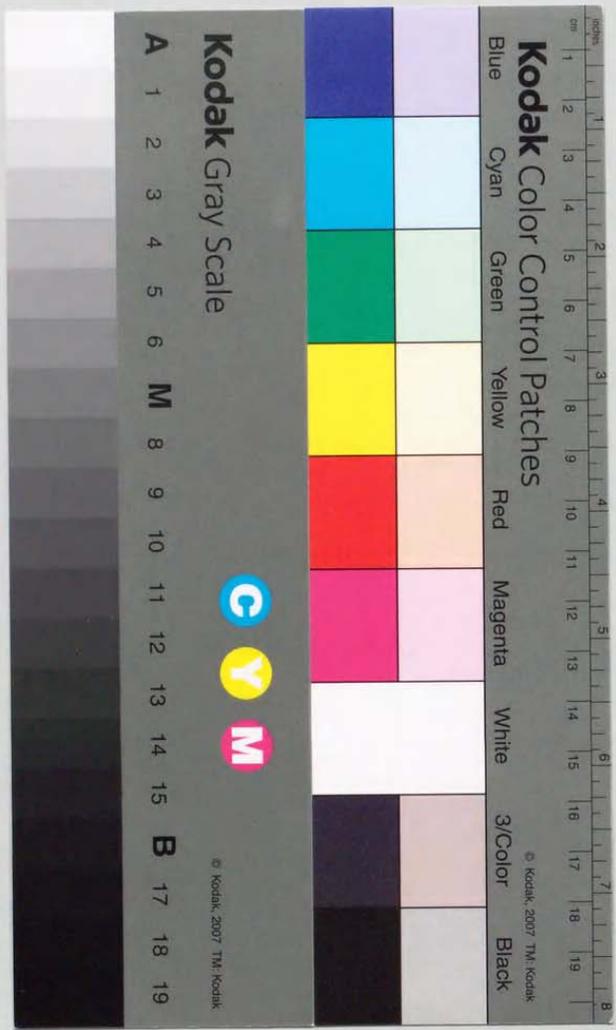


報告番号 甲第 4457 号

# 仮想空間における仮想手による 対話操作に関する研究

舟橋 健司



正誤表		
	誤	正
1章参考文献 [Kitamura93] (p.10, 23行目)	Operetor	Operator
4章 4.3.1 (p.83, 5行目)	しきい値以上か判定	しきい値以下か判定
謝辞 (p.99, 9行目)	東海章吾	東海彰吾
		大変失礼しました

仮想空間における仮想手による  
対話操作に関する研究

舟橋 健司



図 2.10 仮想物体操作システムの実験例

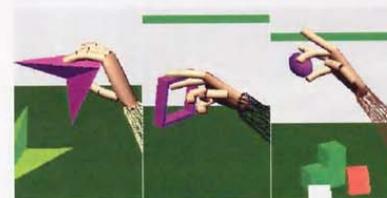


図 2.11 仮想手による任意多面体形状の物体操作



図 2.12 指先による物体を弾く操作

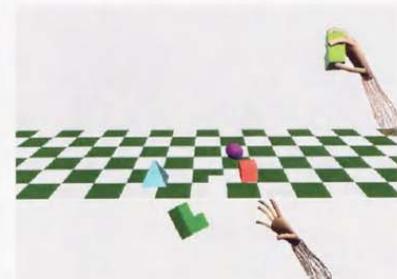


図 2.13 仮想手による物体を投げる操作

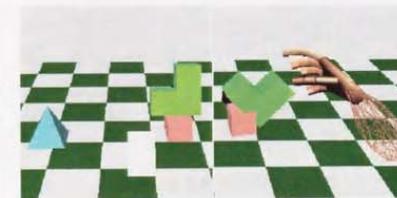
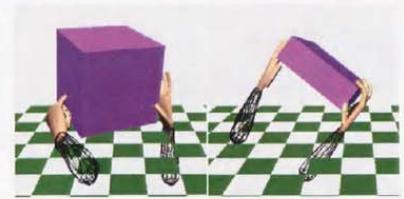


図 2.14 物体を他の物体の上に積む操作



(a)実際の操作の様子



(a)大きな物体の操作

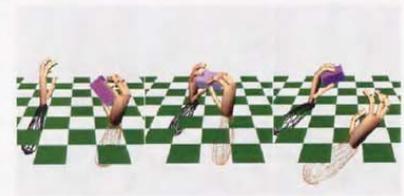


(b)CGで表現された仮想空間の様子

図 3.6 両手による1つの物体の操作例



(a)実際の操作の様子

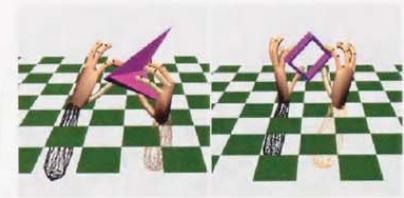


(b)一方の手から他方の手への受け渡し



(b)CGで表現された仮想空間の様子

図 3.7 それぞれの手による異なる物体の操作例



(c)任意の多面体形状の物体操作

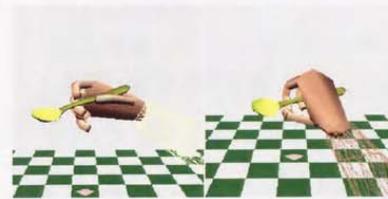
図 3.8 両手による様々な物体操作の例



(a) 実際の操作の様子



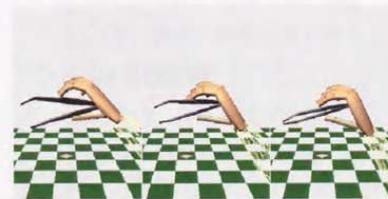
(d) 箸、ナイフ、ハサミの操作の様子



(b) スプーンに対する2種類の把持の様子



(e) スプーンによる物体の移動操作



(c) ピンセットに対する開閉操作の様子



(f) ピンセットによる物体の移動、変形操作

図4.10 仮想手による仮想道具を利用した仮想空間操作の例

## 目次

第1章 序論.....	1
1.1 バーチャルリアリティ技術の動向.....	1
1.2 相互作用モデルに関する研究.....	2
1.2.1 研究の背景.....	2
1.2.2 仮想の手による物体操作の研究.....	3
1.3 本論文の概要.....	7
参考文献.....	9
第2章 単一の仮想手による 物体操作モデル.....	13
2.1 はじめに.....	13
2.2 物体操作システムの基本方針.....	14
2.3 手による物体操作.....	15
2.3.1 仮想空間における手と物体.....	15
2.3.2 手と物体の相互作用モデル.....	18
2.4 仮想環境.....	25
2.4.1 重力, 慣性および摩擦.....	25
2.4.2 落下物体と床との干渉.....	25
2.4.3 物体同士の干渉.....	29
2.5 実験例.....	29
2.5.1 実験システムの構成.....	29
2.5.2 実験結果.....	29

2.6 むすび .....	44
参考文献 .....	44
<b>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 .....</b>	<b>47</b>
3.1 はじめに .....	47
3.2 片手による物体操作モデル .....	48
3.3 両手操作への拡張 .....	48
3.3.1 複数の手による操作 .....	48
3.3.2 様々な両手操作 .....	49
3.3.3 統合手の導入 .....	49
3.3.4 統合手の決定方法 .....	50
3.3.5 物体の両手操作の実現 .....	54
3.4 実験例 .....	57
3.4.1 実験システムの構成 .....	57
3.4.2 実験結果の一例 .....	57
3.5 むすび .....	65
参考文献 .....	66
<b>第4章 仮想手操作のための 仮想道具の一般表現 .....</b>	<b>69</b>
4.1 はじめに .....	69
4.2 仮想手による道具を介した物体操作 .....	71
4.2.1 仮想空間における道具の利用 .....	71
4.2.2 道具の分類 .....	72
4.2.3 ジェスチャによる道具の把持 .....	73
4.2.4 道具による物体操作の実現 .....	74
4.3 知識のプログラムからの分離 .....	77
4.3.1 道具に関する知識 .....	77
4.3.2 道具の把持, 操作の実現 .....	83

4.4 実験例 .....	87
4.4.1 実験システムの構成 .....	87
4.4.2 実験結果 .....	87
4.5 むすび .....	92
参考文献 .....	92
<b>第5章 結論 .....</b>	<b>95</b>
5.1 本研究の要約 .....	95
5.2 今後の課題 .....	96
謝辞 .....	99
付録 実験システムの構成 .....	101

## 第1章 序論

### 1.1 バーチャルリアリティ技術の動向

近年のコンピュータ技術の発達、なかでも計算能力、およびグラフィックス生成能力の進歩に伴い、コンピュータ上にデータとして定義された仮想的な空間をコンピュータグラフィックス(CG)により可視化することが可能となってきた。また、3次元座標や、身体の関節の曲げ具合を測定する入力装置、および触った感覚を提示するなど、視覚以外にうたえる出力装置の開発が盛んに行われている。これに伴い、仮想的な空間を与えられた映像として見るだけでなく、好きな位置から見る、さらには触れて影響をおよぼすなどの、仮想現実(Virtual Reality; VR)に関する技術開発、とりわけ、仮想世界を操作し、体験する方法の研究に期待が高まっている。

VR技術は、単なる工学的分野としてだけでなく、人間にとって利用可能な新しい空間(仮想空間)の実現のための技術として広く一般にまで知られ、また実用化にまで達しようとしている[服部91][廣瀬92][館92]。このVR技術により、我々は実世界において体験し得ない行為でも仮想的に体験が可能となる。例えば、宇宙や深海での作業のように何度もその場所へ行くことが困難な場合、原子力発電所などのように危険の存在する場所での作業、繰り返し行うことが不可能な手術などの訓練、教育、手順の確認、というように様々な応用が期待されている。

一般に仮想空間を構築し仮想体験を実現するためには、まず人間の五感の全て、あるいは一部に仮想空間の情報を提示するための出力装置、および人間の位置、見ている方向、身体の動作など仮想空間に対する意図を計算機に伝えるための入力装置が必要である。出力装置としては、最も一般的なものとして視覚を対象とした、CRTなどに代表される映像提示装置がある。現在普及してきている、グラフィックスをCRT上

に高速描画するためのハードウェアも出力のための装置に含むことができるであろう。さらには、両眼視差を利用した HMD (Head Mounted Display) などのように立体映像の提示を可能とするための装置もある。また近年は、触覚 (力覚) を対象とした、触れている感覚、押し戻されるような力を提示する装置が研究開発されている。一方、入力装置については、従来のマウスのみ利用にとどまらず、磁気や超音波などを利用した 3 次元座標の計測の可能な 3 次元マウスが普及してきている。また、データグローブなどに代表されるグローブ型の指関節の曲げ角を測定可能な装置、これを身体に拡張した腕や脚の曲げ角の測定装置も実用化の域に達している。しかし、このような装置を使用すれば直ちに仮想体験が実現できるかという点、決してそうではない。

仮想空間の構築、仮想体験の実現には、入出力装置だけではなく、これらを制御するためのソフトウェアが特に重要な役割を演ずる。具体的には、まず体験者とは無関係に、仮想空間内にどのような物体が存在し、それらがどのような動きをするかなどを設定しておく必要がある。さらに、体験者 (操作者) が入力装置を介して伝えた意図に対して、空間内に存在する物体がどのような影響を受け、どのように見えるかを決定し、その視覚、触覚情報などを体験者に提示するために、出力装置を制御する必要がある。本論文は、この仮想空間と操作者との間の計算機内の様々な相互作用に対するモデルについて述べたものである。

## 1.2 相互作用モデルに関する研究

### 1.2.1 研究の背景

相互作用とは、「複数の物体が何らかの干渉により互いに作用をおよぼすこと」を意味するが、2 個の物体が存在する場合には、まず一方に注目し、それが他方に影響を与え、更にそれにより影響を受けるというように分けて考えることができる (他方についても同様)。すなわち、それぞれを操作を行うもの (操作者) と、操作を受けるもの (被操作物体) と考える。そして仮想的な体験をする者は、操作者となるのが一般的である。ところで、我々が実世界で様々な操作を行う場合、自らの身体により被操作物体に干渉を与えることにより行うが、なかでも主に手により操作を行うことが多い。また、手で道具を利用することにより物体操作を行うことも多いであろう。仮想

空間内に存在する物体 (仮想物体) に対して操作を指示する方法としては、現状ではキーボードやマウスなどを利用して操作対象の選択、操作の種類、操作量の指定を行うことも可能である (図 1.1 (a))。しかし実世界に近い感覚で、自身の手により仮想物体に対する操作を行うこと (同図 (b))、あるいは仮想空間内に定義された道具 (仮想道具) を利用して操作を実現すること (同図 (c)) が可能となれば、VR 技術の応用はより広範囲に及ぶものとなり得る。例えば、医学での手術シミュレーションについて見れば、手術自体の計画や可能性の評価であれば、実際の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はない。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倣できることが望まれる。このようなことは、産業界での設計や訓練、教育などの用途でも同様である。さらには図 1.1 (d) に示すような、自身の手により仮想道具を直接利用した、仮想物体操作の実現も重要な技術となるであろう。

### 1.2.2 仮想の手による物体操作の研究

このような状況の中で、最近、操作者の手に対応して動く仮想空間内に定義された手 (以下、仮想手と呼ぶ) による、仮想物体操作に関する基礎技術を確認するための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]。これらは、例えば (1) 手と物体との干渉判定に関しては二本の指先のみ判定に限定する、あるいは、(2) 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ある程度とらえてはいるものの、一般に強い制約条件を課している。文献 [Boulic96] 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。さらに、限定的に一つの手であることを利用しているため、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 [石井94][野間97][藤沢97][高橋97]。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、二つの手の中心位置に物体を移動す

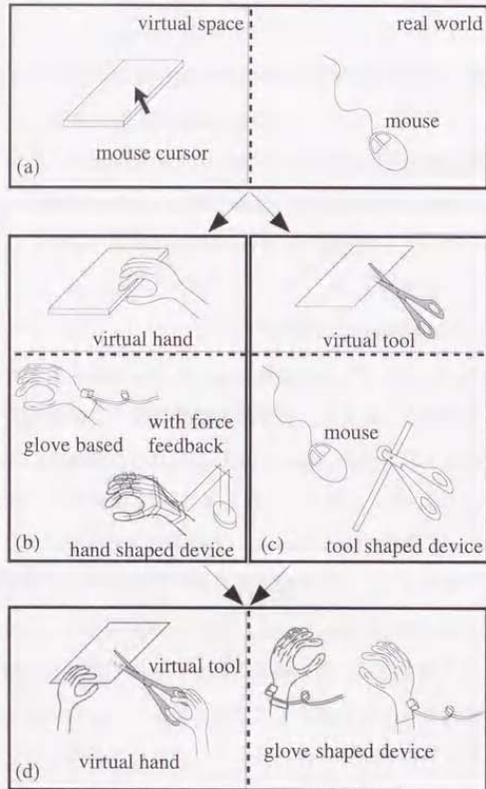


図 1.1 様々な方法による仮想空間操作  
Fig.1.1: Several methods of manipulate objects in vitrual space

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た。

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[ロボット学会 90]. 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り, また操作中の状況を計測することが可能である。しかし, 計算機内のみで状況を再現する必要がある場合にも, 実際の干渉をモデル化する際の参考となるであろう。

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る研究も多数行われている[Moore88][Kitamura93][Shinya95][Braff95][武田96]. しかしこれらは, 一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。

また, 仮想空間内に道具を定義し, その道具による操作を実現するためのモデルの提案がなされている[北川96][野口96]. これらは, マウスや対応する道具の形状をした入力装置を実世界の手で扱うことにより, 仮想道具を利用して物体操作を行うものである。

VR技術による仮想空間という概念を考慮すると, 物体を操作するためのこれらの研究は以下のように分類整理できる(表 1.1)。

表 1.1 (1) は, 実世界における物理法則に従ったものである。物理学の分野において研究がなされている。

表 1.1 (2) は, 仮想空間内のみでの現象であり, 実世界との対比や, 計測, リアルタイムのインタラクションという問題がないため, 厳密な力学計算が可能である。そのため, 仮想空間内のみでの物体同士の相互作用について考慮する, あるいは事前に指定しておいた仮想物体に対する操作を考慮する場合も, 映像生成に必要な時間を考えずにアニメーションを作成することが可能である。

表 1.1 (3) は, 計算機によりロボットを制御する場合等である。計算機は実世界の物体がどこにあるかを把握し, またどのように操作するかを計算する, すなわち CRT などへの表示を行わなくとも仮想空間内で作業をしていると考えられる。この場合, 計算に必要な力などの計測が容易であるが, 以下の2つとは実空間と仮想世界との関係に

表 1.1 様々な状況における物体操作  
Table 1.1: Several kinds of object manipulation

	Real world	Virtual environment
(1) real manipulation		
(2) simulation		
(3) robot		
(4) with force feedback		
(5) without force feedback		

- : manipulator
- : object
- : interaction
- : data flow, matching manipulators

において操作の方向が逆である。

表 1.1 (4) は、実世界から仮想空間に存在する物体を操作し、その結果に応じた力覚が実世界へフィードバックされる場合である。力覚フィードバックを行うことにより操作者の手を拘束して仮想手と一致させること、および力の計測を行うことが容易となる。しかし、装置が大きなものになってしまうだけでなく、現時点では力覚を完全にフィードバックすることは困難であるといった問題点がある。

表 1.1 (5) は、上記(4)と同様な実世界からの仮想物体の操作であり、力覚フィードバックのない場合である。仮想物体により仮想手の動きが制約された場合、実物体を持たない操作者の手と一致しなくなるだけでなく、力の計測を直接行うことは不可能である。

VRの分野において仮想空間操作、あるいは仮想物体操作という場合、一般的には上記(4)、(5)を指す場合が多い。本論文では、上記(5)の状況である力覚フィードバックのない環境を対象としているが、これら(4)と(5)を実現するための手法は互いに応用可能なものである。また図 1.1 (d) に示すような、仮想手による仮想道具を利用した間接的な仮想物体の操作も対象としている。

### 1.3 本論文の概要

本論文では、仮想空間に存在する物体を、仮想手により直接、あるいは道具を利用して操作するためのソフトウェアに関して述べる。これを、実世界と同じように行い同等な結果を得るためには、物理法則を仮想空間と実際の操作を行う実空間において直接適用する必要がある。しかし、いつインタラクションが行われるかは事前に分からないため、方程式の近似解を逐次的に求めていくことになる。この場合でも極めて複雑な干渉判定や力学計算を要するため、リアルタイム操作に適用するモデルとしては利用できない。また、判定、計算に必要となる実世界における様々な値を厳密に測定するための装置も必要となるが、現時点で実用化の段階にあるものは限られたものを対象とした装置だけである。そこで、本文では仮想手の記述や、手と物体の干渉状態、物体の運動などについて単純化したモデルを提案し、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について述べる。このモデルは、実際の

動作を考察し、動作のリアルタイム性を損なわない範囲で模倣したものである。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い。また、仮想空間に対する操作の正確さ、迅速さを第一に追求するものでもなく、実物の操作をモデル化した違和感の少ない操作を仮想空間の物体操作として実現することである。

実世界において手により操作を行う状況は多数存在し、それらを仮想的に体験する場合も手による操作の実現が望まれるであろう。そのため、本手法は今後のVR技術の発展に大きく貢献するであろうと期待できる。

以下、本文の第2章では、片手で直接物体に触れ、自由に移動するためのモデルについて考察し、実際に構築した対話操作システムについて述べる。ここでは、実際には複雑な形状である手を実際の動作の特徴を保存した単純化を行い、この手と物体との細かな干渉に注目した実際の現象に基づく相互作用のモデルについて述べる。また、物体を操作可能ということは、操作せずに離しておくこともある得る。そこで操作対象となっていない物体の挙動についても考察し、リアルタイム操作に適用可能な物体の運動を記述するモデルについても述べる。

第3章では、両手で同じ物体に触れ、移動するためのモデルについて考察し、構築した対話操作システムについて述べる。ここでは、操作者が両手で同じ物体に触れて移動を行う場合は、その物体をある位置まで移動したい、という目的を持っており、両手が全く無関係な動きをすることは少ないことに注目している。第2章で提案する片手と物体のモデルを基に、それぞれの手の動き、および物体に対する接触状況の関係を利用して拡張した両手と物体との相互作用モデルについて述べる。

第4章では、片手で道具を操作し、その道具を介して物体を操作するための手法について考察し、実際に構築した実験システムについて述べる。ここでは、特定の道具について言及するのではなく、一般的な道具の特徴について考察し、同一のシステムに新たな道具のデータを与えるだけで様々な道具を利用可能とする。このデータは、各道具に応じた自身の形状はもちろん、手と道具との相互作用、最終的に影響を与えたい物体との相互作用を有する必要がある。このために必要な要素について考察し、一般的な道具のデータ構造について述べる。

また、上述の各章ごとに、実現した対話操作システムのリアルタイム性、操作性な

どを、実験結果に基づいて様々な側面から考察し、また解決すべき問題点について述べる。

最後に第5章では、仮想空間内で、仮想の手により物体の操作を一般的に実現する上で問題となった点、現在残されている課題、今後の発展の方向について論ずる。

## 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, 電子情報通信学術研究報告, Vol.95, No.83, pp.105-112 (1995)
- [北川96] 北川英志, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間操作を利用した対話型手術シミュレーションシステムの基本機能の実現, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.6, pp.1088-1098 (1996)
- [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)
- [武田96] 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, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.5, pp.860-869 (1996)
- [館92] 館 暉, 廣瀬道孝: バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, 1992
- [野口96] 野口博和, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想ハサミによる切断操作のモデル化と実現, NICOGRAPH 論文集, pp.22-31 (1996)
- [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)
- [服部91] 服部桂: 人工現実感の世界, 工業調査会, 1991
- [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)
- [廣瀬 92] 廣瀬通孝: バーチャル・リアリティ応用戦略 - 人工現実感の産業応用最前線 -, オーム社, 1992
- [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)
- [ロボット学会 90] 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
- [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)
- [Braff95] D. Braff: Interactive Simulation of Solid Rigid Bodies, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.15, No.3, pp.63-75 (1995)
- [Huang95] 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)
- [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)
- [Kitamura93] 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)
- [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)
- [Moore88] M. Moore and J. Wilhems: Collision Detection and Response for Computer Anima-

- tion, Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.289-298 (1988)
- [Shinya95] M. Shinya and M.-C. Fergue: Laying out Objects with Geometric and Physical Constraints, The Visual Computer, Vol.11, No.14, pp.188-201 (1995)

## 第2章 単一の仮想手による 物体操作モデル

### 2.1 はじめに

本章では、力覚フィードバックのない環境において、センサをとりつ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[Funahashi95][舟橋96][舟橋98]。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。

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。

仮想物体と仮想手の相互作用に関しては、1.1.2節で述べたように様々な検討がなされている。まず、文献[Bergamasco94]で、仮想手による物体把持に関する問題の整理がなされている。次に文献[川勝93]では、物体の把持において親指が利用される場合が多いことに注目したモデル化がなされている。文献[Kunii94]では、力学に基づいた仮想物体の把持について検討されている。文献[木島95]では、力学的手法と幾何学的手法、それぞれに注目した手法について検討されている。しかし、操作を指先のみに限定するなど、制約の強い操作方法である。また文献[Huang95]では、指先だけではなく関節の部分など、指の中間での接触を考慮した干渉について研究されているが、掴んで移動するなどの動作は考慮されていない。さらに文献[Iwata90][平田93]では、仮想手と仮想物体の干渉時における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ている研究の多くに見られるように、相互作用モデルに関しては非常に簡略化されていることが多い。

## 2.2 物体操作システムの基本方針

本節では、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。動画における画質に関しては、一般的に 24 frames/sec での描画更新が必要と言われており、関連した様々な研究がある[テレビ学会90]。また、例えば文献[武田96]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 frames/sec 程度の描画更新が必要であると言われる。そこで本研究では、12 frames/sec をリアルタイム処理の指標とし、目標の一つとする。

次に、仮想空間の手で同じく仮想空間の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 2.3.1 節で詳しく述べるが、手と物体は点でのみ干渉するものとする。この場合、様々な物体操作は

- (1) 一点により押す
- (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、2.3.2 節において、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（掴んで移動し、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（2.4 節）。

## 2.3 手による物体操作

### 2.3.1 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なうために、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2.1）。更に、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、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、手の位置、方向、動きを以下のように定義する。

- ・手首に基準点を設定し、これを空間内の仮想手の位置とする。
- ・手首に設定した基準点から中指へ向かうベクトルの方向、およびこのベクトルを軸とする手全体の回転量を手の方向とする。
- ・上記、手の位置、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、変形と把持が互い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

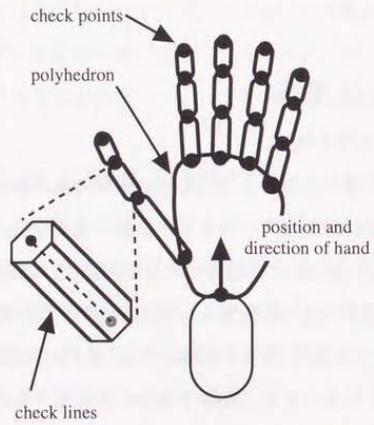


図 2.1 仮想手のモデル  
Fig.2.1: Virtual hand model

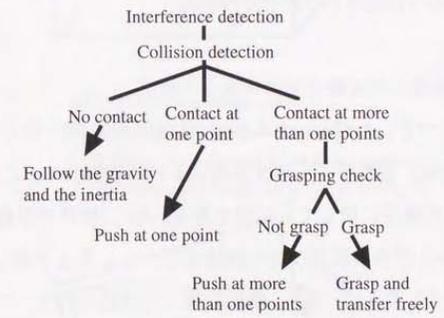


図 2.2 手と物体の相互作用モデル (状態判定手順)  
Fig.2.2: Interaction model between the hand and an object

現される剛体に限定する。また、物体は可動部分をもたず、固定されていないものとする。物体を構成する各面、稜線はそれぞれ、仮想手の個々の判定点、判定線分と干渉し得る。

### 2.3.2 手と物体の相互作用モデル

本節では、片手と、1つの物体との相互作用モデルについて述べる。図2.2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、一点による接触、複数点による接触に分けて考えることができる。さらに複数点接触の場合には、把持、非把持の2つの状態が考えられる。そこで共に移動し得る全ての物体と手に関して、外接球などによる干渉の概略判定の後、

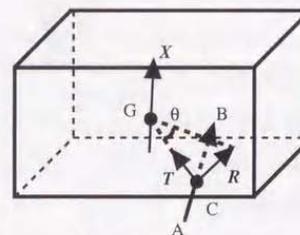
(A)物体の各面と各指の判定点との衝突点の検出、

および、

(B)物体の各稜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。ただし、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。判定線分に関しても同様である。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2.4.1節で述べるように、重力、慣性に従った運動を行う。この時、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2.3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



AB : Locus of a collision point C  
 T : Element of the translation vector  
 $\theta$  : Rotation angle decided by rotation element R  
 X : Rotation axis through the center of gravity G

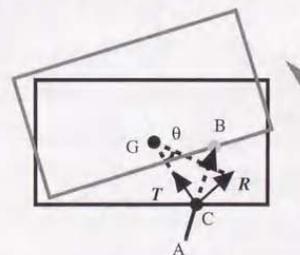


図2.3 1点による押す操作  
 Fig.2.3: Pushing an object at one point

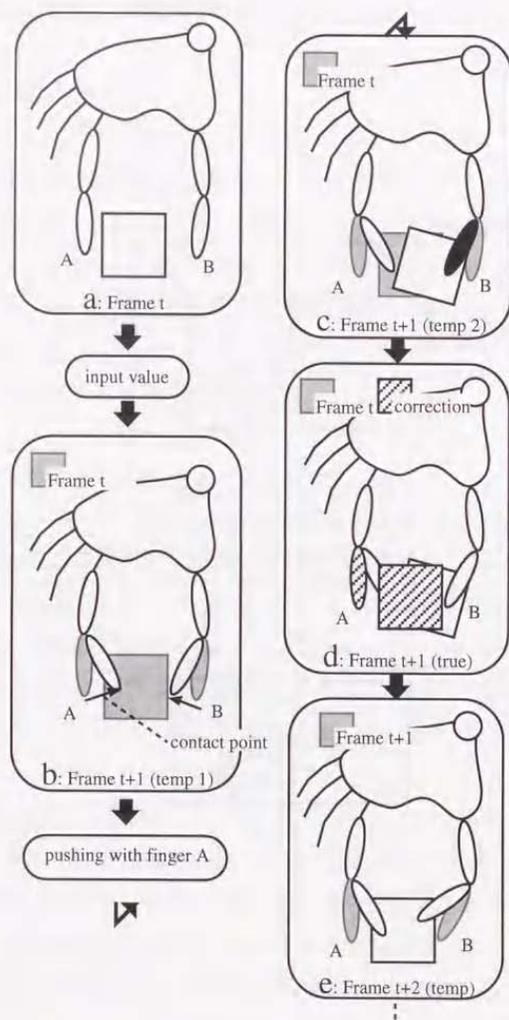


図2.4 1点による押す操作における指の補正  
Fig.2.4: Finger correction for pushing at a point

ル  $CB$  を、次に従いベクトル  $T$  とベクトル  $R$  に分ける。

$$CB = T + R, \quad CG \parallel T, \quad T \perp R. \quad (2.1)$$

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  $\theta$  だけ物体を回転することにより近似表現する。ただし、ベクトル  $X$ 、角度  $\theta$  は次式による。

$$\theta = \arctan(\|R\| / \|CG\|), \quad X = R \times T. \quad (2.2)$$

$CB \parallel CG$  の時には、 $T = CB, R = 0$  となり、平行移動のみ、また、 $CB \perp CG$  の時には、 $T = 0, R = CB$  となり、 $X = R \times CG$  を軸とした回転のみとなる。

ところで、図2.4に示すように、指Aにより物体を押しした結果、指Bが物体に入り込んでしまう場合がある(図2.4-b, c)。指Bの位置を変更することによる入り込みの補正も考えられるが、指Bは動いていない場合もあり、実世界との差異が大きくなる。そこで、指Aの各関節の角度、物体を前フレーム(図2.4-a)の状態に再設定することにより補正を行う(図2.4-d)。操作者が物体の把持を意図しているならば、さらに手を握ることにより物体把持が可能である(図2.4-e)。

(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場合には、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る可能性がある。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、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。全ての組合せの法線のなす角がしきい値を越えない場合、仮想手は複数点により物体を押していることになる。ただし、物体の重心から稜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2.5)。例えば図2.5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  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$  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。また、指が物体の中に入り込んでいる場合、以下のような補正を行う。

把持となる例を図2.6に示す。上述の衝突点検出の結果、仮想手が2点以上で物体と接触している場合は、仮想手の接触している部分は物体に入り込んでいる(図2.6-b)。入り込みを補正しないと、次の処理において仮想手と物体は干渉してはいるが、衝突点検出されない。補正の一手法として判定点を接触点に一致させる方法があるが、近似直線上に求めた接触点に、実際は直線上を移動しているとは限らない判定点を一致させることは、計算時間の増加を伴う。そこで、物体と干渉のあった指の各関節のみ前フレーム(図2.6-a)の角度に再設定し、描画を行う(図2.6-c)。ところで、複数点の操作による物体の挙動はそれぞれの接触点の位置関係により非常に複雑となるため、対話的処理を行う時間内にこれを忠実に再現することは困難である。そこで、物体把持(Frame t+1)の場合は手の位置、方向の変化(Frame t+1 ~ t+2)に伴い物体を移動する。次の時点での処理において、操作者の手が仮想物体を把持した状態である(把持と判定される)ならば、仮想手の物体把持は継続される(図2.6-d)。

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2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(2.4.3節参照)。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。また、物体把持の場合と同様に、指の入り込みを補正する。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を行うよりも主に物体を把持して移動を行うため、これは現実的な簡略化である。

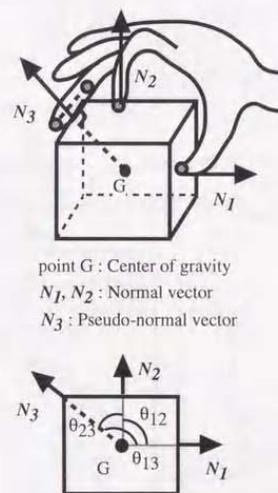


図2.5 疑似法線および把持判定  
 Fig.2.5: Pseudo-normal vector and grasping check

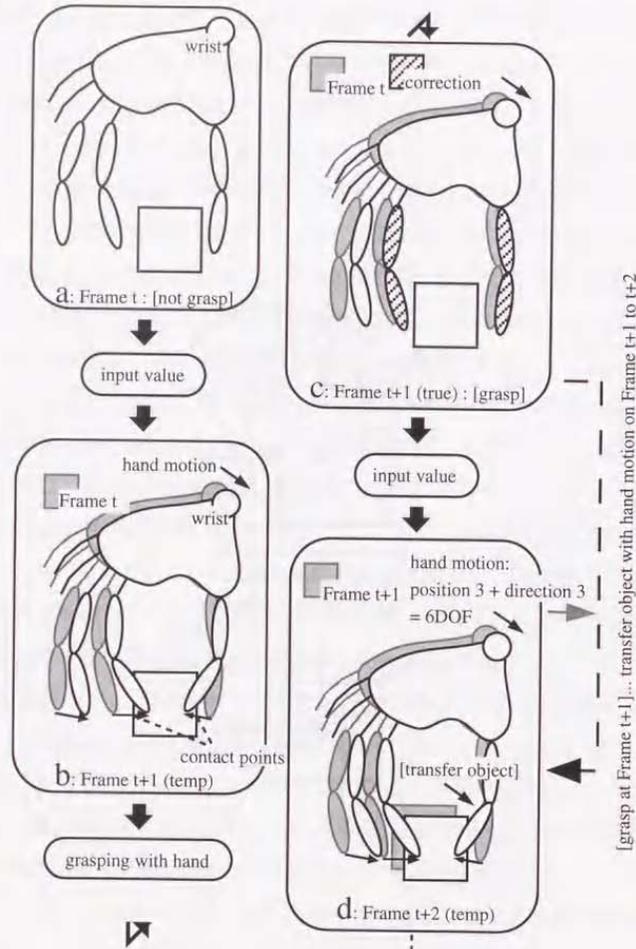


図 2.6 物体把持における指の補正  
Fig.2.6: Correction of fingers for grasping an object

## 2.4 仮想環境

### 2.4.1 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。さらに、それらの物体が常に操作対象になりう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  $P(t)$  は、時刻  $t-\Delta t$  の位置  $P(t-\Delta t)$  に変化分  $P(t-\Delta t) - P(t-2\Delta t)$  と重力による加速として  $g\Delta t^2$  を加えるものとし

$$P(t) = 2P(t-\Delta t) - P(t-2\Delta t) + g\Delta t^2 \quad (2.3)$$

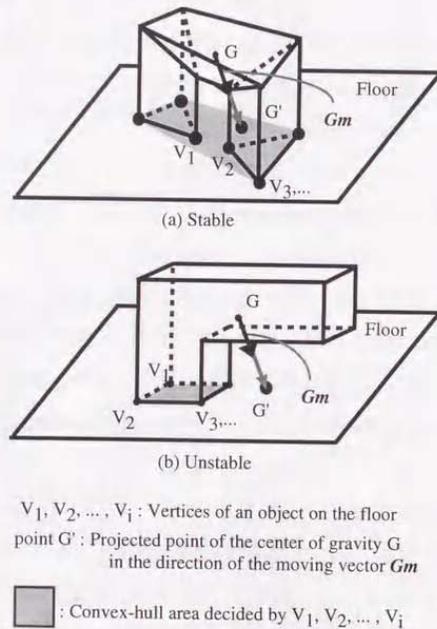
により決定する。ここで、 $g$  は下向きの重力加速度ベクトルであり、描画更新間隔  $\Delta t$  は描画更新レート  $F$  (frames/sec) の逆数である。すなわち、物体を投げた場合などは、 $(P(t-\Delta t) - P(t-2\Delta t)) / \Delta t$  が初速度となる。回転についても、重心を中心とする相対的な回転を継続する。また、床もしくは他の物体と干渉した後は慣性は保存せず、物体は跳ね返らないものとする。さらに摩擦に関しても、力学的な計算は行わず、物体は滑らないものとする。このような仮定を設けることにより、仮想手の影響下でない動いてい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。

### 2.4.2 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  $\Delta t$  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 2.7)。ここで物体の重心  $G$  の移動ベクトル  $Gm$  方向への、 $G$  の床面上の射影点  $G'$  を求める。すなわち、

$$Gm = P(t-\Delta t) - P(t-2\Delta t), \quad (2.4)$$

$$Gm // GG'. \quad (2.5)$$



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

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

図2.7 床面における物体の安定判定  
 Fig.2.7: 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2.7 (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2.7(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2.8 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3つの状態を考える [Funahashi95][舟橋98].

(1) 1点  $V_i$  による接触 (図2.8(1))

点  $V_i$  を点  $C$  とする (図2.8(1)). 指先など1点による押す操作と同様に, ベクトル  $Gm$  を次式に従い滑り, 跳ね返りの成分となるベクトル  $T$  と, 回転成分であるベクトル  $R$  に分ける.

$$Gm = T + R, \quad CG \parallel T, \quad T \perp R. \quad (2.6)$$

ただし, ベクトル  $T$  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およ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  $X$  を軸とし, 角度  $\theta$  だけ回転移動する.  $Gm \parallel CG$  の時は, バランスのとれた状態であり移動は行わない. ただし, ベクトル  $X$ , 角度  $\theta$  は次式による.

$$\theta = \arctan(\|R\| / \|CG\|), \quad X = R \times T. \quad (2.7)$$

(2) 2点  $V_1$  と  $V_2$  による接触 (図2.8(2)-a, b)

点  $V_1$  および  $V_2$  を通り, 直線  $V_1V_2$  に垂直な直線をそれぞれ床面上に求める. 重心  $G$  のベクトル  $Gm$  方向への射影点  $G'$  が, この2本の直線間に位置しないならば (図2.8 (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2.8(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. この場合も (1) と類似の方法で, 直線  $V_1V_2$  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2.8(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, 全ての接点が移動するのではなく, 2点もしくは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, もっとも点  $G'$  に近い2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.

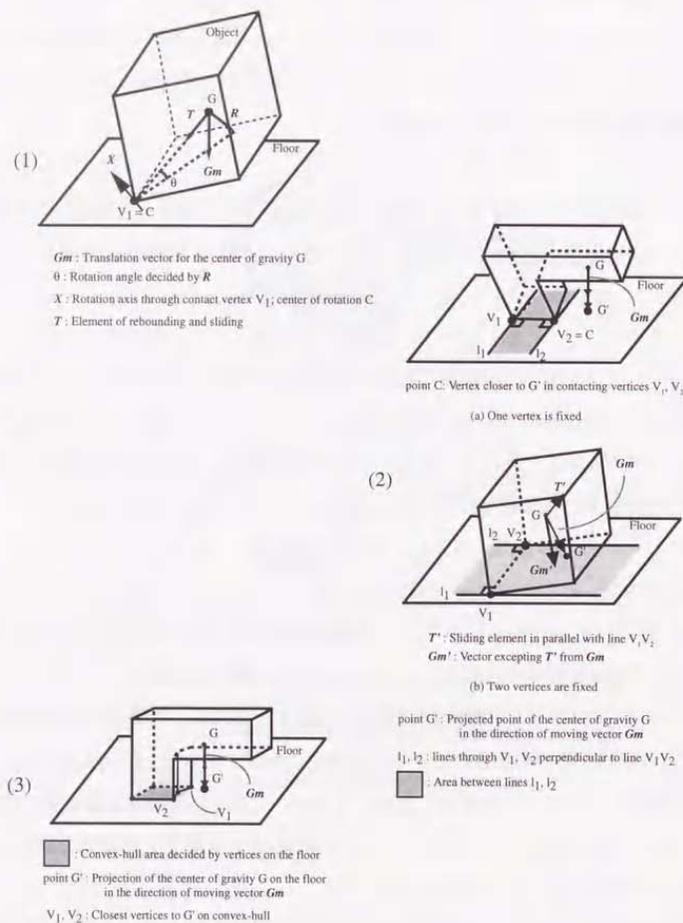


図 2.8 床面における物体の挙動  
 Fig.2.8: Motion of an object on the floor

### 2.4.3 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[Shinya95]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  $O_n$  に触れて物体  $O_n$  を動かした結果、その物体  $O_n$  が他の物体  $O_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) に干渉するならば、それら物体  $O_i$  は物体  $O_n$  の平行移動成分に対応した平行移動のみ行い、回転移動は行わないものとする。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。

## 2.5 実験例

### 2.5.1 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上で、C言語により実現した。本システムの構成、および、実際の処理の流れを図 2.9 に示す。操作者へのCGによる映像提示では、立体視を行うことも可能である。使用した計算機、操作者の手の位置、方向、および各指の関節の角度、手首の角度等を入力するための装置などの詳細については付録で述べる。

### 2.5.2 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

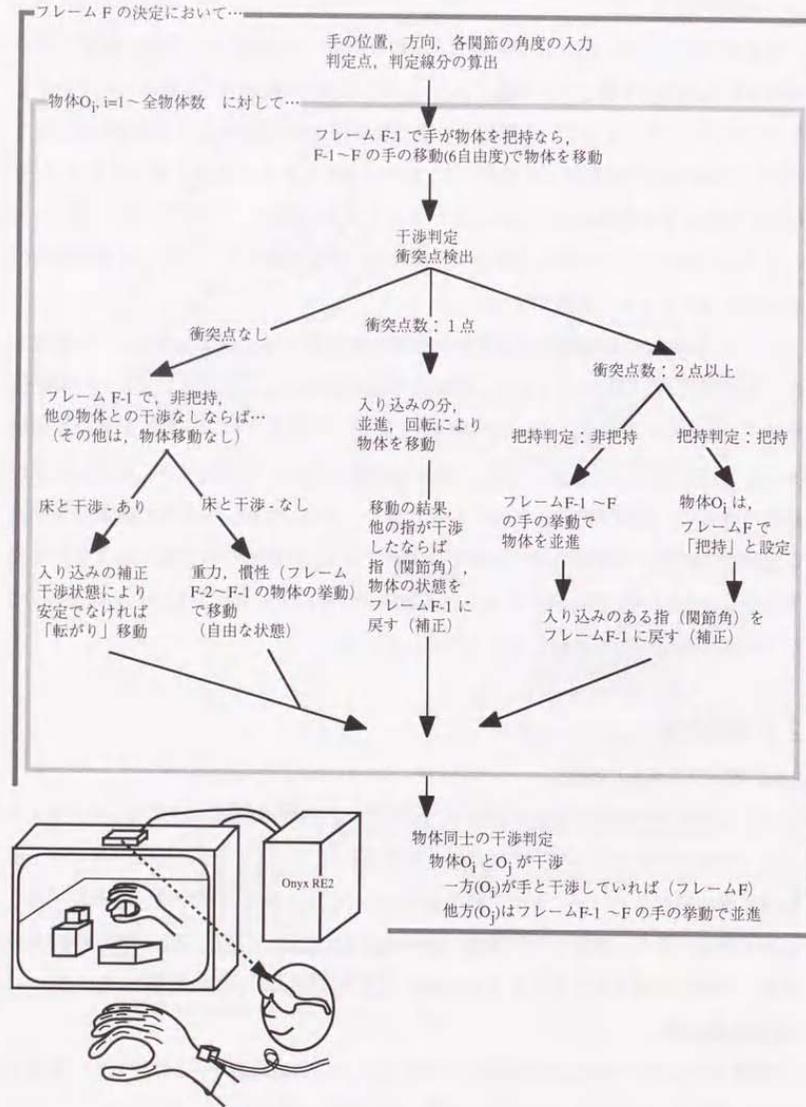
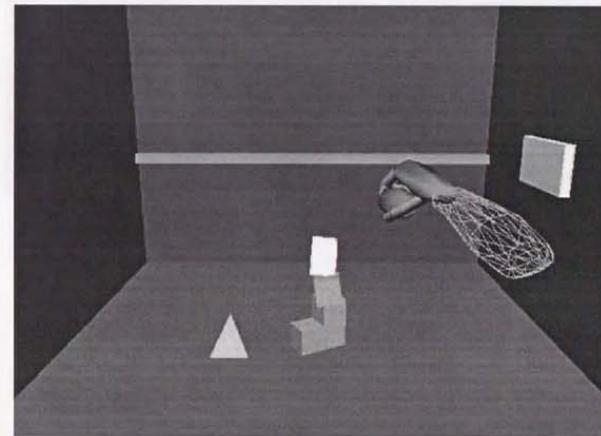


図 2.9 システムの構成と処理の流れ  
Fig.2.9: System configuration and processing flow



(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 2.10 仮想物体操作システムの実験例  
Fig.2.10: Examples of manipulating objects with a virtual hand

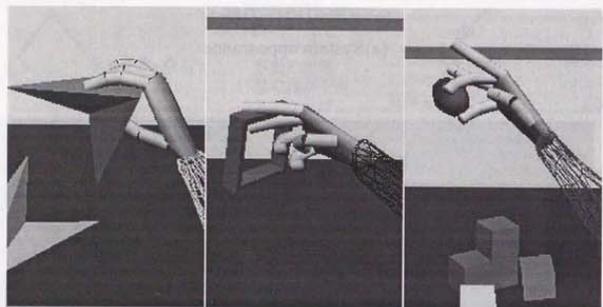


図 2.11 仮想手による任意多面体形状の物体操作  
Fig.2.11: Manipulation of objects (arbitrarily shaped polyhedrons) with a virtual hand

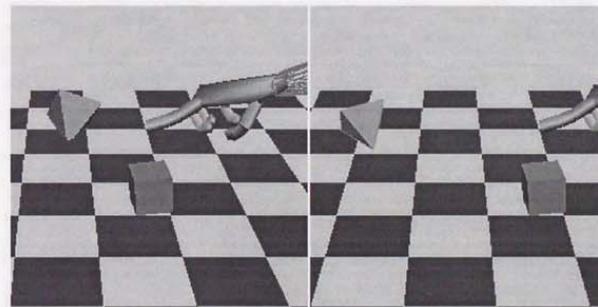


図 2.12 指先による物体を弾く操作  
Fig.2.12: Flipping an object with a finger of a virtual hand

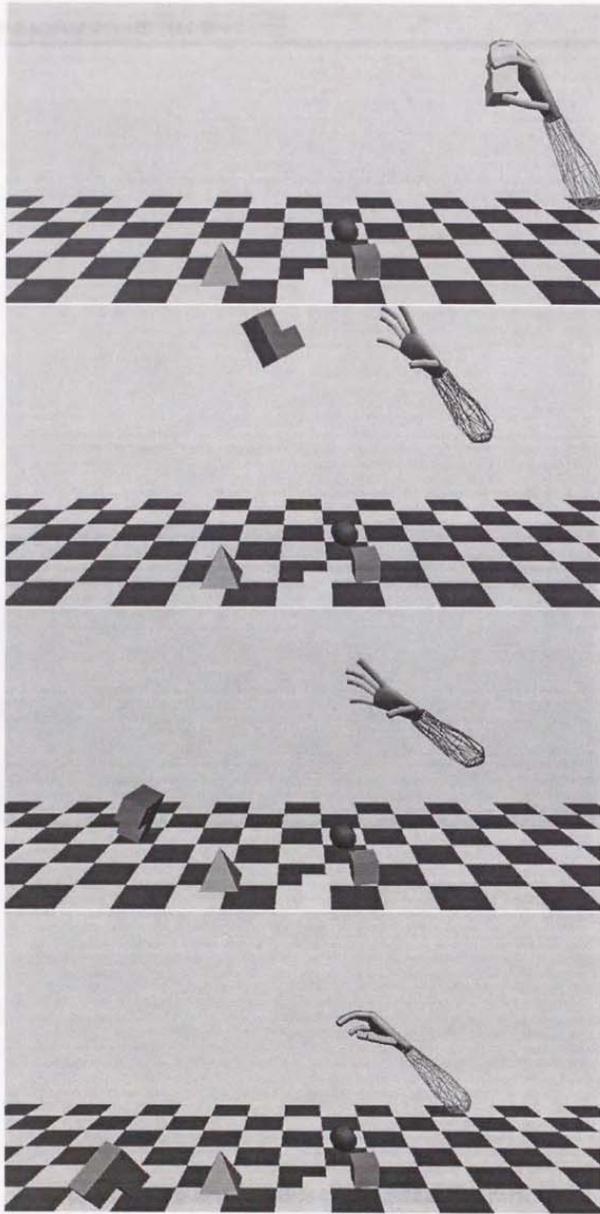


図 2.13 仮想手による物体を投げる操作  
Fig.2.13: Throwing an object with a virtual hand

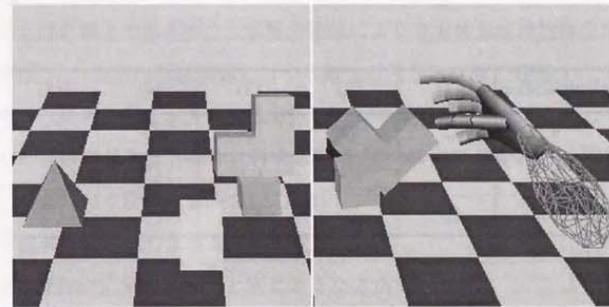


図 2.14 物体を他の物体の上に積む操作  
Fig.2.14: Putting an object on another object with a virtual hand

表 2.1 各操作に対する評価  
Table 2.1: Evaluation for each manipulation

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

- (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

操作例として図 2.10 (図 2.10 - 2.14 は口絵参照) に、実際に仮想空間内の物体を操作している様子と、計算機内で構築した仮想空間の CG 映像を示す。また図 2.11 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 2.12 は、人差し指で四角錐をはじいた様子である。また図 2.13 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分かる。図 2.14 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(2.4.3節)と、立方体形状物体に対する床への入り込み補正処理(2.4.2節)により、右側の図のように物体同士が互いに入り込む、という問題がある。

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 2.1 に示す。

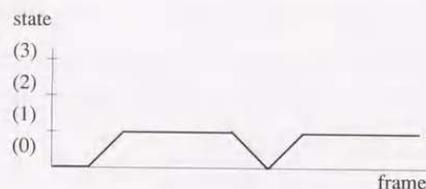
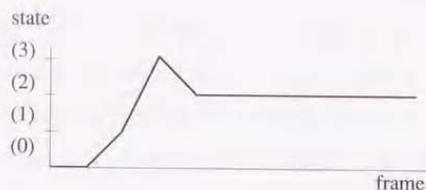
全般に、被験者から次のような評価を受けた。

- ・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始めてわかるため、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 2.1 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る。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。



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

図 2.15 接触状態の推移の例  
 Fig.2.15: The change of the contact state

さらに、操作(1)において被験者は主に物体を把持していた。この時、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2.15に示す。他の操作の場合も、概ね同様の結果が得られた。これらのことから、2.3.2節(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ション)」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2m前方にある半径15cmの標的にブロックを当てる、というゲーム方式をとった。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、触った感じが無い(力覚フィードバックが無い)、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 $\Delta t$ を固定せずに、判定点20、

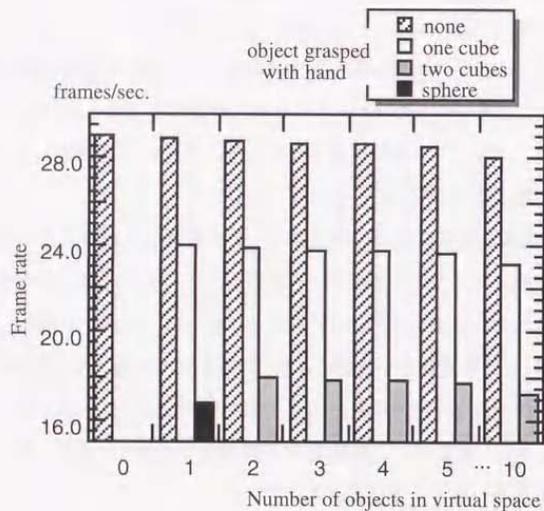


図 2.16 単位時間当たりの描画フレーム数  
Fig.2.16: Number of frames drawn in the unit time

判定線分 60 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. 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 秒あたりに描画可能なフレーム数により示す (図 2.16). また, 32 面, 56 稜線により近似した一つの楕円球 (図 2.10(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 frames/sec の描画更新が可能である. そのため, 当初の目標である描画更新レート 12 frames/sec 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, 稜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 frames/sec 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 2.16 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.

[実験 4] また操作の正確性, 迅速性に関する実験として 5 名の被験者 A~E に以下の 2 種類の操作を各 10 回, 行ってもらった. 被験者は実験前に数分間の練習を行っている.

- (1) 2 個の物体をやや離して配置し, 一方の物体を押して移動することにより他方の物体に接触させる (図 2.17 (1))
- (2) 2 個の物体をやや離して配置し, 一方の物体をつかんで移動し, 離すことにより他方の物体の上に乗せる (図 2.17 (2))

各被験者に対するそれぞれの操作に要した時間の平均を表 2.2 に示す. 他の操作システムとの比較ではないため一概には言えないが, 操作性に関しても大きな問題はないと思われる. しかし実世界での同じ物体操作に比べて遅いと思われるので, 操作性をより向上させることは必要であろう.

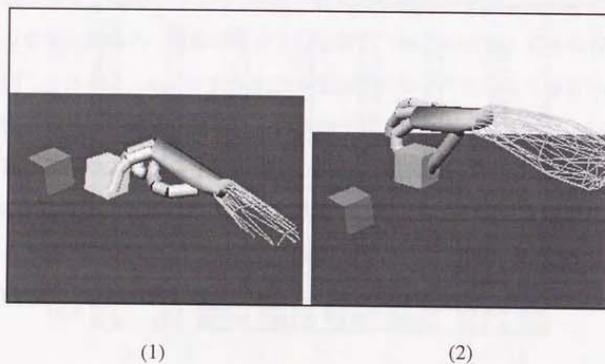


図 2.17 実験を行った操作  
Fig.2.17: Examples of manipulation for experiment

表 2.2 各操作に要する時間

Table 2.2: Required time for each manipulation

manipulation \ subject	(sec.)				
	A	B	C	D	E
(1) contact objects	8.3	5.6	5.3	4.3	6.3
(2) put on another	16.0	10.7	18.3	14.7	12.0

## 2.6 むすび

本章では、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ほぼリアルタイムの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]

- ・複数の指で押した時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時の自然な挙動
- ・跳ね返り、滑りといった現象の表現

さらに、これらの機能の追加ととも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(の実現)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。

## 参考文献

- [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)
- [本島95] 本島竜吾, 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)

- [テレビ学会90] 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)
- [平田93] 平田幸広, 水口武高, 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)
- [舟橋96] 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)
- [舟橋98] 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, 電子情報通信学会論文誌 D-II (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)
- [Funahashi95] 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)
- [Huang95] Z. Huang, R. Boulic, N. Magnenat and D. Thalmann: A Multi-sensor Approach for Grasping and 3D Interaction, Proc. Computer Graphics: Developments in Virtual Environments, 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)
- [Shinya95] M. Shinya and M.-C. Fergue: Laying out Objects with Geometric and Physical Constraints, The Visual Computer, Vol.11, No.14, pp.188-201 (1995)

## 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、移動が可能なるものである。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られる(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、双方の手のウェイトは変化する。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

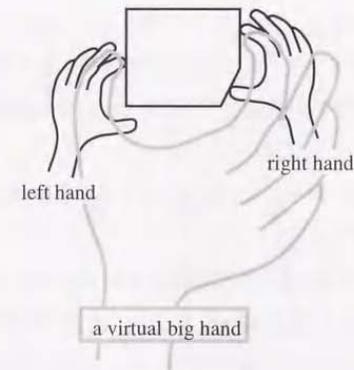


図3.1 両手による物体操作のモデルとしての仮想の大きな手(統合手)

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)).

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

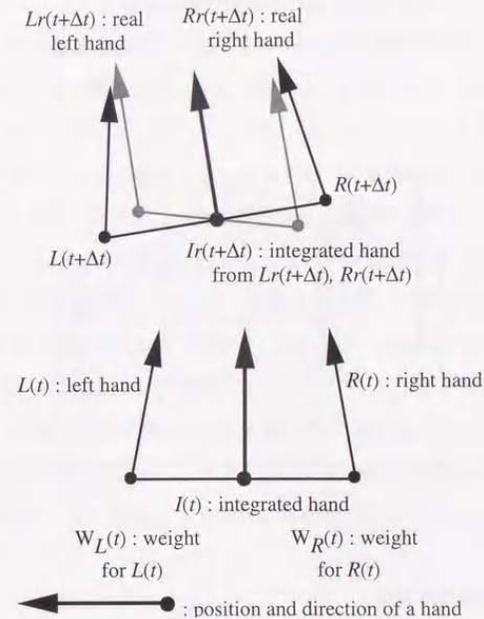


図 3.2 両手操作における統合手の決定

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  $Ir(t+\Delta t)$  は式 (3.4) より求まる.

$$\begin{aligned}
 Ir(t+\Delta t) &= (W_L(t) Lr(t+\Delta t) + W_R(t) Rr(t+\Delta t)) / (W_L(t) + W_R(t)) \\
 &= I(t) + T_f(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

[手順3] 最後に, 手と干渉している物体を  $T_f(t)$  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,  $Ir(t+\Delta t)$  に対して,  $L(t), R(t)$  と  $I(t)$  の関係が保たれるように,  $Lr(t+\Delta t), Rr(t+\Delta t)$  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のので, 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 (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.

$$(8 \times 1 + 12 \times 3) / (1 + 3) = 11
 \tag{3.5}$$

### 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

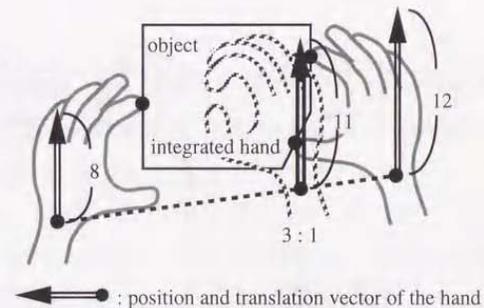


図 3.3 統合手の決定例

Fig.3.3: An example of determining the integrated hand

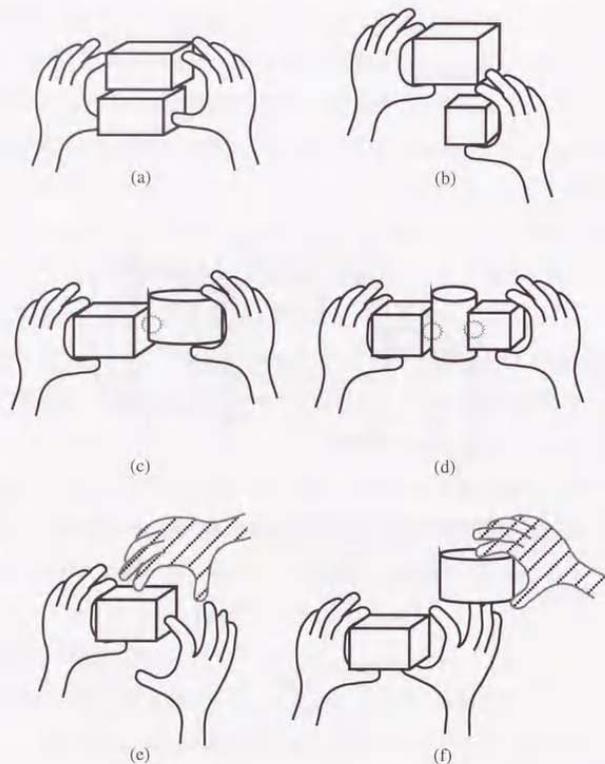


図 3.4 様々な状況の両手操作  
Fig.3.4: Several situation of manipulation with both hands

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

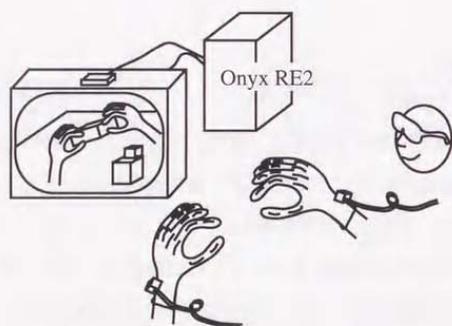


図 3.5 実験システムの構成

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る方法で実現できた。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がある。
- ・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。

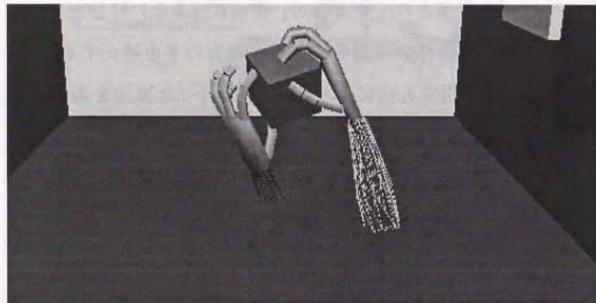
- (1) 干渉状況によらず、常に 1:1
- (2) 干渉状況によらず、利き手を 1、他を 0
- (3) 本章で提案する、干渉状況により変化する重み

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

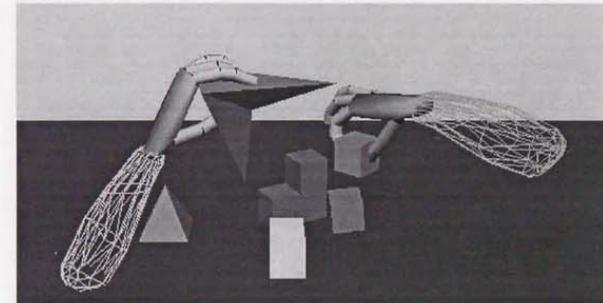


(b)CGで表示された仮想空間の様子  
(b)CG image of the virtual space presented on the screen

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

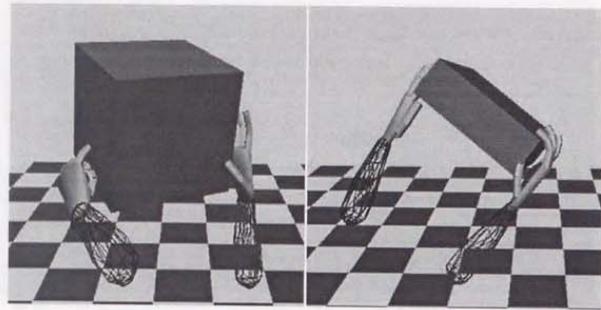


(a)実際の操作の様子  
(a)System appearance

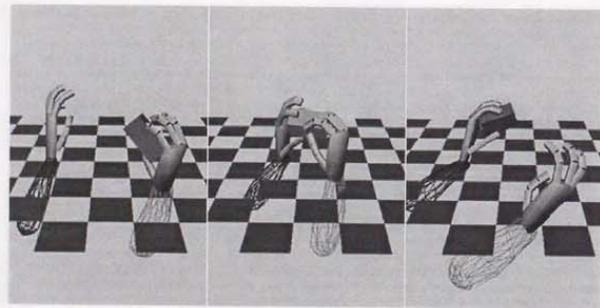


(b)CGで表示された仮想空間の様子  
(b)CG image of the virtual space presented on the screen

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

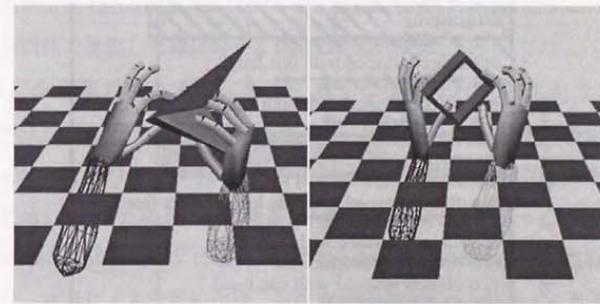


(a)大きな物体の操作  
(a)Big object manipulation



(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)

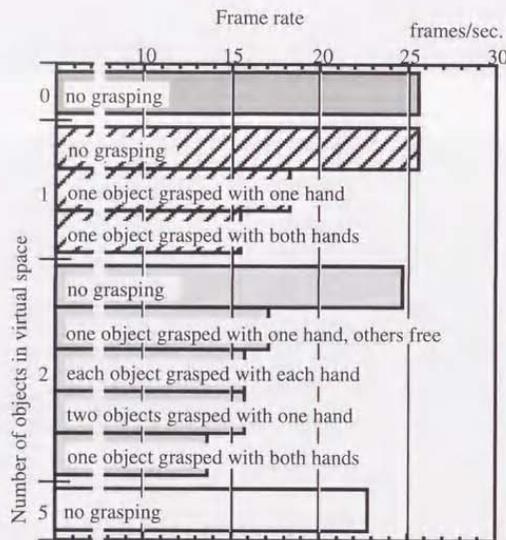


図3.9 単位時間あたりの描画フレーム数  
Fig.3.9: Number of frames drawn in the unit time

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)

## 第4章 仮想手操作のための 仮想道具の一般表現

### 4.1 はじめに

前章までに、仮想手で物体に直接干渉することにより、移動操作が可能なモデルについて述べた。これは、実世界での手の動作に注目し、類似な方法で操作を可能としたものである。

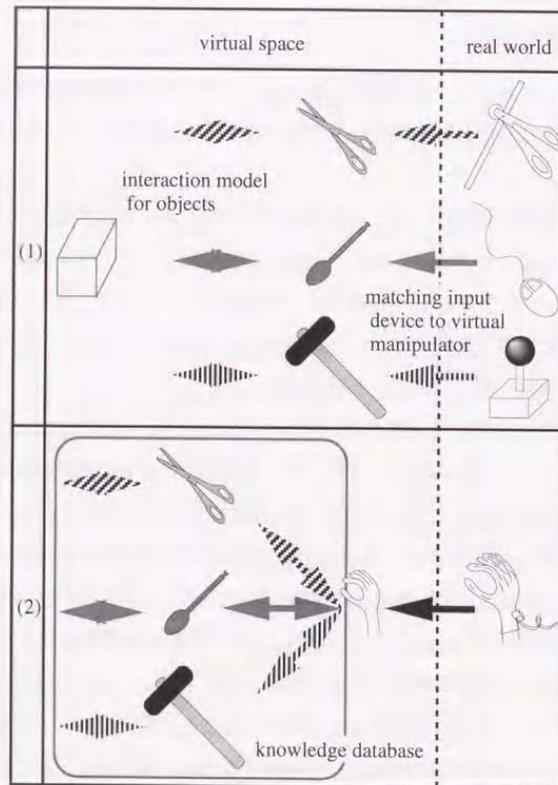
実際には、最終的に操作を施したい物体には直接干渉せずに、間接的に移動、あるいは変形を行うことがある。しかし、一般的な物体同士の干渉を、体験システムの動作速度を確保しつつ現実に近い挙動により再現することは非常に困難である。ところで、この間接的な操作を行う場合、手に直接触れる物体が特定の用途に用いられるものならば、これは一般に「道具」と呼ばれる。

仮想空間における道具と物体の相互作用は、前章までに手の特徴に注目したモデルを提案したように、特定の道具に注目した「道具と物体のモデル」が構築可能であろう。実際に、仮想空間内に道具を定義し（仮想道具）、道具による操作を実現するためのモデルの提案がなされている[北川96][野口96]。様々な道具を仮想空間で利用する場合の、それぞれの道具と入力装置との関係を表4.1に示す。道具の形状や操作に対応したものを直接入力装置として用いる場合は、道具ごとに操作を用意する必要があり（表4.1(1)）、例えば大きさや形状が異なる複数の道具を用いた物体の操作の実現は難しい。これに対して、道具は手によって操作されることに着目して、手の動作の入力デバイスを用いて仮想手で操作するという前提でならば、多様な仮想道具をソフトウェアのみにおいて実現することが考えられる（表4.1(2)）。

表 4.1 実世界の入力装置による仮想道具の操作方法の違い

Table 4.1: Different ways of manipulating virtual tools by operating input devices in the real world

- (1) 各仮想道具毎に入力装置を対応
- (1) Each device is matched to each virtual tool
- (2) 仮想手へのみ入力装置を対応, 仮想手により各道具を操作
- (2) The hand device is matched to a virtual hand, which manipulates each virtual tool



このような目的のために, 表 4.1(2) に示すように, 手で操作する道具について, 仮想手と道具, 道具と物体との相互作用に関する知識を一般化することは, 一般的な仮想道具による仮想空間操作システムの重要な基本技術となり得る。

ところで, 知識を標準化し, システムから分離することは一般的な考え方であり[大須賀 96], 様々な分野において知識を分離することの有効性が述べられている (例えば [鈴木 88][飯国 95]). CG における 3 次元形状定義に関しては DXF, VRML などの標準書式が普及している. しかし, VR において, 手で操作する道具に対する手, 道具, 物体間の相互作用モデルなどの情報を知識ベース化し, 一般的に扱うための研究は報告されていない。

そこで本章では, 道具自身を構成する部品, および, 道具の利用方法に関する知識などをシステムから分離することにより, 仮想道具の仮想手による操作を一般的に表現可能な基本モデルを考案した[舟橋 97b][舟橋 97c]. このように知識をシステム (実行プログラム) から分離することにより, プログラムを変更せずに, 新たな道具に対する知識 (データファイル) を付加することで新しい道具の利用が可能である. 提案手法に従い, 利用する各道具に対応した, 仮想手と道具, 道具と物体との相互作用モデルを構築することにより, 仮想手で様々な道具を操作し, それらの道具により物体を間接的に操作することが可能となる。

以下, まず 4.2 節では, 本研究の具体的な目的, および, 方針について述べる. 次に 4.3 節では, 知識の構造, 操作システムの実現方法について述べる. 実現した実験システム, 実際の操作の様子などについては 4.4 節で示す。

## 4.2 仮想手による道具を介した物体操作

### 4.2.1 仮想空間における道具の利用

本文では, 最終的に操作したい対象を物体と呼び, この物体を操作する目的で手で直接に扱う対象を道具と呼ぶ。

この道具の操作を仮想空間で実現する場合, マウスなどの通常のコンピュータ用の入力装置を用いる方法, および, 仮想空間内で利用する道具と同一形状の実際の道具を入力装置として用いる方法がある. しかし, 前者は実世界における道具の操作との

差異が大きいため、直感的な操作が困難となる。後者によれば操作は直感的になるが、個々の装置ごとにシステムが構成されるため汎用性が乏しく、入力装置のみを簡単に交換することはできない。また、同じ種類の道具を使っても形状がことなれば操作は直感的でなくなる。例えば、ある形状のハサミを模した入力デバイスを用いたとすると、これと大きさや形が異なった仮想ハサミの操作は違和感を与えることになる。そこで、操作者の手に対応させた仮想手により仮想道具を操作することが可能となれば、入力装置の交換、仮想道具との形状の違いによる違和感という問題がなくなると考えられる。

本研究では、仮想空間に複数の道具が存在し、それらのうち任意の道具を仮想手で利用することにより、物体操作が可能なシステムの構築を目的としている。具体的には、次節で述べるような道具を対象とする。ところで、例えば VRML で記述された仮想空間内をウォークスルー可能なシステムでは、データファイルを変更することにより他のシーンの体験が可能である。これと同様に、本システムにおいて新しい道具を利用する場合に、プログラムを変更するのではなく、新たな道具の知識を有するデータファイルを作成する、あるいは、他から入手することにより、道具の追加が可能となることを目的としている。

そのために、VRML などの 3 次元形状定義の書式のように、仮想道具のためのデータの構造を定め、さらに、その道具データに基づいた手による道具の操作、道具による物体の操作が可能なシステムを作成する。仮想道具のデータに含める情報について考察する意味で、次節では道具に関する性質について整理し、4.2.3、4.2.4 節では、それぞれ、道具の手による操作、および、道具による物体操作の実現法について述べる。

また後述するように、道具は多面体により表現される剛体とする。また、物体も多面体による表現とするが、道具との相互作用により変形も可能とする。手に関しては、前章までと同様に手を代表する点（手首）の座標と手の方向、および、各関節の角度が入力装置から得られるものとする。さらに、仮想手の形状モデルを有することにより描画を行う。

#### 4.2.2 道具の分類

本節では、仮想手で様々な道具を扱うために、道具に関する性質について考察する。

ここでは片手で把持して動かし、実際に操作したい物体に干渉させることにより移動、変形などを行う道具を対象とする。ここで干渉とは、道具と物体の相互作用モデルによるが、接触させる、近付ける（例えば、磁力によるもの）、などのことである。道具の具体例として (1) スプーン、(2) ナイフ、(3) ハサミ、(4) ピンセット、(5) 箸などが挙げられる。

[A] [道具の形状] 道具に可動部分が存在しないものと、存在するもの（例えば、上記の例の 3、4、5）がある（ここでは、箸は 2 つの部分互いに独立した動きをしない 1 つの道具とみなしている）。可動部分の存在は、道具の姿勢が変化して描画に影響するだけでなく、ピンセットの先端などの互いの位置が変化することにより、以下で述べる物体との相互作用にも影響する。これについても、道具の形状が任意に変化するのではないため、道具を構成する変形しない部品の相対的な位置変化により可動部分の動きを表現できる。ここでは、例えば針金のように任意に形状の変化する道具は考えないものとする。

[B] [手と道具の相互作用] 一般に、道具には把持や操作方法が 1 種類とみなせるものだけでなく、複数考えられるものも存在する。ところで、物体を手で直接に把持する場合は、手の形状、接触位置など様々な状態で行われることが予想される。それに対して、道具を用いる場合は限定された把持のしかたのみを許容するとしても大きな問題は起らない。

[C] [道具と物体の相互作用] さらに道具には、物体に対して変形操作を行うもの、主に移動操作を行うもの、および、この両方共に可能なものが存在する。この道具と物体との相互作用モデルは、仮想物体の性質、構造も関係する。

#### 4.2.3 ジェスチャによる道具の把持

前節で述べた様々な仮想道具の、仮想手による把持、操作を実現する必要がある。ここでは、手のジェスチャによる指示を用いることにする。

仮想手による物体操作の実現方法の一つに、ジェスチャを利用する方法がある。これらは既して、ジェスチャの情報をシステム自身が持っている。また、任意の手の形状による把持に対応できない、などの問題点と、物理法則などによる実現方法に対して計算時間を少なくできる、という利点がある。

仮想手による道具を利用した物体操作システムの実現には、手と道具の関係だけでなく、道具と物体との相互作用に関しても処理を行う必要がある。また前節で述べたように、道具毎に把持を行う手の形状は異なるが、1つの道具に対してあらゆる手の形状による把持に対応する必要はない。そこで、1つ、ないし、複数のジェスチャを道具毎に知識として持たせることにより、任意の道具の把持、操作を実現した。

実際の把持判定では、まず道具および手を内包する球、立方体等が互いに干渉するか否かを判定（境界判定）する(図4.1)。次に、各関節の角度によるジェスチャの判定を行う。これは、手の大小の違いによる指先などの座標値の変化の影響を受けないこと、および、操作者の手の形状を入力する装置は主に各関節の角度を測定していること、による。判定方法は、各関節に対しての各角度に上限と下限を指定することにより、しきい値による判定を行う。各ジェスチャ毎に手に対する道具の位置に関する知識も持たせておき、ジェスチャにより把持と判定された場合、道具の位置、方向を補正する。また、道具を把持したまま手全体の位置、方向を変化させた場合、その道具は手との相対位置が変化しないと考え、手の動きに従って移動する。

#### 4.2.4 道具による物体操作の実現

上述した手で操作されている道具による、物体の操作も実現する必要がある。道具と物体との関係は、手と道具との関係と比較して、道具と物体の組合せにより様々な状況が考えられる。本研究では、道具による干渉、操作の計算、および描画の高速性を考慮し、仮想物体は多面体とする。また、道具を構成する部品も、同様に多面体とする。

一般に仮想空間における相互作用（物体同士の干渉など）を考える場合、まず干渉を判定し、その状況により様々な作用を加える。具体的に多面体同士の干渉を扱う場合には、多面体を構成する頂点、稜線、面に対する干渉、および物体の内部に侵入しているか否か、等あらゆる状況に対応する必要がある。しかし、特定の目的を持つ道具の場合、あらゆる部分における干渉を考慮する必要性は低い。そこであらかじめ、図4.2に示すように、道具の部品を構成する多面体の頂点により、物体との干渉等の判定を行うための判定点、判定線分、判定面を設定しておく。これらは、道具に固定された頂点だけでなく、2頂点の中点を判定点とすること、あるいは交点、射影点等によ

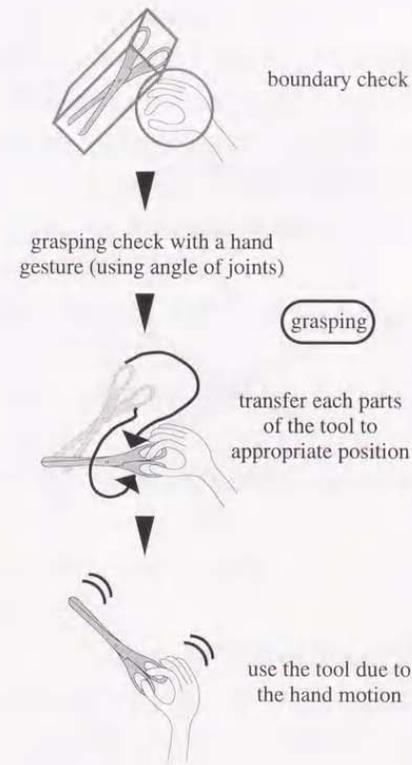


図4.1 道具の把持（判定と実行）

Fig.4.1: Grasping of a tool (grasping check and execution)

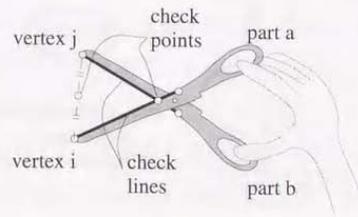


図 4.2 判定点, 判定線分の説明 (ハサミの場合の例)

Fig.4.2: Check points and check lines for interference (an example of scissors)

る決定も可能なものとする。

また, 実際に仮想空間における相互作用 (物体の操作など) を実現する場合, プログラミング言語などによりシステムを構築する必要がある. このとき, 相互作用を実現するための記述は多岐にわたり, また複雑である. ここではプログラムのみにより相互作用を実現するのではなく, 相互作用に関する知識を有するデータファイルなどを解釈, 実行可能なプログラムの実現を目的としている. そこで, 相互作用を実現するための要素を(1)干渉判定, (2)各種演算, (3)真偽判定, およびその結果による(4)物体の操作に分けて考え, それぞれについて以下に挙げる具体的な処理を考慮する.

- (1)干渉判定: 道具の判定点, 判定線分, 判定面と, 物体の面, 物体の稜線, 物体の頂点との各組合せの判定, および物体に対する内外判定
- (2)各種演算: スカラー変数, ベクトル変数に対する接触点の数, 座標などの代入, 各種算術演算, 大小判定等を含む論理演算
- (3)真偽判定: 処理の実行, あるいは, 非実行を決定するための, 干渉判定, 大小判定などの結果に対する真偽判定
- (4)物体操作: 道具に追従した物体の移動, 頂点を移動することによる物体の変形, 平面による物体の切断

これらの組合せにより, 道具と物体との相互作用モデルに関する知識を構築する。

### 4.3 知識のプログラムからの分離

#### 4.3.1 道具に関する知識

4.2 節で述べた事項をもとに, 各道具に関する知識の構造について提案する(図4.3).  
 [A] [道具自身] 可動部分が存在する道具に対応するため, 道具の形状データは, 道具を構成する変形しない部品 (多面体) の集合として表現する. ただし, 各部品の位置関係, 拘束の方法についてはここには記述しない.

[B] [道具—手] 次に道具の把持操作に関しては, 1つの道具に対して複数の把持, 操作方法が存在し得るため, 操作方法の集合として表現する. この各要素は, 可動部分の存在しない道具の操作方法に関しては, 1組の道具把持における手のジェスチャ, および手全体の位置に対する相対的な各部品の位置, 方向を知識として持つ. 道具の

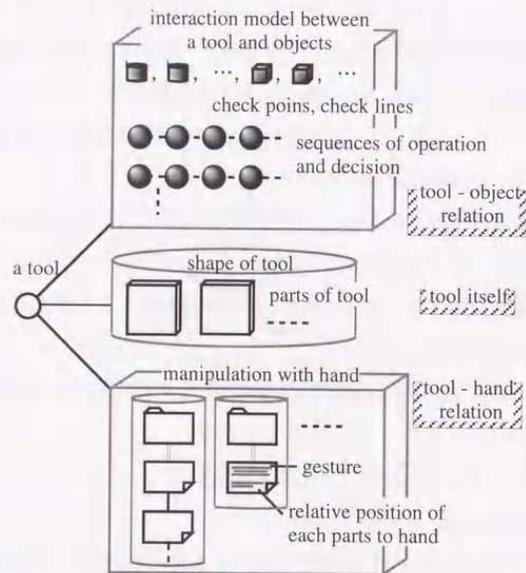


図4.3 仮想道具のデータ構造  
Fig.4.3: Generalized data structure for virtual tools

可動部分を動かす操作方法の場合、複数組のジェスチャ、および各部品の相対位置をリスト表現による知識として持ち、隣り合う要素間を補間することにより、ジェスチャの変化に対応して道具の可動部分の状態を連続に変化させる。またこれにより、各部品の位置、拘束の関係が決まる。ただし、手に対する相対座標のみでは、表現が困難な場合が予想される。そこで、これにより大まかな位置を設定した後、部品同士の頂点、頂点と指先、等の一致すべき点の情報（例えば、ハサミの、軸における各部品の一致、指先と持ち手の穴との一致）により細かな補正も可能とする。ここで、指に関する座標は第2章で述べた手の判定点によるものとし、また4.2.4節で述べた道具の判定点と同様に、道具や手に固定された点だけでなく2点の中点といった指定も可能とする。

[C][道具-物体] さらに、道具と物体との相互作用モデルとして、まず判定点、判定線分、判定面の集合を、道具形状データの頂点座標の演算として表現する。この判定点などに対して、どの様な判定、演算を行い、その結果どの様な影響を物体に与えるかを、リストとして表現する。操作方法が複数ある場合は、このリストの集合となる。

図4.4, 4.5 にスプーンとピンセットの道具データの構成例を示す。

スプーンは1つの部品からなり、スプーンの持ち方は2通りとした。それぞれの持ち方に対し、それぞれ1組のジェスチャと、手に対するスプーンの相対位置を知識として持つ。判定点をスプーン先の部分に設定し、物体をのせること、および、押すことを可能とした。

また、可動部分を持つピンセットは、2つの部品により構成し、使用方法は1通りとした。使用方法の表現は、ピンセットを閉じた状態と大きく開いた状態それぞれの手のジェスチャと、各部品の相対位置による。物体との相互作用モデルは、以下に示す3つの判定点と2つの操作方法を有するものとした(図4.6)。

[判定点の設定]

部品0の先端(頂点*i*)を判定点0とする

部品1の先端(頂点*j*)を判定点1とする

上記判定点0,1の中点*P*を判定点2とする

[操作の設定]

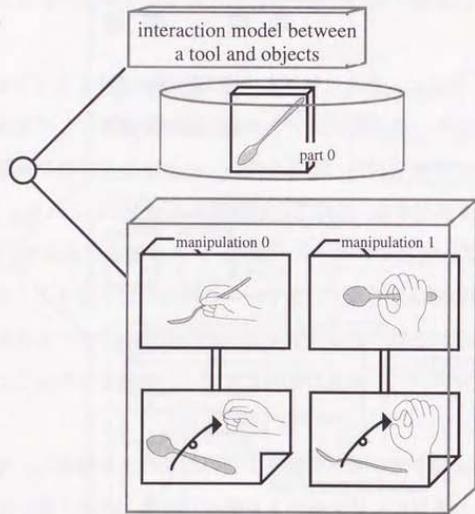


図 4.4 スプーンのデータ構造の例

Fig.4.4: Illustration of data structure for a virtual tool(1) (spoon)

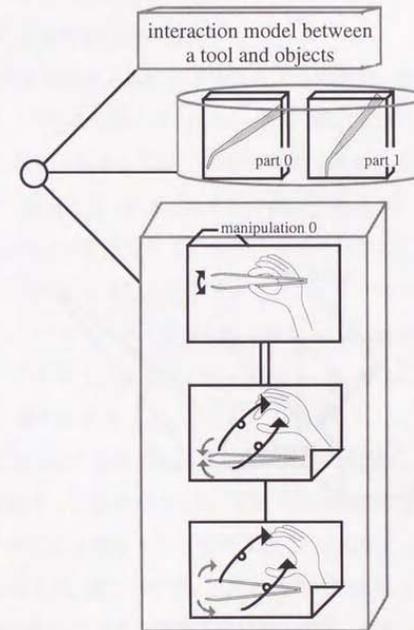


図 4.5 ピンセットのデータ構造の例

Fig.4.5: Illustration of data structure for a virtual tool(2) (tweezers)

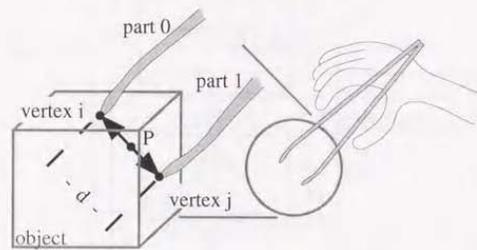


図 4.6 ピンセットと物体との相互作用モデル  
Fig.4.6: Interaction model between tweezers and object

以下の 2 つの操作を用意した。

[操作 0] 以下による各判定, 計算, 把持操作

- (1) しきい値の設定(5cm)
- (2) 判定点 0, 1 間の距離  $d$  を計算
- (3) 距離  $d$  がしきい値以上か判定
- (4) 判定点 2 が物体内部か判定
- (5) 共に真ならば物体を把持, 移動

[操作 1] 上記操作と類似な方法による物体の頂点の選択, 移動による変形操作

このピンセットツールの知識の実際のデータを図 4.7 に示す。実際のデータはテキストで表現されており、容易に記述、変更が可能である。左中央のデータファイル tweezers.ktf により、道具と手、道具と物体との相互作用モデルのファイル tweezers.kth (左下)、tweezers.kto(右上) を指定する。また、道具の形状として指定されたファイル tweezers.kof.list(右中央) は、各部品の形状データのファイル tweezer\_R.kof、tweezer\_L.kof (右下) を指定する。このピンセット自身のデータは ex.ktf.list(左上) 等から参照される。図中、「%」以降、行末まではコメント文である。

#### 4.3.2 道具の把持, 操作の実現

上述のデータ構造により道具の知識をシステムから分離し、仮想手による道具を介した物体操作を実現する。従来のように、それぞれの把持対象に対してシステムに設定されたジェスチャによる判定を行うのではなく、道具毎にジェスチャを知識として持たせておくことにより、道具の形状、実際の操作に対応した把持を実現する。また、道具の可動部分の状態の変化する操作方法に対しても、複数のジェスチャと道具を構成する各部品の手に対する位置を知識として持たせ、隣り合う要素間を補間することにより、手の形状の変化に対応した道具の可動部分の状態の連続的な変化を実現する。具体的には、図 4.5 におけるピンセットを閉じた状態と大きく開いた状態の間を補間することにより、図 4.8 に示すようなピンセットの開閉動作が可能となる。また、道具を把持したまま手を動かした場合、その道具を手との相対位置が変化せず手の動きに追従し移動させることにより、把持した道具の移動を行う。さらに、道具と物体の相互作用モデルに応じた物体操作を実現する。これらのことから、本モデルにより

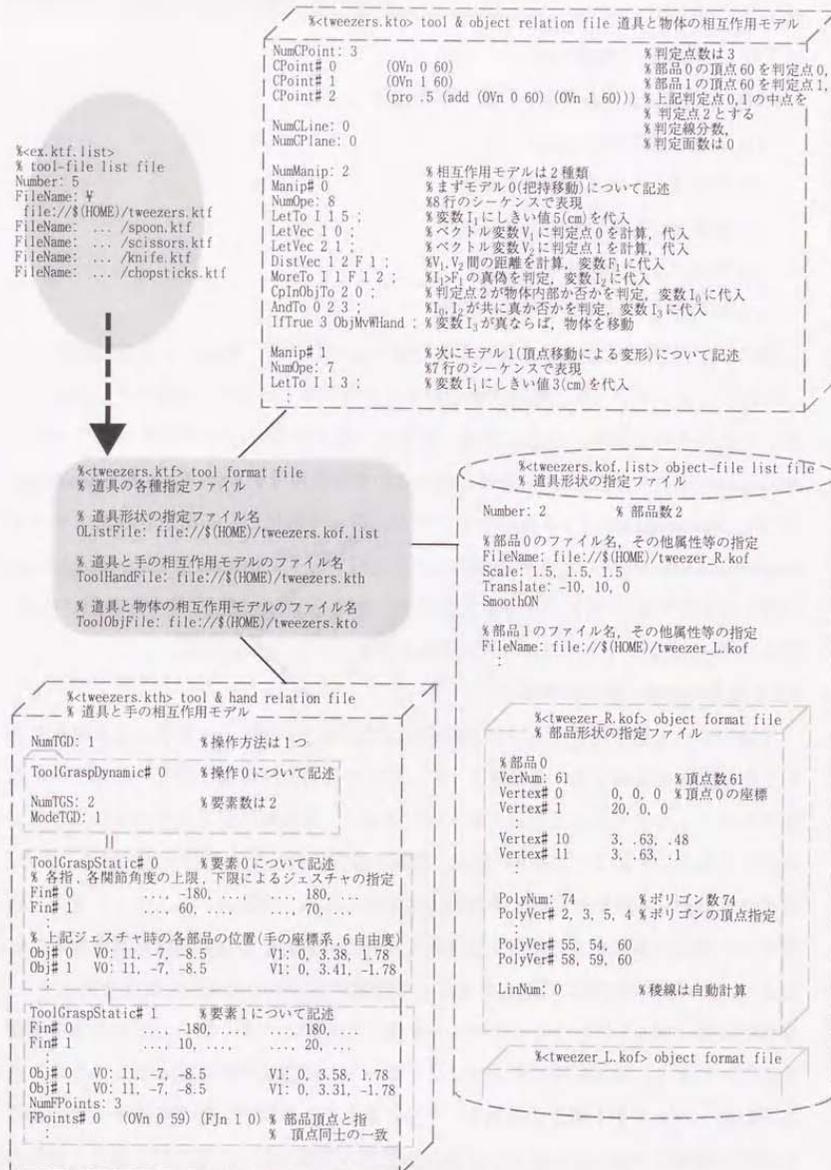


図4.7 仮想道具のデータ構造の一例 (ピンセット)  
 Fig.4.7: An example of data structure for virtual tool (tweezers)

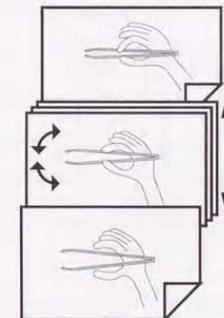


図4.8 ピンセットにおけるデータ補間の様子  
 Fig.4.8: Data interpolation for manipulating tweezers

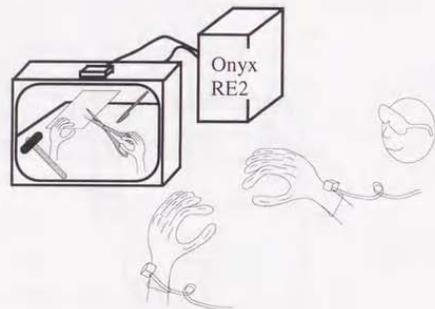


図4.9 実験システムの構成

Fig.4.9: Configuration of the experiment system

4.2.2 節で挙げた道具の把持，操作を行うことができる。

## 4.4 実験例

### 4.4.1 実験システムの構成

上述したデータ構造，操作モデルを用い，道具に関する知識を分離した仮想空間操作システムを，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(図4.9)。本システムは前述の知識を入力し，解釈，処理が可能なるものである。また，手の位置，各指の関節の角度等を入力するための装置として，前章までに述べたものと同じ入力装置を使用している(付録参照)。さらに，映像提示に関しても前章までと同様に立体視が可能である。

本システムでは，複数の道具，複数の物体が存在する状況で，任意の道具による，任意の物体に対するインタラクションが可能である。また，物体データを作成するだけで新しい物体に対する操作が可能であると同様に，システムの改良なしに道具データを作成するだけで新たな道具の利用が可能である。

さらに，仮想手で物体に直接干渉することによる物体の移動操作も可能であり，全く干渉を受けていない物体は重力，慣性に従った挙動を示す。

### 4.4.2 実験結果

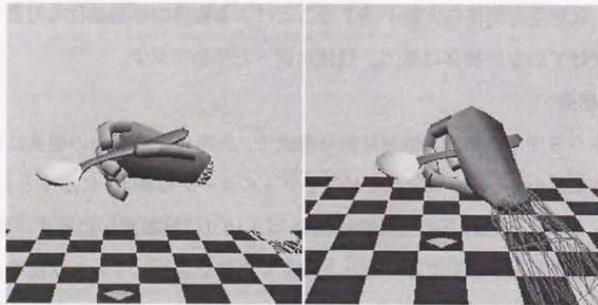
前述の本システムで解釈，処理可能な書式で，実際にいくつかの道具に対する知識ベースを構築した。その一つであるピンセットのデータは図4.7に示すとおりである。

本システムによるこれらの道具操作例を図4.10(口絵参照)に示す。図4.10(a)は左手で物体を把持し，右手でピンセットにより物体を変形している状況のシステムの概観である。同図(b)には同じ道具(スプーン)に対して，2通りの異なる持ち方が実現されていることが示されている。また，同図(c)に示すように，可動部分のある道具(ピンセット)の操作も実現できた。同図(d)では，箸，ナイフ，ハサミを利用している様子を示す。さらに同図(e)，(f)からは，複数存在する道具から希望する道具を選び，物体を操作できることがわかる。

また，計算時間に関する評価については，図4.11に示すように，複数存在する道具のいずれも操作せず，手による物体への直接的な干渉も行わない状況で，約20 frames/

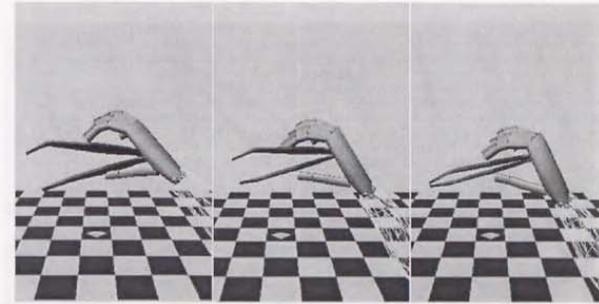


(a) 実際の操作の様子  
(a) Appearance of manipulation

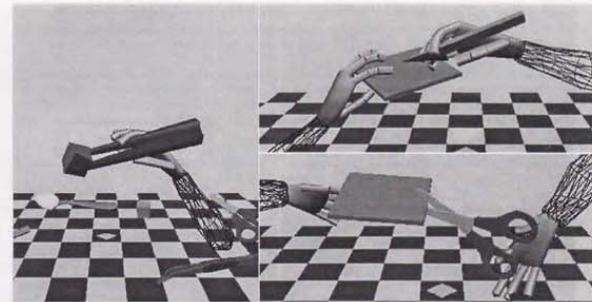


(b) スプーンに対する2種類の把持の様子  
(b) Two kinds of spoon grasping with hand

図4.10 仮想手による仮想道具を利用した仮想空間操作の例  
Fig.4.10: Examples of virtual objects manipulation using virtual tools with a virtual hand

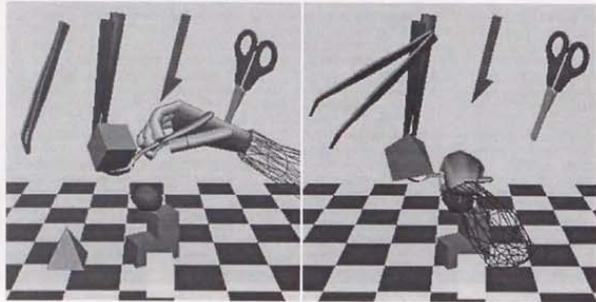


(c) ピンセットに対する開閉操作の様子  
(c) Opening and shutting tweezers with hand

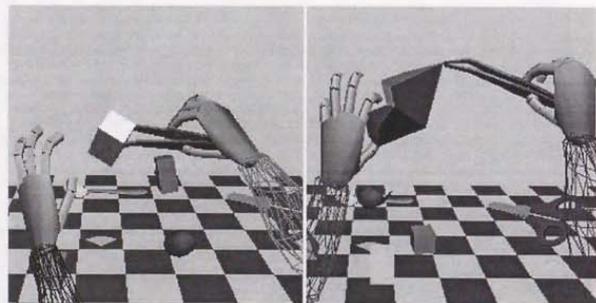


(d) 箸, ナイフ, ハサミの操作の様子  
(d) Manipulation of chopsticks, knife and scissors manipulation

図4.10 (続き)  
Fig.4.10 (Continued)



(e) スプーンによる物体の移動操作  
(e) Transfer an object using a spoon



(f) ピンセットによる物体の移動，変形操作  
(f) Transfer an object and change the shape of an object using tweezers

図 4.10 (続き)  
Fig.4.10 (Continued)

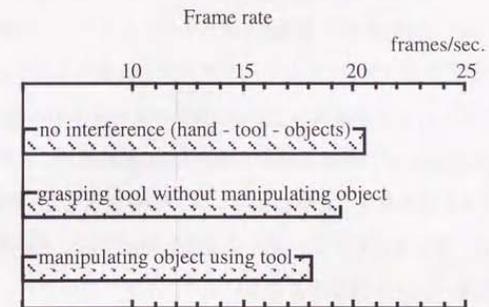


図 4.11 単位時間当たりの描画フレーム数  
Fig.4.11: Rendering frame rate for three conditions

sec.での描画が可能であった。次に、手で道具を操作しているが、物体への干渉は全く行っていない状況で（手と道具の相互作用のみ）約 19 frames/sec.、道具を利用した物体操作を行っている状況では（手と道具、道具と物体の相互作用）約 18 frames/sec.での描画が、それぞれ可能であった。これらは、何れの道具に関しても、ほぼ同じ結果であった。一般には、対話操作の実現に 12 frames/sec 必要であるといわれており、本システムによる、道具を利用した対話的な仮想物体操作が可能であると判断できる。厳密に言えば、仮想物体の形状、道具の形状、および道具と物体との相互作用モデルが非常に複雑な場合は、描画、干渉時の処理時間が増加することが予想され、本結果は十分であるとは断定できない。今後、手と道具、道具と物体の相互作用に関する処理の高速化を行う必要性も考えられる。

#### 4.5 むすび

本章では、仮想道具の知識構造を提案し、知識をシステムから分離することにより、仮想手による仮想道具を介した物体操作を容易に表現可能とした。またこの考えに従って、仮想手による道具を介した物体操作システムを実現した。本システムでは、システム自体の修正、変更を行わずに、様々な道具を利用することが可能である。さらに、仮想道具の知識ベースを構築することにより、ネットワークへの対応など様々な応用が可能となる。

本システムは現在、基本機能を実現した段階にあり、以下の問題が残されている。まず、実際にデータを記述する際の書式の分かり易さ、記述の容易さについてさらに検討する必要がある。この点に関しては、仮想道具定義用エディタの開発も望まれる。今後、これらの問題を解決するとともに、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、本システムによる道具を介した仮想空間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

[飯国 95] 飯国洋二: 再構成可能な知識データベースに基づく非線形信号処理, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J78-A, No.2, pp.178-185 (1995)

- [大須賀 96] 大須賀節雄, 有川節夫, 波多野諄余夫, 志村正道, 西尾章治郎, 大槻説平: 知識科学の展開, オーム社 (1996)
- [北川 96] 北川英志, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間操作を利用した対話型手術シミュレーションシステムの基本機能の実現, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.6, pp.1088-1098 (1996)
- [鈴木 88] 鈴木秀智, 本田祐司, 鳥脇純一郎: 画像処理手順開発支援システム SDIP における処理手順に関するコンサルテーション機能の開発, 情報処理学会論文誌, Vol.29, No.1, pp.29-37 (1988)
- [野口 96] 野口博和, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想ハサミによる切断操作のモデル化と実現, NICOGRAPH 論文集, pp.22-31 (1996)
- [舟橋 97b] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想物体操作における両手による協調操作および道具操作のモデルの検討, 計測自動制御学会 第 39 回パターン計測部会研究会資料, 97PG0006, pp.17-24 (1997)
- [舟橋 97c] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における手による道具操作の支援のための知識データベース, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会講演論文集, pp.250-253 (1997)

## 第5章 結論

### 5.1 本研究の要約

本論文では、仮想空間に存在する物体に対して仮想手による直接的な、あるいは仮想道具を利用した操作を実現するために実際の現象を考察し、実際に仮想空間操作システムを実現するための手法について述べた。

本手法は、実際の現象を厳密に再現するためのものではなく、既に実用レベルにあるハードウェアを用いて、対話的な操作が可能な動作速度を保ちつつ実際の現象に対して違和感の少ない状況を再現するものである。現在、仮想空間操作は様々な方面から注目されており、それを実現するための装置が種々、開発されている。またソフトウェアに関しては、「個別の目的を満たす操作」自体を実現するための研究は行われている（例えば対象を移動、変形できればよい）。しかし、「操作の方法」については十分研究されておらず（例えば、どのように対象を選ぶか、どのように移動を指定するか）、今後の発展が望まれる。本手法は、実世界でものを選ぶのと同じように対象を指定し、実世界でものを動かすのと同じように対象を移動できるようにするためのものである。

第2章では、色々な形状の物体を片手で持ち、動かすという実際の動作について考察し、現在の計算機環境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た。また、複数の物体が存在することにより操作対象とならない物体も存在するため、対話操作を不可能としない範囲で、ある時点で操作対象となっていない物体の運動を表現するためのモデルについても述べた。また、これらのモデルに基づいて、実際に仮想手による物体操作システムを構築し、どの指のどの部分においても物体の操作が可能なこと、さらに手の影響下でない物体の挙動についても実世界の印象に近づけるこ

とができたことを確認した。

第3章では、ある物体に片手だけではなく両手で干渉することにより移動を行う実際の動作について考察し、「その物体をある位置まで移動したい」という目的を持っていることに注目して、両手による物体操作のためのモデルを提案した。これは前述の片手操作モデルを基にしており、様々な形状の物体を、両手のどの指のどの部分においても操作可能なものである。さらに、操作していない物体の運動モデルも考慮した、両手による物体操作システムを実際に構築した。そして、両手を用いた物体の移動、右手から左手へ物体を手渡す操作などが従来よりも少ない違和感で行えることを確認した。

第4章では、道具を利用した物体操作について考察し、道具の種類は多様であるが個々の道具は限られた使用法により、限られた用途に利用されることに注目して、一般的な道具のデータ構造について提案した。これは特定の道具を対象としたものではなく、同一のシステムに新たな道具のデータを与えるだけで様々な道具を利用可能とするものであり、各道具に応じた自身の形状はもちろん、手と道具との相互作用、最終的に影響を与えたい物体との相互作用に関する知識を有するものである。また、実際に仮想手による道具を介した物体操作システムを実現し、システム自体の改良を行わずに様々な道具の利用が可能であることを確認した。

これらは、互いに独立なものではなく、仮想環境に存在する物体を片手で、あるいは両手で操作することが可能であり、さらに多種多様な道具を利用した操作も可能なものである。同時に、操作対象でない物体の挙動も考慮されている。

## 5.2 今後の課題

今後の課題としては、本研究では重要度の低さから簡略化の度合いを大きくしている、複数の指で物体を押したときの自然な挙動、物体同士の干渉時の自然な挙動を、動作のリアルタイム性を損なわない範囲で実現していく必要がある。また、これらの実現のために、本研究で既に実現されている実際の処理方法についても計算の一層の高速化を行う必要があるであろう。

両手による操作時の、統合手の決定に必要な重みを決定する要因、および重みの値

に関しても、体験実験などにより心理的要因をより考慮した検証が必要であると考えられる。また、同一人物の左右の手だけではなく、それぞれの手が独立に動いてしまう可能性の高い、多人数の手による同時干渉、および協調操作への対応も検討すべき問題である。

道具のデータ構造については、実際にデータを記述する際の書式の分かり易さ、記述の容易さについて検討する必要がある。この点に関して、仮想道具定義用エディタの開発は有効であろう。また、道具自身の形状は物体（本文中でいう、最終的な操作対象）と同様な表現を採っているが、現時点では、道具を物体として扱うことはできない。システムの動作速度に影響を与えない範囲で、道具を物体として扱うことも必要であろう。これにより、道具を道具として利用するだけでなく、物体として手渡すことなどが可能となる。

また現時点では、仮想空間からのフィードバックは視覚によるものだけであるため、力覚のフィードバックについても検討する必要がある。この点については、本文中において仮想空間における手、あるいは指を補正する場合に、同時に力覚を返すことが考えられる。また、道具のデータ構造に、手と道具、道具と物体の干渉時に返る反力に関する知識を追加することも考えられる。しかし、実際に実現する場合には、様々な問題点が出てくることが予想され、それらを解決する必要があるであろう。

さらに、本研究の中で実現した仮想空間操作システムは、実験的なものであり、特定の具体的な応用について考慮したものではない。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、本モデルによる仮想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。用途、目的によっては、本手法をさらに簡略化することが可能な場合もあるであろう。あるいは、より厳密な状況を表現する必要も考えられる。そのため、個々の状況に対して、様々な段階の簡略化を行ったモデルを統合的に扱い、目的に応じた簡略化レベルのモデルを選択可能としておくことは、一般的なVR技術において非常に有効であろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方のお世話になりました。代表的な方々を挙げさせていただきます、また、名前の挙がっていない方々をも含めた皆様方に心より感謝いたします。

本論文の作成にあたり、筆者の指導教官である本学鳥脇純一郎教授、本研究のテーマを与えていただいた本学横井茂樹教授、研究方針など多くの御指導を頂いた本学安田孝美助教授、貴重な助言を頂いた本学末永康仁教授に深く感謝します。

また、本学齋藤豊文助教授、本学清水昭伸助手、中京大学宮崎慎也助手には、研究に関する多くの助言をいただき、深く感謝します。

研究室における筆者の先輩である、北川英志氏（現富士通）、東海章吾氏（現京都大学）、目加田慶人氏（現宇都宮大学）には、研究を含め、様々な助言をいただき感謝します。

実際に研究を行うにあたり、必要な計算機環境の整備をいただいた本学大下弘技官、日頃から相談にのっていただいた森健策氏（現本学助手）、藤井哲也氏（現郵政省通信総合研究所）に感謝します。

研究室の同期である、水野慎士君、今村和彦君（現NTT）、皆様方には、研究室に関わる生活面においてもお世話になりました。ありがとうございます。

本研究を行うにあたり、貴重なご意見、多くの協力をいただきました名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻鳥脇研究室の皆様へ感謝します。

本研究、筆者の我がままから不規則となった研究生活に理解を示し、生活面から支えていただいた家族に感謝します。

直接、研究生活とは関わってはいなくとも、筆者の研究意欲に理解を示していただき、

日常生活に関わっていただいた多くの友人の皆様、ありがとうございます。

また、心の支えとなってくれた修士課程時代の友人に、心より感謝させていただきます。

## 付録 実験システムの構成

本文中で述べた実験は以下に示す装置により構成されたシステムにより行った。仮想操作システムは、グラフィックワークステーション (SGI PowerOnyx RE2, R8000 (図 A.1, 表 A.1)) 上に構築した。操作者の手の位置, 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; Polhemus 社 3SPACE FASTRAK (図 A.2) により入力される。センサは次に述べるグローブの手首の部分に装着されており (図 A.3(c)), 位置, 角度データに関してそれぞれ, 静的精度: 0.08cm, 0.15°, 分解能: 0.0005cm, 0.025° の測定値を与える (表 A.2)。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; Virtual Technologies 社 CyberGlove (図 A.3) により入力される。これは 18 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 に設定している (表 A.3)。また, 液晶シャッターを利用したステレオグラス; StereoGraphics 社 CrystalEyes (図 A.4) による立体視, および HMD; 島津製作所 See-Through Vision STV-01 (図 A.5) の使用も可能となっている。

表 A.1 PowerOnyx の仕様  
Table A.1: Specifications of PowerOnyx

<b>Processor:</b>	MIPS R8000 90MHz (4 processors)
<b>Instruction/Data Cache:</b>	16KB/16KB
<b>Additional Cache:</b>	4MB per processor
<b>SPECint92/SPECfp92:</b>	132.2/396
<b>Memory:</b>	1024 Mbytes, 2-way interleaved
<b>Graphics:</b>	RealityEngine2

表 A.2 FASTRAK の仕様  
Table A.2: Specifications of FASTRAK

<b>Position Coverage:</b>	The receivers are within 30 inches of the transmitter.
<b>Angular Coverage:</b>	The receivers are all-attitude.
<b>Latency:</b>	4 milliseconds.
<b>Update Rate:</b>	120 updates/sec. divided by the number of receivers.
<b>Interface:</b>	RS-232, selected 38.4K baud.
<b>Static Accuracy:</b>	0.03 inches RMS for the X, Y, or Z position; 0.15 degrees RMS for receiver orientation.
<b>Resolution:</b>	0.0002 inches/inch of range, and 0.025 degrees.
<b>Range:</b>	Up to 10 feet with transmitter.
<b>Carrier Frequency:</b>	12019Hz.

表 A.3 CyberGlove の仕様  
Table A.3: Specifications of CyberGlove

<b>Sensor Linearity:</b>	0.62% maximum nonlinearity over full range of hand motion.
<b>Sensor Resolution:</b>	0.5 degrees; remains constant over the entire range of joint motion.
<b>Interface:</b>	RS-232, selected 38.4K baud.
<b>Update Rate:</b>	Up to 112 records/sec when filtered (18 sensor records). Up to 149 records/sec when unfiltered.



図 A.1 グラフィックワークステーション ; PowerOnyx  
Fig.A.1: Graphics workstation; PowerOnyx



図 A.2 3次元位置入力装置 ; FASTRAK  
Fig.A.2: 3-D position sensor; FASTRAK

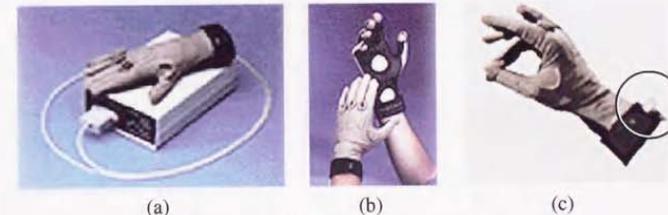


図 A.3 手の動作の入力装置 ; CyberGlove  
Fig.A.3: Hand gesture sensor; CyberGlove



図 A.4 立体視メガネ ; CrystalEyes  
Fig.A.4: Stereo glasses; CrystalEyes



図 A.5 ヘッドマウントディスプレイ ; STV-01  
Fig.A.5: Head mounted display; STV-01

