

仮想空間における両手による協調操作モデル

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

本論文では、操作者の両手に対応して動く仮想空間内に定義された両手（仮想手）によって、物体を操作する際の物体の挙動のモデルについて提案し、仮想の両手による物体の対話操作システムについて述べる。著者らは、従来より仮想空間における片手と物体との相互作用モデルを考案している。本研究ではこれを拡張することにより両手による協調操作を可能とした。本モデルでは、両手で物体を操作している場合には物体の挙動を決定する「統合手」を定義することにより、片手による物体操作のモデルと同等な扱いに帰着している。統合手は両手の位置、および挙動から操作物体との接点数などを考慮した加重平均として決定している。作成した対話操作システムでは、両手で同じ物体を、あるいは、それぞれの手で別の物体を操作することが可能である。

A Model for Cooperative Manipulation of Virtual Objects with Both Hands

KENJI FUNAHASHI,[†] TAKAMI YASUDA,^{††} SHIGEKI YOKOI^{††}
and JUN-ICHIRO TORIWAKI[†]

This paper describes a model for cooperative handling virtual objects with both virtual hands. We have been studying an interaction model for one hand to manipulate one rigid object in virtual space. In this paper, we extend this model to a new one for both-hands-cooperation. This model can be reduced to a model for one hand manipulation by introducing a "integrated hand", when two hands touch the same object. The integrated hand is defined by a set of weighted average values of locations and movements of both hands by considering the number of touched points to an object. Using the system of the extended model, one an operator manipulate an object with both hands and also handle two objects with each hand.

1. はじめに

近年のハードウェア技術の進歩により、計算機上に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対話操作が可能となってきている。このような仮想空間は人間に利用可能な新たな空間として各方面から期待が高まっており、人間にとって実空間と同じように利用できることが望まれている。仮想物体を操作する場合は、マウスやキーボードなどのデバイスで操作することも可能である。しかし、人間が実物体を操作する場合は手を使って操作することが多い。そのため、仮想空間中の物体を手を使って操作できることはヒューマンインタフェースの点から望ましい。たとえば、医学分野における手術シ

ミュレーションでは手を使った手術プロセスがそのまま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、教育といった用途についても同様である。

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、仮想物体操作に関する基礎技術を確立するための研究が多方面で行われている^{1)~7)}。これらにおいては、物体との干渉を2本の指先のみに限定する、親指を特別に扱うなど、1つの手であることを利用しているため、限定された操作であり、また複数の手への適用は困難である。そこで、より一般的な、あるいは高度な対話的操作を実現するために、片手だけではなく両手による操作、あるいは複数の操作者による協調作業の実現が試みられている^{8)~11)}。しかし、これらの研究においても、同時に物体を操作することを排除するといった条件を設定するか、2つの手の中心位置に物体を移動する、などの実際の手の操作とはかけ離れた操作により

[†] 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University
^{††} 名古屋大学情報文化学部
School of Informatics and Sciences, Nagoya University

実現されていた。

著者らは従来より、仮想空間における片手と物体との相互作用モデルを考案してきている^{12),13)}。これは、実物体操作プロセスの単純化モデルにより物体の選択、移動が可能なるものである。このモデルでは、把持判定により選択された操作対象の移動を手全体の挙動により指定するものである。

本研究ではこれを両手による協調操作のためのモデルに拡張した¹⁴⁾。新たなモデルでは、両手で物体を操作している場合には「統合手」を定義することにより、片手（統合手）と物体とのモデルへと帰着している。「統合手」は両手の位置、挙動から操作物体との接触状況などを考慮した加重平均として決定している。本モデルの目的は、仮想物体の運動を厳密に表現することではなく、実際の手による物体操作を考察し、単純化した相互作用モデルを導くことにある。以下、3章で拡張したモデルについて述べる。作成した実験的物体操作システムでは、両手で同じ物体を、あるいは、それぞれの手で別の物体を操作することが可能である。ただし、本文中における「操作」とは、「把持して、あるいは、押すことにより移動すること」を意味するものとする。これらの操作例、および実験については4章で述べる。

2. 片手による物体操作モデル

2.1 基本方針

本論文では、実物体の両手操作のプロセスの単純化モデルを導いている。仮想空間での物体操作モデルとしては、厳密な力学計算がリアルタイムに実行可能ならば手と物体の状況による分類は不必要である。しかし、リアルタイム性の保持、任意時刻におけるインタラクションへの対応、完全な力覚の帰還が困難である、などの理由から本モデルは厳密な力学計算によらず、幾何学的なモデルとする。

2.2 仮想手と仮想物体のモデル

手の形状モデルとして、指は複数の多角柱で表現し、手のひらは多面体で近似する。また、物体との干渉判定を行う点（判定点）を各指の先端および関節に設定する。さらに、隣り合う判定点を結ぶ線分を母線とする多角柱の、母線に平行な稜線すべて（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。また以下では、手首に設定したベクトルの始点を空間内の仮想手の位置とし、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移動量とする。上述した

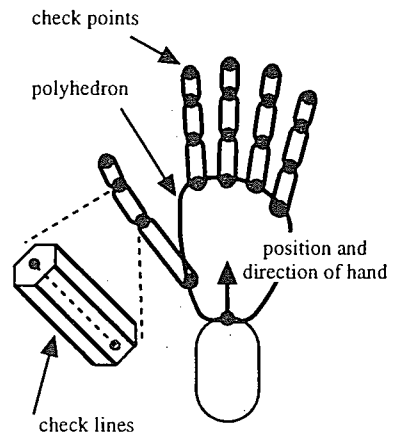


図1 仮想手—仮想空間における手のモデル

Fig. 1 Virtual hand — a model of the hand in virtual space.

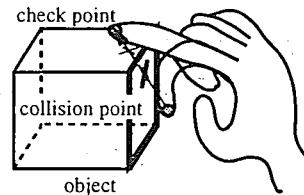


図2 仮想手と仮想物体との衝突点検出

Fig. 2 Collision detection between a hand and an object.

簡略化した手のモデルを図1に示す。

操作対象である仮想物体は、多面体によって表現される剛体に限定する。物体を構成する各面、稜線はそれぞれ、仮想手の個々の判定点、判定線分と干渉しうる。

2.3 片手による仮想物体の操作モデル

本節では片手で物体を把持、移動する方法について述べる。まず、ともに移動しうるすべての物体と手に関して、物体のすべての面とすべての判定点の衝突点、および、物体のすべての稜線とすべての判定線分との衝突点を検出する。ただし図2に示すように、ある判定点に対して、同一物体の複数の面との干渉が検出された場合は、最も早く干渉する面における衝突点を、この判定点と物体との衝突点とする。また、判定線分に関しても同様である。

次に、摩擦などの力学計算によらず、物体と手の位置関係により把持判定を行う。物体のそれぞれの接触面、稜線の法線のうちいずれか2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。ただし、稜線に関しては物体の重心から稜

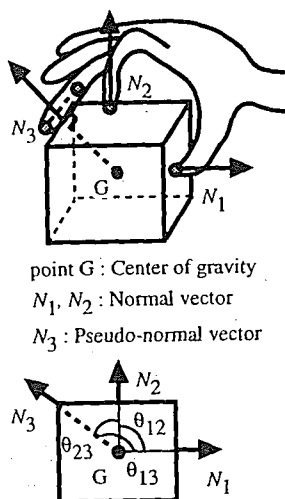


図3 仮想物体の稜線における疑似法線と把持判定
Fig.3 Pseudo-normal vector of the edge of a virtual object and grasping check.

線へ下ろした垂線をその疑似法線とし、単に法線という場合は面の法線および稜線の疑似法線を指すものとする(図3)。たとえば、図3のように3点で干渉している場合、3つの法線 N_1, N_2, N_3 により決まる角度 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ のうち1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。ここで、本研究では実験的にしきい値を135度とした。また、指が物体の中に入り込んでいる場合、その指の各関節の角度を直前の値に戻す、という補正を行う¹⁵⁾。

ここで用いた把持判定のためのしきい値を変化させることにより、摩擦係数の異なる物体を擬似的に表現することも可能である。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。また、物体を把持しようとする場合などでは、把持に至る前に1点でのみ干渉することがある。このような場合は、平行移動と回転移動の組合せにより自然な物体の動きを実現する^{12), 13)}。その後、物体と他の指が干渉した場合に、把持の判定を行う。

ところで、物体が把持できず、仮想手の複数箇所により押されている場合もありうる。しかし、実世界でのこの物体の挙動は、接触点の位置関係により非常に複雑となるため、これを忠実に再現することは困難である。そこで、物体が把持されている場合は上述の方法で物体の挙動を決定し、複数箇所を押されている場合には仮想物体の挙動は手の動きに対応した平行移動のみを考える。手で実物体を移動する場合は主に把持により行うため、これは現実的な簡略化である。

3. 両手操作への拡張

3.1 複数の手による操作

より一般的な、あるいは高度な対話的操作を実現するためには片手だけではなく両手による操作、あるいは複数の操作者による協調作業を実現する必要がある。従来の仮想空間操作システムにおける協調作業は排他処理、すなわち、同時に同一の対象に関与することを制限することにより実現しているものが多い。

本研究では、複数の手による操作のうち、それぞれの手を動かす目的が互いに通じている(操作者同士の意志の疎通がはかられている)場合の典型である、単独の操作者の両手による物体操作モデルを提案する。ただしこの場合、目的的操作に対する各手の操作の方向、量の差異は小さいものと仮定している。本モデルにより、両手で同じ物体を、あるいは、それぞれの手で別の物体を操作することが可能である。

3.2 様々な両手操作

大きな物体の両手操作を可能とするために操作空間に両手が存在する場合、両手を使った物体の移動操作として、以下のような状況が実際に考えられる。

- (1) 両手同時に同じ物体に触れ、それぞれの手を均等に動かし、持ち上げる。
- (2) 両手同時に同じ物体に触れるが、実際は片手で把持、他方の手は補助的にそえる。
- (3) 片手で物体を把持、後に他方の手をそえる。
- (4) 両手で同じ物体に触れて把持、後に一方の手を離す。
- (5) 片手で物体を把持、他方へ手渡す。
- (6) それぞれの手で別の物体を、互いに干渉させずに操作する。
- (7) それぞれの手で別の物体を操作、物体を互いに干渉させる。

これらは、(1)~(5)の両手で同じ物体に触れて操作する場合と、(6)、(7)のそれぞれの手で別の物体を操作する場合に分けられる。ここで、操作(6)は2章で述べた方法により実現可能である。さらに、本研究では指による干渉を考慮した手と物体との相互作用に重点をおいているため、物体どうしの干渉といった問題を含んでいる(7)については考慮しないものとする*。また、片手による操作と同様に物体は剛体に限定し、変形操作は考えないものとする。

* 1つの操作対象が複数のパーツからなり、各パーツが接触し、かつ、互いに異なる動きをするような場合は、それぞれのパーツを1つの物体と考えている。パーツどうしが干渉する場合は、本稿では扱わない。

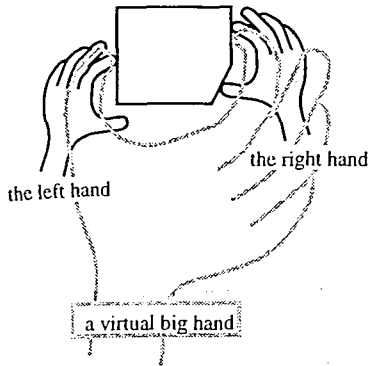


図4 両手による物体操作のモデルとしての仮想の大きな手（統合手）

Fig.4 A virtual big hand (the integrated hand) as a model of object handling with both hands.

3.3 統合手の導入

実世界において両手により同一の大きな物体に触れる場合、主に目的とする物体の挙動に対応して両手を移動する。すなわち、同一物体に接触している場合、左右の手はそれぞれ無関係な挙動を示すのではなく、左右の手があたかも10本の指を有する「大きな手」の一部として機能するものと考えることができる（図4）。

そこで、干渉を判定する段階では左右それぞれの手における干渉を検出し、それぞれの手が同じ物体に接触していない場合は従来のモデルを適用する。また、両手で同じ物体に接触している場合、左右の手を統合した手を定義することにより、その移動量により物体の挙動を決定する、というように従来のモデルへ帰着させることが可能である。複雑な干渉状況を簡略化することにより、計算時間の短縮、対話操作の実現が可能となる。

この統合した手を、物体の挙動を決定するための左右の手の「統合手」と呼ぶことにする。干渉判定はそれぞれの手において行うため、統合手には新たに判定点を定義する必要がなく、物体の挙動を決定するための手の位置、方向、移動量のみが必要である。すなわち、大きさを考えない仮想的に考慮する手である。

判定の結果、両手で仮想物体に干渉している場合、後述の方法により統合手を決定する。片手で干渉している場合にはその手自身を統合手と考えることもできる。その後、統合手に対する把持判定を行う。これは、片手の場合と同様に、すべての接触点における法線のうちいずれか2つのなす角があらかじめ決められたしきい値以上ならば、統合手は物体を把持しているとす。また、物体の挙動は統合手の挙動に従って決定する。この方法により、両手の中心位置へ物体を移動

するなどの手法より実際に近い操作が対話的に可能である。

3.4 統合手の決定方法

統合手の決定には、左右どちらかの手の位置、移動量、あるいはその平均などを用いることが考えられる。しかし、操作者の動作の意図により、双方の手のウェイトは変化する。そこで、統合手は操作状況を考慮した両手の加重平均とする。重み決定の要素としては、たとえば、以下などが考えられる。

- (1) 単独の手による把持、非把持
- (2) 物体との干渉点数
- (3) 物体との干渉時刻
- (4) 手の位置（重力、操作者と物体の距離を考慮）
- (5) 干渉点の位置（同上）
- (6) 初期優先度（利き手などを考慮）

また、操作中における、手の物体に対する干渉状況の変化に対応して、重みおよび統合手を決定しなおす必要がある。そこで、統合手は動的に決定するものとし、操作中に重みが変わった場合は統合手の位置、方向を補間し、変更していくことにより、統合手の不自然な変化を抑制する。これにより、右手から左手へ物体を手渡す、といった操作も自然に実現できる。

ところで、操作者は力覚や、触覚フィードバックがないため、左右の手の間隔が物体より狭くなってしまいう可能性がある。そこで両手による干渉が継続されている場合には、入力値（操作者の手）から統合手を決定し、左右の仮想手は統合手に対する位置が相対的に変化しないように補正を行う。

実際の統合手の決定は、両手により触れられている物体が存在する場合、以下の手順を行う（図5）。

[手順1] まず、時刻 t における左右の仮想手 $L(t)$, $R(t)$ （手の位置、および方向を表す6次元ベクトル、これらは、時刻 $t - \Delta t$ において両手で物体に干渉していない場合、操作者の手の実測値 $L_r(t)$, $R_r(t)$ に等しい）および、物体との干渉状況より決まる重み $W_L(t)$, $W_R(t)$ から統合手 $I(t)$ を決定する（式(1)）。

$$I(t) = \frac{W_L(t)L(t) + W_R(t)R(t)}{W_L(t) + W_R(t)} \quad (1)$$

[手順2] 次に、時刻 $t + \Delta t$ における仮想空間の状況を決定するために、時刻 $t + \Delta t$ における左右の手の実測値 $L_r(t + \Delta t)$, $R_r(t + \Delta t)$ および $L(t)$, $R(t)$ から左右の手の移動量 $T_L(t)$, $T_R(t)$ を決定する（式(2)）。

$$T_L(t) = L_r(t + \Delta t) - L(t)$$

$$T_R(t) = R_r(t + \Delta t) - R(t) \quad (2)$$

さらに、 $W_L(t)$, $W_R(t)$ により統合手の移動量 $T_I(t)$

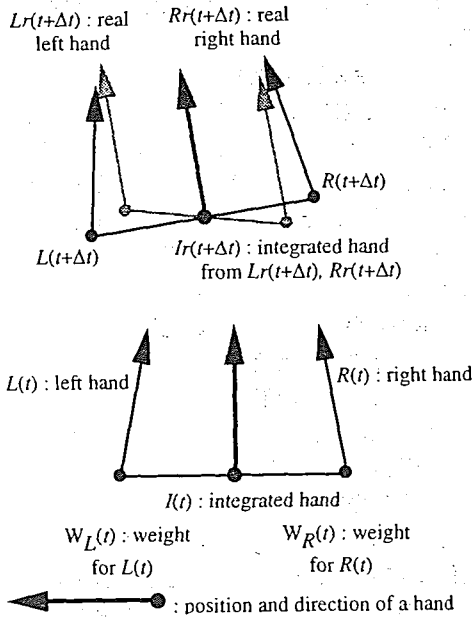


図5 両手操作における統合手の決定

Fig. 5 Definition of the integrated hand in handling with both hands.

を決定する (式 (3)).

$$T_I(t) = \frac{W_L(t)T_L(t) + W_R(t)T_R(t)}{W_L(t) + W_R(t)} \quad (3)$$

この時点における仮の統合手 $I_r(t + \Delta t)$ は式 (4) より求まる.

$$\begin{aligned} I_r(t + \Delta t) &= \frac{W_L(t)L_r(t + \Delta t) + W_R(t)R_r(t + \Delta t)}{W_L(t) + W_R(t)} \\ &= I(t) + T_I(t) \end{aligned} \quad (4)$$

[手順 3] 最後に、手と干渉している物体を $T_I(t)$ により移動し、 $L_r(t + \Delta t)$ 、 $R_r(t + \Delta t)$ との干渉状況から $W_L(t + \Delta t)$ 、 $W_R(t + \Delta t)$ を決定する。また、 $I_r(t + \Delta t)$ に対して、 $L(t)$ 、 $R(t)$ 、と $I(t)$ の関係が保たれるように、 $L_r(t + \Delta t)$ 、 $R_r(t + \Delta t)$ を時刻 $t + \Delta t$ における左右の手 $L(t + \Delta t)$ 、 $R(t + \Delta t)$ へと補正し、時刻 $t + \Delta t$ における仮想空間の状況とする。

重みについては計算時間の制約などから、統合手の条件要素 (1), (2), (6) を利用し、単独把持に対する重みを 10 とし、干渉点 1 つにつき重み 1 を、右手に利き手としての重み 1 を与えるものとしている。これは、たとえば右手のみで把持可能であり左手のみでは不可能な状態の場合、操作者は右手に意識を集中しており、右手の挙動の方が、より意図している物体の移動を表していると考えられるからである。もちろん、

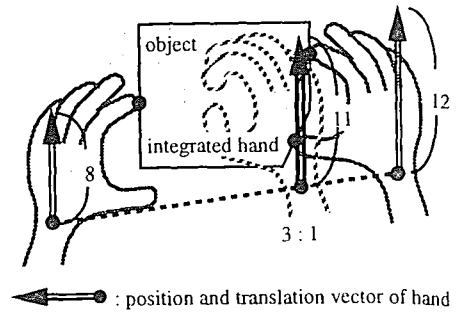


図6 統合手の決定例

Fig. 6 An example of determining the integrated hand.

利き手を左手に設定することも可能である。

具体例として、右手で 2 点接触 (非把持)、左手で 1 点接触している場合における統合手の決定例を図 6 に示す。この場合、左手は 1 点でのみ接触しているので、重みは 1 である。右手は利き手であり、また、2 点で接触しているので、重みは 3 である。このとき、統合手の位置は左右の手の位置を 3:1 に内分する点となる。また、左右の手が平行に動いている場合は統合手の挙動もこれらに平行で、その移動距離は式 (5) となり、把持されている物体の挙動はこの統合手の移動ベクトルに従う。

$$\frac{8 \times 1 + 12 \times 3}{1 + 3} = 11 \quad (5)$$

3.5 物体の両手操作の実現

片手と物体との相互作用モデルを、上述した統合手、およびそれに対する両手の補正の導入により拡張し、両手と物体との相互作用モデルとする。統合手を左右の手の加重平均とすることにより、操作者の左右の手に対する意識のウエイトの変化に対応可能である。また、統合手を動的に決定し、操作中にウエイトが変化した場合は補間を行うことにより、左右の手の物体に触れる時刻の違いに対応可能である。さらに、片手と物体との相互作用モデルを直接適用することにより、左右の手による別の物体の操作が可能である。ただし、現時点では物体どうしの干渉による相互作用には重点をおいていないため、2 つの物体を各々の手で把持し互いを接触させる、などのような物体どうしを接触させる操作にはまだ対応していない。また、仮想物体の幅より左右の手の間隔が狭くならないように補正し、移動中の両手による把持の維持を容易化した。物体との干渉判定は補正前の手に対して行うため、左右の手の間隔を広くすることにより、物体を離すことが可能である。

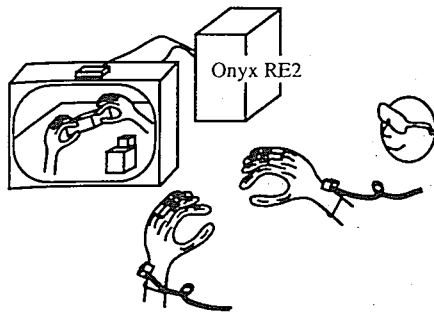


図7 実験システムの構成
Fig. 7 Experiment system.

4. 実験例

4.1 実験システムの構成

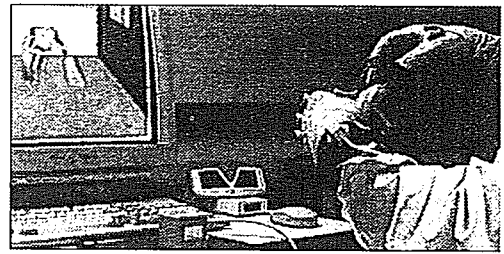
上述したモデルを用い、さらに重力、慣性、床面における物体の安定といった処理を同時に行う、仮想空間における両手による物体操作システムを、グラフィックワークステーション (SGI Onyx RE2, R8000) 上で、C言語により実現した。本システムは図7に示すような構成となっている。操作者の各指の関節の角度、手首の角度等はグローブタイプの入力装置により入力される。これは18個のセンサを有し、それぞれ8bit (0-255) の値を得ることが可能であり、0.5 degree/value に設定されている。手の位置および方向は低周波の磁界を利用したモーションセンサにより入力される。これは位置、角度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° の測定値が得られる。また、液晶シャッターを利用したステレオグラスおよびHMDによる立体視も可能である。

4.2 実験結果の一例

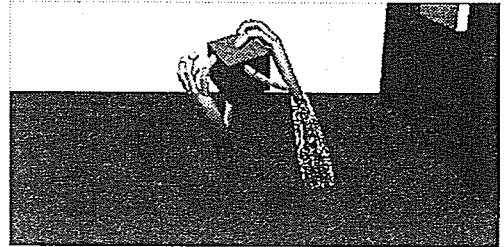
[実験1] 本システムによる実験の1つとして、3人の被験者に、練習として5分程度の仮想物体操作を行った後、次の操作を行った。

- 自由な仮想物体操作
- 大きな物体の両手による把持
- 小さな物体の両手の干渉による把持
- 小さな物体の、一方の手から他方の手への受け渡し

操作例を図8、図9、図10に示す。図8は、両手で1つの物体を、図9は、それぞれの仮想手で別の物体を操作している様子を示している。また、図10に示すように、左右それぞれの手の物体に対する干渉が均等でない操作、一方の手から他方の手へ物体を手渡すという操作、任意の多面体形状の物体に対する両手による操作が、実物体操作と大きく異なる方法で実



(a)



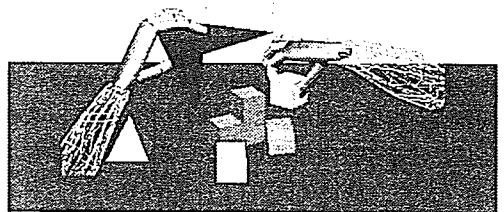
(b)

図8 両手による1つの物体の操作例、(a) 実際の操作の様子、(b) CGによる仮想空間の様子

Fig. 8 Example of manipulating one object with both hands, (a) System appearance, (b) CG image on the screen.



(a)



(b)

図9 それぞれの手による異なる物体の操作例、(a) 実際の操作の様子、(b) CGによる仮想空間の様子

Fig. 9 Example of manipulating different objects with each hand, (a) System appearance, (b) CG image on the screen.

現できた。実験後、被験者から

- 物体の把持において、強引に左右の手の間隔を狭めた時など、自身の手と仮想手の差異が大きくなることがある。

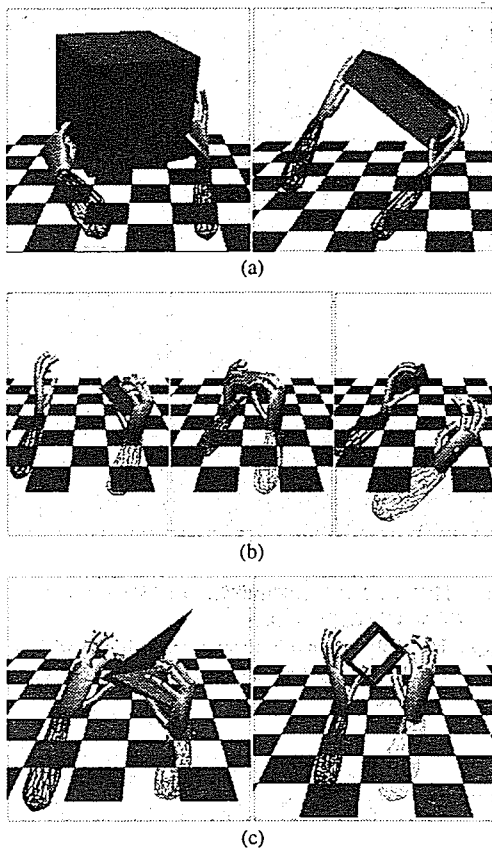


図 10 様々な両手による物体の操作例, (a) 大きな物体の操作, (b) 一方の手から他方の手への受け渡しの様子, (c) 任意の多面体形状の物体操作

Fig. 10 Examples of both hands manipulation, (a) Big object manipulation, (b) Hand over manipulation, (c) Manipulation of irregular shape objects.

- 物体に触れている感触がない。
- 奥行き感がつかみにくい。

などの、力覚、触覚のフィードバック、立体視に関する問題点が指摘された。これらは、総合的なシステム構築における今後の課題である。また、各被験者から 3.2 節で述べた様々な状況 (1)~(6) においても、概ね意図した物体の操作が行えたとの評価を受けた。

【実験 2】従来の方法、ここでは (1) 両手により干渉されていると判断される場合、(両手の間隔が物体の幅よりも広い場合などにも) 物体を両手の中心へ移動する、(2) 物体が両手により干渉されている場合、事前に (あるいは状況によって) 決定された一方の手により物体の挙動を決定し、他方の手を補正する、との比較のため、以下の重みの決定方法により【実験 1】で行った操作を各被験者にそれぞれ行った。

(1) 干渉状況によらず、つねに 1:1

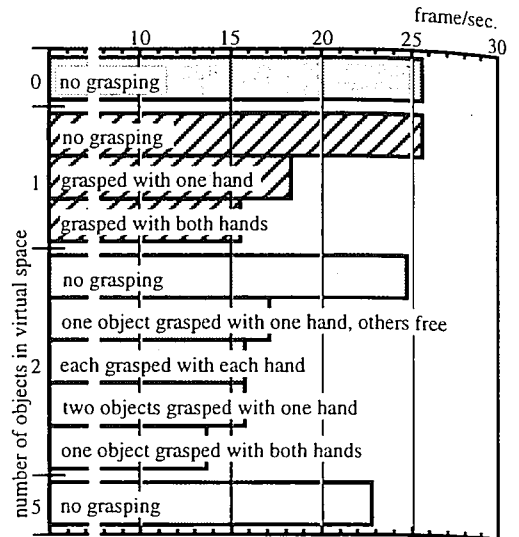


図 11 単位時間あたりの描画フレーム数

Fig. 11 Number of frames drawn in the unit time.

- (2) 干渉状況によらず、利き手を 1, 他を 0
- (3) 本論文で提案する、干渉状況により変化する重み

実験後、すべての被験者から、重みの決定方法に関しては方法 (3) が様々な状況において全般的に違和感が少なかったとの評価を受けた。

【実験 3】計算時間に関する評価として、それぞれ判定点 20, 判定線分 60 の左右の仮想手による、6 面、12 稜線からなる数個の立方体に対する干渉を行った。具体的には、両手で 1 つの物体を、片手で 2 つの物体を同時に把持するなど、他方、またはすべてが干渉していない状況も考慮している。

物体の総数、被把持状況による計算量の変化を、1 秒あたりの描画フレーム数により示す (図 11)。仮想空間において対話操作を実現するには、少なくとも 12 frame/sec. 程度の描画更新が必要であるといわれている¹⁶⁾。この結果によれば、物体総数の変化による計算時間への影響は少ないため、十数個の物体が存在する状況にも対応可能であると判断できる。しかしこれは、操作感覚を重視し、物体どうしの干渉にお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。また、干渉物体数の増加にともなう計算時間の増加については、通常の物体移動では同時に少数の物体にしか触れないため、許容可能な計算時間と考えられる。

また、32 面、56 稜線により近似した 1 つの楕円球に対する干渉を行った場合の描画更新は約 13.5 frame/sec. であった。複雑な物体には対応でき

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可能である。

さらに、参考事項であるが、入手の容易な廉価なパーソナルコンピュータ (PentiumPRO 200 MHz) 上にシステムを構築し (ただし、ハードウェアの制約から片手に制限している)、図 11 における上から 3 番目の操作「1つだけ存在する立方体の片手による把持」を行った場合の描画更新は、約 12 frame/sec. であった。この結果から、このクラスのパーソナルコンピュータ上での、より計算時間を要する複雑な物体の操作、両手による対話操作は、現時点では困難であると考えられる。

5. む す び

本文では、仮想空間の物体の対話操作を実現するための両手による物体操作のモデルを提案し、実験例を示した。本モデルを用いた仮想現実感システムでは、両手を用いて物体を把持する、移動する、投げるなどのような対話操作、右手から左手へ物体を手渡す操作などが、従来よりも物体の挙動、手の位置補正に関して少ない違和感で行える。

本システムは現在、両手操作における基本機能を実現した段階にあり、仮想物体のより自然な対話操作の実現に関しては解決すべき多くの問題を含んでいる。まず、重みを決定する要因、および重みの値に関して、体験実験などにより検証する必要がある。また、物体どうしの干渉の表現、多人数の手による協調作業への対応も検討すべき問題である。今後、これらの機能を追加するとともに、具体的問題を含む様々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。

謝辞 研究を進めるにあたり、有益な議論をいただ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、股関節振興財団、および堀情報科学財団の研究助成による。

参 考 文 献

- 1) Bergamasco, M., Degl'Innocenti, P., Bucciarelli, D. and Rigucci, G.: 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) Huang, Z., Boulic, R., Magnenat, N. and Thalmann, D.: A Multi-sensor Approach

- for Grasping and 3D Interaction, *Computer Graphics: Developments in Virtual Environments (Proc. Computer Graphics International '95)*, pp.235-253, Academic Press (1995).
- 3) Kunii, Y. and Hashimoto, H.: Object Grasping in Virtual Environment Using Dynamic Force Simulator, *Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.261-264 (1994).
- 4) 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, 情報処理学会研究報告, グラフィクスとCAD, 66-4, Vol.93, No.110, pp.25-32 (1993).
- 5) Iwata, H.: Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.165-170 (1990).
- 3) 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 (1993).
- 7) 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, Vol.95, No.83, pp.105-112 (1995).
- 8) 石井雅博, 猿渡基裕, 佐藤 誠: 両手協同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).
- 9) 野間春生, 宮里 勉: 仮想的な拘束を用いた両腕による協調仮想物体操作, 1997 電子情報通信学会総合大会 A-16-26, p.398 (1997).
- 10) 藤沢祐介, 福田昌弘, 加藤孝俊, 西野明仁, 伊藤 稔: 仮想空間を利用した共同作業システム, 1997 電子情報通信学会総合大会 A-16-27, p.399 (1997).
- 11) 高橋克直, 寺本純司, 寺島信義, 富永英義: 協同作業 (CSCW) に関する一検討~複数人による同一物体の操作, 1997 電子情報通信学会総合大会 A-16-28, p.400 (1997).
- 12) Funahashi, K., Yasuda, T., Yokoi, S. and Toriwaki, J.: Block Manipulation with Hand in Virtual Space, *Proc. Virtual System and Multimedia '95*, pp.189-194 (1995).
- 13) 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 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, 信学論 (D-II) (1998.5「サイバースペース」特集号), 掲載決定.
- 14) 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, MVE97-71, pp.21-28 (1997).
- 15) 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).
- 16) Brooks, F.P.: Walkthrough - A Dynamic

graphic system for simulating virtual buildings,
Proc. Workshop on Interactive 3D Graphics
'86, pp.9-21 (1986).

(平成 9 年 6 月 30 日受付)

(平成 10 年 1 月 16 日採録)



舟橋 健司

平成 5 年岐阜大学工学部卒業。平成 7 年名古屋大学大学院博士前期課程(情報工学)修了。同年同大学大学院博士課程後期課程に入学, 現在に至る。コンピュータグラフィックス, およびバーチャルリアリティに関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



安田 孝美(正会員)

昭和 57 年三重大学工学部電気工学科卒業。昭和 62 年名古屋大学大学院博士課程(情報工学)修了。同年同大学工学部助手, 平成 5 年同大学情報文化学部助教授となり, 現在に至る。質感表現, 仮想空間操作等の CG および VR の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 学会各会員。



横井 茂樹(正会員)

昭和 24 年生。昭和 52 年名古屋大学大学院博士課程(電気系専攻)修了。同年名古屋大学工学部情報工学科助手, 昭和 53 年三重大学工学部電子工学科助教授, 昭和 57 年名古屋大学工学部情報工学科助教授を経て, 平成 5 年同大学情報文化学部自然情報学科教授, 現在に至る。工学博士。コンピュータグラフィックス, バーチャルリアリティ, 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。電子情報通信学会, 日本 ME 学会各会員。



鳥脇純一郎(正会員)

昭和 14 年生。昭和 37 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。昭和 42 年同大学大学院博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手。以後, 昭和 45 年同助教授, 昭和 49 年同大学大型計算機センター助教授, 昭和 55 年豊橋技術科学大学情報工学系教授, 昭和 58 年名古屋大学工学部電子工学科教授を経て, 昭和 60 年 4 月より同大学工学部情報工学科教授。工学博士。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)。電子情報通信学会, 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。