: 0.08 cm, 0.15°, 分解能: 0.0005 cm, 0.025°の測定値を与える．また、液晶シャッタを利用したステレオグラス（同図右、頭部に装着）およびHMDによる立体視も可能となっている．

5.2 実験結果

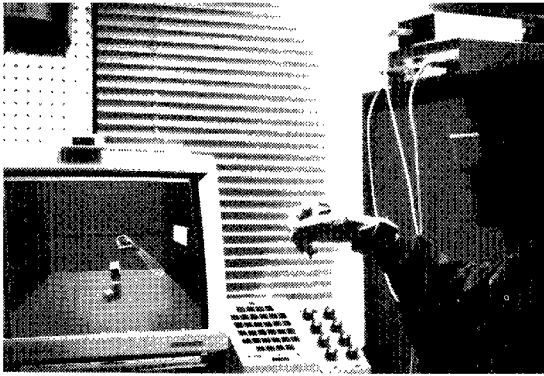
[実験1] 本システムによる実験の一つとして、3名の被験者a～cに対して、練習として5分程度の仮想物体操作を行った後、次の操作を行った．

- (1) 自由な仮想物体操作
- (2) 親指を使わない把持
- (3) 指先によって弾く操作
- (4) 把持した物体を投げる操作
- (5) 物体を積み上げる操作

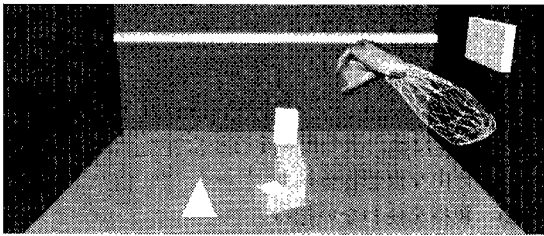
操作例を図7に示す．図7(a)は、実際に仮想空間内の物体を操作している様子を示している．図7(b)は計算機内で構築した仮想空間のCG映像である．また図8に示すように、任意の多面体形状の仮想物体を仮想手の任意の部分により操作することが可能である．この様子から、従来のようなジェスチャによらず、5本の指と物体との相互作用を考慮することにより、実世界における物体操作と類似な物体把持が実現できたことがわかる．図9は、人差し指で四角すいをはじいた様子である．また図10からは、投げられた物体が放物運動の後、床の上で静止したことがわかる．図11は物体を積み上げた様子であるが、L字型の物体により立方体形状の物体を床下へ押し進める（4.3）と、立方体形状物体に対する床への入り込み補正処理（4.2）により、右側の図のように物体同士が互いに入り込む、と

表1 各操作に対する評価
Table 1 Evaluation for each manipulation.

manipulation	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
a	◎	◎	○	◎	○
b	○	◎	○	◎	△
c	◎	△	◎	○	○



(a) System and example of manipulation



(b) CG image of virtual space

図7 仮想物体操作システムの構成と実験例

Fig. 7 System configuration and examples of manipulating objects with a virtual hand.

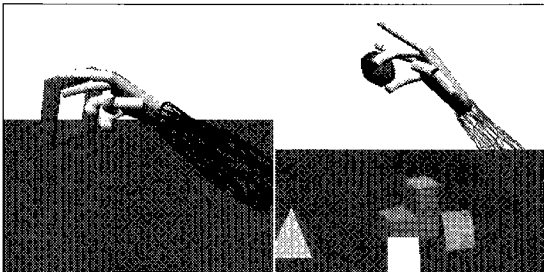


図8 仮想手による任意多面体形状の物体操作

Fig. 8 Manipulation of objects (arbitrary shape of polyhedrons) with virtual hand.

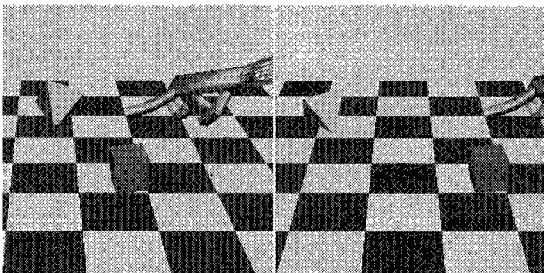


図9 指先による物体を弾く操作

Fig. 9 Flipping an object with a finger of virtual hand.

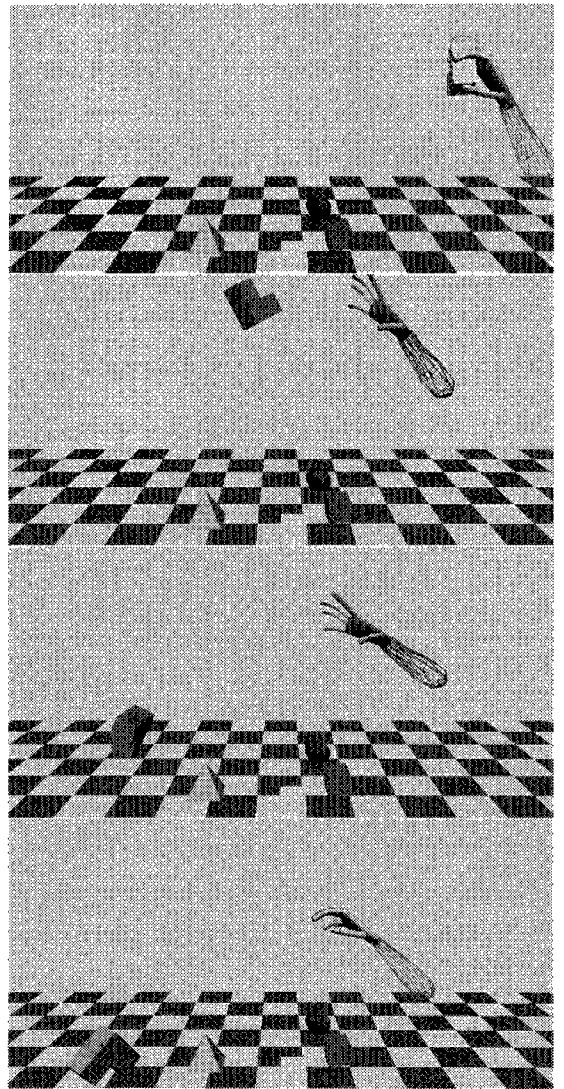


図10 仮想手による物体を投げる操作

Fig. 10 Throwing an object with a virtual hand.

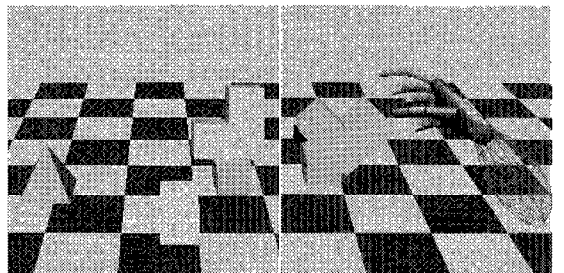


図11 物体を他の物体の上に積む操作

Fig. 11 Putting an object on another object with a virtual hand.

いう問題がある。

それぞれの被験者による各操作に対する評価（◎：操作性が良い，自然である，○：普通，△：あまり良くない）を表1に示す。

一般に，被験者から次のような評価を受けた。

・仮想物体の操作が，実物体操作と同じような方法で行える。

・投げた物体の挙動，床の上で転がる物体の挙動が自然である。

一方，次のような問題点が指摘された。

・手と物体との接触は物体が動くことから初めてわかるため，素早い操作ができない。

・物体同士が干渉したときの挙動が不自然であり，また積み上げるという操作に関しては実世界とは大きく異なる。

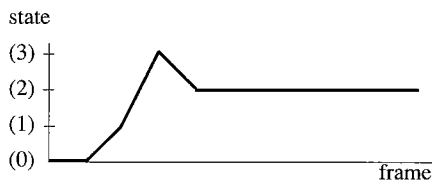
また，表1において操作(5)の△は，前述した物体同士の相互作用の問題に関係する。操作(3)の評価がやや低いのは，3次元的な位置把握の問題である，すなわち，把持する場合にはゆっくり指を近づければよいが，弾く場合には指を素早く動かす必要があり，接触する瞬間がわかりにくいためであると考えられる。操作(2)に関しては被験者cから「指先が器用に動かない」との感想があった。

更に，操作(1)において被験者は主に物体を把持して

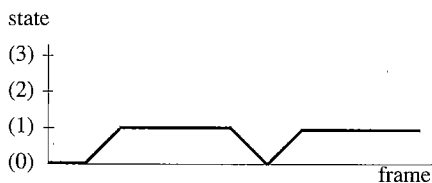
いた。このとき，把持に至る直前の1～2 frameに1点，あるいは複数点により押している状況が存在する場合があった。また，被験者が物体を意図的に押す場合は，主に人さし指の先端1点で押していた。それぞれの，ある操作における接触状況の推移を図12に示す。他の操作の場合も，おおむね同様の結果が得られた。これらのことから，3.2(3)で述べたように複数点で物体を押す状況の重要性は低いと判断できる。

これらのように，本研究で提案したモデルによる，仮想手による物体操作システムでは，仮想空間内のデスクトップにおかれた複数のブロックを，仮想手により移動したり積み上げたり投げたりするという自由な操作が行える。また，仮想手と仮想物体の相互作用のみではなく，仮想物体の操作後の動きや，床への物体の衝突なども考慮したことにより，投げられた物体の（手から離れた後の）挙動も表現できる。しかし，物体同士が干渉した場合，不自然に静止してしまう，互いに入り込んでしまう，という物体同士の干渉に関する問題が残されている。

[実験2] 上記実験は実験室内のものであり，より多様な被験者による実験が必要である。そこで，1997年8月に名古屋で3日間にわたり行われた「ザ・新世界博」（国際人工知能合同会議エキシビジョン）でのデモ展示において，データを採取した。記録は，筆者らの観察，および体験者との会話による。デモはSGI Indigo2 HighIMPACT, R10000により，仮想空間内の2 m前方にある半径15 cmの標的にブロックを当てる，というゲー



(a) Grasping manipulation



(b) Pushing manipulation

state: (0): no contact
(1): push at one point
(2): grasp (with more than one points)
(3): push at more than one points

図12 接触状態の推移
Fig. 12 The change of contact state.

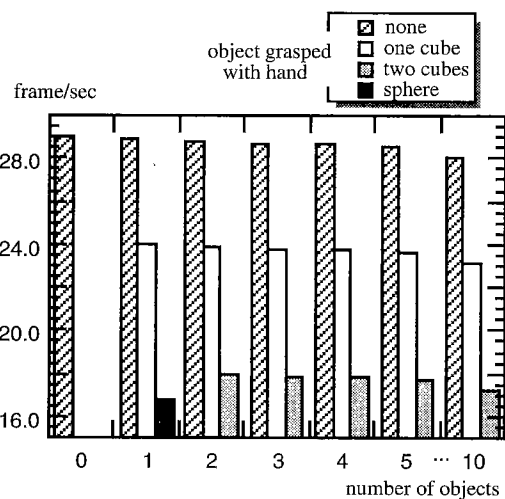


図13 単位時間当りの描画フレーム数
Fig. 13 Number of frames drawn in the unit time.

ム方式をとった。体験者は、一般客も多数いたことから、国籍、性別、職業、年齢（小学生未満あり）など、多人数多様である。

簡単な説明を行いながら体験してもらったところ、数分の操作により、100名程度の多様な体験者のうち9割程度の人がブロックを標的に当てることができた。そして、仮想手による基本的な物体操作のシステムについて、特に違和感の指摘はなく、「仮想空間の物体を自分の手で触れるのは面白い」などの意見があり、積極的な評価が大多数であった。一方、操作の後に、触った感じがなく（力覚フィードバックがない）、ブロックを積み上げると変な止まり方をする（物体同士の干渉の簡略化）、などの問題点の指摘があった。

[実験3] 計算時間に関する評価として、描画更新間隔 Δt を固定せずに、判定点20、判定線分60の仮想手による、6面、12りょう線からなる数個の立方体に対する干渉を行った。物体の総数、手に把持されている物体数による計算量の変化を、1秒当りに描画可能なフレーム数により示す（図13）。また、32面、56りょう線により近似した一つのだ円球（図7(b)参照）に対する干渉も行った。

今回の実験では全物体数10個、把持物体数2個（立方体）の場合でも17 frame/sでの描画更新が可能である。そのため、必要とされる描画更新レート12 frame/sにより、対話操作が実現できる。手と干渉している物体数の増加に伴う計算時間の増加については、通常の物体移動では片手で同時に少数の物体にしか触れないため、片手による対話操作の可能な計算時間である。物体形状の複雑さに関しては、多数の面、りょう線からなる物体には対応できないのが現状であるが、多面体で近似した球に対する操作は17 frame/sでの描画更新が可能である。また手と干渉している物体数が一定の場合、物体総数（図13横軸）の変化による計算時間への影響は少ないため、数十個の物体が存在する場合でもほぼ同程度の速度が得られる。すなわち、同時に1～2個の物体にしか触れないならば、数十個の物体が存在する状況における物体操作が可能である。しかしこれは、操作感覚を重視し、物体同士の干渉については簡略化を行ったためであり、より正確な物体干渉を実現するためには改良すべき点である。

6. む す び

本論文では、現在のGWSの処理能力で実現可能な手による物体操作のための一モデルを提案し、仮想現実

感システムの実験例を示した。本システムでは、物体を把持、移動し、また投げるなどの動作が対話操作により可能である。操作については、従来よく用いられた大幅な簡略化による制約条件などを設けることなく、どの指のどの部分においても物体の操作が可能なモデルを実現することができた。また、手の影響下でない物体の挙動についても、簡略化された重力などを導入することにより実世界の印象に近づけることができた。

本システムは現在、その基本機能を実現した段階にあり、仮想手による3次元物体のより自然な対話操作の実現に関しては次のような課題が残されている。

[手と物体の相互作用]

- ・複数の指で押したときの自然な挙動の実現
- ・両手、あるいは多人数の手による協調作業による物体操作への対応

[手から離れた物体の挙動]

- ・他の物体と干渉したときの自然な挙動
- ・跳ね返り、滑りといった現象の表現

更に、これらの機能の追加と共に干渉判定の高速化、柔らかい物体に対する操作の実現や、力覚のフィードバックについても検討し、具体的問題を含むさまざまな状況における仮想空間操作の体験実験により、本モデルによる物体操作の実現の容易さおよび問題点を検証することも必要である。また、対話的な物理シミュレーションを実現することによる、計算量、物体の挙動などを比較、検討することも重要であろう。

謝辞 研究を進めるにあたり、有益な議論を頂いた本研究室諸氏に感謝する。なお、本研究の一部は文部省科研費重点領域研究「人工現実感」、同基礎研究(1)、および股関節振興財団の研究助成による。

文 献

- [1] M. Bergamasco, P. Degl'Innocenti, D. Bucciarelli, and G. Rigucci, "Grasping and moving objects in virtual environments: A preliminary approach towards a realistic behaviour," Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.44-49, 1994.
- [2] Z. Huang, R. Boulic, N. M. Thalmann, and D. Thalmann, "A multi-sensor approach for grasping and 3D interaction, computer graphics: Developments in virtual environments," Proc. Computer Graphics International'95, Academic Press, pp.235-253, 1995.
- [3] R. Boulic, S. Rezzonico, and D. Thalmann, "Multi-finger manipulation of virtual object," Proc. ACM VRST, ACM, pp.67-74, 1996.
- [4] Y. Kunii and H. Hashimoto, "Object grasping in virtual environment using dynamic force simulator," Proc. IEEE

International Workshop on Robot and Human Communication, pp.261-264, 1994.

- [5] 川勝大輔, 中山敦司, 小堀研一, 久津輪敏郎, “バーチャルリアリティにおける物体選択方法について,” 情報学グラフィックスとCAD研報, 66-4, vol.93, no.110, pp.25-32, 1993.
- [6] H. Iwata, “Artificial reality with force-feedback: Development of desktop virtual space with compact master manipulator,” Computer Graphics, vol.24, no.4, pp.165-170, 1990.
- [7] 平田幸広, 水口武尚, 佐藤 誠, 河原田弘, “組立作業のための仮想作業空間,” 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.8, pp.1788-1795, Aug. 1993.
- [8] 木島竜吾, 廣瀬道孝, “Virtual Physics: 仮想空間の物体挙動計算,” 信学技報, MVE95-24 1995.
- [9] 日本ロボット学会編, “ロボット工学ハンドブック,” III 制御技術編, 3. ハンドの機構と制御, pp.297-320, コロナ社, 1990.
- [10] M. Moore and J. Wilhems, “Collision detection and response for computer animation,” Computer Graphics, vol.22, no.4, pp.289-298, 1988.
- [11] Y. Kitamura, H. Takemura, N. Ahuja, and F. Kishino, “Interference detection among objects for operator assistance in virtual cooperative workspace,” Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.442-447, 1993.
- [12] M. Shinya and M.-C. Forgue, “Laying out objects with geometric and physical constraints,” The Visual Computer, vol.11, no.14, pp.188-201, 1995.
- [13] D. Braff, “Interactive simulation of solid rigid bodies,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol.15, no.3, pp.63-75, 1995.
- [14] 武田捷一, 丸山 稔, 亀井克之, “物理法則に基づく剛体運動のシミュレーション手法,” 信学論(D-II), vol.J79-D-II, no.5, pp.860-869, May 1996.
- [15] K. Funahashi, T. Yasuda, S. Yokoi, and J. Toriwaki, “Block manipulation with hand in virtual space,” Proc. Virtual System and Multimedia '95, pp.189-194, 1995.
- [16] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, “仮想空間操作における物体の挙動および手と物体の相互作用のモデル,” 第1回計算工学講演会論文集, vol.1, no.1, pp.15-18, 1996.
- [17] テレビジョン学会編, “テレビジョン・画像情報工学ハンドブック,” 1 編 光・色・視覚・画像, 5章 画像, pp.57-75, オーム社, 1990.

(平成9年9月26日受付, 12月11日再受付)



舟橋 健司 (学生員)

平5岐阜大・工・電子情報卒。平7名大大学院博士前期課程了(情報工学)。現在同大学院後期課程在学中。コンピュータグラフィックス, バージナルリアリティに関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。



安田 孝美 (正員)

昭57三重大・工・電気卒。昭62名大大学院博士課程了(情報工学)。同年同大工学部情報工学科助手。平5同大情報文化学部助教授, 現在に至る。この間, 日本学術振興会特別研究員(昭61)。質感表現, 仮想空間操作等のCGおよびVRの研究に従事。情報処理学会, 日本ME学会各会員。



横井 茂樹 (正員)

昭46名大・工・電気卒。昭52同大大学院博士課程了。同年名大助手, 昭53三重大助教授, 昭57名大工学部情報工学科助教授を経て, 平5同大情報文化学部教授, 現在に至る。コンピュータグラフィックス, バージナルリアリティ, マルチメディアなど, 映像を中心とした情報メディア技術とその社会的影響に関する研究に従事。市村賞学術貢献賞, 日本ME学会論文賞各受賞。情報処理学会, 日本ME学会各会員。



鳥脇純一郎 (正員)

昭37名大・工・電子卒。昭42同大大学院博士課程了。同年4月名大工学部助手。以後, 昭45助教授, 昭49名大大型計算機センター助教授, 昭55豊橋技術科学大学情報工学系教授, 昭58名大工学部電子工学科教授を経て, 昭60年4月より同情報工学科教授。パターン認識, 画像処理, グラフィックスおよびそれらの医学情報処理への応用に関する研究に従事。著書「パターン認識の画像処理」(朝倉書店), 「認識工学」(コロナ社), 「見えないイメージを見る」(共立出版)。情報処理学会, 日本ME学会, 画像電子学会, 人工知能学会, コンピュータ支援画像診断学会, IEEE各会員。