

第3章 2つの仮想手（両手）による 協調操作モデルへの拡張

3.1 はじめに

第2章では、仮想空間における片手と物体との相互作用モデルについて述べた。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、移動が可能なものである。このモデルは、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。

本章ではこれを両手による協調操作のためのモデルに拡張する[舟橋 97][舟橋 98b]。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、3.3節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3.4節で述べる。

これに関連する従来の研究として、次のようなものがある。

まず、前章でも述べたが、操作者の手と同様に動く仮想手による、仮想物体操作に関する研究が多方面で行われている[Bergamasco94][Huang95][Boulic96][Kunii94][川勝 93][Iwata90][平田 93][木島 95]。これらにおいては、物体との干渉を二本の指先のみ

限定する，親指を特別に扱うなど，一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，1.2.2節で述べたように，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．まず文献[高橋97]では，対象物体の形状を直方体に限定することにより，大きな簡略化を行っている．また文献[藤沢97]では，ネットワークを介した協調作業について検討されている．しかしこれらは，二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実現されている．さらに文献[石井94][野間97]では，力覚のフィードバックについても研究されているが，装置の開発に重点をおいたものであり，相互作用モデルに関しては同様に簡略化されている．

3.2 片手による物体操作モデル

本章では，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．

上述の理由から，両手による協調操作を実現するための基礎となる，片手による操作のモデルとして，前章で述べた方法を用いる．

ただし，実験時における把持判定のためのしきい値を，両手による操作の場合には135度とした．片手の場合には，物体表面の状態にもよるが立方体の隣り合う2つの面により把持が可能であると判断し90度とした．しかし，両手で持つ物体というのは，大きい，あるいは重い場合が多いと判断したためである．将来的には，このしきい値を物体毎に設定することも考えている．

3.3 両手操作への拡張

3.3.1 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介入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．

本章では，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，目的の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，両手で同じ物体を操作することも，それぞれの手で別の物体を操作することも可能である．

3.3.2 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) 片手で物体を把持して，他方の手へ渡す
- (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，物体同士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．ただし，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．パーツ同士が干渉する場合は，本文では扱わない．また，前章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．

3.3.3 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 3.1）。

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前章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、というように前章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える手である。

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 つのなす角が予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る。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。

3.3.4 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、双方の手のウエイトは変化する。そこで統合手の位置などは、操作状況を考慮した両手の位置などの加重平均とする（具体的方法は後述する）。重み決定の要素としては、例えば、以下などが考えられる。

(1) 単独の手による把持，非把持

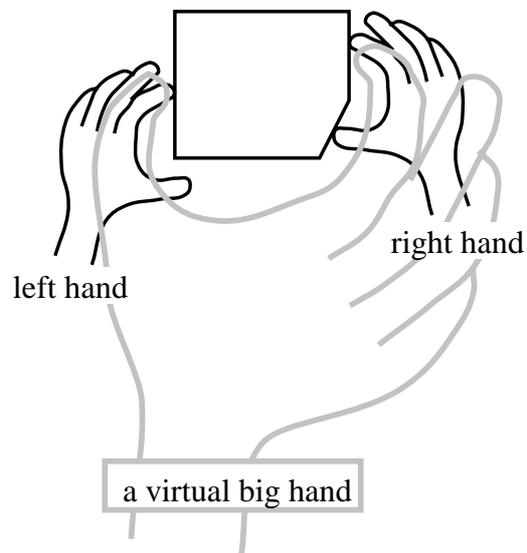


図 3.1 両手による物体操作のモデルとしての仮想の大きな手（統合手）

Fig.3.1: A virtual big hand (integrated hand)
as a model of object handling with both hands

- (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，操作中に重みが増加し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，以下の手順によって行う（図3.2）．

[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，および方向を表わす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 $Lr(t)$, $Rr(t)$ 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（3.1））．

$$I(t) = (W_L(t) L(t) + W_R(t) R(t)) / (W_L(t) + W_R(t)) \quad (3.1)$$

[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 $Lr(t + \Delta t)$, $Rr(t + \Delta t)$ 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（3.2））．

$$\begin{aligned} T_L(t) &= Lr(t + \Delta t) - L(t) \\ T_R(t) &= Rr(t + \Delta t) - R(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

さらに， $W_L(t)$, $W_R(t)$ により統合手の移動量 $T_I(t)$ を決定する（式（3.3））．

$$T_I(t) = (W_L(t) T_L(t) + W_R(t) T_R(t)) / (W_L(t) + W_R(t)) \quad (3.3)$$

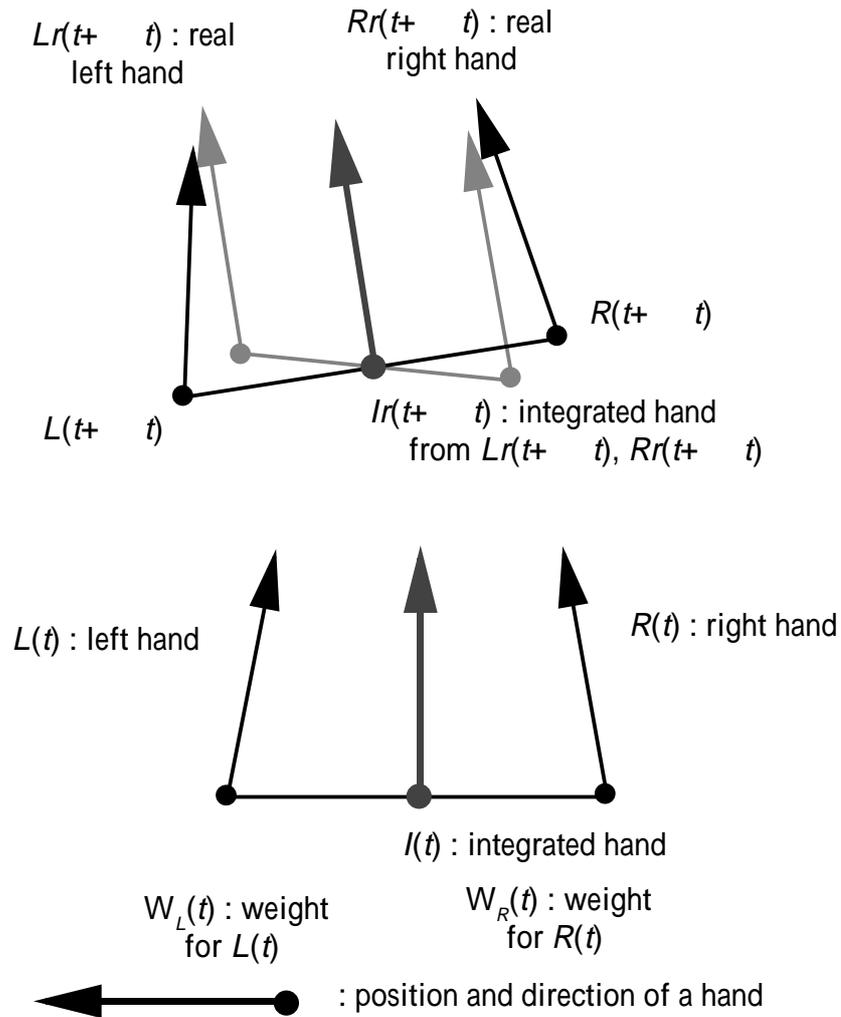


図 3.2 両手操作における統合手の決定

Fig.3.2: Definition of the integrated hand in handling with both hands

この時点における仮の統合手 $lr(t+\Delta t)$ は式 (3.4) より求まる .

$$\begin{aligned} lr(t+\Delta t) &= (W_L(t) Lr(t+\Delta t) + W_R(t) Rr(t+\Delta t)) / (W_L(t) + W_R(t)) \\ &= l(t) + T_l(t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

[手順3] 最後に, 手と干渉している物体を $T_l(t)$ により移動し, $Lr(t+\Delta t)$, $Rr(t+\Delta t)$ 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, $lr(t+\Delta t)$ に対して, $L(t)$, $R(t)$ と $l(t)$ の関係が保たれるように, $Lr(t+\Delta t)$, $Rr(t+\Delta t)$ 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, 干渉点一つにつき重み 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, 意図している物体の移動をより正確に表わしていると考えられるからである . もちろん, 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 3.3 に示す . この場合, 左手は 1 点でのみ接触しているため, 重みは 1 である . 右手は利き手であり, また, 2 点で接触しているため, 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 (3.5) 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 .

$$(8 \times 1 + 12 \times 3) / (1 + 3) = 11 \quad (3.5)$$

3.3.5 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 . 図 3.4(a), (b) に示すように, 両手で複数の物体に接触している場合も, 1 つの統合手を決定することにより物体の挙動を決定する . さらに, 片手と物体との相互作用モデルを直接適

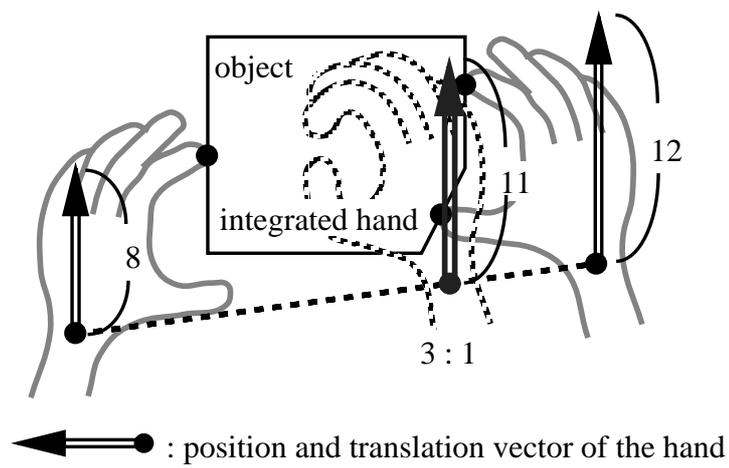


図 3.3 統合手の決定例

Fig.3.3: An example of determining the integrated hand

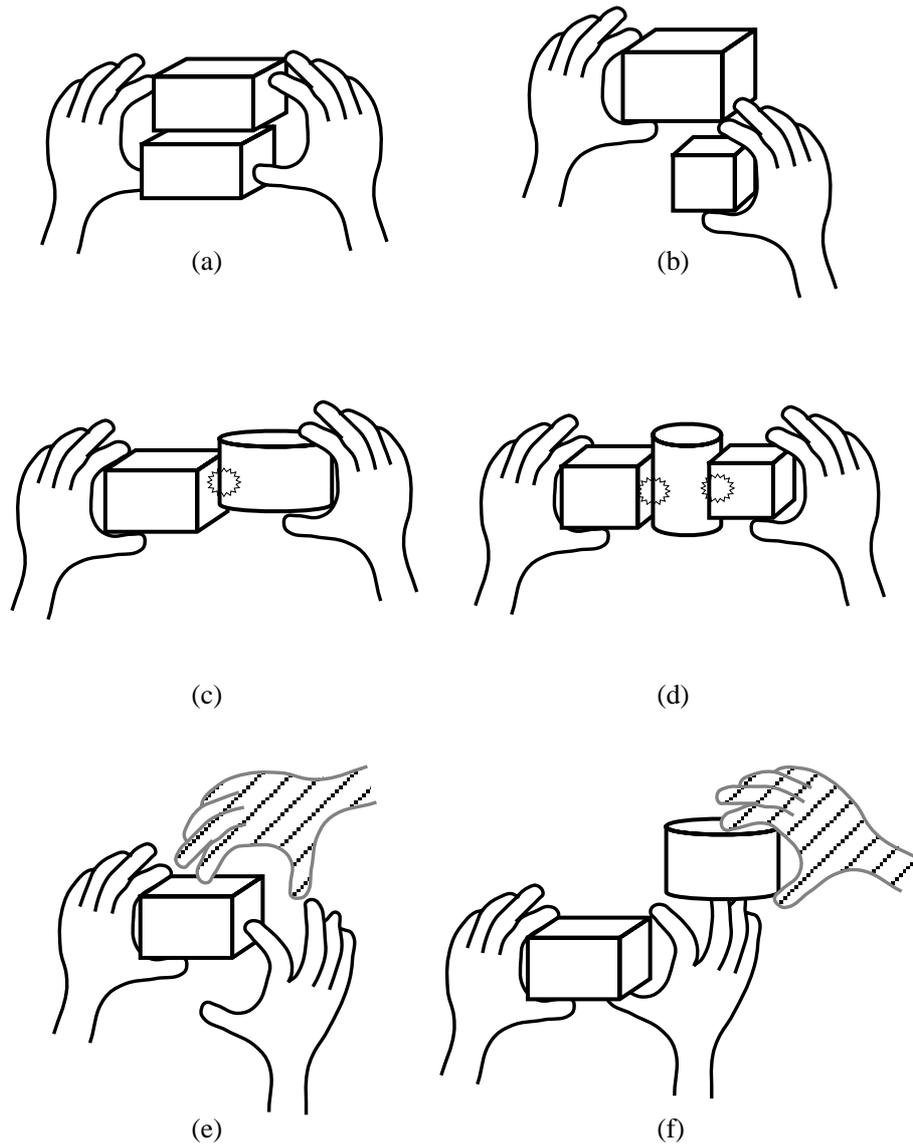


図 3.4 様々な状況の両手操作

Fig.3.4: Several situation of manipulation with both hands

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。また、仮想物体の幅より左右の仮想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にした。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。

ただし、現時点では物体同士の干渉による相互作用には重点をおいていないため、図3.4(c), (d)に示すように、2つの物体を各々の手で把持し互いを接触させる、などのような物体同士を接触させる操作にはまだ対応していない。しかし、これらの場合も間接的に干渉している手と物体の集合に対して統合手を決定することも考えられる。さらに、図3.4(e), (f)に示すような複数の操作者による干渉時も、間接的に干渉している手と物体の集合に対して統合手を決定することも考えられる。

3.4 実験例

3.4.1 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上で、C言語により実現した。本システムは図3.5に示すような構成となっている。操作者の手の情報を入力するための装置は、前章で述べたものと同じ入力装置を使用した（付録参照）。また、映像提示のための装置も同一のものを使用し、前章における実験と同様に立体視が可能である。

3.4.2 実験結果の一例

[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、次の操作を行ってもらった。

- ・ 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3.6, 図3.7, 図3.8（口絵参照）に示す。図3.6は、両手で1つの物体を、図3.7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

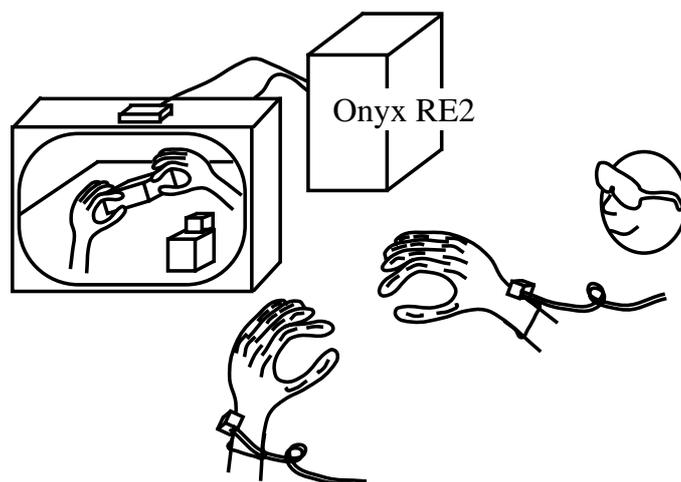


図 3.5 実験システムの構成

Fig.3.5: Experiment system

3.8 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らない方法で実現できた。実験後、被験者から以下のような指摘があった。

- ・ 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もある。
- ・ 物体に触れている感触がない。
- ・ 奥行き感がつかみにくい。

いずれも、力覚、触覚のフィードバック、立体視に関する問題点である。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 3.3.2 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] 本文で提案した手法と、以下に示す従来の方法との比較を行う。

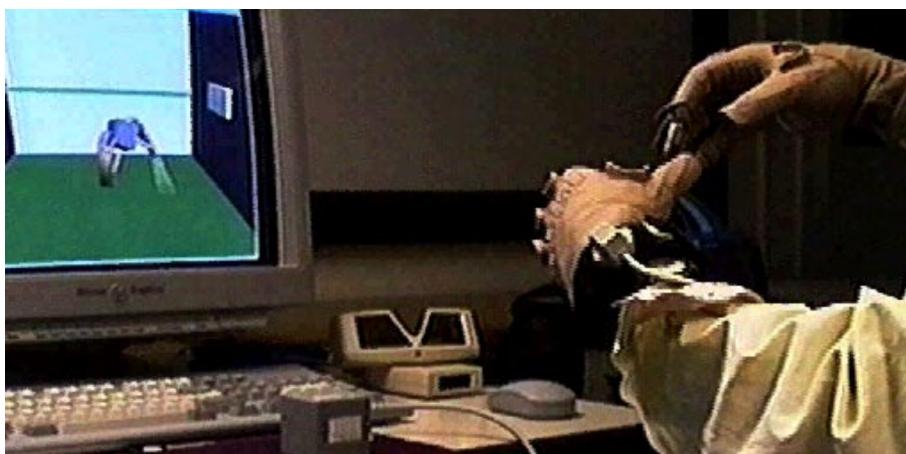
- (1) 両手により干渉されていると判断される場合、(両手の間隔が物体の幅よりも広い場合などにも) 物体を両手の中心へ移動する
- (2) 物体が両手により干渉されている場合、事前に(あるいは状況によって)決定された一方の手により物体の挙動を決定し、他方の手を補正する

実験は、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てもらった。

- (1) 干渉状況によらず、常に 1:1
- (2) 干渉状況によらず、利き手を 1、他を 0
- (3) 本章で提案する、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 つの物体を把持する、片手で 2 つの物体を同時に把持する、というように他方の手や物体が干渉していない場合、または全てが干渉していない状況も考慮している。



(a)実際の操作の様子

(a)System appearance



(b)CG で表示された仮想空間の様子

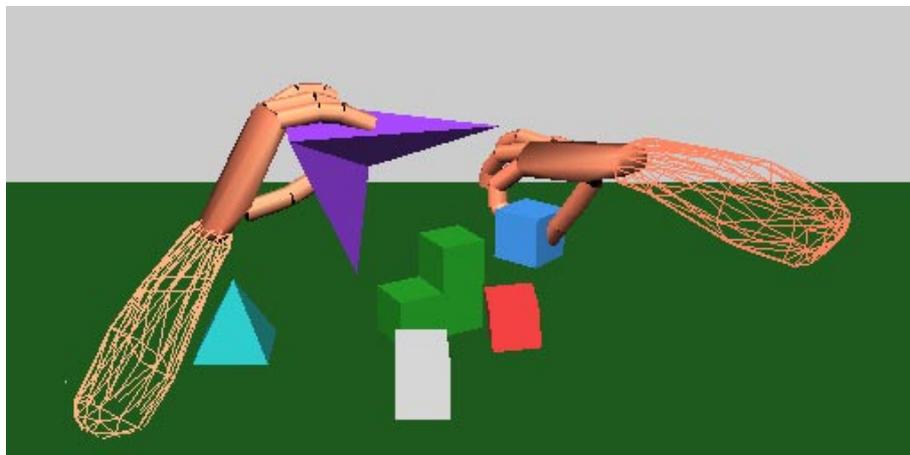
(b)CG image of the virtual space presented on the screen

図 3.6 両手による 1 つの物体の操作例

Fig.3.6: Example of manipulating one object with both hands

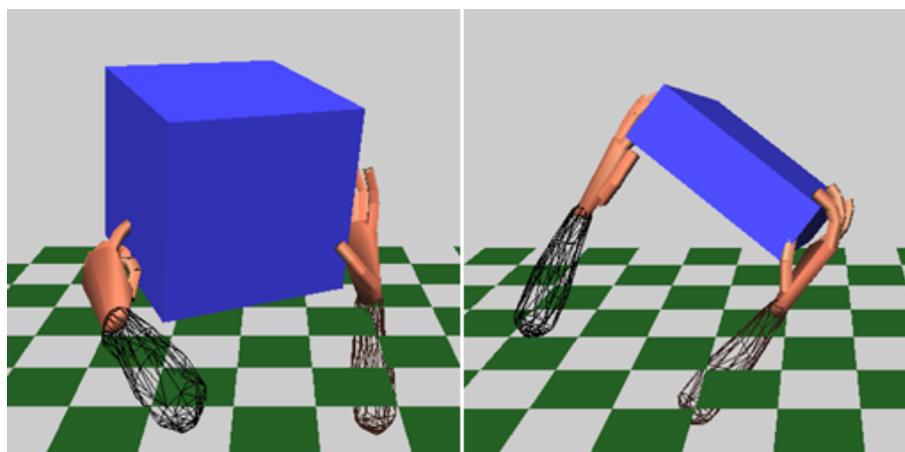


(a)実際の操作の様子
(a)System appearance

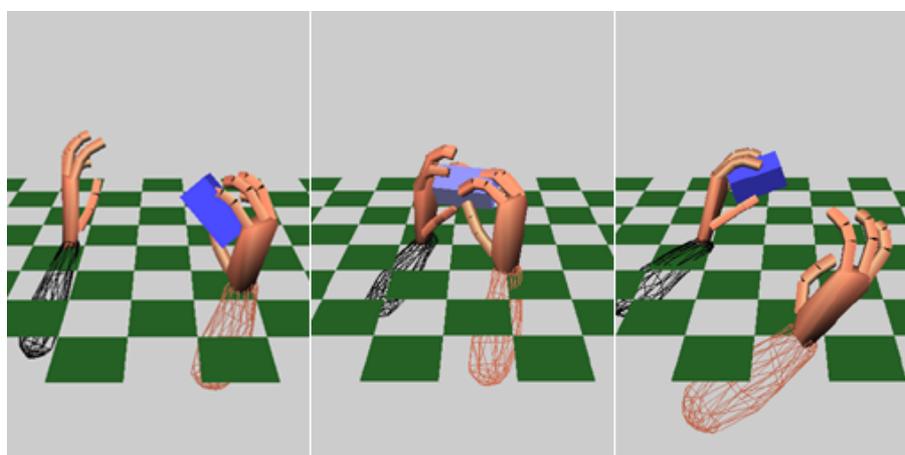


(b)CG で表示された仮想空間の様子
(b)CG image of the virtual space presented on the screen

図 3.7 それぞれの手による異なる物体の操作例
Fig.3.7: Example of manipulating different objects with each hand

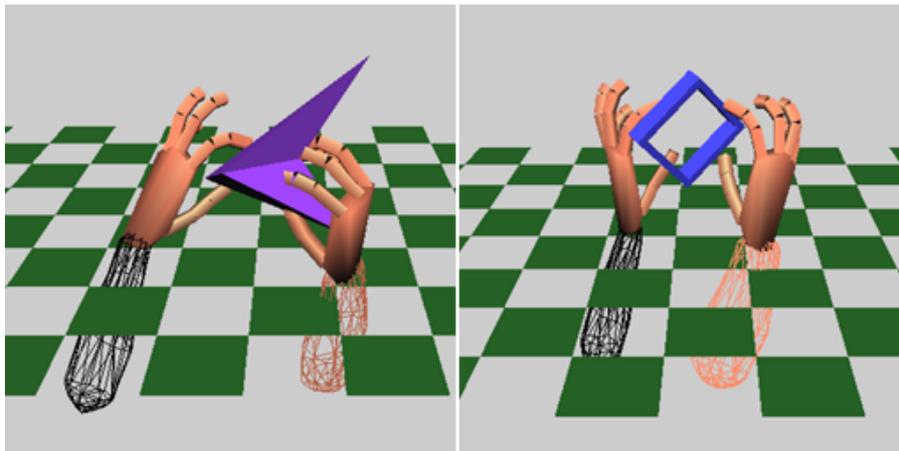


(a)大きな物体の操作
(a)Big object manipulation



(b)一方の手から他方の手への受け渡し
(b)Hand over manipulation

図 3.8 両手による様々な物体操作の例
Fig.3.8: Examples of both hands manipulation



(c)任意の多面体形状の物体操作
(c)Manipulation of arbitrary polyhedral objects

図 3.8 （ 続 き ）
Fig.3.8 (Continued)

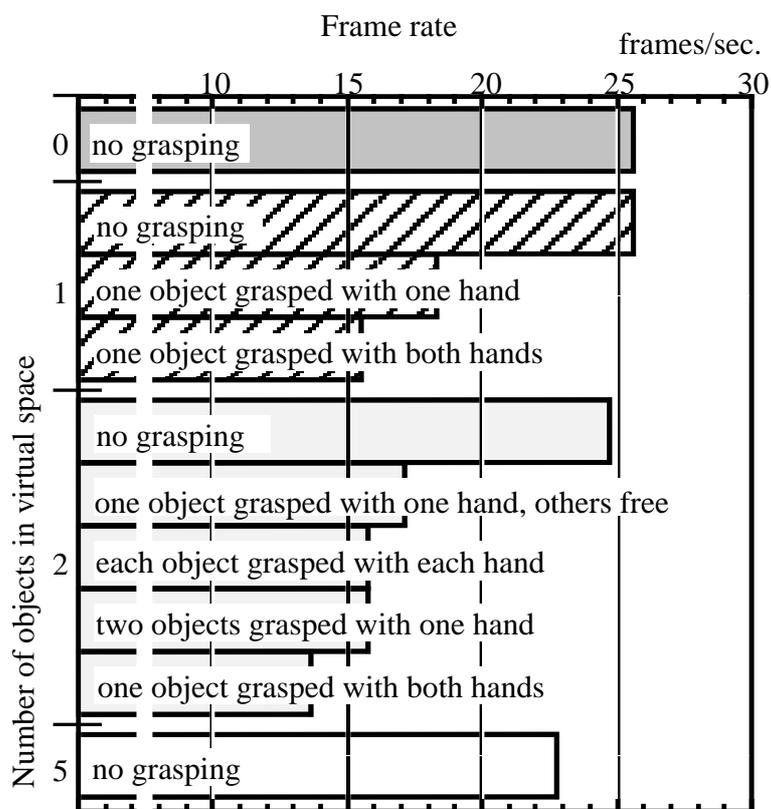


図 3.9 単位時間あたりの描画フレーム数
 Fig.3.9: Number of frames drawn in the unit time

物体の総数、および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3.9)。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 frames/sec. 程度の描画更新が必要であるといわれている[Brooks86]。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、物体同士の干渉において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がある。また、干渉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同時に少数の物体にしか触れないため、計算時間は許容できる範囲にあると考えられる。

また、32面、56稜線の多面体により近似した一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 frames/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 200MHz) 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3.9における上から3番目の操作「一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 frames/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、および、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。

3.5 むすび

本章では、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。

る。また、物体同士の干渉の表現、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。

参考文献

- [石井 94] 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, 電子情報通信学会技術研究報告 HC93-84, pp.31-36 (1994)
- [川勝 93] 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)
- [木島 95] 木島竜吾, 廣瀬道孝: Virtual Physics: 仮想空間の物体挙動計算, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.95, No.83, pp.105-112 (1995)
- [高橋 97] 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)
- [野間 97] 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)
- [平田 93] 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, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1788-1795 (1993)
- [藤沢 97] 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)
- [舟橋 97] 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, 電子情報通信学会技術研究報告 MVE97-71, pp.21-28 (1997)
- [舟橋 98b] 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協調操作モデル, 情報処理学会論文誌 (1998.5, 掲載決定)
- [Bergamasco94] 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)
- [Boulic96] R. Boulic, S. Rezzonico, D. Thalmann: Multi-Finger Manipulation of Virtual Object, Proc. ACM VRST, ACM, pp.67-74 (1996)
- [Brooks86] F. P. Brooks: Walkthrough - A Dynamic graphic system for simulating virtual buildings, Proc. Workshop on Interactive 3D Graphics '86, pp.9-21 (1986)
- [Huang95] Z. Huang, R. Boulic, N. Magnenat, 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)
- [Iwata90] 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)
- [Kunii94] 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)

