

NAIST-IS-DT9661007

博士論文

共有仮想空間における仮想物体の操作補助手法の研究

— 協調型仮想物体モデラ VLEGO II の開発を通して —

清川 清

1998年 6月 25日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

清川 清

審査委員： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
西田 豊明 教授
竹村 治雄 助教授

共有仮想空間における仮想物体の操作補助手法の研究

— 協調型仮想物体モデラ VLEGO II の開発を通して — *

清川 清

内容梗概

力覚や触覚のない仮想空間では仮想物体の直接操作は困難であり、この問題が多くの人工現実感アプリケーションの実用化を妨げている。本研究では、両手操作や共同操作などにより仮想物体が複数同時に操作される環境下で、効率良く仮想物体の操作を補助する手法を開発し、開発した操作補助手法を導入して複数人で仮想空間を共有して3次元形状を生成できる協調型仮想物体モデラを構築する。まず、1章で人工現実感分野の歴史と発展に触れ、当該分野における本研究の目的と意義を整理する。また、2章では仮想物体操作の困難性について述べ、1) 仮想物体の位置と姿勢を離散的に制約する、2) 仮想物体間の干渉を検出し位置を補正する、3) 複数の仮想物体間の位置関係に基づいて仮想物体の操作自由度を動的に変更する、という3点を特徴とする操作補助手法を提案する。3章では、評価実験を通して提案手法の評価と改善を行なう。4章では、改善された操作補助手法を導入して開発した協調型仮想物体モデラ VLEGO II の諸機能について述べる。VLEGO II では、複数の利用者が、両手操作や共同操作によって基本形状を順次接合することにより、簡易に正確な形状生成が可能である。最後に5章では全体を総括する。

キーワード

人工現実感, 操作補助, 没入型仮想物体モデラ, 協調作業

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT9661007, 1998年5月11日.

Manipulation Aid for Direct Manipulation of Virtual Objects in a Shared Virtual Space*

Kiyoshi Kiyokawa

Abstract

Most virtual reality applications are still impractical, since direct manipulation of virtual objects is hard to perform without force and tactile feedback. In this study, exploited are manipulation aid techniques for simultaneous direct manipulation of multiple virtual objects, also developed is a cooperative immersive solid modeler VLEGO II, which employs the proposed techniques. Chapter 1 gives a perspective of the study in the research area of virtual reality. In chapter 2, the difficulty of direct manipulation in virtual space is discussed, and a set of manipulation aid techniques are proposed, which include 1) discrete placement constraints, 2) collision detection and location adjustment, 3) dynamic control of operable degree-of-freedom. Chapter 3 describes a number of empirical studies to investigate the effectiveness of the proposed techniques and the improvement of the techniques. In chapter 4, VLEGO II is build and its implementation is described. VLEGO II enables multiple users to share a virtual workspace and to design 3-D objects by assembling simple primitives like toy blocks using two-handed and collaborative manipulation. Chapter 5 gives the conclusion.

Keywords:

virtual reality, manipulation aid, immersive modeler, collaboration

*Doctor's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT9661007, May 11, 1998.

目次

1. 序論	1
1.1 人工現実感概観	1
1.1.1 人工現実感の歴史	1
1.1.2 人工現実感の従来研究	2
1.2 本研究の目的	5
1.2.1 複数仮想物体の協調操作の補助手法の開発	5
1.2.2 協調型仮想物体モデラの開発	6
1.3 本論文の構成	7
2. 仮想物体操作の困難性と操作補助手法の提案	9
2.1 緒言	9
2.2 仮想物体の直接操作における困難性	10
2.2.1 幾何的整合性	10
2.2.2 時間的整合性	14
2.2.3 生理的制約	16
2.3 複数仮想物体の協調操作の補助手法の提案	19
2.3.1 離散配置制約	20
2.3.2 干渉回避	21
2.3.3 動的自由度制御	24
2.4 結言	26
3. 仮想物体操作補助手法の有効性の検討	27
3.1 緒言	27
3.2 両手操作の有効性の検証（実験1）	27
3.2.1 実験手法	28
3.2.2 結果と考察	30
3.3 干渉回避の有効性の検証（実験2）	33
3.3.1 実験手法	34

3.3.2	結果と考察	37
3.4	動的自由度制御の有効性の検証 (実験3)	41
3.4.1	実験手法	41
3.4.2	結果と考察	44
3.5	離散配置制約の最適な利用法の検討 (実験4)	49
3.5.1	実験手法	51
3.5.2	結果と考察	52
3.6	結言	55
4.	協調型仮想物体モデラ VLEGO II の開発	57
4.1	緒言	57
4.2	協調型仮想物体モデラの特長	57
4.2.1	仮想物体モデラの特長	58
4.2.2	共有仮想空間を用いた協調作業の特長	61
4.3	VLEGO II の設計方針	62
4.3.1	形状生成手法	62
4.3.2	データ共有機構	63
4.4	VLEGO II の実装と機能	64
4.4.1	実行環境	64
4.4.2	作業空間の構成要素	68
4.4.3	プリミティブの基本操作	73
4.4.4	協調操作を交えた形状生成	75
4.5	仮想物体デザイン例	81
4.6	結言	83
5.	結論	84
5.1	まとめと考察	84
5.2	今後の展望	86
	謝辞	89

参考文献	91
研究業績	111
付録	116
A. 対応機器	116
A.1 計算機	116
A.2 入力装置	116
A.3 表示装置	117
B. 投影パラメータの調整例	119
C. 位置計測誤差の補正機構	122
D. 遅延予測フィルタ	125

目次

1.1 Sutherland の HMD と表示画像例 ([Sun96] より引用)	2
1.2 AIP キューブ	3
2.1 誤った投影パラメータによる投影歪みの様子	11
2.2 仮想空間提示ループ	15
2.3 姿勢の離散配置制約	21
2.4 2種類の操作自由度	21
2.5 干渉回避の例	23
2.6 操作自由度の動的遷移の様子	25
3.1 実験 1: タスクブロックの例	28
3.2 実験 1: 3通りの操作手法	29
3.3 実験 1: 直前 10 試行分のタスク達成時間の平均値の推移	31
3.4 実験 2: 各試行の初期状態	35
3.5 実験 2: 試行の完成例	35
3.6 実験 3: ハードウェア構成	42
3.7 実験 3: 仮想物体の配置	43
3.8 実験 3: 平均タスク達成時間	46
3.9 操作補助手法の改善	50
3.10 実験 4 の結果	53
4.1 従来の CAD	58
4.2 仮想物体モデラの特長	59
4.3 従来の CAD の設計過程	61
4.4 実行環境例 1	65
4.5 実行環境例 2 (合成写真)	66
4.6 VLEGO II の作業空間の構成要素	67
4.7 矢印型カーソル	69
4.8 手形状型カーソル	69
4.9 手形状型カーソルで仮想物体を把持する様子	69
4.10 予め用意しているテクスチャ	71

4.11	プリミティブボックス	71
4.12	ナビゲーションボックス	72
4.13	パレットボール	73
4.14	VLEGO II における協調接合操作例	76
4.15	VLEGO II における分断作業例	78
4.16	プリミティブ拡大縮小の様子	79
4.17	プリミティブ彩色の様子	81
4.18	犬のデザイン例	82
4.19	ロケットのデザイン例	82
4.20	学生居室のデザイン例	82
4.21	学生居室のデザイン例 (近接図)	83
5.1	VR Expo '97 における VLEGO II 展示の様子	86
A.1	自作 3 次元入力デバイス	117
A.2	SuperGlove ([日商エ 96] より引用)	117
A.3	SeeThrough Vision	118
A.4	Mediamask	118
A.5	CrystalEYES ([Ste98] より引用)	118
B.1	3 次元座標変換パラメータ	120
B.2	ディスプレイおよび操作者固有のパラメータ	121
C.1	磁場補正のシミュレーション (誤差の大きい場合)	124
C.2	磁場補正のシミュレーション (誤差の小さい場合)	124
D.1	予測フィルタの動作シミュレーション (1 次予測の場合)	125
D.2	予測フィルタの動作シミュレーション (2 次予測の場合)	125
D.3	予測フィルタの動作シミュレーション (3 次予測の場合)	125
D.4	予測フィルタの動作シミュレーション (4 次予測の場合)	125

表目次

2.1	主要な頭部の3次元位置計測手法	13
3.1	実験1の結果	31
3.2	実験2: 干渉の提示条件	34
3.3	実験2: 各指標の全被験者による平均	38
3.4	実験2: 典型的分散分析結果	38
3.5	実験2: 一把持当りの時間指標の全被験者による平均(秒)	38
3.6	実験2: 各サブタスクの所要時間の総時間に対する比	38
3.7	実験2: 各提示条件の主観評価の被験者による平均(10段階評価)	39
3.8	実験2: ハイライトの主観評価	39
3.9	実験3: 操作補助の4条件	43
3.10	実験3: 指標の平均値と分散分析結果(有意水準 $\alpha = 0.05$)	47
3.11	実験4: 7段階主観評価の基準	52
3.12	実験4: 指標の平均値と分散分析結果(有意水準 $\alpha = 0.05$)	53
4.1	共有仮想空間で用いられるデータ共有機構の分類	63
4.2	VLEGO IIにおけるブロック操作	73
A.1	VLEGO IIで利用できる3次元位置計測装置	116
A.2	本研究室で利用できる表示装置	118

1. 序論

1.1 人工現実感概観

1.1.1 人工現実感の歴史

— *A display connected to a digital computer gives us a chance to gain familiarity with concepts not realizable in the physical world. It is a looking glass into a mathematical wonderland. ... With appropriate programming such a display could literally be the wonderland into which Alice walked.*

Ivan Sutherland, "The Ultimate Display," 1965.

我々は、現実世界から様々な知覚刺激を受け、それらの刺激によって現実を現実であると認識している [大山 84]。このことは、視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚の五感をはじめとするあらゆる刺激を完全な形で人工的に合成し再現することができれば、その人工的な環境をあたかも現実であると感じる（現実感）ことができる、ということの意味している。このような、現実感を人工的に作り出すという考えは、3次元コンピュータグラフィクス（CG）を実時間で直接人間に提示する計算機システムを MIT（Massachusetts Institute of Technology）の Sutherland が 1965 年に提案、1968 年に実現して以来、空想の産物から工学の対象へと変貌した [Sut65, Sut68]。図 1.1 は Sutherland が世界で初めて製作した頭部搭載式ディスプレイ（HMD: Head Mounted Display）“Sword of Damocles” の外観とその表示画像例である。

こうして誕生した人工現実感（Artificial Reality）は、1987 年に当時 VPL（Virtual Programming Language）社の CEO であった Lanier により Virtual Reality（VR: 仮想現実）という造語が生み出された時期を境に、必要なハードウェア環境の整備が進み、MIT や NASA（National Aeronautics and Space Administration）など各地で急速に研究対象となっていった [Dai98, Kru91, Rhe90, Wex93, 廣瀬 93]。典型的には、これらの研究における人工現実感の環境は、1) 頭部の位置や姿勢を計測できる HMD を用いて、視差を与えた 3次元 CG のステレオ画像を実時間で表示し、視点追従型の両眼立体視を可能とする、2) 手の位置や姿勢

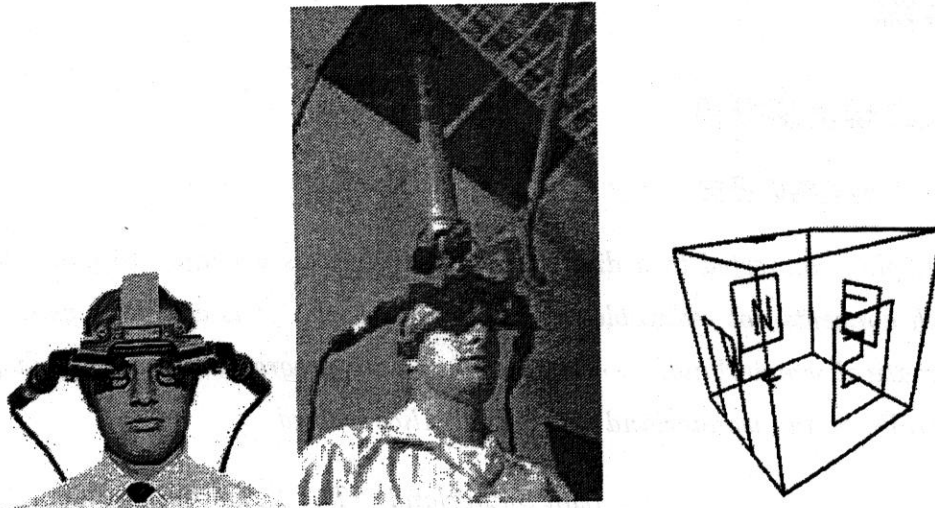


図 1.1 Sutherland の HMD と表示画像例 ([Sun96] より引用)

を計測できる 3次元入力装置を用いて、3次元 CG の操作を可能とする、といった特徴を有する。今日では、その技術の先進性や潜在能力の高さから人工現実感
は社会の幅広い注目を集め、[野呂 92, 野呂 96, 服部 91, 原島 94] などの数々の一
般向け解説書が出版されるに至っている。

1.1.2 人工現実感の従来研究

人工現実感の評価尺度空間として、1991年に MIT の Zeltzer は AIP キューブを提案している [Zel91]。図 1.2 に AIP キューブの様子を示す。AIP キューブは、人工現実感の 3 要素を自律性 (Autonomy)、対話性 (Interaction)、臨場感 (Presence) と捉え、これらを 3 軸として各値域が 0 から 1 となるような立方体を成している。自律性は、人工現実感が生成する仮想空間内の個々の要素が自らの挙動を自律的に決定している度合を表す軸であり、例えば静止画に描かれた物体は 0、映画の登場人物は 1 となる。対話性は、仮想空間内の要素に対して実際に操作者が働きかけを行なうことのできる度合を表す軸であり、映画やテレビは 0、すべてのパラメータを操作できる場合 1 となる。臨場感は、操作者を取り巻く仮想空間の映像や音場が、そこに存在するものとして、どの程度自然に受け入れられるかを表す軸であり、各種感覚器の入出力デバイスを介したシステムの操作性

も含む概念である。例えば、完全な臨場感を備えるが自律的に行動する要素が全くない、静止した仮想世界の中で操作者が自由に行動できる場合、そのシステムは AIP キューブ上で $(0,1,1)$ の位置に来る。また、 $(1,1,0)$ の方向性が重要となるアプリケーションとしては、自律的に行動を決定する計算機内のキャラクターと操作者が対話（対戦）できる様々なコンピュータゲームが挙げられる。 $(1,0,1)$ に来るシステムでは、臨場感にあふれる情景に没入して、個々の要素がそれぞれ自律的に行動する様子を観察できるが、それらの要素に対して操作者は何ら働きかけができない。人工現実感のシステムではないが、このような方向性を持つものとして、全方位画像センサ HyperOmni Vision を用いたテレプレゼンスシステム [山澤 98] が挙げられる。

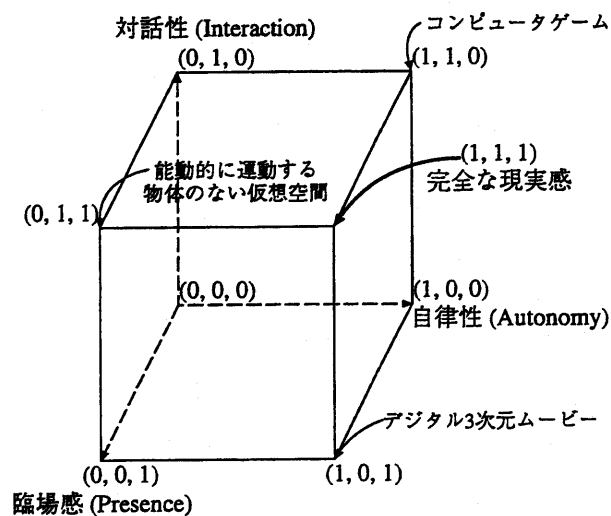


図 1.2 AIP キューブ

AIP キューブ上で $(1,1,1)$ となるシステムでは、現実と区別できない完全な現実感が得られる。しかしながら、現在の技術水準では完全な現実感を人工的に得ることは困難である。例えば、人間の視野角や視覚の空間分解能に比して、映し出される 3 次元映像が臨場感や写実性に欠ける、3 次元映像中の仮想物体を実物体と全く同様には触れたり掴んだりできない、といった理由により、仮想空間は

実空間と容易に弁別されてしまう。現在では、完全な現実感を生成することは技術的に非常に困難であること、また、そのような不完全な現実感であっても、用途によっては十分に実用的であることが分かってきており、人工現実感に関する研究は、1) 人工現実感の本質・特性を明らかにしようとする基礎研究、あるいはさらなる現実感の向上を目指す基礎研究、2) 計算機ならではの柔軟かつ便利な作業環境の創出を目指す応用研究、に分化しているといえる [BC94, 野村 97]。

人工現実感の特性を明らかにしようとする研究には、両眼立体視の生理特性に関する研究 [EM97, WAB93, 石樽 96, 魚森 96, 森田 96, 矢野 93], 3次元直接操作の生理特性に関する研究 [GM96, HPGK94a, SO95, 木島 95b, 竹村 91] などがある。また、現実感の向上を目指す研究としては、高速な3次元描画ハードウェアに関する研究 [Ake93], 焦点調節を補償する視覚提示装置 [志和 96] やカメラ画像を用いた手振り入力 [石淵 96, 島田 96] などの、より違和感の少ない入出力を可能とするための研究、視点に応じた3次元形状の見え方の正確さに関わる、視覚と位置覚の整合性に関する研究 [AB94, Dee92, Hol97, OT96, 大石 94, 廣瀬 90], 力覚, 触覚, 前底感覚, 嗅覚, 熱感などの視覚以外の感覚提示に関する研究 [BD96, BAC97, 北村 97, 野間 96, 廣瀬 95, 廣瀬 97b, 廣瀬 97a], 仮想物体の挙動, ふるまいに関する研究 [BV93, 木島 95b, 北村 96] などがある。高い現実感が特に重要となる応用分野の研究開発事例としては、遠隔に離れた複数の利用者があたかも一堂に会しているかのような感覚で、互いに対話を行うことのできる臨場感通信会議システム [宮里 96, 宮里 97], 損壊した建造物の様子を再現するためや設計途中の建物の使い勝手を確認するためのウォークスルーシステム [JKM⁺96, MW96, 高橋 96], 軍事訓練用システム [ZBD⁺97, ZP96, ZPF⁺93], 手術シミュレーションシステム [北川 96] などがある。また、AIP キューブの一軸である自律性に関する研究として、生物などの仮想空間中の物体の動きを物理モデルに従って計算し、自然なCGアニメーションを自動的に生成する研究が行なわれている [HP97, TPB⁺89, TT94]。

一方、計算機ならではの新しい作業環境の創出を目指す研究とは、人工現実感を新たなマンマシンインタフェースと捉え、その有効な利用方法を模索する研究である。マンマシンインタフェースは、初期の一括バッチ式からコマンドプロン

プト（対話シェル）方式に移行し、さらに2次元グラフィカルユーザインタフェース（2DUI）へと変遷してきた。人工現実感を用いて3次元ユーザインタフェース（3DUI）を構築することで、従来のマンマシンインタフェースの枠組を越えた新たな作業環境を創り出すことができる。このような研究開発の代表例としては、立体形状のモデリングを仮想環境中で行う研究 [BDHO92, BH95, Dee96, KE96, Nom94, SG94, SRS91, SSOM94, WBC⁺95], 分子モデル, 流体, 電場や重力場などの直接観察することが困難な多次元データの把握を支援するための科学的可視化に関する研究 [BL91, Bry92b, CH94, NHM97], 時系列的, 階層的, あるいは一般のグラフ構造的に絡み合った抽象データ構造の理解や, それらデータの利用を支援することを目指す, 3次元情報視覚化に関する研究 [CRM91, RCM93], 透過型のHMDを用いて実空間と仮想空間を同時に観察することにより, 現実世界での作業を3次元CGで支援しようとする拡張現実感（AR: Augmented Reality）に関する研究 [Azu97, FMS93, FWK⁺95] などがある。

1.2 本研究の目的

本研究では、人工現実感の基礎研究として、複数の仮想物体が同時に操作される際の円滑な操作補助手法について検討し、いくつかの手法を提案する。また、提案手法を活かした応用研究として、複数人による協調モデリングが可能な協調型仮想物体モデラを実装する。以下では、本研究の目的と意義について述べる。

1.2.1 複数仮想物体の協調操作の補助手法の開発

本研究の第1の目的は、仮想物体の円滑な操作補助手法を開発することである。人工現実感の利点の1つは、3次元形状を直接操作することが可能な点である。ここで「直接操作」とは、3次元的に観察できる立体形状に対して、その位置まで直接3次元的に手や腕を動かして働きかけを行うような操作である。直接操作が円滑に行えるためには、仮想物体が実際にその場所に存在すると感じる（実在感, 臨場感）ことができ、その仮想物体に対して行った操作について、利用者が実物体操作の経験から推測したと同様の反応をシステムが返す（対話性）ことが要求される。すなわち円滑な直接操作環境を提供することは、AIPキューブの3要素の中で、人

工現実感をマンマシンインタフェースと捉えた場合に最も重要と考えられる、臨場感と対話性の2軸を1に近づけるための重要な課題である。人工現実感のシステムは、その初期から直接操作が可能であった。しかしながら、一般に仮想物体の直接操作は正確に行うことが困難であるという問題があり、実用的な直接操作を可能とするための研究が続けられている。この問題は、仮想空間の計算および描画の遅延、3次元入出力装置の低い精度や不完全なパラメータ設定による提示位置のずれ、あるいは人間の視覚の奥行き方向の分別能力や筋肉の疲弊などの生理的要素に起因する [AJE92, CMN83, HPGK94a, LSG91, SZ94, SZP89, 柴崎 92]。この問題を解決するために、人間の物体操作に重要とされる力覚や触覚も同時に提示する手法が提案されている [INS94, 岩田 92, 佐藤 91, 平田 93, 米川 94]。しかし、特殊で大がかりな装置が必要になることや、装置の可動域にユーザの行動範囲が束縛されるという問題がある。そこで本研究では、利用者の手の動きは制限せずに、物体の視覚的位置の自由度のみに制限を設ける手法 [BV93, 木島 95a, 北村 96, 竹村 94] に着目する。その際、近年の人工現実感アプリケーションでは、両手操作、あるいはネットワークを介した複数操作者の共同作業を可能とするものが増えており [TK92, INS94, SG94, MM95]、このような複数の仮想物体が同時に操作される環境において、仮想物体の操作性を向上する重要性が高まっていることを鑑み、複数の仮想物体が同時に操作される状況下でも効率良く操作補助の可能な手法であることを目指す。

1.2.2 協調型仮想物体モデラの開発

本研究の第2の目的は、操作性に優れた仮想物体モデラを構築することである。今日、映画やテレビ、意匠デザイン、プレゼンテーションから家庭用ゲーム機に至るまでのあらゆる映像表現分野において3次元CGが扱われ、膨大な3次元データを効率良く生成したいという要求や、一般の利用者が3次元CGを手軽に作成したいという要求が高まっている。ところが、従来の3次元CAD (Computer Aided Design) アプリケーションは、通常2次元画面上で3次元形状を視認、操作するため直感的でなく、CADのコマンド体系も複雑になりがちであり習熟を要するという問題があった [HG94, 河内 94]。これに対し、仮想空間中で直感的に3次元

形状を操作することで簡易にモデリングを行う仮想物体モデラが注目され、様々な研究がなされている。仮想物体モデラの初期の試作例としては、Butterworthらによる 3DM などが知られている [BDHO92]。しかしながら、仮想物体モデラは未だ実装例自体が少なく、それらのモデラにおいても操作性の向上については深く考慮されていない [Dee96, KE96, Nom94, SSOM94, 掛井 93, 柴崎 92]。仮想物体モデラの操作性を高めるためには既に述べた仮想物体の直接操作に付随する困難性を解決した操作手法の導入が不可欠である。

さらに本研究では、仮想物体モデラの有益性を向上するために、共有仮想空間の適用を検討する。共有仮想空間とは、ネットワークを介して複数の計算機を接続し、複数の利用者があたかも 1 つの仮想空間に共存しているかのように作業を行うことができる環境である。実空間では、顧客と設計者、あるいは複数の設計者が同席して相談しながら 1 つのデザインを行う協調設計が頻繁に行われる。したがって、このような協調作業を仮想物体モデラにおいても可能とする意義は大きいと考えられる。ところが、共有仮想空間は利用せずに協調モデリングを支援するシステム [GS94, SF92] や、共有仮想空間を利用して、設計以外の協調作業を支援するシステム [BBF⁺95, BBRG96, CH93, FBSC93, Sty96] は知られているが、共有仮想空間を利用した協調モデリング支援システムはほとんどない [LJVD96]。そこで本研究では、提案する操作補助手法を導入し、複数の利用者の協調作業によって簡易に正確な 3 次元形状を生成可能な、協調型仮想物体モデラ VLEGO II を実装する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。2 章では、仮想物体の操作が困難となる理由について述べ、これを解決するために、1) 仮想物体の位置と姿勢を離散的に制約する、2) 仮想物体間の干渉を検出し位置を補正する、3) 複数の仮想物体間の位置関係に基づいて仮想物体の操作自由度を動的に変更する、という 3 点を特徴とする操作補助手法を提案する。3 章では、いくつかの評価実験を通して提案手法の評価と改善を行なう。4 章では、改善された操作補助手法を導入して開発した協調型仮想物体モデラ VLEGO II の実装と諸機能について述べる。また、

VLEGO II を用いて作成したいくつかのデザイン例を示す。最後に 5 章では、本論文全体を総括する。

2. 仮想物体操作の困難性と操作補助手法の提案

2.1 緒言

仮想空間内では、様々な要因により仮想物体の正確な操作が困難なため、操作性の向上を図る研究が続けられている。仮想物体の操作性を向上するには、操作が困難となるメカニズムを理解し、改善の方策を講ずることが重要となる。

木島らは仮想空間における正確な操作を妨げる要因として、1) 幾何的不整合、2) 時間的不整合、の2点を挙げている [木島 95b]。仮想物体が実際に3次元空間上のある場所に存在しているように観察されるためには、表示解像度が高く、写実性の高い映像を提示するだけでなく [SO95]、利用者の両眼間隔、視点の3次元位置、表示装置の画角や縦横比（アスペクト）などを正確に考慮した画像を提示する必要がある。これらのパラメータが不正確な場合、仮想物体は本来提示したい位置からずれて観察され、形状も歪んでしまう。このような、仮想物体の位置や形状が正確に観察される度合を一般に「幾何的整合性」という。幾何的不整合が存在すると、視点の移動によって、仮想物体が変形したり定位置にあるように見えずに浮遊して観察されたりする。その結果、視覚と位置覚に空間的ずれが生じ、仮想物体の見えるところに手を伸ばしても仮想物体が操作できないという事態となり、操作性が劣化する [HPGK94a]。また、たとえ幾何的整合性に優れた仮想空間の提示が可能であっても、視点や手の3次元位置計測から仮想空間の提示までに時間遅れが存在するため、視点を移動してから視界が変化するまでに時間を要する、手を用いて仮想物体を移動する際に仮想物体が手に遅れてついてくる、といった事態が起こってしまう。このような、利用者のアクションに対する仮想空間の提示の応答性（す早さ）を一般に「時間的整合性」という。時間的不整合が存在すると、応答遅延のために個々の操作に時間を要したり操作感覚を損なう上、視点移動や仮想物体操作の度に幾何的整合性を崩すため、操作性が劣化する。本章では、まず2.2節で、正確な仮想物体操作を妨げる要因として、これら2つの整合性に加えて、力覚や触覚などの適切なフィードバックのない場合の3) 生理的制約、を加えた3つの要因を考慮し、これら3要因についてそれぞれ詳述した上で、改善策について考察する。次に2.3節では、3要因の中で最も改

善策を与える必要性が高いと考えられる生理的制約に関して、具体的に操作補助手法を提案する。

2.2 仮想物体の直接操作における困難性

2.2.1 幾何的整合性

高い幾何的整合性を得るためには、仮想空間の描画に必要な様々な投影パラメータを正確に設定する必要がある。設定を要する投影パラメータには、例えば、据え置き型ディスプレイを用いたデスクトップ型の人工現実感システムの場合、

- 仮想空間の世界座標系から 3 次元位置計測装置の座標系（計測座標系）への座標変換行列 S
- 計測座標系から頭部位置計測点の局所座標系（計測点座標系）への座標変換行列 M
- 計測点座標系から両眼位置で定まるカメラ座標系への座標変換行列 E

などの 3 次元座標変換パラメータ（付録の図 B.1 参照）と、ディスプレイ投影面の物理的サイズ、および利用者個々の両眼間隔などがある。これらの全ての投影パラメータが常に正しく設定されていなければ、仮想空間は正しく表示されない。ところが、

- 一度計測すればよいパラメータの計測が完全には正しく行えない (S , E , ディスプレイのサイズ, 両眼間隔)。
- 常に計測しなければならないパラメータの計測に誤差が生じる (M)

といった理由により、投影パラメータを正確に設定することは困難である。

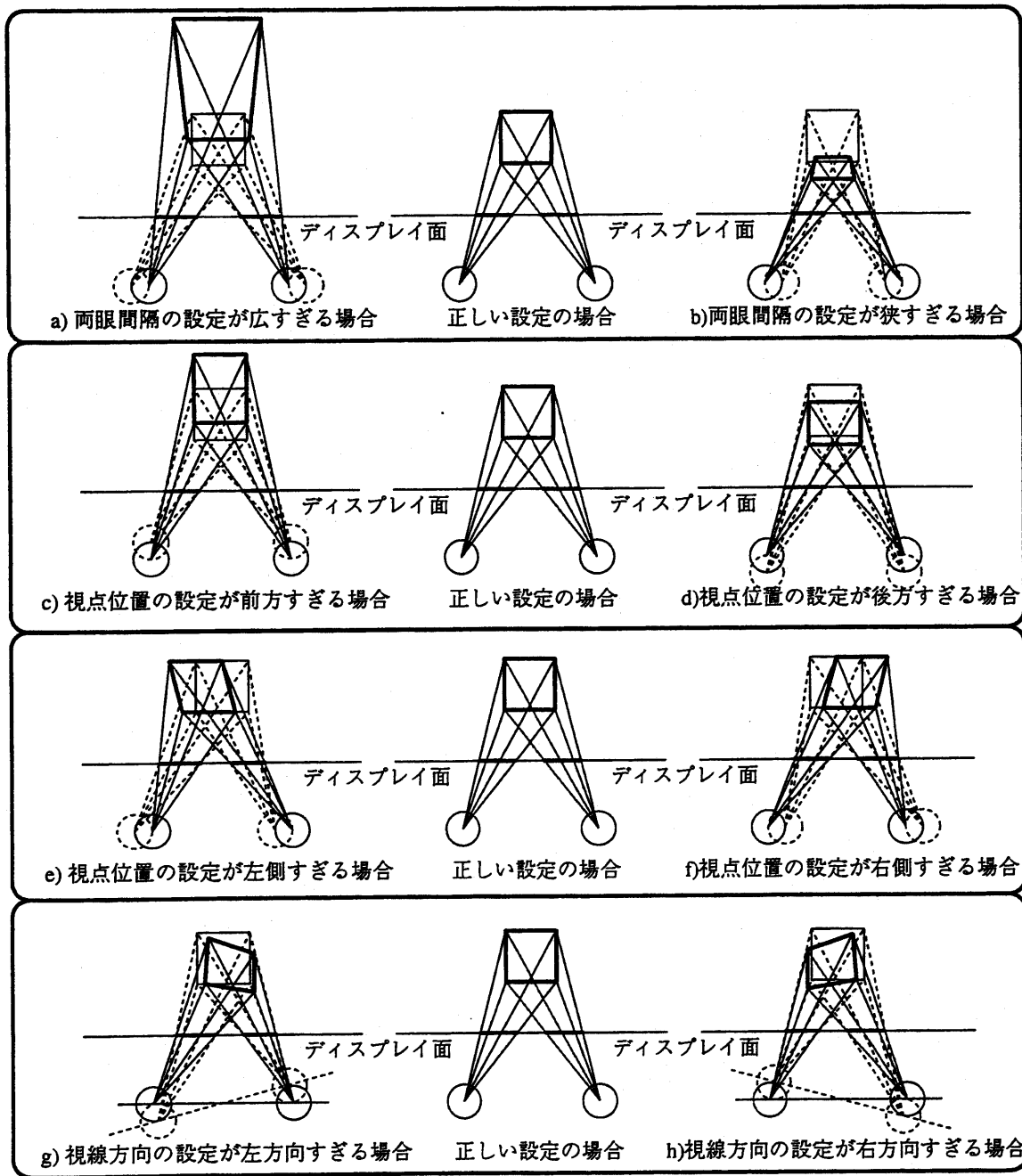


図 2.1 誤った投影パラメータによる投影歪みの様子

これらの投影パラメータが正しく設定されていない場合に、どのような投影歪みを生じるかを図 2.1 に示す。図 2.1 a) および b) は、各々両眼間隔の設定が実際より広すぎる場合と狭すぎる場合に生じる投影歪みの様子を示している。両眼間隔の設定が広すぎる場合、仮想物体は視点から遠ければ遠いほど本来の位置よりも奥にずれて観察される。一方、両眼間隔の設定が狭すぎる場合、仮想物体は視点から遠ければ遠いほど本来の位置よりも手前にずれて観察される。また、図 2.1 c) および d) は、各々視点位置の設定が実際より前方すぎる場合と後方すぎる場合に生じる投影歪みの様子を示している。これらの場合、両眼間隔の設定が正しくない場合と同様に、仮想物体は視点から遠ければ遠いほど本来の位置よりも奥または手前にずれて観察される。さらに、図 2.1 e) および f) は、各々視点位置の設定が実際より左側すぎる場合と右側すぎる場合に生じる投影歪みの様子を、図 2.1 g) および h) は、各々視線方向の設定が実際より左方向すぎる場合と右方向すぎる場合に生じる投影歪みの様子を示している。このように仮想物体が本来の位置とずれて観察されると、仮想物体が観察されている位置と仮想物体を実際に操作できる位置がずれ、視覚と位置覚の不整合をひき起こすために、操作性に支障をきたすと考えられる。また、視点の位置によって仮想空間全体の歪み方が変動するため、仮想空間の 3 次元的構成の理解を妨げ、乗物酔いに似た症状を起こしやすくなると考えられる。

次に、両眼間隔の計測誤差やその影響の軽減について考える。両眼間隔は厳密には輻輳角の大小に従って変化しているが、一般の人工現実感システムでは両眼間隔を一定であるとみなしており、その結果、視対象の距離に応じた投影歪みが生じている。そこで、視線検出装置を用いて両眼間隔の変化を実時間で実測することにより投影歪みを軽減することが考えられる。また、星野らは、仮想物体の提示距離やディスプレイの位置に応じて両眼間隔を逆算する補正式を導出し、両眼間隔を実時間で実測することなく、投影歪みの軽減を行う手法を提案している [星野 97]。

表 2.1 主要な頭部の 3 次元位置計測手法

方式	機構	利点	欠点	製品例
機械式	角関節角の累積から 末端位置を計算	正確かつ 比較的安価	可動域が狭い, 着脱が繁雑	ADL-1 (Shooting Star)
光学式	画像内の情報から撮像物体と カメラの相対位置関係を逆算	ワイヤレス が可能	撮像環境を選ぶ	HiRES (Motion Analysis) 4D-Captor (System Sacom)
超音波式	3 つ組のスピーカからの超音波を 3 つ組のマイクで 3 角測量	比較的安価	風速, 気温, 隠蔽 などに影響を受ける	Sonic Digitizer (Science Accessories)
電磁気式	直交 3 軸周りに交流磁界を 発生し直交 3 軸周りのコイル の誘導電流を解析	広範囲で 比較的正確	磁場の歪みに 従った誤差を生む	Fastrak (Polhemus) Flock of Birds (Ascension)

次に、視点の 3 次元位置計測に用いられる一般的手法と、精度の良い位置計測を行うための従来研究について述べる。まず、人工現実感システムに用いられている視点の 3 次元位置をトラッキングするための主要な手法を表 2.1 に示す。機械式的手法は比較的正確な計測が可能であるが、装置の装用が利用者に違和感を与え、利用者を装置の狭い可動域に束縛してしまうという問題があるため、一部のデスクトップ型システムを除いてあまり使用されていない [WAB93]。超音波式的手法は比較的安価にある程度の精度が得られるが、計測値が使用環境の気温や風速、音波の遮蔽や反射などの影響を受けやすく、精度良い測定の可能な環境が限られるという問題がある。従って、視点を広範囲に移動する場合には不向きであり、一部のデスクトップ型システムを除いてあまり使用されていない [Dec92]。

光学式的手法には、1 つの計測点を複数のカメラで撮像する手法 (2 眼ステレオ, 多眼ステレオ) [奥富 96] や、複数の既知の計測点を単眼のカメラで撮像する手法 (カメラキャリブレーション) [出口 93, 浅田 96] がある。表 2.1 の製品例は前者の方式を用いており、大隈らによるシステムは後者の方式を用いている [大隈 97, 中沢 97]。光学式的手法は、煩わしい装置の装着などの負担が比較的少ない利点があるが、計測可能な範囲を広げるほど計測精度が悪くなる、計測点の検出や同定に失敗すると計測が不可能となる、などの問題がある。光学式の手法の応用として、Azuma らは、HMD に取り付けられた 4 つのカメラで天井に格子状に配した周期的に発光する赤外線 LED を撮像し、撮像時刻と画像上の光点の位置から HMD の 3 次元位置・姿勢を比較的広範囲かつ高精度に計測する手法を実現

している [AB94]. これは優れた手法であるが、大掛かりで特殊な装置を要する。

現在、人工現実感システムの頭部の 3 次元位置計測手法として、最も一般的なものが電磁気式的手法である。電磁気式的手法は比較的広範囲に渡って精度良く測定することが可能である。ただし、この方式は周囲の金属などの影響を受けて磁場が歪み、非線形な誤差を生みやすいため、計測精度を十分発揮させるには実環境に細心の注意を払う必要がある。そこで、歪んだ磁場を補正するために、Bryson や Livingston らは、ルックアップテーブルを用いる手法を提案している [Bry92a, LS97]. また、Bajura らや State らは、HMD に取り付けられたカメラの視界に映るマーカを電磁気式センサから特定し、特定したマーカの、既知の 3 次元位置と画像上の位置の対応から HMD の位置と姿勢を補正するハイブリッド手法を提案している [BN95, SHC+96, SLG+96].

いずれにせよ、幾何的整合性を向上するには、精度の高い 3 次元位置入力装置を用いた上で、表示装置の特性や個々の利用者にあったパラメータを使用し、3 次元形状をできる限り正確に提示することが重要である。

2.2.2 時間的整合性

仮想空間は、図 2.2 に示すように入力信号を処理し画像や場合によっては音声などを出力するという閉ループを延々繰り返すことによって提示される。ループ一周の所要時間である更新間隔や入力から出力までの時間である応答遅延は、操作性に重大な影響を及ぼす [金川 97, 佐藤 90]. Card らや MacKenzie らの実験によれば、遅延が 100ms 程度以下で既に操作性の劣化がはじまり、250ms 程度以上となると急激に操作が困難になる [CMN83, MW93]. 従って、時間的整合性を確保し、快適な操作性を得るには応答遅延を 100ms 以下に抑えることが肝要である。応答遅延は、1) 入出力装置の処理遅延、2) 計算機による計算遅延、3) 仮想空間の描画遅延、などに分類することができる。これらの遅延による操作性の劣化を抑えるには、次の 2 通りの手法が考えられる。

- 高速な処理の可能な機器構成やアルゴリズムを採用し、遅延量自身を抑える。
- 計測するパラメータの現在値を予測し、遅延の影響を実質的に抑える。

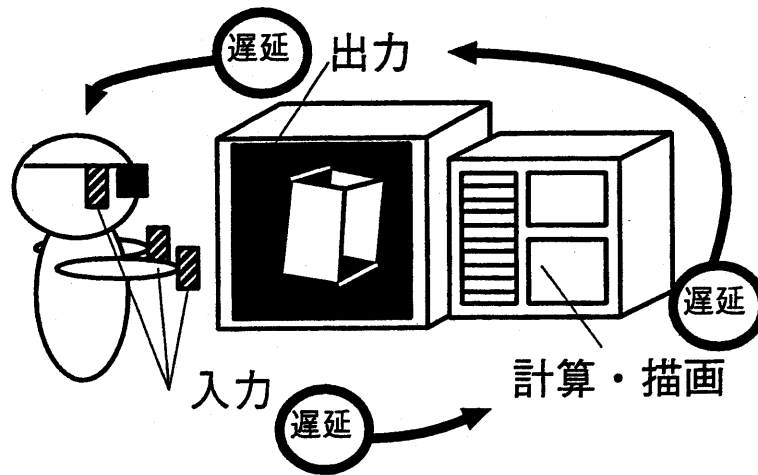


図 2.2 仮想空間提示ループ

まず、遅延量自身を抑えることを考える。Liang らや Adelstein らによれば、入出力装置は処理周期を持つものが多く、入出力装置の処理遅延は通常 30ms 以下で一定ある [AJE92, LSG91]。この値を短縮するためには、より処理周期の早い装置を用いる必要がある。一方、計算遅延や描画遅延は仮想空間の複雑さに依存するので、これを短縮するにはより高速な計算機やアルゴリズムを使用する以外にない。特に、描画遅延の短縮には 3 次元グラフィックスの描画に優れた高速な専用ハードウェアを使用することが有効である [Ake93]。また、プログラム各部の遅延量に依らず、メインループの更新レートを確保するための手法として、入出力装置の値計測処理や仮想空間の描画処理を各専用プロセスに分割し、共有メモリを介して非同期に最新値を用いる手法が確立されている [Gre96, Ros95]。同様の手法として、Bishop らは、直前のフレームから現在のフレームへの描き替えを漸時的に行う手法を提案している [BFMZ94]。

一方、手や頭部の位置など、計測するパラメータの現在値を予測することで、実際に提示される時刻に合った画像を予め描画しておけば、実質的に遅延の影響を抑えることができる。予測を行う手法としては、線形近似や Kalman の予測フィルタ、灰色システム理論などの手法が用いられ、急激な運動の変化のない場合には

一定の効果のあることが知られている [AB94, WO95, 有本 77, 廣瀬 90, 柳田 97]. 遅延による操作性の劣化を抑える他の手法としては, 遅延を補うなんらかの情報 を付加する手法が考えられる. 例えば, 筆者と金川らは, 手形状入力装置を用い て仮想物体の直接操作を行う際に, 透過型 HMD を装着して実際の手を観察しな がら操作することにより応答遅延の悪影響をある程度抑えられることを示してい る [金川 98]. また, 表示装置として, HMD よりは据え置き型のディスプレイを 用いた場合の方が, 視線の変化に対する視体積の変化が遥かに小さい (厳密に言 えば, 単眼の場合, 視線方向の変化に対して視体積は変化しない) [CDS93]. 従っ て, 見回しの際の時間的整合性を改善する観点からは, 据え置き型ディスプレイ を用いたシステムの方が優れているといえる.

2.2.3 生理的制約

市販の 3次元位置計測装置とグラフィクス WS を用いて, 一般的構成の人工現 実感システムを構築した場合, 何ら特別の工夫をせずとも, 一定の幾何的および 時間的整合性を得ることができる. ところが, 仮想物体の自由な選択や配置を可 能とするには, これまで述べてきた 2つの問題点を解決し, 正しい立体像を遅延 なく提示するだけでは不十分であり, 使いやすいインタフェースを構築するた めには, むしろ以下に述べる生理的制約の克服が最大の課題となることが多い. す なわち, 幾何的整合性や時間的整合性のさらなる改善よりも, 生理的制約を克服 する操作補助手法の開発が重要であることが多い. ここでは, 仮想物体の直接操 作が困難となる生理的理由について述べ, これを改善するための従来の操作補助 手法について検討する.

到達運動の困難性 一般に, 人間が物体を操作する場合, その操作は, 1) 物体 の選択, 2) 物体の配置や変形, 3) 物体の解放, の 3段階に分解できる. 直接操 作により選択や配置を行う場合, 空間中のある位置に手を伸ばす運動である「到 達運動」が必要となる. ところが, 実空間の場合に比べ, 一般の仮想空間では到 達運動の正確性は著しく劣化する. これは, 視覚や触覚など, 到達運動の軌道修 正に必要な情報が通常の仮想空間では必ずしも完全に再現されないことに起因す

る。到達運動は、1) 脳が目標位置までの運動を計算し、フィードフォワード制御により軌道修正をせずに一気に進む「弾道運動」と、2) フィードバック制御により修正しながら進む「修正運動」の2つの部分運動から成るとされている [乾 95]。実空間で修正運動に利用されるフィードバック情報には、体性感覚、視覚、触覚、力覚などがあるが、これらの中で仮想空間でも完全に再現されるのは筋繊維のゴルジ体から得られる体性感覚（自己受容感覚）だけである。視覚について、通常仮想物体の提示の際に、輻輳角の変化に伴う両眼間隔の動的変化は考慮されず、焦点の調節機能も再現されないため [志和 96]、実物体を観察する場合に比べて距離感の把握が困難である。また、例えばこれらが完全に再現されても、本質的に、人間の視覚特性は視線に垂直な方向に比べて奥行き方向の弁別能力が低く、四肢の空間指示能力も低いという問題がある。例えば、腕をあげて指先で空中を指示する場合、指先は常に振動し安定しない。実空間では触覚や力覚がこれを補い、物理的に手が目標物体と接触する、あるいは把持している物体が他の物体と接触することを頼りに正確な選択や配置を行っているが、仮想空間でこれらの感覚を自然に提示することは困難である [佐藤 91]。竹村らは、力覚や触覚の伴わない仮想空間内で利用者が意志通りに3次元位置を指示できる精度は1cmから2cm程度と報告している [竹村 94]。

操作補助手法 1: 仮想物体の操作自由度の拘束 仮想物体の直接操作の操作性を向上する手法としては、仮想物体または操作者の手の動きの自由度を制限する手法が考えられる。自由度を制限する手法には、適当なフィードバック装置を用いて、実際に力覚を再現し、操作者の手の動きを物理的に拘束する手法 [岩田 92, 岩田 95, 野間 96, 平田 93, 米川 94] と、操作者の手の動きは拘束せず、仮想物体の運動のみを視覚的に拘束する手法 [KYK96, 木島 95a, 北村 96, 竹村 94, 吉村 91] がある。前者の手法は、装置の装用が繁雑で利用者の操作感を損ないやすく、装置の可動範囲が比較的狭いため利用者が自由に運動できないという問題がある。一方、後者の手法は、仮想物体の面や稜線などの幾何特性に応じて操作可能な位置や姿勢を制約する。すなわち、常に6自由度の操作を許すのではなく、物体間の干渉状態などに基づいて操作者が現在関心のある操作を推定し、関連する自由度の操作のみを許す。後者の手法は、簡易かつ確実に仮想物体操作の正確性を向

上できるが、違和感のない自然な制約方針となるよう配慮する必要がある。

操作補助手法 2: 両手操作の導入 仮想物体の操作を円滑に行うもう1つの有力な手法として、両手による操作を用いる手法がある。両手操作はタイピングや工作、楽器演奏など日常的に行なわれており、自然で効率的とされている。両手操作は片手操作に比べ作業効率などの点で優れ、Buxtonらによってその特性の分析や両手操作を活かしたツールについて以前より研究が行われてきた [BH92, BM86, GM96]。Kabbashらは、2次元の位置指示操作における利き手と非利き手の特性の違いを調査し、非利き手は精度的に利き手にやや劣るが指示時間などの基本特性は十分高いことを示した [KBS94, KMB93]。Hinckleyらは、両手操作について1) 並列操作により作業が効率化する、2) 上半身と両手の相対位置に基づく体性感覚を利用し、仮想空間と実空間の対応の理解を促進する、といった利点を挙げている [HPGK94a]。仮想物体を両手により操作する利点としては、さらに、3) 計測される3次元位置がノイズなどにより振動する場合があるが、複数計測点間の相対位置は絶対位置に対して比較的安定なため、両手の相対位置を利用して操作精度の低下を回避する、といった利点が考えられる。このような利点を持つ両手操作を仮想空間で有効に活用するために、Mapes, 野間, 舟橋らによって、両手で協調して仮想物体を操作するための操作手法が検討されている [MM95, 野間 97, 舟橋 97]。

両手による操作を積極的に支援する人工現実感システムとして、3次元のデザインを支援する、Sachsらによる3-Draw[SRS91], ShawらによるTHRED[SG94], ノースカロライナ大(UNC: University of North Carolina)のChapel Hill Immersive Modeling Program (CHIMP) [Min96], MultiGen社のSmartScene[Mul97]などが知られている。また、Hinckleyらは脳断面を視覚化する際の断面位置決定手法を提案している [HPGK94b]。一方、人工現実感システムではないが、BierらはToolglassと呼ばれる2次元ドロ잉アプリケーションを開発している [BSF+94, BSP+93]。また、Toolglassの概念を3次元化した例として3D Magic Lenseが知られている [VCWP96]。

2.3 複数仮想物体の協調操作の補助手法の提案

本研究では、仮想物体の直接操作を困難にする3つの要因のうち、最も必要性の高いと考えられる生理的制約を克服する操作補助手法について検討し、その1手法を提案する。特に、両手操作や共同操作を可能とする人工現実感システムの増加を鑑み、複数の仮想物体が同時に操作されるような場合にも効率的に操作補助が行なえる手法となることを目指す。

複数の仮想物体が同時に操作される際に、仮想物体間の相対位置や相対姿勢を拘束して正確に揃えようとする場合、少なくとも1つ以上の仮想物体の位置や姿勢を明示的に変更する必要がある。この際、仮想物体を拘束する参照座標系の設定方針および参照座標系への拘束方針が問題となる。まず、参照座標系の設け方としては、全操作物体の位置や姿勢から動的に決定する方法と、特定の操作物体の位置や姿勢に基づき静的に決定する方法が考えられる。ここでは、同時に操作される物体数が変動する場合にも参照座標系が安定する後者の方法を採用する。ただし、この場合参照座標系を特定する操作物体（参照物体）をどう決定するかが問題となる。ここでは、人間が両手を用いて実物体を配置するとき、先に土台となる物体を把持し後に土台に置く物体を把持するケースが多いという観察に基づき [HPGK94a], 時間的に最も早く把持された仮想物体を参照物体とする。

次に参照座標系への拘束方針について検討する。参照物体や他の物体（従属物体）は通常多面体で表現され、正確な配置が要求される対象は仮想物体間の面同士の相対位置や相対角度である。また、仮想物体は一般に複雑な形状を持つが、実用上配置可能な相対位置や相対的姿勢を限定できることが多い。したがって、従属物体の位置や姿勢を、参照座標系に対して配置可能なもののうち最尤の値に変更する手法が有効であると期待できる。そこで、配置可能な位置や姿勢の設定方針が問題となる。ここでは、仮想物体の幾何形状によらずに有用と思われる以下の方針を採用する。

- 従属物体の姿勢を参照座標系の軸に平行に揃える。
- 従属物体の位置を参照座標系の格子点に揃える。

以上の考察から、複数仮想物体間の正確な配置を支援する操作補助手法として、

1) 離散配置制約, 2) 干渉回避, の2点を特徴とする手法を提案する. 本節では以下, 離散配置制約と干渉回避について述べた後, これらを活かした複数の手の協調操作による柔軟な仮想物体の組み合わせ操作を実現する動的自由度制御の方針について述べる.

2.3.1 離散配置制約

原則として, 把持した仮想物体の取り得る位置と姿勢を離散的に制限する. これにより, 仮想物体同士の位置合せを容易にする. 位置の離散配置制約では, 操作者が触覚などに頼らずに空中で位置を指示できる精度が1cmから2cm程度であるという報告に基づき [竹村 94], 仮想空間に1cm間隔で格子点を設け, 操作物体を最近傍の格子点に並行移動する. 姿勢の離散配置制約では, 仮想物体間で辺や面の向きを揃えやすくするため, 基準となる参照座標系 (通常は世界座標系) に対する操作物体の姿勢を4通りのみに制限する. 具体的には, 参照座標系の x, y, z 軸正の向きをそれぞれ $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$ と表記すると, 図2.3に示すように, (a) 操作物体を外積 $y_{obj} \times y_{ref}$ 回りに回転し y_{obj} を y_{ref} の向きに揃え, (b) $\pm x_{ref}, \pm z_{ref}$ の4方向中で x_{obj} との内積 $x_{obj} \cdot (\pm x_{ref}), x_{obj} \cdot (\pm z_{ref})$ が最大のものに対し, これに x_{obj} の向きを揃えるよう操作物体を y_{ref} 軸回りに回転する.

以降この離散配置制約における自由度を4DOFC (4 Degree Of Freedom with discrete placement Constraints) とよぶ. 図2.4左に4DOFCの概念図を示す. これに対し, 6自由度 (6DOF, 6 Degree Of Freedom) で仮想物体を操作できる場合, 位置と姿勢の値はすべて連続的に変化する (図2.4右参照).

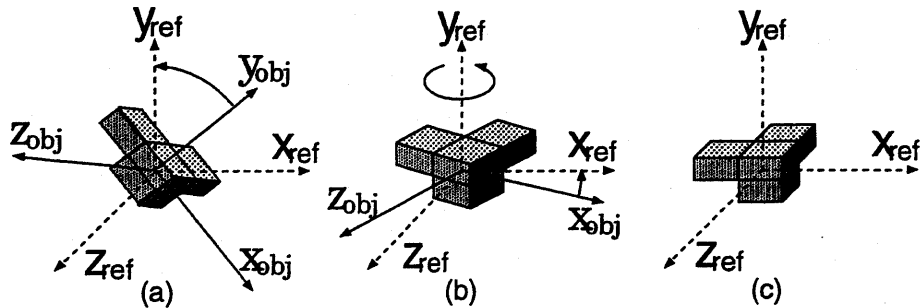


図 2.3 姿勢の離散配置制約

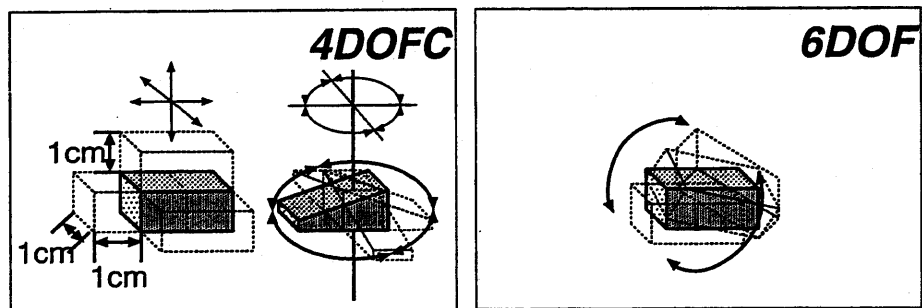


図 2.4 2種類の操作自由度

2.3.2 干渉回避

離散配置制約の結果、仮想物体のバウンディングボックスの境界面は参照座標系の軸と平行であるか直交する。このことを利用して、高速かつ簡易な干渉検出を用いた操作補助手法「干渉回避」を提案する。

干渉回避とは、位置合わせしようとする仮想物体間の干渉を事前に検出し、干渉を回避するように操作する仮想物体の位置を補正する手法である。つまり、操作する仮想物体は、干渉が起きるまでは対応する手の運動に追従し、干渉が起きると干渉した仮想物体と接する面に拘束を受ける。これにより仮想物体同士がす

り抜けるのを見かけ上防ぎ、正確な配置を支援する。

まず、干渉回避のための干渉検出は、内部計算として離散配置制約で操作物体を参照座標系に揃えた後、仮想物体を構成する部分形状のバウンディングボックスの範囲を再帰的に比較して行われる。そのため、仮想物体間の頂点間距離をすべて比較する厳密な方法に比べ計算量が小さく高速である。この干渉検出を繰り返し用いることにより干渉回避が以下のように行なわれる。

1. 前回の描画時における操作物体の位置を O 、 O を更新して次に求めようとする操作物体の新たな位置を A 、現在、手により操作可能な位置を 4DOFC で制約して求められる位置を A' とする。それぞれの x, y, z 座標値を A_x, A_y, A_z などと書く。
2. 次のように A_x を決定する。
 - (a) 初期値 O_x を A_x に代入。
 - (b) $A_x = A'_x$ であれば終了。
 - (c) そうでない場合、 A_x を A'_x 側に 1cm 近づけて干渉検出を行なう。
 - (d) 干渉していれば A_x を A'_x から 1cm 遠ざけて終了。
 - (e) 干渉していなければ (b) に戻る。
3. A_y, A_z についても同様に決定する。
4. 決定値に従って操作物体を表示する。
5. システムに必要な他の処理を行ない、 A を O に代入して 1. に戻る。

以上のような干渉回避を利用して、他の仮想物体に接して接面に沿わせながら仮想物体を移動するなどの自然な操作が実現できる。図 2.5 に干渉回避の例を示す。はじめ a) では干渉は起きていない。次に b) では把持物体を右奥 b-3 に移動しようとして途中で b-2 と干渉し、干渉回避の結果 b-1 に留まった。さらに c) では把持物体を c-4 に移動しようとして c-2, c-3 との干渉回避の結果、c-1 に留まった。最後に d) では手を上に移動したため把持物体は矢印に示すように移動

した. 3章で検証するように, 仮想物体間の干渉回避は, 仮想物体の正確な操作を支援しており, その効果は顕著である.

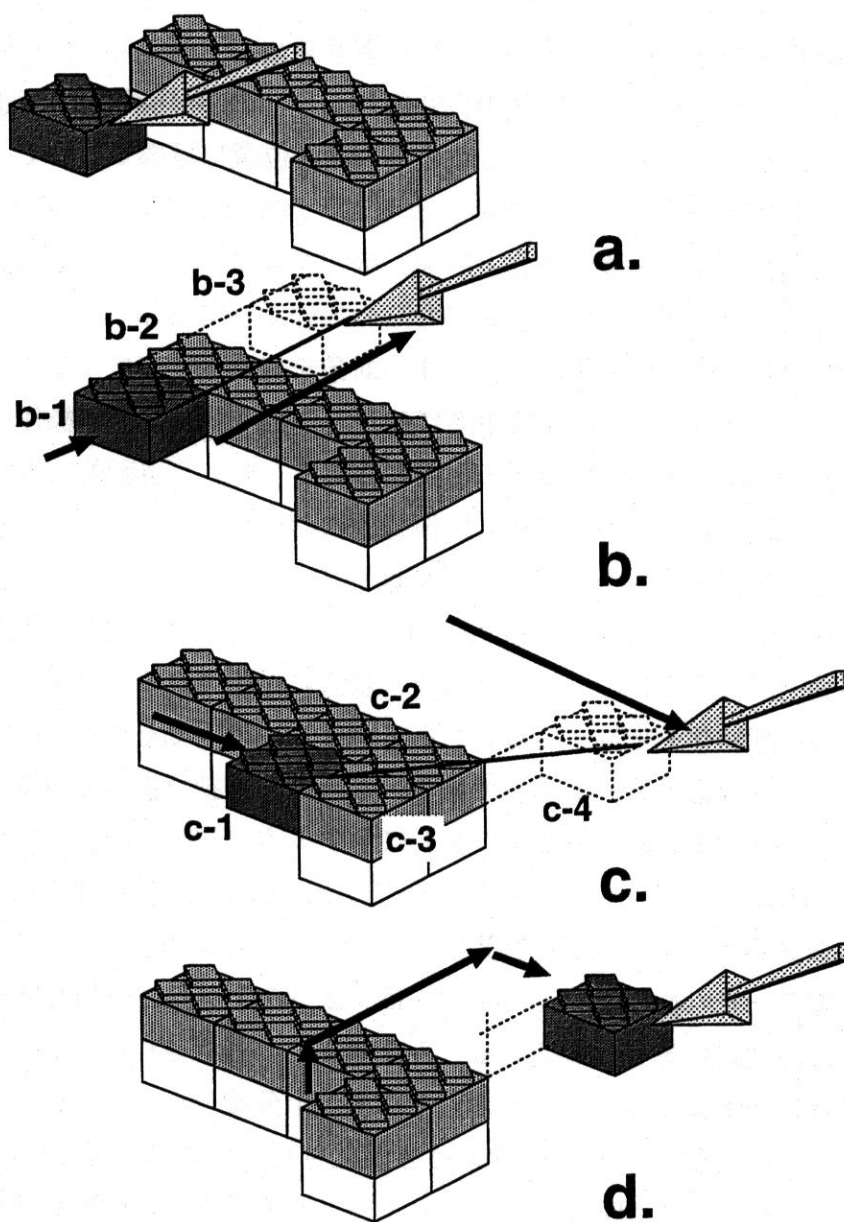


図 2.5 干渉回避の例

2.3.3 動的自由度制御

ここでは、離散配置制約と干渉回避の2つの操作補助手法を協調操作（両手操作または共同操作）と組み合わせて柔軟に利用することを考える。操作者が仮想空間内で操作中のある仮想物体を正確に配置する場合を考えると、その配置対象となるのは、操作されていない他の仮想物体か、他の手が操作中の仮想物体かのいずれかしかない。前者の場合、2つの手の相対位置は重要ではなく、後者の場合、2つの手で互いの位置関係を調整することが重要となる。以降本論文では、前者を独立操作、後者を協調操作と呼ぶ。仮想空間で、これらの2種類の操作をともに支援するためには、操作者がどちらの操作手法で操作しようとしているかに応じて仮想物体の位置や姿勢を補正する対象を自動的に変更することが望ましい。そこで、2つの操作物体間の距離に基づき、独立操作と協調操作に対応する2つの作業モード（独立作業モードと協調作業モード）を自動的に遷移することを考える。なお、以降本論文では、協調操作において、先に把持した参照物体をベース、他方の従属物体をワークと呼び区別する。

独立作業モード（separative mode）は、2つの手が互いの相対位置を合せる必要のない独立的作業を行っているときみなす場合に選択される。具体的には、一方の手のみが仮想物体を把持する場合、あるいは2つの手でそれぞれ把持する仮想物体が互いに十分離れている場合である。このとき、把持物体を把持していない物体と位置合せするため、図 2.6 の S-1 に示すように作業空間全体の世界座標系に対して 4DOFC で操作可能とした。双方の手がともに仮想物体を把持し、仮想物体間の最短距離が閾値以下に接近すると滑らかに協調作業モードに移行する。

協調作業モード（cooperative mode）は、2つの手が互いの相対位置を合せる必要のある協調的作業を行っているときみなす場合に選択される。具体的には2つの手が各々仮想物体を把持しており、それらが十分接近している場合である。このとき、自由な操作と容易な位置合せを両立させるために、図 2.6 の C-1, C-2 に示すようにベースは 6DOF、ワークはベースを基準とする動的な局所座標系を参照座標系とするように 4DOFC で操作可能とした。一方の仮想物体を解放するか、仮想物体間の最短距離が閾値以上に離れると、独立作業モードに移行する。この際、把持する仮想物体は、利用者に違和感を与えないよう 500ms 程度の補

間アニメーションを伴って世界座標系に対する4DOFCで位置や姿勢を整えられる。

以上のように、1) 仮想物体間の距離に応じて2つの操作モードを自動的に切替える、2) 協調作業モードの際、ベースの姿勢に応じてワークが従う座標系を動的に変更する、の2点を特徴とする操作自由度の動的変更手法を提案する。以降、本手法を動的自由度制御と呼ぶ。

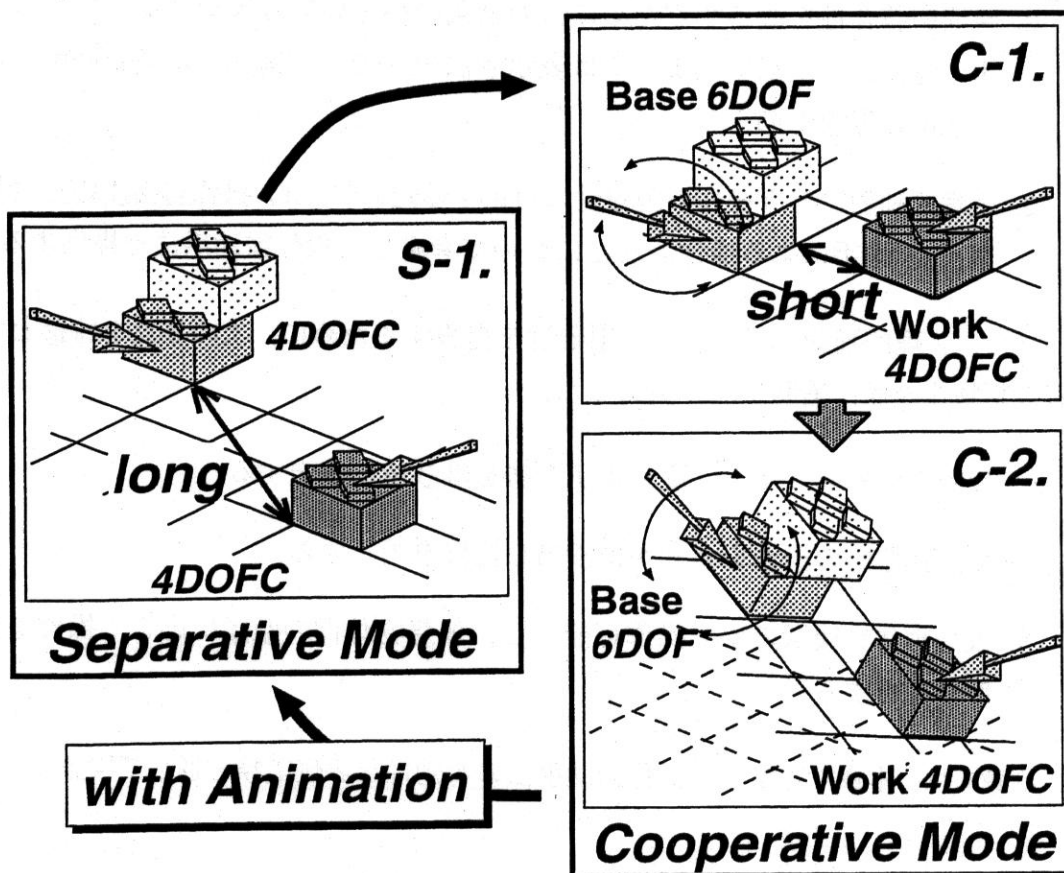


図 2.6 操作自由度の動的遷移の様子

2.4 結言

本章では、仮想物体操作が困難となる要因とその対策手法について述べた。仮想物体操作の困難性を克服するためには、次の3点に留意する必要がある。

1. 幾何的整合性を改善するために、表示装置や利用者個々のパラメータを考慮し、精度の良い3次元位置計測手法を用いて正確に仮想空間を提示する。
2. 時間的整合性を改善するために、遅延量の小さい計算機やアルゴリズムを用いる。また、場合によっては表示手法の工夫や予測フィルタの使用により遅延の影響を抑える。
3. 生理的制約に伴う操作の困難性に対応するために、1) 操作自由度の動的拘束、2) 両手による操作、などについて考慮した操作補助手法を提供する。

また、生理的制約に伴う操作の困難性を克服するために、次の3点を特徴とする仮想物体の操作補助手法を提案した。

1. 仮想物体の取り得る位置および姿勢を離散値に限定する。
2. 仮想物体間の干渉を大まかに検出し位置を補正する。
3. 仮想物体を複数の手で操作可能とし、仮想物体間の距離に応じて操作自由度を変更する。

次章では、本章で提案した操作補助手法の有効性を評価実験を通して検証する。

3. 仮想物体操作補助手法の有効性の検討

3.1 緒言

本章では、2章で提案した操作補助手法について、評価実験を通してそれらの作業効率や主観的操作感覚（操作感）に関する有効性を検証する。また、実験の過程で示されたさらなる改善の可能性について検討し、改善案の有効性を確認する。

まず3.2節と3.3節では、それぞれ、評価実験を通して両手による空間操作の有効性と仮想物体間の干渉回避の有効性を示す[清川 95c, 清川 95b]。次に3.4節では、動的自由度制御の有効性を検証する。この際、実験結果から離散配置制約の利用方法を変更することで、さらに作業効率や操作感を改善できる可能性が示される。これを受けて、最後に3.5節では、離散配置制約を有効にする基準について再検討し、干渉回避と離散配置制約の最適な組合せについて検討する[KTY96, 清川 97c, KTY97]。実験結果から、改善した操作補助手法により作業効率や操作感を顕著に向上できることが示された。

3.2 両手操作の有効性の検証（実験1）

本節では、両手操作の有効性を検証する。両手操作が片手操作に比べて操作性や操作感に優れるとしても、その理由や程度は両手独立操作と両手協調操作によって異なると考えられる。前章の考察を踏まえ、具体的な特性として、以下の仮説を考えることができる。

仮説 1-1 両手独立操作では、2ヶ所で並行に作業を行なうために、片手操作に比べて作業の時間効率が良い。その反面、操作者の心理的負担が大きく位置指示の精度は悪くなり、操作誤りが増える。

仮説 1-2 両手協調操作では、両手の相対位置を利用するために、片手操作に比べて作業の時間効率が良い。また、位置指示の精度が良くなり、操作誤りは減少する。

各操作手法を比較して特性を明らかにし、これらの仮説を検証するためには、片手操作と合わせた3種類の操作手法で統一した尺度による評価実験を行なうこ

とが望まれる。以下では、片手操作、両手独立操作、両手協調操作を統一した尺度で比較し、これらの仮説を検証する [清川 95c].

3.2.1 実験手法

実験環境 グラフィクス WS として、Onyx RE2 (SGI 社) を使用した。被験者は 3 次元位置計測装置 3SPACE Fastrak (Polhemus 社) で測量される視点に基づき、液晶シャッター眼鏡 CrystalEYES (StereoGraphics 社) を通して、WS 標準の 21 インチ CRT に描画される仮想空間を両眼立体視する。仮想物体の操作には、基盤に Fastrak のレシーバと押しボタンスイッチを取り付けた入力デバイスを両手用に 2 つ 1 組用意した。被験者は入力デバイスに追従する矢印型の 3 次元カーソルを操作し、必要に応じてスイッチを押下することで仮想物体の操作を行なう。

実験タスク 片手操作、両手独立操作、両手協調操作を統一した尺度で比較するため、把持可能な仮想物体の表面を両手または片手で彩色する次のようなタスクを設定した。被験者は図 3.1 のように 72 個の小区画に区切られた酒樽型の仮想物体 (タスクブロック) を、以下の 1. ~ 3. の要領で全て白色にする。このタスクを、図 3.2 に示す 3 通りの操作方法について行なう。なお、仮想空間にはタスクブロックと操作 (彩色と把持) 用の 2 つの 3 次元カーソル、および座標軸のみが表示される。

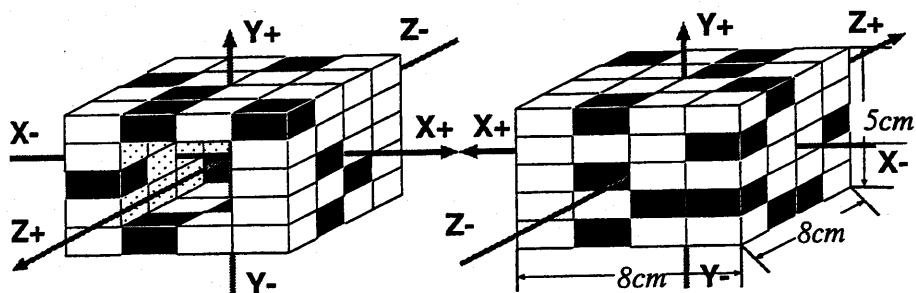


図 3.1 実験 1: タスクブロックの例

1. 各試行の初期状態では、タスクブロックは図 3.1 の原点が CRT 表示面の中心となるように、くり抜かれた側を Z 軸正（表示面に垂直，手前向き）に向け，全 72 の区画中ランダムな 18ヶ所が赤，残りが白となっている。タスクブロックが初期位置にあるとき，被験者は視点を上下左右に移動してタスクブロックを構成する全区画を観察できる。
2. 被験者は 3 次元カーソルを操作し，ハイライトにより明示される最寄りの区画に対し把持を指示するスイッチを押下する。スイッチが押下されると，その区画の色が白なら赤，赤なら白に反転する。
3. 被験者はタスクブロックが全て白色になるまで 2. を繰り返す。また，被験者にはできるだけ正確かつ迅速にタスクを遂行するよう要求する。

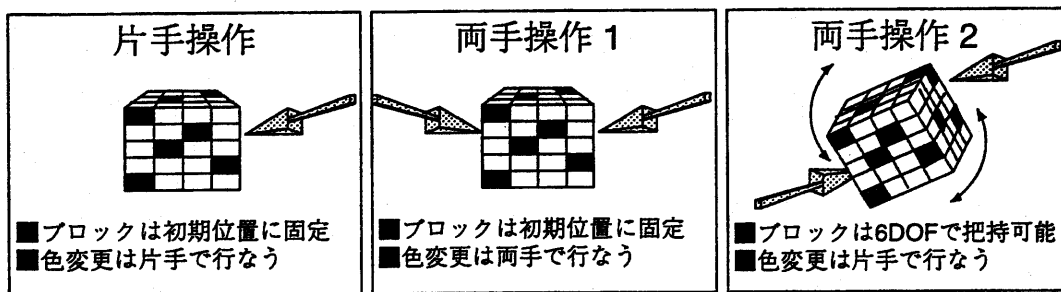


図 3.2 実験 1: 3 通りの操作手法

測定項目 実験中，操作性を示す客観的指標として以下の 2 つの項目を測定する。

[タスク達成時間] タスクブロックが提示されてからすべての区画が白色となるまでの時間であり，作業の時間効率を示す。

[誤り率] 白から赤へ彩色した誤り操作総数を理想的な最少必要操作数（= 18 × 試行数）で割った値。

被験者と試行数 被験者は仮想物体の操作に熟練した者から全くの初心者までの本学学生 10 名である。各被験者は、各操作方法について各々 30 試行（計 90 試行）行なう。

3.2.2 結果と考察

外れ値による影響を取り除くため、タスク達成時間の分布として正規分布を仮定し、各操作方法の 10 名 \times 30 試行 = 300 試行について、タスク達成時間 X の標準化 $Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$ が $|Z| > 3.0$ となる試行を無効とした。ここで、 μ および σ はそれぞれ 300 試行のタスク達成時間の平均と標準偏差である。

各操作方法での有効なタスク達成時間を全被験者について平均し、分散分析を行った結果を表 3.1 に示す。また、30 試行中のタスク達成時間の推移を図 3.3 に示す。図 3.3 では、推移の傾向を把握しやすくするため、第 10 試行から第 30 試行のそれぞれについて、直前 10 試行分のタスク達成時間の全被験者についての平均値を示している。図 3.3 の右端値の左端値に対する減少率は、片手操作、両手独立操作、両手協調操作の順に 19.2%、11.4%、18.6% である。

両手独立操作について見ると、まずタスク達成時間では片手操作よりも有意に時間が短縮されている。しかしながら、両手独立操作のタスク達成時間は 3 通りの操作手法で最短ではない。また、誤り率は片手操作と同程度である。さらに、習熟に伴う作業効率の改善率は 3 通りの操作手法中で最も悪い。一方、両手協調操作について見ると、タスク達成時間では片手操作よりも有意に時間が短縮されている。また、誤り率は片手操作に比べて若干の改善傾向が見られる。さらに、習熟に伴う作業効率の改善率は片手操作と同程度である。以下ではこれらの結果について考察する。

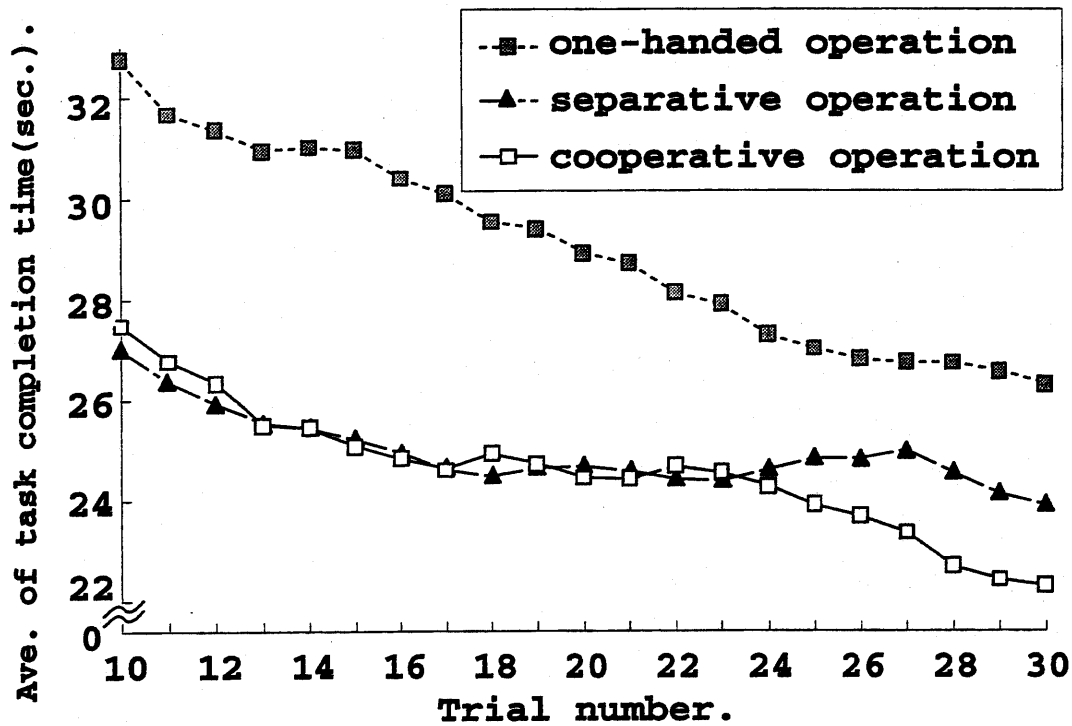


図 3.3 実験 1: 直前 10 試行分のタスク達成時間の平均値の推移

表 3.1 実験 1 の結果

	片手	両手独立	両手協調
平均タスク達成時間 (秒)	29.2	25.1	24.7
(分散)	(72.7)	(45.3)	(51.6)
有意差 ($\alpha = 0.05$)	>	=	
後半 10 タスクの平均 (秒)	26.3	23.9	22.3
(分散)	(62.1)	(39.8)	(28.3)
有意差 ($\alpha = 0.05$)	>	>	
誤り率	0.097	0.101	0.069

両手独立操作の有効性 タスク達成時間に関して、仮説 1-1 の通り、両手独立操作では片手操作よりもタスク達成時間が有意に短縮されている。しかしながら、単純に考えれば、両手独立操作は片手操作に比べて最大限 2 倍の作業効率が得られるはずである。平均タスク達成時間が半減しない理由としては、1) 人間は 2 箇所以上同時に注視できないので、3次元カーソルの位置合わせを左右同時には行なえないこと、2) 利き手に比べて非利き手は正確に動かさないこと、などが挙げられる。2箇所を視認する必要がある両手独立操作は操作者への負担が大きいことが伺われる。実際、両手独立操作は他の 2 手法に比べて、習熟に伴う作業効率の改善が頭打ちしやすい傾向が認められ、このことは、操作者への負担の大きさを示唆するものと考えられる。

また誤り率に関して、仮説 1-1 では片手操作に比べて時間効率が向上する一方で誤り率が増大すると予想したが、誤り率はほぼ変化がなかった。これは、被験者が正確さと迅速さをともに要求されており、操作を慎重に行なっていたためと思われる。迅速さに力点を置いてタスクを行なった場合は、今回とは結果が異なった可能性がある。

両手協調操作の有効性 タスク達成時間に関して、仮説 1-2 の通り、両手協調操作では片手操作よりもタスク達成時間が有意に短縮されている。これは、1) ベースの位置や姿勢を手によって直接制御できるので、目的の区画を発見しやすいこと、2) ベースの位置および姿勢変更の結果ワーク側を大きく移動させる必要がなく、正確かつ迅速に位置合わせが行なえること、さらに 3) これらの双方を並列に行なえること、によると考えられる。また、後半 10 タスクの平均タスク達成時間について、両手協調操作は他の 2 手法に比べて有意に短い。これは、他の手法に対する両手協調操作の優位性が習熟につれてより顕著になることを示すものと考えられる。

また誤り率に関して、仮説 1-2 の通り、両手協調操作では若干の改善傾向が見られた。これらの結果を裏付けるように、被験者の多くは、1) 頭部を移動する必要が少なく疲れにくい、2) 仮想物体の自由な観察とそれに対する操作を同時に行なえる、の 2 点を理由に両手協調操作を最も使い良いと報告した。両手協調操作は、作業効率だけでなく操作感も向上しているといえる。

実験1のまとめ 実験1では、両手独立操作、両手協調操作の特性に関して仮説を立て、これらと片手操作の3通りの操作手法をを統一した尺度で比較した。実験結果から、以下のことが明らかになった。

- 両手独立操作では、2ヶ所で並行に作業を行なうために、片手操作に比べて作業の時間効率が良い。その反面、習熟に伴う作業効率の改善率が低く、操作者への負担が大きいことが示唆される。
- 両手協調操作では、両手の相対位置を利用するために、片手操作に比べて作業の時間効率が良い。また、位置指示の精度が良くなり、操作誤りは減少する傾向がある。さらに、主観的操作感覚は3通りの操作手法で最良である。

3.3 干渉回避の有効性の検証（実験2）

本節では、提案手法の1つである干渉回避の有効性を検証する。干渉の有無により仮想物体の操作自由度を変更する干渉回避は、仮想物体の配置が確実にこなえる点で作業効率や操作感の向上が期待できる。また、本研究では視覚的フィードバックによる操作補助を対象としているが、視覚的フィードバックには様々な方法が考えられ、複数のフィードバックを組み合わせることで操作効率を改善できる可能性がある。そこで本節では、干渉のある場合にハイライトによる視覚的フィードバック（以下、単にハイライト）を与えることにより、操作効率を改善できるか否かについても検討する[清川95b]。そこでまず、本節で検証する仮説として次の3つを考える。

仮説 2-1 干渉回避は配置作業の時間効率や操作感を向上する。

仮説 2-2 ハイライトは干渉回避ほどではないが、配置作業の時間効率や操作感を向上する。

仮説 2-3 ハイライトと干渉回避を組み合わせることによりさらに時間効率や操作感を改善できる。

以下では、仮想物体の組み立て作業を用いて、これらの仮説を検証するために
行なった評価実験について述べる。

表 3.2 実験 2: 干渉の提示条件

条件名	ハイライト (V)	干渉回避 (C)
NN	なし	なし
NC	なし	あり
VN	あり	なし
VC	あり	あり

3.3.1 実験手法

実験環境 本実験の実行環境は、実験 1 のそれと同一である。

実験タスク 干渉回避やハイライトの有効性を検証するために、それぞれの操作補助がある場合とない場合の計 4 通りの組合せについて、4 通りそれぞれの条件下での組み立て作業の効率を比較することを考える。以下では、4 通りの操作補助の各条件を表 3.2 に示すように NN, NC, VN, VC と呼ぶことにする。組み立て作業として、被験者は、以下の 1. ~ 3. に説明するタスクを実行する。なお、仮想空間には、必要な仮想物体と仮想物体操作用の 2 つの 3 次元カーソル、および座標軸のみが表示される。

1. 各試行の初期状態を図 3.4 に示す。奥側には土台となる仮想物体があり、その手前には 3 色 × 9 個の小物体がある。これらはいずれも把持・運搬が可能である。
2. 被験者は利き手のみを用いて、小物体を土台に配置していく。操作する仮想物体が他の仮想物体の上に配置されると、それら両物体は接合して一体となる。接合した仮想物体を分離、修正する場合のみ、両手協調操作を用いる。なお、仮想物体の積む順序や色は任意である。

3. 被験者は、最終的に図 3.5 のように、全体が1つの直方体となるまで 2. を繰り返す。また、被験者にはできるだけ迅速にタスクを遂行するよう要求する。

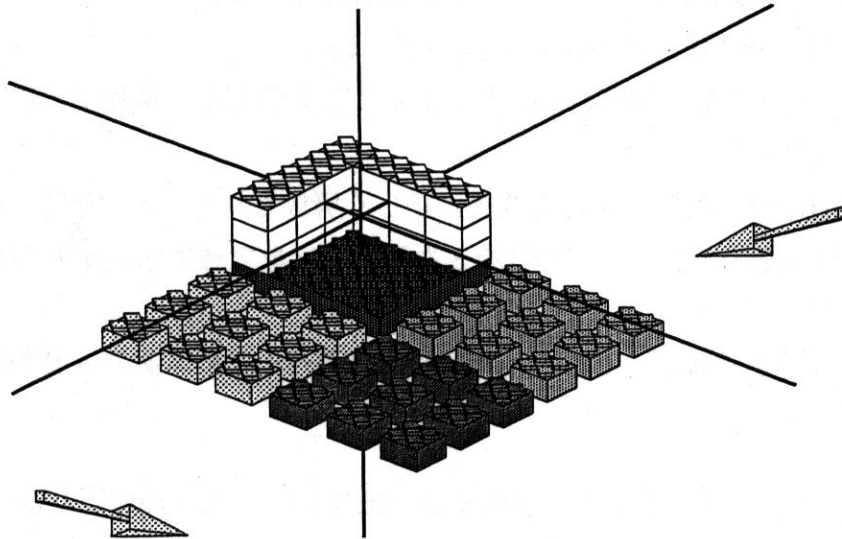


図 3.4 実験 2: 各試行の初期状態

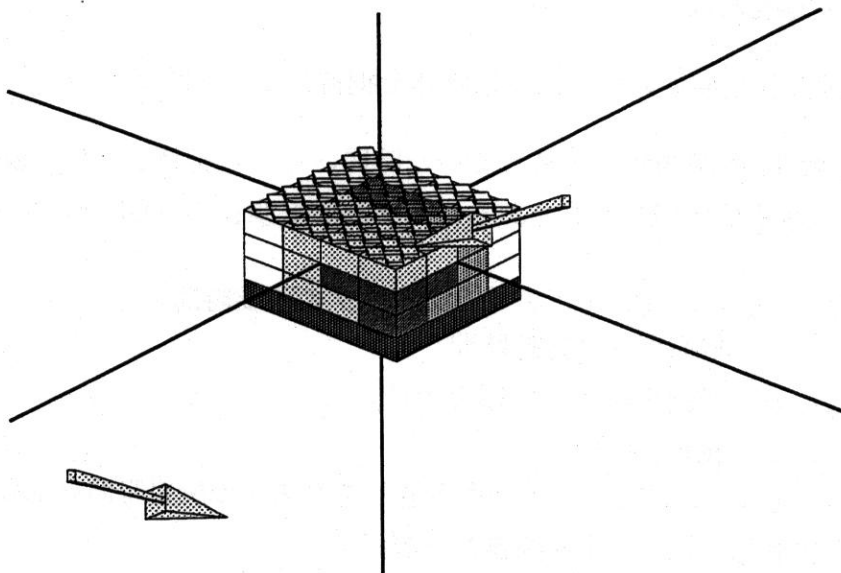


図 3.5 実験 2: 試行の完成例

測定項目 干渉の提示条件間で対比すべき情報を決定するために、仮想物体の組み立て作業をサブタスクに細分化して考察する。組み立て作業は、最初に把持する物体を決定し、それを3次元カーソルで選択した後は次のサブタスク (i) ~ (iii) を繰り返すと考えられる。

(i) 選択した仮想物体を把持し、目的位置付近へ大まかに移動する作業（この作業の試行当りの総所要時間を T_{move} とする）。

(ii) 把持した仮想物体が目的位置にあることを確認し、解放する作業（同様に T_{adjust} とする）。

(iii) 解放した仮想物体が目的位置に正しく解放されたことを確認した後、次に把持する仮想物体を決定し、それを3次元カーソルで選択する作業（同様に T_{next} とする）。

この細分化を踏まえ、これらの時間指標を調べるために次の4種類の情報を記録する。

[把持回数] タスク達成までに仮想物体を把持した回数。操作誤りの程度を示す。

[総時間] 1つ目の仮想物体を把持してから最後の仮想物体を解放するまでのタスク達成総時間、

[総把持時間] 総時間のうち、仮想物体を把持していた時間、

[総接合時間] 仮想物体を把持していた時間のうち、把持している仮想物体が他の仮想物体と接合可能であった、または干渉していた時間。

ここで、これらの情報を用いてサブタスクの所要時間を

$$T_{next} = \text{総時間} - \text{総把持時間},$$

$$T_{move} = \text{総把持時間} - \text{総接合時間},$$

$$T_{adjust} = \text{総接合時間}$$

のように対応づけ、記録する情報から各サブタスクの所要時間を求める。また実験後、被験者毎に以下の主観評価値を記録した。

[主観評価値] 最も操作感が良好であったものを10点とした各提示条件の得点。

被験者と試行数 被験者は仮想物体の操作に熟練した者から全くの初心者までの本学学生 11 名である。被験者は練習試行として VC を 1 回行ない、その後 NN, NC, VN, VC の順に 3 周、計 12 回の本試行を行なう。

3.3.2 結果と考察

干渉の提示条件について、把持回数と各時間指標を全被験者で平均した結果を表 3.3 に示す。また、各条件間で分散分析 ($p = 0.05$) を行なった典型的結果を図 3.4 に示す。

次に、接合 1 回当たりの接合時間を求める。干渉の有無を被験者に提示することにより、仮想物体の接合位置の確認に要する負担、すなわち T_{adjust} が減少し、仮想物体の接合 1 回当たりの作業時間が減少することが期待できる。そこで、 T_{adjust} を把持回数（仮想物体を把持して接合しない場合は稀であったため、把持回数を接合回数とみなす）で割り、これを各提示条件間で比較することで、1 回の接合当たりの接合位置の確認の負担度を調べる。参考のために各提示条件について、表 3.3 の各時間指標を把持回数で割った結果を表 3.5 に示す。なお、各試行による 1 把持当たりの T_{adjust} の分散分析結果は、表 3.4 と全く同様であった。

また、提示条件の違いによる、総時間に占める各時間指標の比を表 3.6 に示す。さらに、主観評価値の全被験者による平均を表 3.7 に、ハイライトの有無による主観評価値の分類表を表 3.8 に示す。以上ではこれらの結果について考察する。

表 3.3 実験 2: 各指標の全被験者による平均

	NN	NC	VN	VC
把持回数	44.73	35.58	46.12	36.82
T_{next} (秒)	48.10	36.36	47.61	34.25
T_{move} (秒)	37.17	27.61	36.32	27.07
T_{adjust} (秒)	43.49	27.75	43.37	26.83

表 3.4 実験 2: 典型的分散分析結果

(良) VC = NC < VN = NN (悪)

表 3.5 実験 2: 一把持当りの時間指標の全被験者による平均 (秒)

	NN	NC	VN	VC
T_{next} /把持回数	1.05	0.94	1.02	0.91
T_{move} /把持回数	0.79	0.71	0.76	0.70
T_{adjust} /把持回数	0.99	0.76	0.95	0.73

表 3.6 実験 2: 各サブタスクの所要時間の総時間に対する比

	NN	NC	VN	VC
T_{next} /総時間	0.37	0.39	0.37	0.39
T_{move} /総時間	0.28	0.29	0.28	0.30
T_{adjust} /総時間	0.35	0.32	0.35	0.32

表 3.7 実験 2: 各提示条件の主観評価の被験者による平均 (10 段階評価)

NN	NC	VN	VC
3.5	9.0	5.0	9.6

表 3.8 実験 2: ハイライトの主観評価

NN > VN	NN = VN	NN < VN	NC > VC	NC = VC	NC < VC
3 名	0 名	8 名	3 名	3 名	5 名

干渉回避の有効性 干渉回避がある場合はない場合よりも有意に把持回数が少ない。把持回数の減少は接合誤りの減少を示す。接合誤りが減少した理由は以下のように考えられる。観察によれば、接合誤りの大半は仮想物体の解放時に位置がずれることによるが、干渉回避がある場合、操作物体はそれに接する他の物体に押しやっても動かないために、物体解放時の位置ずれの可能性が減少し、接合誤りが減少すると考えられる。結果的に、干渉回避により正確に仮想物体を接合しやすくなっている。

また、接合 1 回当たりの接合時間が干渉回避により有意に短縮していることから、干渉回避は仮想物体の接合位置の確認を容易にするとと言える。この理由は、通常は操作物体の位置は被験者の実際の手の位置に対応しているが、干渉回避を起こした場合にはその対応がくずれるので、干渉の有無を感じとりやすいためと考えられる。実際多くの被験者は、干渉回避が起こると手の移動に仮想物体が追従しなくなるため他の仮想物体に「当たった」ことを感じると報告している。また、全員の主観評価値が干渉回避のない場合よりある場合が高く、干渉回避が操作感の向上に寄与することを示している。以上のことから、仮説 2-1 は支持されたと言える。

なお、各サブタスク作業時間を比較すると、干渉の有無に直接影響を受けると考えられる T_{adjust} の、総時間に占める比は干渉回避の結果 35% から 32% へ 9% ほど有意に減少したが、 T_{adjust} 自身の干渉回避による改善率 (37% 程度) に比べると顕著ではない。これは、干渉回避の有無による接合作業の負担度の変化が、

T_{adjust} のみならず T_{move} や T_{next} にも大きく影響を与えていたことを意味し、接合作業の負担度を示す指標として T_{adjust} の定義を改善する余地があることを示唆していると考えられる。

ハイライトの有効性 ハイライトの有無による各指標の有意な差は認められない。この理由は次のように考えられる。今回の仮想物体では、物体同士の相対位置が、仮想物体の形状や立体視の提供などによって視認しやすいため、仮想物体が他の物体と接合可能か否かを容易に把握できる。従って、ハイライトが冗長な情報になったため影響がなかったものと考えられる。

一方、表 3.7 に示すように、ハイライトのある場合はない場合に比べて主観評価値がわずかながら向上している。また、表 3.8 に示すように、ハイライトの有無による使用感の差について分類したところ、干渉回避のない場合はハイライトを有効であると感じている被験者が多いことが分かった。これらの結果から、仮説 2-2 と仮説 2-3 はほぼ棄却されるが、ハイライトが操作感の向上にはある程度寄与したと考えられる。

実験 2 のまとめ 実験 2 では、仮想物体の組み立て作業を用いて、仮想物体の正確な配置に対する干渉回避の有効性を検証した。また、干渉状態をハイライトによりフィードバックする操作補助の有効性も合わせて検証した。実験結果から、以下のことが明らかになった。なお、物体解放時の位置ずれを防ぐ観点から、正確な接合をさらに支援する手法として、仮想物体解放時以前の 3 次元カーソル位置もしくは、解放時以前のある期間の 3 次元カーソル位置の平均などを解放位置とする手法が考えられ、今後検討を要する。

- 干渉回避は配置作業の時間効率や操作感を向上する。
- ハイライトは時間効率に影響しない。ただし、操作感の向上にはある程度寄与する。

3.4 動的自由度制御の有効性の検証（実験3）

本節では、提案手法の柱である動的自由度制御の有効性を検証する。動的自由度制御は、1) 仮想物体間の距離に応じて2つの操作モードを自動的に切替える、2) 協調作業モードの際、ベースの姿勢に応じてワークが従う座標系を動的に変更する、の2点を特徴とする。本節では、2)の協調作業モードにおける操作補助手法の有効性に関して検討する。提案手法では、複数の仮想物体を両手または複数人で協調して位置合わせする場合には、離散配置制約を利用して、一方の仮想物体を6DOF、他方をそれに従う4DOFCで操作可能とし、さらに両物体間で干渉回避を行なっている。協調作業モードにおける組み立て作業において、離散配置制約と干渉回避はそれぞれ有効と考えられるが、その程度や働き方は異なると考えられる。そこで、本節で検証する仮説として次の3つを考える。

仮説 3-1 離散配置制約は組み立て作業の時間効率や誤り率を改善する。特に、接触状態に関わらず、位置合わせや姿勢合わせを容易にする。

仮説 3-2 干渉回避は組み立て作業の時間効率や誤り率を改善する。特に、接触時の作業時間を短縮し、位置合わせを容易にする。

仮説 3-3 双方の補助手法を用いるとさらに時間効率や誤り率が改善される。

以下では、仮想物体の組み立て作業を用いて、これらの仮説を検証するために行なった評価実験について述べる。なお、1名の両手操作の場合と、2名の共同操作の場合では、操作補助手法の働き方が異なる可能性があり、作業形態に応じた操作補助手法の開発を目指す観点から、本実験では、両手操作および2名の共同操作の双方について検討する。

3.4.1 実験手法

実験環境 本節の実験におけるハードウェア構成を図3.6に示す。この構成では、1名の操作者の両手操作、もしくは2名の操作者のそれぞれ片手による共同操作が可能である。

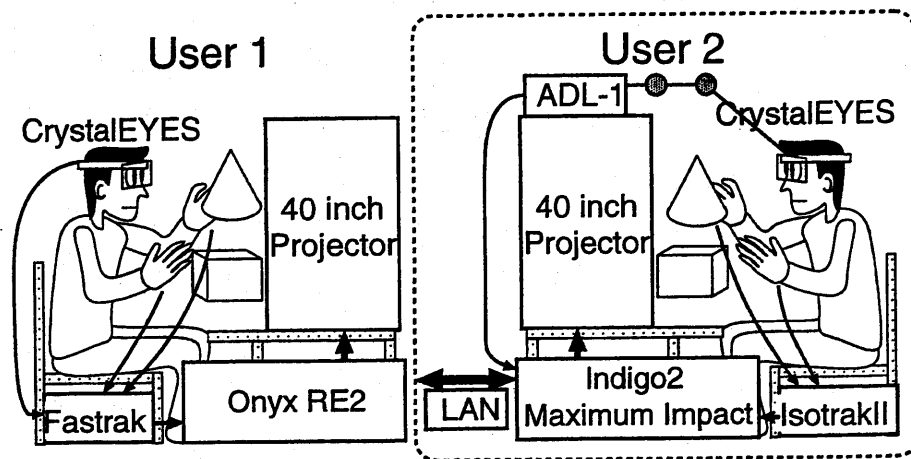


図 3.6 実験 3: ハードウェア構成

実験タスク 実験の設定を図 3.7 に示す。実験用仮想空間には仮想物体 O_A, O_B 、さらに 3次元カーソル A, B が存在する。 O_A と O_B は直方体となるように接合できる。 O_A と O_B の各タスクの初期位置は固定であり、初期姿勢は O_A, O_B それぞれについて垂直軸回りで回転角の異なる 4 通り、両物体で計 16 通りがタスク毎に循環する。被験者は単独または 2 人で協力して仮想物体を操作し直方体となるように接合する。このタスクは以下に示すサブタスクからなる複合タスクである。

1. 2つの 3次元入力装置を操作して 3次元カーソル A, B を仮想物体 O_A, O_B に移動する。
2. 3次元入力装置の把持ボタンを押下して仮想物体を把持する。
3. 把持した 2つの仮想物体を互いに近づける。
4. 接合可能な位置で一方の把持ボタンを解放し、2つの仮想物体を接合する。
この時、接合物体が直方体とならなくても修正は許さない。

各被験者は、干渉回避と離散配置制約のそれぞれの操作補助がある場合とない場合の計 4 通りの組合せの下でこのタスクを行う。以下では、4 通りの操作補助の各条件を表 3.9 に示すように CD, CN, ND, NN と呼ぶことにする。

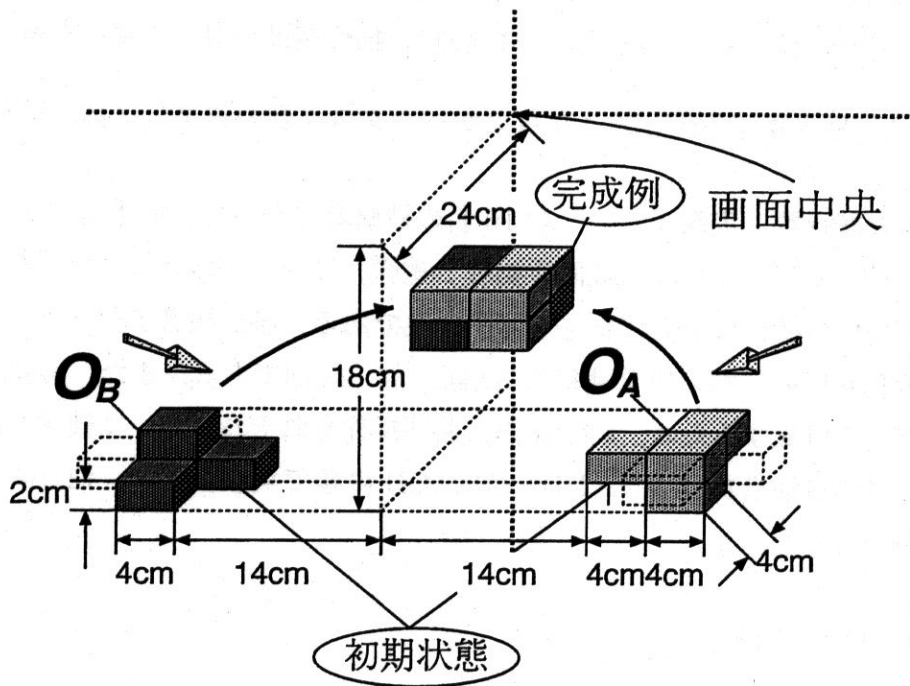


図 3.7 実験 3: 仮想物体の配置

表 3.9 実験 3: 操作補助の 4 条件

条件名	干渉回避 (C)	離散配置制約 (D)
CD	あり	あり
CN	あり	なし
ND	なし	あり
NN	なし	なし

測定項目 実験中、以下の指標を記録する。

[タスク達成時間] 仮想物体が初めて把持されてから接合物体が解放されるまでの時間。タスク達成時間は作業の時間効率を示す。

[接触時間] 1タスクの実行中に2つの仮想物体が互いに接触していた総時間。この指標を用いて、接触時・非接触時の操作補助の働きの違いを検討する。

[誤り率] 接合物体が直方体とならなかったタスク数の総タスク数に対する比。

被験者と試行数 実験3では、全10名の被験者について、両手操作8名、共同操作4組(8名、うち6名は両手操作と重複)に対し実験を行った。被験者は全員仮想物体の操作に不慣れな本学男子学生である。各被験者が行った実験タスクは、操作補助の4種の組合せ毎に32回、計128回である。また、実験の順序による影響を軽減するため、両手操作、共同操作それぞれについて被験者群を2分し、一方の被験者群はNN, ND, CN, CDの順で実験を行い、他方はこの逆順で実験を行った。

3.4.2 結果と考察

図3.8に両手操作、共同操作それぞれについて、操作補助手法の組合せ4通りにおける被験者全員の平均タスク達成時間、平均接触時間、およびこれらの差である平均非接触時間を示す。また表3.10にこれらの数値、不等号で表した分散分析に基づく有意差、および平均誤り率を示す。さらに、習熟の様子を見るため、前半16タスク分の時間指標の平均値に対する後半16タスク分の時間指標の平均値の比を表中「学習効果」の欄に示す。これらの実験結果は次のようにまとめられる。

- 平均タスク達成時間の順序は、両手操作・共同操作ともに、最短のものよりCN, CD, ND, NNである。最短のCNの作業時間は最長のNNに対し平均66%である。干渉回避は有意にタスク達成時間を短縮している。
- 平均接触時間の順序は、両手操作・共同操作ともに、最短のものよりCD, CN, ND, NNである。CDの接触時間は他に比べて有意に短い。両手操作では干渉回避と離散配置制約がともに接触時間を有意に短縮し、共同操作でも干渉回避が有意に接触時間を短縮している。

- 平均非接触時間は、両手操作・共同操作ともに、CN の場合が他に比べて有意に短い。また、有意差は認められないが、平均非接触時間は、干渉回避のある場合 19% 減少し、離散配置制約のある場合 12% 増加している。この傾向は分散値についても同様である。
- 誤り率について、干渉回避と離散配置制約は、それぞれ誤り率を減少させている。また、この傾向は離散配置制約よりも干渉回避の方が顕著である。
- 学習効果について、各条件の前半 16 タスクと後半 16 タスクの時間指標の間に有意差は認められない。定性的には、習熟とともに時間指標が短縮するか否かは離散配置制約の有無に依存している傾向が認められ、この傾向は両手操作と共同操作によって正反対である。すなわち、両手操作では、離散配置制約のある場合に、習熟につれて時間指標が短縮し、共同操作では、離散配置制約がない場合に、習熟につれて時間指標が短縮する傾向がある。
- 2 種類の操作補助手法による作業効率の改善率は、両手操作と共同操作で同程度である。

以下では、これらの結果について考察する。

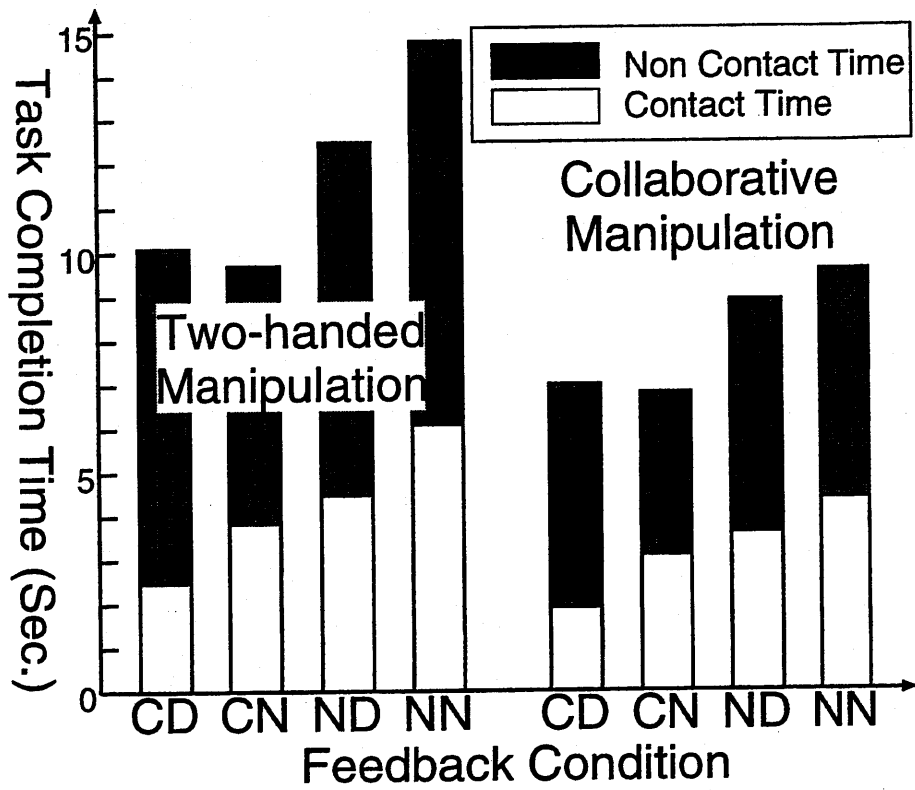


図 3.8 実験 3: 平均タスク達成時間

表 3.10 実験 3: 指標の平均値と分散分析結果 (有意水準 $\alpha = 0.05$).

両手操作の場合

指標 \ 条件	CD	CN	ND	NN
タスク達成時間	10.1 (秒) =	9.4 <	12.5 =	14.8
分散	83.6	23.2	204.8	138.5
学習効果	0.91	1.04	0.81	1.04
接触時間	2.5 <	3.7 <	4.5 <	6.1
分散	9.3	6.7	28.5	28.7
学習効果	0.80	0.92	0.97	1.22
非接触時間	7.6 >	5.7 <	8.0 =	8.7
分散	48.7	11.4	112.8	60.6
学習効果	0.95	1.12	0.73	0.93
誤り率	0.05	0.08	0.12	0.16

共同操作の場合

指標 \ 条件	CD	CN	ND	NN
タスク達成時間	7.0 =	6.8 <	8.9 =	9.6
分散	36.0	6.9	129.3	40.9
学習効果	1.08	0.89	1.12	0.89
接触時間	1.9 <	3.1 <	3.6 =	4.4
分散	3.2	3.0	15.8	10.3
学習効果	1.08	0.87	1.04	0.89
非接触時間	5.1 >	3.7 <	5.3 =	5.2
分散	23.1	2.3	66.1	17.2
学習効果	1.07	0.90	1.18	0.89
誤り率	0.05	0.07	0.13	0.12

離散配置制約の有効性 離散配置制約は、平均接触時間を短縮するが、平均非接触時間を増加させている。被験者は仮想物体の姿勢合わせを主に非接触時に行い、接触時には主に位置合わせを行うことが観察されたことから、離散配置制約は仮説 3-1 の通り位置合わせを容易にするが、仮説 3-1 に反して姿勢合わせを困難にしていることが伺われる。離散配置制約が位置合わせを容易にする理由は、これにより仮想物体の相対位置を確認しやすくなるためと考えられる。また、離散配

置制約が姿勢合わせを困難にする理由は、一方の物体の回転によって他方の物体の姿勢が強制的に変更されるためと考えられる。なお、接触時の操作性に影響を受けると考えられる誤り率が、仮説通り離散配置制約によって減少していることから、離散配置制約は位置合わせを容易にしていることが裏付けられる。

干渉回避の有効性 干渉回避は、平均接触時間と平均非接触時間をともに短縮させており、仮説 3-2 の通り干渉回避が組み立て作業の作業効率の向上に有効であることが確認できる。干渉回避が平均非接触時間を短縮した理由は、干渉回避がある場合、仮想物体同士がすり抜けないことを利用して、被験者がこれらを素早く安定に接近できたためと考えられる。また、干渉回避が仮説通り平均接触時間を短縮し、位置合せに有効である理由は、これにより仮想物体の相対位置を維持しやすくなるためと考えられる。

操作補助の組み合わせ 仮説 3-3 に反して、干渉回避のみを用いる場合が平均タスク達成時間が最短であった。なお、離散配置制約は平均接触時間を短縮しており、仮想物体の接触時のみ離散配置制約を有効とすることにより、組み立て作業の時間効率はさらに向上するもの期待できる。

両手操作と共同操作の差異 操作補助手法の導入による作業効率の改善率は、両手操作と共同操作で同程度であった。すなわち本実験からは、両手操作と共同操作で特に操作補助手法を切替える必要性は認められない。なお、離散配置制約の有無に関して、学習効果によって作業時間が短縮する場合は、両手操作と共同操作では正反対の傾向を示していた。以下、この理由について考察する。

両手操作では、離散配置制約がない場合は、2つの仮想物体をともに自由に回転できるために、学習効果が早期に現れてそれ以降時間指標が短縮されず、離散配置制約がある場合は、徐々に制約の扱いに慣れていくために若干の学習効果が現れたものと考えられる。一方、意志の疎通が不自由な共同操作では、離散配置制約のない場合は、各操作者が自由に仮想物体を回転し共同で姿勢合せを行う操作に徐々に慣れていき学習効果が現れたのに対し、離散配置制約のある場合は、従属物体の姿勢制御が困難なため、共同で姿勢合わせを行う操作に慣れることが

できなかったものと考えられる。

実験 3 のまとめ 実験 3 では、両手操作および共同操作による仮想物体の組み立て作業を用いて、動的自由度制御手法の協調作業モードにおける離散配置制約と干渉回避の有効性を検証した。実験結果から、以下のことが明らかになった。

- 離散配置制約は接触時の時間効率や誤り率を改善し、位置合わせを容易にする。一方、その制約が従属する座標系が動的に変化する場合は却って姿勢合わせを困難にする。
- 干渉回避は接触状態によらず、組み立て作業の時間効率や誤り率を改善する。
- 非接触時には干渉回避のみ、接触時には離散配置制約と干渉回避の双方を提供すると、さらに時間効率や誤り率が改善される可能性がある。

3.5 離散配置制約の最適な利用法の検討（実験 4）

本節では、実験 3 から示された、接触状態によって離散配置制約の有無を変更することにより、仮想物体組み立て操作の作業効率をさらに改善できる可能性を検証する。具体的には、示唆に基づいた操作補助手法の改善案として、接合する仮想物体 O_A, O_B の各上面の法線ベクトルのなす角 $\theta (0 \leq \theta \leq 180)$ を基準として、離散配置制約の有効・無効を切替える、次のような手法を考え（図 3.9 参照）、その有効性を検証する。

1. 仮想物体間の距離が大きい場合、双方とも 4DOFC で操作可能とする。
2. 仮想物体間の距離が小さい場合、
 - (a) 双方が接してなければ、ともに 6DOF で操作可能とする。
 - (b) 双方が接している場合、接面のなす角 θ が
 - i. $\theta > th$ の場合、従属物体の位置の補正だけ行なう（「CN」に相当）。
 - ii. $\theta \leq th$ の場合、従属物体の位置と姿勢の補正を行なう（「CD」に相当）。

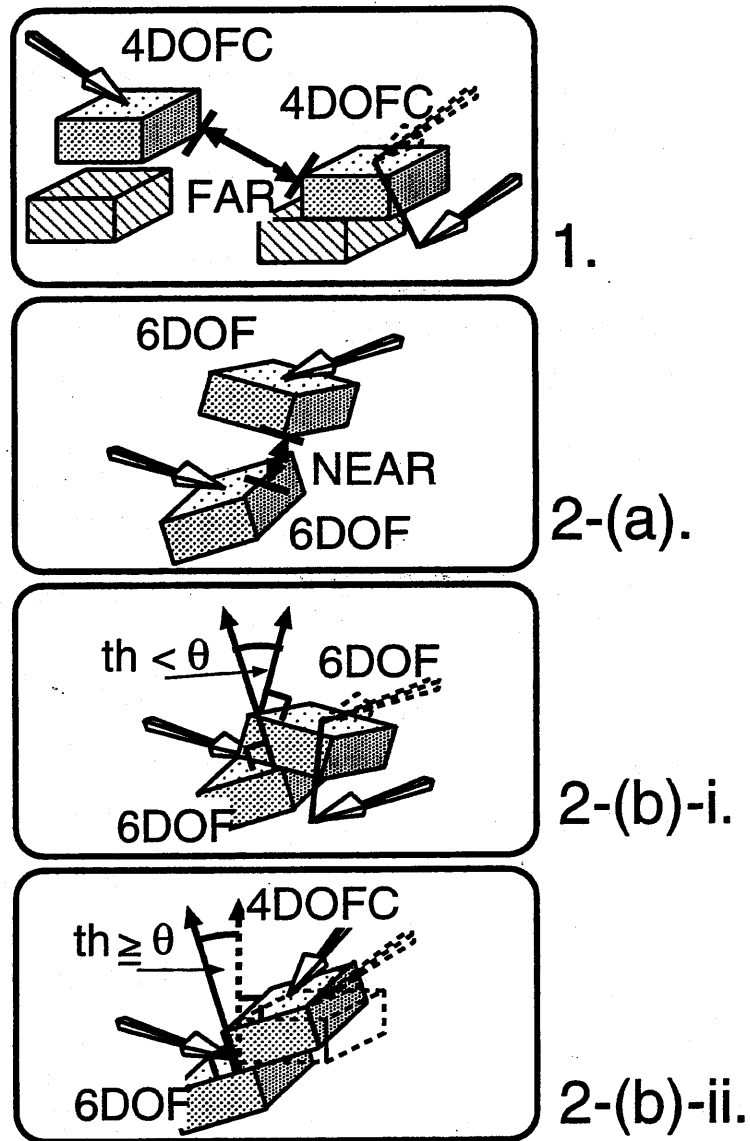


図 3.9 操作補助手法の改善

閾値 th が大きい場合、接触時に従属物体の回転角が急激に変更されることとなり、姿勢合せは容易になるが不自然な印象を与える可能性がある。一方、 th が小さい場合、離散配置制約を有効にするためには正確な姿勢合せを手動で行う必要があり、作業効率が低下する可能性がある。本実験の目的は、自然な操作感覚を与えかつ姿勢合せが容易となるような th を決定することである。以上のこと

から、本節で検証すべき仮説として以下の2つを考える。

仮説 4-1 離散配置制約が常に有効、または常に無効の場合に比べて、仮想物体の接触・非接触に応じて離散配置制約の有無を切替える手法が作業の時間効率に関して優れる。

仮説 4-2 改善案の閾値 th について、 $th = 0$ や $th = 180$ ではなく、その間の適当な値を取る場合に操作感が最適となる。

3.5.1 実験手法

実験環境 本実験では、図 3.6 の左側のハードウェア構成を用いて、操作者1名による両手操作を可能としている。

実験タスク 実験タスクは実験3と同じである。実験3の結果に基づき、干渉回避と離散配置制約が協調接合操作の作業効率に与える影響は、両手操作と共同操作で定性的に同程度であると判断し、本実験は両手操作のみで行う。

各被験者は、 $th = 0, 3, 5, 10, 15, 20, 180$ (度) の7通りに加え、比較のために実験3のCDと同じく常に2つの操作補助を有効とする場合の計8条件で実験を行う。実験ではこれらの条件を2段階に分けて行う。1段階目では、実験3で示唆された単純組合せ手法($th = 180$ に相当)とCN($th = 0$ に相当)およびCDの3手法を特に比較するため、 $th = 0, th = 180, CD$ の3条件でランダムな順序で実験を行う。次に2段階目では、 th の最適値を求めるため、残りの5条件で th の昇順および降順に実験を行う。

測定項目 客観的指標として、実験3と同じタスク達成時間、接触時間に加え、次のように再定義した誤り率と、主観評価値を記録する。

[誤り率] 接合した瞬間に $\theta > th$ となっていたタスク数の総タスク数に対する比。
なお、 $th = 0$ の場合は考慮しない。

[主観評価値] 各8条件についての、表 3.11 の7段階基準による同点を許した主観評価。

表 3.11 実験 4: 7 段階主観評価の基準

7	非常に操作しやすい
6	かなり操作しやすい
5	やや操作しやすい
4	どちらでもない
3	やや操作しにくい
2	かなり操作しにくい
1	非常に操作しにくい

被験者と試行数 被験者は実験 3 の被験者から無作為に抽出した 9 名であり、全員実験タスクを熟知している。各被験者が行った実験タスクは、各 8 条件で 32 回、計 256 回である。

3.5.2 結果と考察

図 3.10 に、各条件での平均タスク達成時間、平均接触時間、平均非接触時間、平均誤り率、平均主観評価値を示す。また、表 3.12 にこれらの数値と、不等号で表した分散分析に基づく各条件間の時間指標の有意差を示す。さらに実験 3 と同様に、習熟の様子を見るため、前半 16 タスク分の時間指標の平均値に対する後半 16 タスク分の時間指標の平均値の比を表中「学習効果」の欄に示す。以下では、これらの結果について考察する。

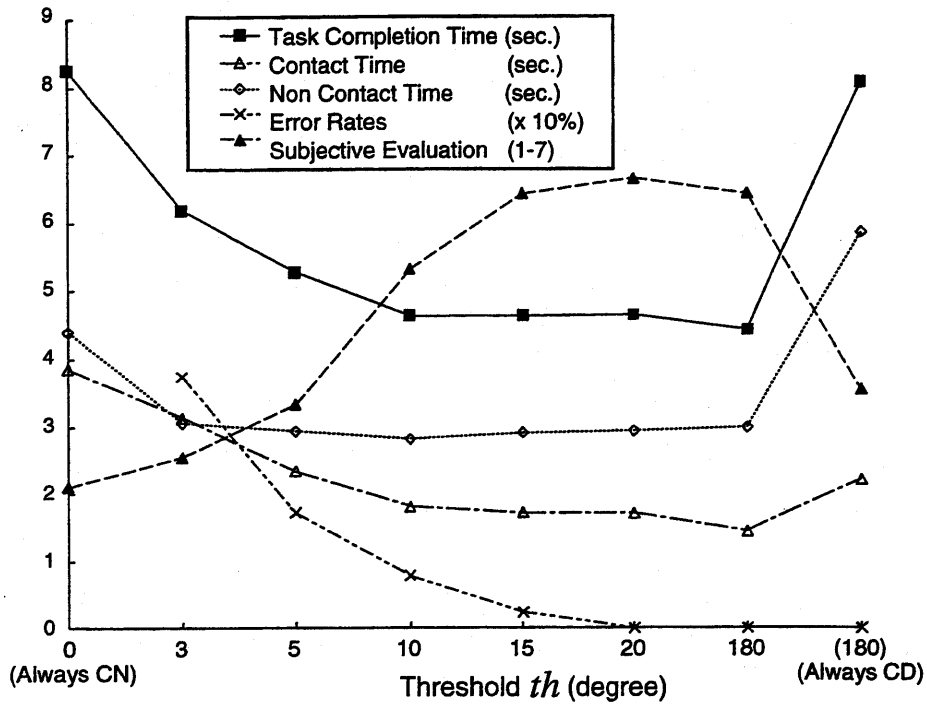


図 3.10 実験 4 の結果

表 3.12 実験 4: 指標の平均値と分散分析結果 (有意水準 $\alpha = 0.05$).

指標 \ th	0	3	5	10	15	20	180	180 (CD)
タスク達成時間	8.3	6.2	5.3	4.6	4.6	4.7	4.4	8.1 (秒)
分散	25.6	8.2	5.1	3.2	4.0	5.5	2.8	39.0
学習効果	0.97	1.03	1.04	0.96	1.00	0.97	0.93	0.92
接触時間	3.9	3.1	2.3	1.8	1.7	1.7	1.5	2.2
分散	7.6	4.4	2.7	1.2	1.0	1.5	0.6	4.5
学習効果	0.90	1.06	1.06	0.93	1.05	1.01	0.92	0.93
非接触時間	4.4	3.1	2.9	2.8	2.9	2.9	2.9	5.9
分散	14.2	2.0	1.7	1.7	2.3	2.3	1.7	22.3
学習効果	1.04	1.00	1.02	0.98	0.96	0.94	0.93	0.92
誤り率	—	0.38	0.17	0.08	0.02	0	0	0

操作補助を切替える手法の有効性 接触状態によって操作補助を切替える手法の有効性について、図 3.10 のタスク達成時間を見ると、常に干渉回避のみ有効の場合 (CN) や常に双方とも有効の場合 (CD) に比べ、全ての $0 < th \leq 180$ に渡って操作補助を切替える手法が優れることが分かる。さらに、表 3.12 から、その他の時間指標についても、 $10 \leq th \leq 180$ ではそれ以外の場合に比べ有意に時間指標が短いことが確認できる。以上のことから、接触状態によって操作補助を切替える手法の有効性が確認でき、仮説 4-1 は支持されたといえる。

なお、学習効果について、各条件の前半 16 タスクと後半 16 タスクの時間指標の間に有意差は認められなかった。定性的には、 $th = 180$ と CD の場合の短縮率がやや大きく、さらに実験タスクに習熟する余地があったものと思われるが、概ね実験 3 で習熟は完了していたと見ることができる。

最適な th の検討 最適な th の値について、接触状態によって操作補助を切替える場合、 $th \geq 15$ では、誤り率は約 2% 以下と小さく、時間的作業効率や主観評価値も最高レベルにある。特に、 $th = 20$ の時、誤り率は 0% であり、主観評価値は最良であった。以上より、仮説 4-2 は支持されたといえる。一方、 $th \leq 10$ では誤り率や主観評価値が急激に悪化し、 $th \leq 5$ では時間的な作業効率も悪化する。これらのことから、作業効率や操作感覚を悪化させずに最も自由に仮想物体を操作できる th の値は 15 度から 20 度程度であるといえる。

なお、CD の主観評価値は被験者によって 1 から 7 と極端な開きがあり、離散配置制約の制御のしやすさに個人差のあることが確認された。

他手法との比較 ここでは、提案手法と従来手法を比較検討し、提案手法の有効性に関して考察する。仮想物体の操作補助を行う従来手法として、正確な干渉検出に基づく視覚的位置補正を行う方法 [北村 96] や力覚提示を行う方法 [INS94, 野間 96] がある。これらの研究では、仮想物体の配置精度を評価することで、正確な操作を支援することを検証していることが多い。これに対し、提案手法は離散配置制約を導入し配置可能な位置を限定することで、1cm 以内の位置ずれや 15 ~ 20 度以内の姿勢ずれを吸収し、正確な配置を積極的に実現しているため、配置精度について従来手法と比較することはできない。作業時間の短縮に関しては、例え

ば [北村 96] では仮想物体の頂点の許容配置精度を 3mm とした配置作業で、視覚的な位置補正により作業時間を 50% 以上短縮している。また, [INS94] では力覚の提示により, 2人の操作者間での仮想物体の受渡しに要する作業時間を 30 ~ 70% 程度短縮している。

一方, 提案手法において, 最適な th の場合 $th = 15$ の作業時間は $th = 0$ (CN) に対し, 平均 56% である。これに, 実験 3 における CN の作業時間の NN に対する比 66% を単純に掛けると 37% となる。これより, 操作補助のない場合に比べ, $th = 15$ の場合, 作業時間を 60% 程度短縮すると推定できる。実験条件が異なるため定量的な比較は困難であるが, 提案手法の作業時間短縮率 60% は従来手法と遜色がないと考える。本手法は, 従来手法に比べ計算量が少なく高速な処理が期待できる上, 特別な装置を必要としない点で有利である。また, 仮想物体は一般に複雑な形状を持つが, 実用上配置可能な面を特定できることが多く, 配置可能な面の組合せに対し本手法を適用可能なアプリケーションは少なくないと考えられる。

実験 4 のまとめ 本実験から, 仮想環境で直方体のような単純な物体を複数同時に操作し接合する場合, 操作補助手法として提案した干渉回避と離散配置制約を適切に組合せることにより, 作業時間の短縮や操作感覚の向上に効果のあることが示された。

なお, 実験 4 において, $th = 10$ では, $th \geq 15$ の場合と同程度の時間で位置合せが完了しているにも拘らず, 接合のために仮想物体を解放した瞬間に角度のずれが生じる場合が多かった。これを踏まえ, 本手法の改善案として離散配置制約を有効にする閾 th_{in} を 10 度程度, 一度有効になった離散配置制約を無効にする閾 th_{out} を 15 度程度とするヒステリシスを導入する手法が考えられる。これらの値は一般的な直接操作環境で共通して使用できるのではないかと考えられる。

3.6 結言

本章では, 前章で提案した操作補助手法について, その有効性を検証するために行なった評価実験について述べた。

両手操作の有効性を評価した実験では、片手操作、両手の独立操作、両手の協調操作を同一の尺度で評価することで、特に両手協調操作の優位性が示された。また、干渉回避の有効性を評価した実験に関しては、干渉の事実をハイライトで示すだけでは操作補助にならないこと、仮想物体の操作自由度を干渉状態によって拘束する手法が有効であることが示された。

さらに、動的自由度制御手法における協調作業モードで利用している干渉回避と離散配置制約について詳細に評価を行ない、離散配置制約の2面性を明らかにして同手法の利用方法を改善することで、操作補助のない場合に比べて60%程度作業効率を短縮する操作補助手法を導出した。本手法は正確な干渉検出を行う方法や力覚提示を行う方法に比べて単純であり、多数の仮想物体が存在する仮想環境で複数の仮想物体が同時に操作される場合でも効果的な操作補助が可能である。

4. 協調型仮想物体モデラ VLEGO II の開発

4.1 緒言

本研究の第2の目的は、1) 仮想物体の操作性に優れる、2) 複数人の協調作業に対応している、の2点を特徴とする仮想物体モデラを開発することである。本論文で開発する仮想物体モデラを以降、VLEGO II (Virtual Environment for Generating Objects, second-generation) と呼ぶ。本章では、前章までに開発した操作補助手法を導入し、複数人で協調して仮想物体を生成できる協調型仮想物体モデラ VLEGO II を開発する。

まず4.2節では、従来の3次元形状生成手法と比較した協調型仮想物体モデラの特長について述べる。まず仮想物体モデラの特長として、1) 視認の容易性、2) 操作の直感性、3) 高い対話性、の3点を挙げ、次に共有仮想空間を用いた協調作業の特長を述べる。これらのそれぞれについて詳説することで、協調型仮想物体モデラとはどういったものであるか、何故注目されているのかについて述べる。次に4.3節では、VLEGO II の設計方針として、1) 提案した操作補助手法を活かした簡易な形状生成手法、2) 共有仮想空間を構成するために必要なデータ共有機構、の2点を決定する。さらに4.4節では、複数人がそれぞれ両手を用いて簡易に正確な仮想物体を生成できる仮想物体モデラとして、実際に構築したVLEGO II の実装と機能について述べる。最後に4.5節では、VLEGO II を用いて作成したいくつかのデザイン例を示す。

4.2 協調型仮想物体モデラの特長

本節では、従来の3次元形状生成手法と比較した協調型仮想物体モデラの特長について述べる。以下では、まず仮想物体モデラとしての利点を述べ、次に共有仮想空間を用いた協調作業の利点を述べる。

4.2.1 仮想物体モデラの特長

従来、建築や意匠デザインの現場では次の2種類の3次元形状生成手法が用いられてきた。

1. 粘土や木材などを用いて、実物体を製作する方法。
2. 3面図などを用いたCADなどの従来型モデラを使用して、計算機上で設計する方法（図4.1）。

1. の実物体を製作する方法は、生成する3次元形状を簡便に直接視認、操作できるという利点がある反面、重力や摩擦といった物理法則に縛られるために実現できる形状や操作に制約が多いという欠点がある。一方、2. の従来型モデラを用いる方法では、計算機を利用して、物体の消去や複製、操作履歴の参照をはじめ表示拡大率の変更、視点の自由な移動、光源や物体の自在な色変更など、実空間では不可能なさまざまな柔軟な機能が簡単に実現できるという利点を持つ反面、3次元形状の直感的な把握や操作が困難であり、複雑なコマンド体系に習熟する必要のある場合が多いという問題がある。

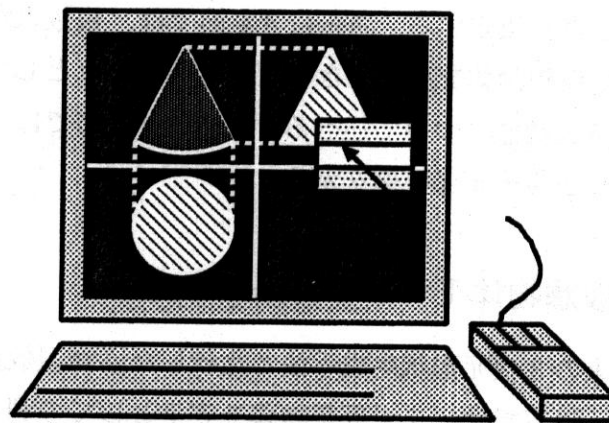


図 4.1 従来の CAD

これに対し仮想物体モデラでは、上述の2手法の利点を併せ持ち欠点を排除した理想的な形状生成環境を実現できる。この概念を簡単に表したものを図4.2に

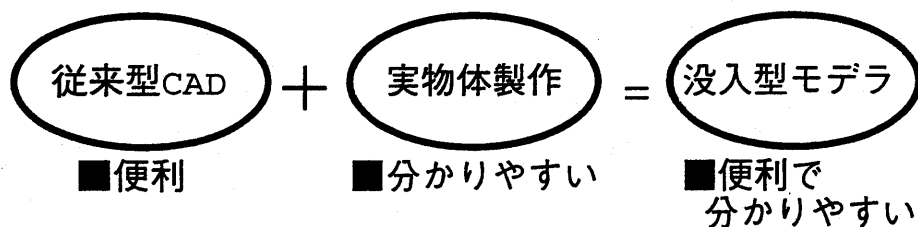


図 4.2 仮想物体モデラの特長

示す。まず，1. の実物体を製作する方法と比較した場合，仮想物体モデラでは 3次元物体を簡便に操作できる利点を保ちつつ，従来のモデラと同様に計算機を活用した自由な作業環境を提供できる。一方，2. の従来型モデラを用いる方法に対して，仮想物体モデラは計算機を用いた柔軟な機能を提供できる利点を継承しながら，より実空間に近い作業環境を提供できる利点を持つ。より実空間に近い作業環境を提供する利点の具体例として，掛井は 1) 変更した 3次元形状が直ちに視認でき，設計効率が高い，2) 操作が直感的で簡易である，といった点を指摘し [掛井 93]，Smets らは，1) 設計対象のスケールを把握できる，2) ジェスチャなどを用いた 3次元形状の直接操作が可能である，といった点を挙げている [SSOM94]。こうした利点は，次の 3 点にまとめられる。

- 視認が容易に行なえる
- 操作が直感的に行なえる
- 対話性の高い形状生成が行なえる

以下では，仮想物体モデラを持つこれら 3 点の特長について述べる。

視認の容易性 視認の容易性とは，3次元形状を直接 3次元的に視認できることを指す。人間が 3次元形状を直感的に理解するためには，奥行き感あるいはより正確な奥行き情報の提示が不可欠であり，その手法は多様である [乾 95]。一般に，同時により多くの奥行き情報の提示手法を用いることにより，3次元形状のより

正確な把握が可能となり、形状の直感的理解も促進される [WAB93]。両眼立体視を実現する表示装置の研究は数多く [元木 96]、従来のモデラにおいても両眼立体視の機能を備えるものがあるが、利用者個々の両眼間隔（瞳孔間距離）やディスプレイと視点の相対位置を考慮したステレオ画像ではないため、正確な奥行き感 は得られない [河内 94]。これに対し仮想物体モデラの提示する仮想空間では、容易に3次元形状を把握できるため、利用者が3次元形状の確認を簡単かつ確実に行なえる。

操作の直感性 操作の直感性とは3次元形状を直接3次的に操作できることを指す。通常3次元物体は位置および姿勢について各々3自由度、計6自由度を持つ のに対し、最も一般的な位置入力装置であるマウスは2自由度のみを持つ。従ってマウスを用いて6自由度を持つ3次元物体を操作するには何らかの工夫が必要 であり様々な手法が提案されてきた。例えば Houde らは操作する3次元物体に移 動のための取っ手や回転のための押し棒などを重ねて表示することで、選択でき る自由度を実物体の操作経験から類推しやすくする手法を提案している [Hou92]。 より高い自由度を同時に操作するために、Venolia らは通常の2次元マウスに奥 行き用のロータリエンコーダを付け加えた3次元マウスを用いることにより、3 次元物体の位置を制御する手法を提案している [Ven93]。

高自由度の操作をより直感的に行なうためには、Hinckley らは知覚される空間 構造と入力装置の制御構造の相関を高くすべきであると指摘している [HPGK94a]。 これに従えば、3次元空間の位置や姿勢を入力する場合は、その6自由度に対応 して3次的に入力装置が移動、回転でき、その物理的な位置や姿勢に基づいた 値を取得できることが望ましい。仮想空間で提供されている、手を対象物の位置 まで移動して行う直接操作は、日常の実空間での作業感覚に近く直感的であり、 作業効率に関しても優れている [竹村 91]。従来のアプリケーションでは3次元形 状を容易に視認できないため、3次元位置入力装置を用いる場合でも操作性に限 界があった。一方、仮想物体モデラでは視認の容易性を持つため、3次元位置計 測装置を用いた作業対象の6自由度操作を直接直感的に行うことができる。

高い対話性 従来の3次元モデラでは、平面図や立面図の作図に基づいて形状生成を支援することが多い。このようなモデラでは、形状の変更を2次元の図面上で行なうため3次元形状の確認がその設計過程と乖離している(図4.3)。また、2次元画面上で3次元形状の直接操作、変更を可能としているモデラにおいても視認や操作の直感性が十分でないため、自由度の選択や変更などの各操作に工数を要する。このように、設計過程のサイクルが冗長になることは、時間的効率の問題だけでなく、利用者の発想支援の立場からも望ましくない。一方、仮想物体モデラでは、提示される3次元形状を実時間で直接変更していくことが可能なために、編集対象の図面や操作する自由度の切り替えなどが不要である。従って仮想物体モデラでは、視認や操作の直感性を活かし、認知的負荷や作業工数を低減できるため対話的にかつ効率よく形状生成を行なうことができる。

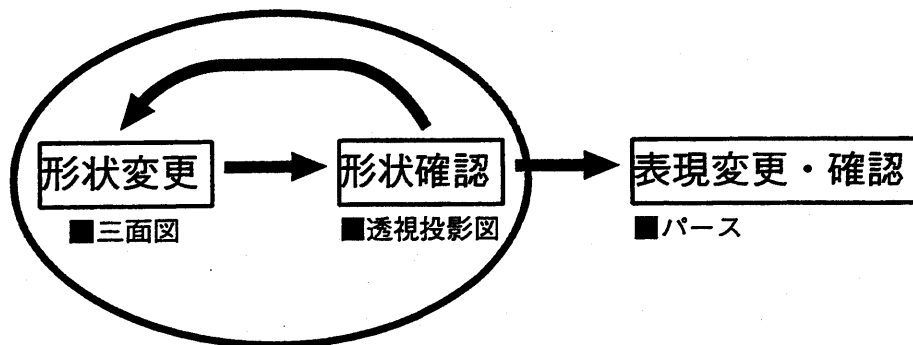


図 4.3 従来の CAD の設計過程

4.2.2 共有仮想空間を用いた協調作業の特長

従来、協調作業において3次元イメージを実際に共有するためには、立体工作などの実物体を用いることが多かったが、実物体を用いた場合に作業形態を制限する様々な物理的制約を、共有仮想空間を用いることにより解消することができる。実空間で行う協調作業に対する共有仮想空間を用いた協調作業の利点として、竹村らは1) 操作者間の距離を克服した遠隔協調作業が可能、2) 重量、摩擦などの物理量を無視した自由な作業が可能、3) 操作者間の視点の共有や操作権の設

定など、柔軟な作業が可能、といった点を挙げている [TK92].

協調型仮想物体モデラは、仮想空間で形状モデリングが可能であるという利点と、共有仮想空間で協調作業が可能であるという利点を兼ね備えており、有益な作業環境であるといえる。

4.3 VLEGO II の設計方針

本節では、VLEGO II の設計方針について述べる。VLEGO II は次の 2 点を設計方針とする。

- 前章で導出した操作補助手法を活かした、簡易な操作で正確な形状生成が可能な手法を導入する。
- 複数人による協調モデリングが可能な適切なデータ共有機構を導入する。

以下では、これらの方針に基づいて決定した具体的な形状生成手法やデータ共有機構について順に述べる。

4.3.1 形状生成手法

前章で導出した操作補助手法を活かした形状生成手法として、ブロック玩具に倣った手法を導入する。その理由は以下の 3 点である。

- 仮想物体モデラの特長を活かすためには、形状生成のための仮想物体の操作手法が習熟を要さない分かりやすいものであることが望ましい。ブロック玩具は多くの人にとって馴染みがあり、目的の形状を生成するための操作方法が理解しやすい。
- 提案した操作補助手法では、バウンディングボックスに基づく簡易な干渉判定を行なう。ブロック玩具は直方体を基本とする形状で構成されており、提案手法との親和性が高い。
- 提案した操作補助手法では仮想物体に離散配置制約を課している。ブロック玩具は、離散的な突起位置に応じた位置や姿勢でのみ互いに接合し、提案手法との親和性が高い。

ブロック玩具に倣った形状生成手法として、具体的には、互いに接合可能な適当な基本形状を用意し、両手操作や共同操作によって順次それらの基本形状を組み立てていく手法を導入する。このような手法によって、操作補助手法の特性から、位置に関しては1cm、姿勢に関しては90度単位で正確かつ簡易に3次元形状を生成できる作業環境が提供できるものと期待できる。

4.3.2 データ共有機構

本節では、VLEGO II が共有仮想空間を構成するための、データ共有機構について述べる。一般に、CSCW (Computer Supported Cooperative Work: 計算機援用協調作業) の分野におけるアプリケーションでは、複数の計算機が保有するデータベースの同一性、一貫性を保つ必要がある。CSCW のアプリケーションには、大きく分けて、協調作業の参加者全員が同一時刻に同じ目的で共同作業を実施する同期型のものと、必ずしも時刻の一致を見ない非同期型のものがある。共有仮想環境は通常同期型の構成を取るが、同期型の共有データベースの保持方法や、更新データの配布方針は表 4.1 に示すように典型的に幾つかの形態に分類できる [Fun96, Mac95]。

表 4.1 共有仮想空間で用いられるデータ共有機構の分類

対称型	特徴	利点	欠点	例
ユニキャスト型	1対1の通道路を確保、 $N-1$ 回の再送が必要	簡易な機構、信頼性	拡張性	MAGIC[Sta96], GII[DB97]
ブロードキャスト型	全ノードへ一斉に送信	通信量が小さい	信頼性	SIMNET, DIS Protocol
マルチキャスト型	Ack や Nack により信頼性を確保	信頼性	拡張性	DIVE[CH93, FBSC93]
非対称型	特徴	利点	欠点	例
集中型	サーバがデータを集め、直列化して再送	一貫性の確保が容易	拡張性	臨場感通信会議 [KOTT93]
分散型	分散データベースをサーバが仲介して通信	拡張性、信頼性	管理が繁雑	BrickNet[SSPN94], MASSIVE[GB95]

VLEGO II では、これらの形態のうち、ユニキャストを用いた対称型の構成を選択した。その理由は、この形態は機構が単純であり、サーバによるデータの再

送が不要なため遅延量が比較的少なく、プロトコルレベルの信頼性が確保されるためである。この形態の欠点は、すべての参加ノードでデータを交換するためには、 N 個のノードについて $N \times (N - 1)$ 本の通信路を確保し、各ノードは同一の packets を $N - 1$ 回再送する必要があるため、参加ノードが多くなると通信量が急激に増加する点である。ただし、参加者が少人数（10 名程度以下）であり、同一建物内の LAN (Local Area Network) などを介して協調作業を行なうような、通信量や遅延量が比較的小さい場合には、この構成でも十分実用的に利用できる [KH96]。

具体的には、データ通信の媒体として Ethernet を用いて全ての参加ノードの組合せに対して 1 対 1 の通信路を確保し、1) TCP/IP によりプロトコルレベルでデータの欠落や不一致を防ぐ、2) 各ノードから発信されるデータにノード固有の ID を付加し、受信側では ID の若い順に処理をすることでデータの直列化を行なう、という 2 点によってデータの一貫性を確保する。

4.4 VLEGO II の実装と機能

前節の設計方針に従って、実際に協調型仮想物体モデラ VLEGO II を実装した。本節では以下、VLEGO II が実行される環境、提供する作業環境、および様々な機能と操作の実際について述べる。

4.4.1 実行環境

VLEGO II は SGI のグラフィックス WS 上で動作する。開発は C++ 言語で行ない、OpenGL, glut ライブラリ, 自作ライブラリ, および本研究室で開発中の汎用 3 次元ユーザインタフェースツールキット [世利 98] を利用した。VLEGO II は、様々な入出力装置に対応している。対応する機器を付録 A にまとめた。ここでは、具体的な実行環境の例を 2 つ挙げる。

実行環境例 1 図 4.4 は、比較的精度の高い、単独操作者用の実行環境の例である。この例では、グラフィック WS として Onyx RE2 (SGI 社) を使用し、利用者は、電磁気式の 3 次元位置計測装置 3SPACE Fastrak (Polhemus 社) で測量

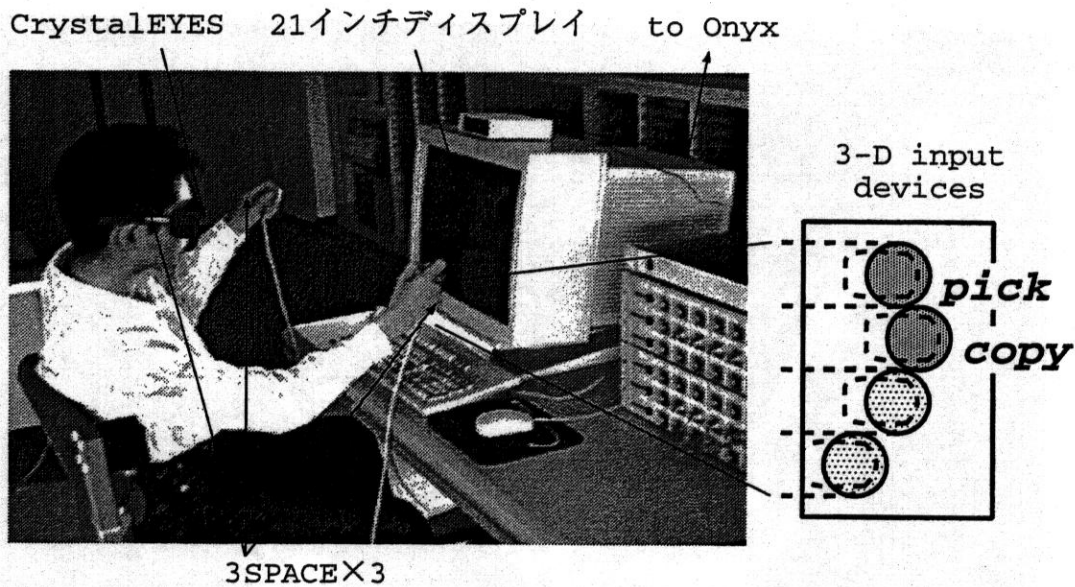


図 4.4 実行環境例 1

された視点に基づき、液晶シャッタ眼鏡 CrystalEYES (StereoGraphics 社) を通して、仮想空間を両眼立体視している。利用者は 1 組の 3 次元入力デバイスを用いて、両手で仮想物体を操作できる。この構成では、利用者はディスプレイからおおよそ 80cm 離れた視点で水平方向に最大視野角 30 度を確保することができる。グラフィック WS として使用した SGI 社の Onyx RE2 は、本学で利用できる最も高速なハードウェアであり、計算や描画の遅延の短縮に有効である [Ake93]。また、3 次元位置計測装置として使用した Fastrak は、デスクトップ式システムのような比較的狭い作業範囲に用いる場合、高い精度を得ることができる。さらに、仮想空間の提示に用いている据え置き型ディスプレイである Onyx RE2 標準の 21 インチディスプレイは比較的高い表示精度を得ることができる。この結果、この構成では仮想空間提示の位置ずれは作業半径内で 1cm 程度に留まっており、応答遅延は計算および描画遅延を含めて概ね 100ms 以下に抑えられている。

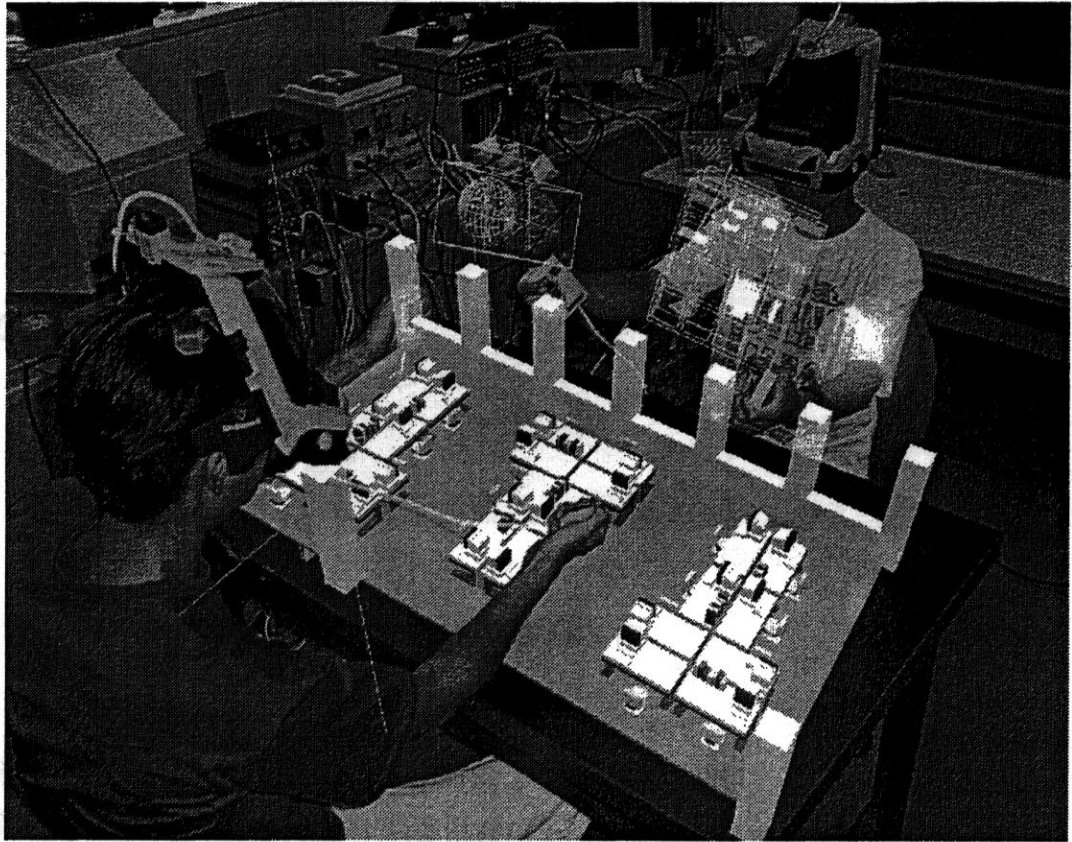


図 4.5 実行環境例 2 (合成写真)

実行環境例 2 図 4.5 は、同一地点で共有仮想空間を構成した、2名の操作者用の実行環境の例である。なお、図 4.5 では、操作者が観察している仮想空間の様子を示すために元画像に CG を合成した。この例では、グラフィクス WS として Indigo² Maximum Impact (SGI 社) 2 台をネットワークで接続して共有仮想空間を構成し、2名の利用者はそれぞれ、Fastrak で測量された視点に基づき、透過型 HMD Mediamask (Olympus 社) を通して、水平視野角 60 度の範囲について実空間と仮想空間を同時に観察している。この構成では、各利用者は実空間と仮想空間をともに共有することができ、2名の利用者は仮想物体を実空間のほぼ同一の地点で観察できる。このような作業環境を特に、共有拡張空間と呼ぶ [清川 97a]。利用者はそれぞれ 1 組の 3 次元入力デバイスを用いて、仮想物体の両手操作や共同操作が可能である。共有拡張空間では、幾何的不整合 (位置ずれ) の程度が特

に問題となるが、付録Bに示した手法によって位置合わせを行っており、2名がある仮想物体を観察する際の実空間上の位置ずれは、半径50cm程度の作業範囲において1cmから4cm程度である[清川97b]。

なお、VLEGO IIでは、幾何的不整合や時間的不整合に対処して、より正確に仮想空間を提示するために、位置計測誤差の補正フィルタ（付録C参照）や遅延を補償するための予測フィルタ（付録D参照）を提供しており、これらを利用することもできる。

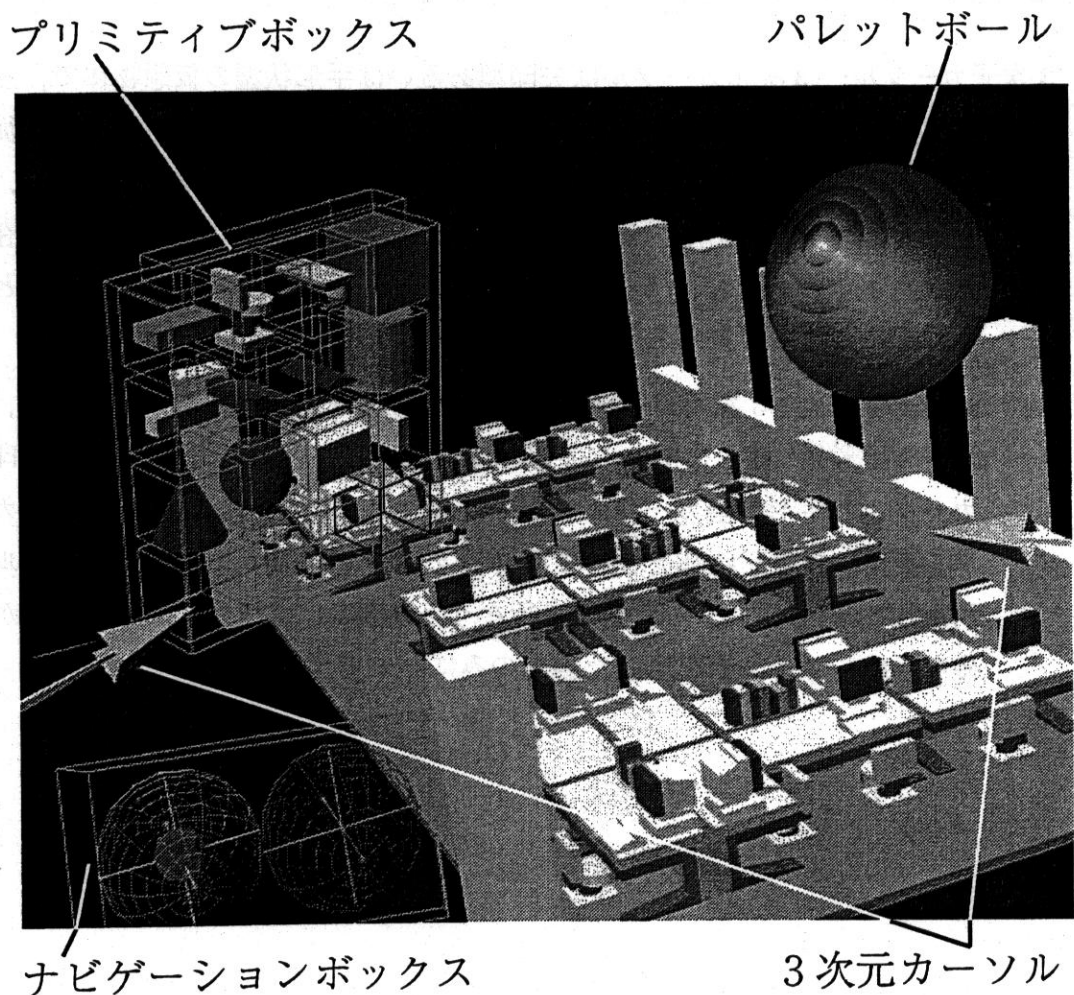


図 4.6 VLEGO II の作業空間の構成要素

4.4.2 作業空間の構成要素

VLEGO II ではブロック玩具に倣い、形状生成の最小単位である数種類のプリミティブを、離散配置制約に基づいて組合せていくことにより3次元形状を生成する [清川 95a]。図 4.6 に示すように、VLEGO II の作業空間には、左右の3次元カーソル、プリミティブボックス、パレットボール、ナビゲーションボックスなどが存在し、これらに加えて形状を構成するプリミティブが適宜存在する。本節ではこれらの各構成要素について説明する。なお、以降、単独または接合された複数のプリミティブを総称してブロックと呼ぶ。

3次元カーソル: 3次元カーソルは矢印型あるいは手形状型の仮想物体で、左右の入力デバイスに対応して2つ存在し、各デバイスの物理的動きに従って自由に移動する。矢印型の3次元カーソルは付録 A に挙げたような、自作の入力デバイスを用いる際に選択される。以降、このデバイスに存在する仮想物体の把持および複製に対応したスイッチを押下、解放することを単に把持する、複製する、または解放する、と書く。

一方、手形状の3次元カーソルは SuperGlove を利用する際に選択され、利用者の手形状に応じてカーソル形状も変化する。図 4.7, 図 4.8 に、矢印型カーソルと手形状型カーソルの様子を示す。また、図 4.9 に手形状型カーソルを用いて仮想物体を把持する様子を示す。利用者は3次元カーソルを利用して VLEGO II の全操作を行なう。以下では、機能と操作の対応が明確なため、スイッチを用いた場合のみについて説明する。

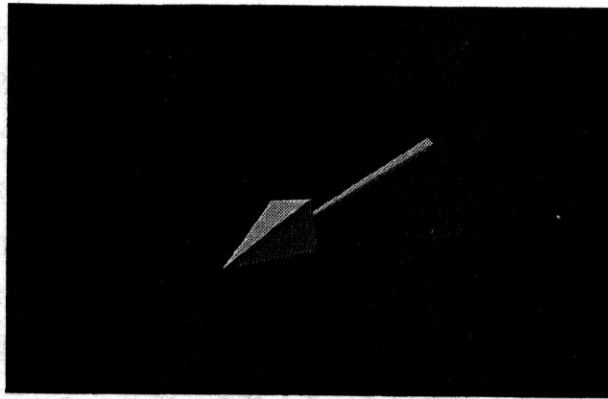


図 4.7 矢印型カーソル

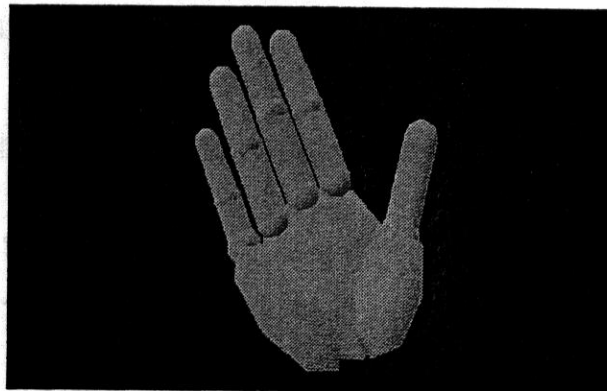


図 4.8 手形状型カーソル

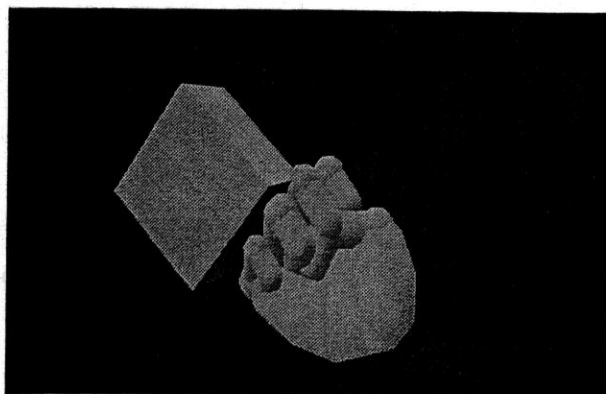


図 4.9 手形状型カーソルで仮想物体を把持する様子

プリミティブ: プリミティブはすべて、Wavefront 社の OBJ 形式を拡張した専用の定義ファイルによって、形状、色、マテリアル、テクスチャなどが記述され、VRML などに採用されているシーングラフ [SC92] に似た階層構造によって管理されている。VLEGO II では、プリミティブ定義ファイルを作成すれば任意の色や形状を持つプリミティブを新たに利用することができるが、直方体、3角柱、4角柱、円柱、3角錐、4角錐、円錐、球などの 11 種類のプリミティブを予め用意している。また、定義ファイルを記述する際に、プリミティブに使用できるテクスチャとして図 4.10 に示す 6 種類のテクスチャを予め用意している。また、プリミティブの高さ、横幅、奥行き、直径などは原則として 1cm の整数倍である。さらに、後述するように、各プリミティブにはそれを覆う最小の直方体であるバウンディングボックスが定義されており、バウンディングボックスの各面は他のプリミティブのそれと互いに接合することができる。

なお、定義ファイルと連動した描画の段階的詳細化機能を利用して [AP94]、実際のブロック玩具に倣った外観を持たせるために各プリミティブの上面に 1cm 間隔で突起を設けて表示することもできる。プリミティブに対して行なえる具体的な操作については次節以降で詳しく述べる。

プリミティブボックス: プリミティブボックスは図 4.11 に示すように、ワイヤフレームの立方体を 16 個整列した形状をしている。図 4.11 の例では、予め用意されている 11 種類のプリミティブが各区画に 1 つずつ収められている。各区画は、プリミティブ消去用の 1 区画を除いてプリミティブの登録と再利用に利用できる。仮想空間で組み立てたブロックを格納用の空き領域に移動すると、そのブロックは一塊の新たなプリミティブとして登録され、その区画に丁度納まるようにスケーリングされて表示される。再利用するプリミティブを生成するには登録されているプリミティブを把持すればよい。このようにプリミティブが自己拡張性を持つことにより、目的に合った形状を効率良く利用できる。

また、消去用の区画はプリミティブの消去に利用され、プリミティブを区画内に移動して消去できるほか、区画内で消去用のオブジェクトを把持す

ることができ、これを任意のプリミティブに触れてそのプリミティブを消去できる。また、プリミティブボックス上部の直方体領域を把持することでプリミティブボックス全体の移動が可能である。

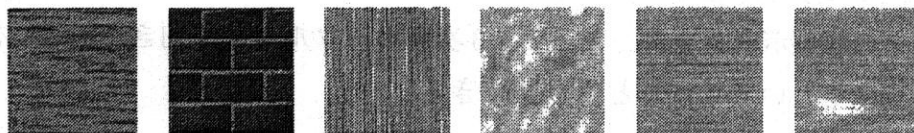


図 4.10 予め用意しているテクスチャ

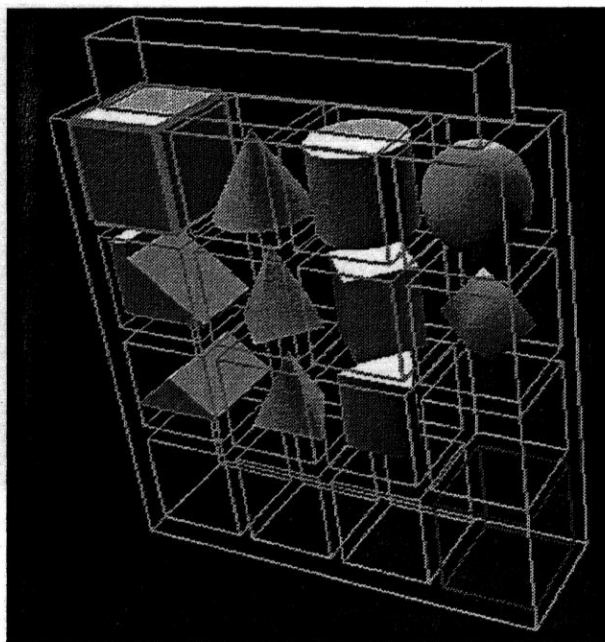


図 4.11 プリミティブボックス

ナビゲーションボックス: ナビゲーションボックスは図 4.12 に示すように、2つの球と1つのスクロールバーを持つ形状をしている。右側の球を把持する

と3次元カーソルの回転に追従して利用者の視点の姿勢を変更できる。左側の球を把持すると内側の球が3次元カーソルに追従して移動する。このとき、内側の球と外側の球の中心位置の差分ベクトルを速度ベクトルとして、利用者の視点を並行移動できる。なお、仮想空間中で視点の位置を変更する別の手段として、プリミティブを把持していない状態で入力デバイスの複製ボタンを押下すると、3次元カーソルの差す向きに加速しながら移動するという手法なども利用できる。

さらに、ナビゲーションボックス上部のスクロールバーの左右の角錐をクリックする、または、スクロールバー内部の球を把持して移動すると、それに応じて仮想空間の提示スケールを増減できる。

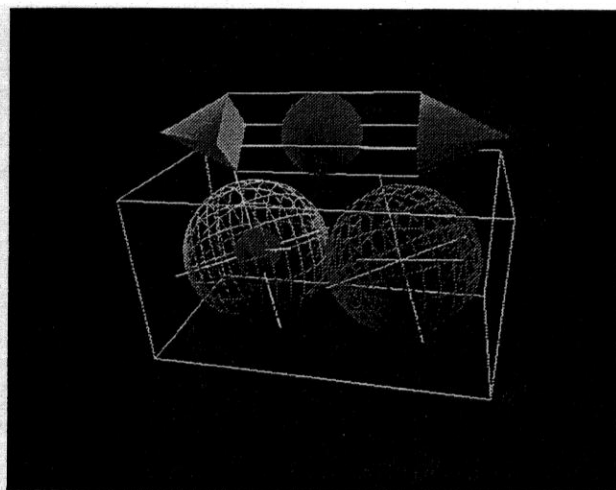


図 4.12 ナビゲーションボックス

パレットボール: パレットボールは図 4.13 に示すように部位によって3次元的に明度、彩度、色相の異なる球形であり、2つの手を用いてブロックの彩色に利用する。パレットボールも把持して自由に移動することができる。彩色の実際については、4.4.4 節で述べる。

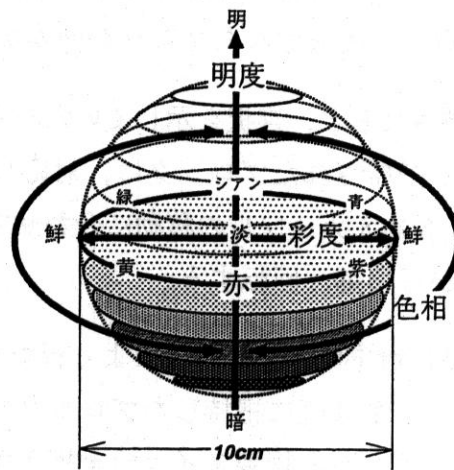


図 4.13 パレットボール

4.4.3 プリミティブの基本操作

VLEGO II のブロックに対する機能は、片手で行なえる基本的なものと同調操作（両手操作または共同操作）で行なうものがある。これらを表 4.2 にまとめる。通常、ブロックに対するすべての操作は、ブロックを選択し、把持し、目的の操作を行ない、解放する、という手順で行なわれる。本節ではブロックに対する片手操作について説明し、同調操作については 4.4.4 節で述べる。

選択: 3次元カーソルの先端が、あるブロックの内部に存在する間、そのブロックは選択され、選択されたことを示すためにカーソルの指すプリミティブがハイライト表示されるとともにブロック全体を囲む最小の直方体であるバウンディングボックスがワイヤフレームで表示される。なんらかの操作

表 4.2 VLEGO II におけるブロック操作

片手操作	選択, 把持, 複製, 消去, 接合
同調操作	接合, 分割, 拡大縮小, 彩色

により複数のブロックの範囲が重なり、その領域にカーソルの先端がある場合には、最も過去に生成されたブロックのみが選択される。

把持: ブロックが把持されると、選択を示していたバウンディングボックスは表示されなくなる。把持されたブロックは、対応したスイッチを解放するまで把持され続け、3次元カーソルの移動に合わせて通常は既に述べた離散配置制約を伴いながら移動、回転する。

複製: ブロックの複製は対応するスイッチにより行なえるが、細かくは2通りの複製方法がある。第1は既に把持したブロックを複製する場合であり、この場合は把持し続けながら複製スイッチを押下することにより元のブロックを把持したまま複製ブロックを仮想空間に置いて行ける。第2は把持していないブロックを複製する場合であり、この場合は予め複製スイッチを押下しておき、そのまま目標ブロックを把持することにより元のブロック位置を動かさずにブロックが複製され把持できる。なお、複製は必然的に干渉を起こすため、把持ブロックは、一旦干渉を起こすとその干渉が解消されるまで6DOFで自由に操作できるようにしている。

消去: ブロックの消去は前述の通り、ブロックを把持しプリミティブボックス内で解放する、あるいはプリミティブボックス内から消去用の仮想物体を把持し消去対象のブロックに触れることにより行なえる。消去操作の実行されたブロックはすぐには消滅せず、500ms程度の期間しだいに縮小しながら最後に消滅する。

接合: ブロックは仮想空間に置かれている他のブロックに対して片手または両手で接合することができる。片手で把持しているブロックが把持されていない他の全てのブロックと干渉回避を行なった結果、どのブロックとも干渉がなく、かつ一つ以上のブロックと接合可能な場合、把持ブロックおよびこれと接合可能な全てのブロックのバウンディングボックスがワイヤフレーム表示され、接合可能であることを示す。このとき把持しているブロックを解放すると、把持ブロックは接合可能な全てのブロックと接合し、それ

らのバウンディングボックスは消える。協調操作による接合については次節で述べる。

4.4.4 協調操作を交えた形状生成

本節では表 4.2 に挙げた VLEGO II の機能のうち、4.4.3 節で述べた片手によって行なえる基本機能以外の、協調操作によって行なう機能について述べる。以下、ブロックの接合、分割、拡大縮小、彩色の各操作について順に説明する [KTK+96a, KTK+96b, 清川 95d, 清川 96]。

ブロックの接合 協調操作によってプリミティブを接合する場合、それぞれの手の位置や姿勢を合わせながら接合を行なう。一方の手が把持しているブロックが他方が把持しているブロックに対して干渉回避を行なった結果、両ブロックが接合可能な場合は、双方のバウンディングボックスをワイヤフレーム表示する (図 4.14, C)。ここで一方のブロックを解放すると両ブロックは接合される (図 4.14, D)。

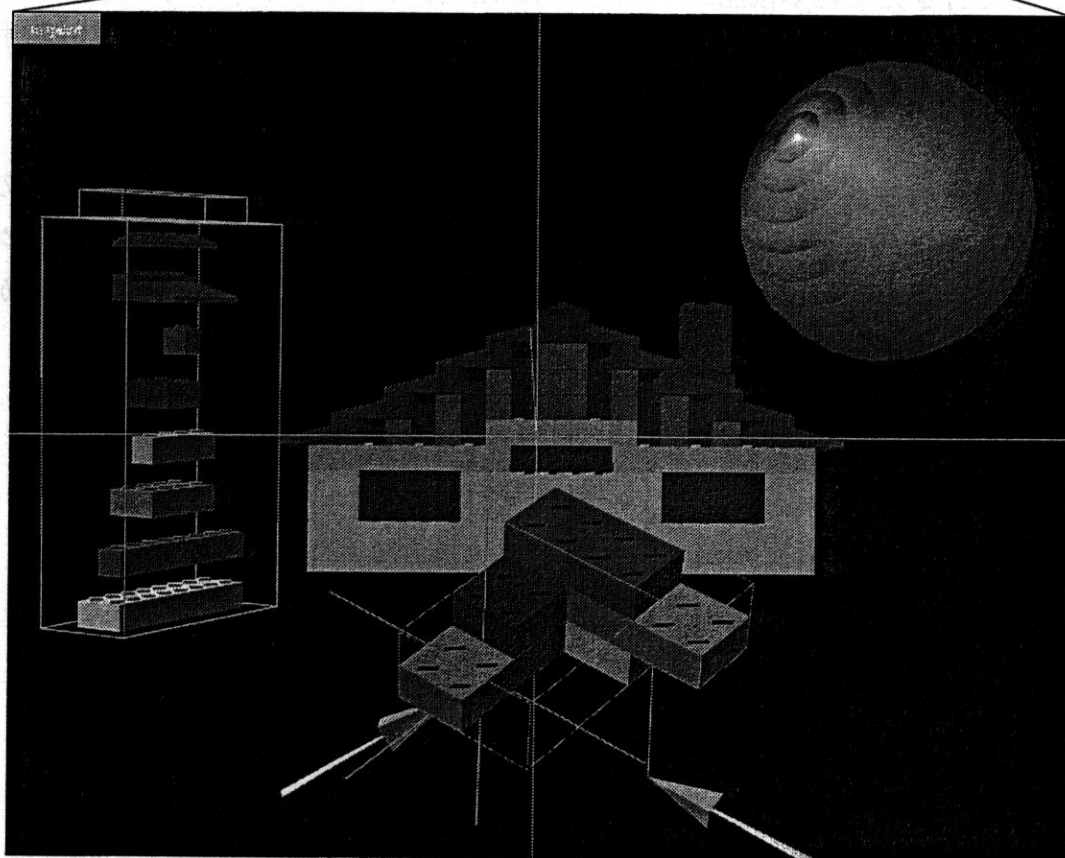
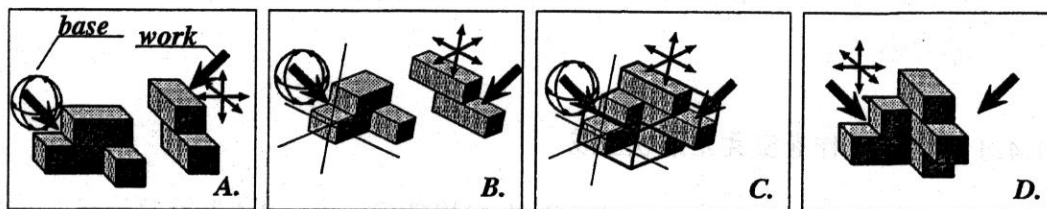


図 4.14 VLEGO II における協調接合操作例

ブロックの分割 接合されたブロックは次の2通りの方法で分割できる。

取り外し: 片手でブロックを把持し, そのカーソルが突き刺しているプリミティブ以外のプリミティブを, 他方の手で一つずつ取り外すことができる。

分断: カースルを切断平面に変更し, ブロックを分断することができる. はじめに一方の手がブロックを把持しているとする (図 4.15, A→B). 他方の手が何も仮想物体を選択していない位置で把持ボタンを押すと, その3次元カースルの形状は半透明の正方平面 (切断平面) となる (図 4.15, B→C). この時, ブロックと切断平面の位置および姿勢を適当に合わせ, 切断平面を解放することによりブロックをプリミティブ単位で分断できる (図 4.15, C→D). 切断平面は半透明であるのは把持物体との相対位置が把握しやすいと考えられるからである [ZBM94]. 分断が起こると, ベースのカースルが突き刺すプリミティブのある側がベースに把持されたままとなり, 分断された残りのブロックは, その位置および姿勢が 500ms 程度のアニメーションで補間されて 4DOFC で整えられ, 仮想空間に置かれる.

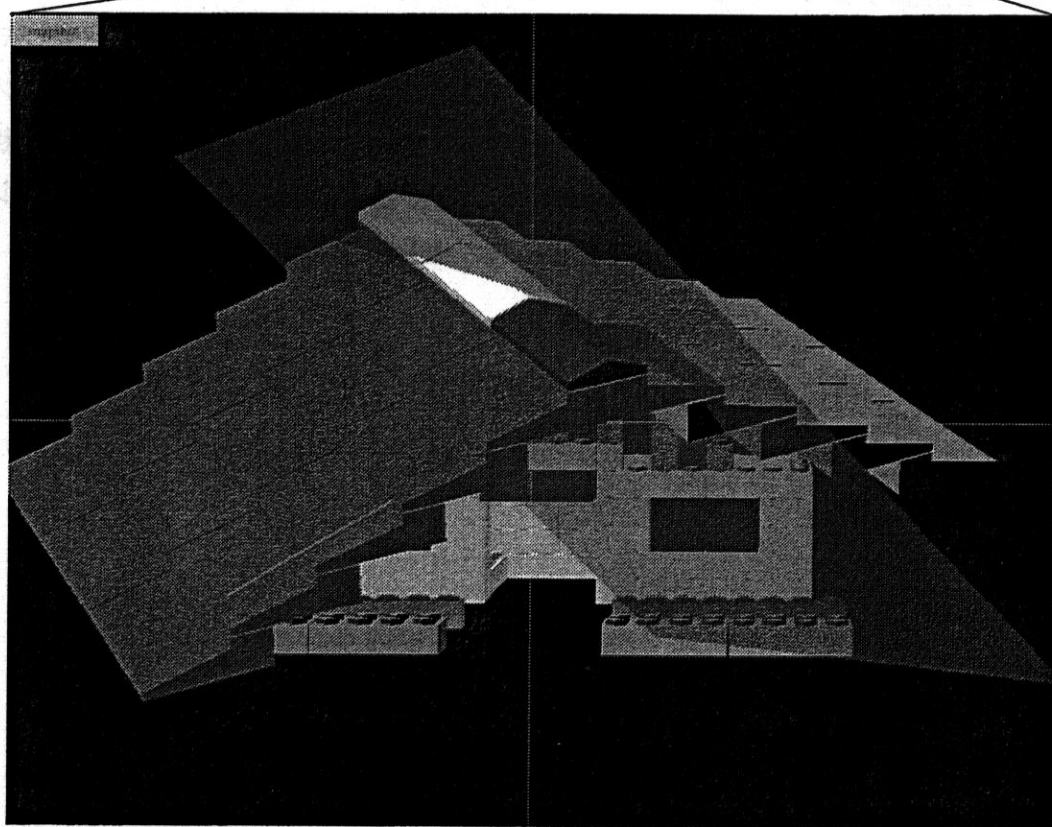
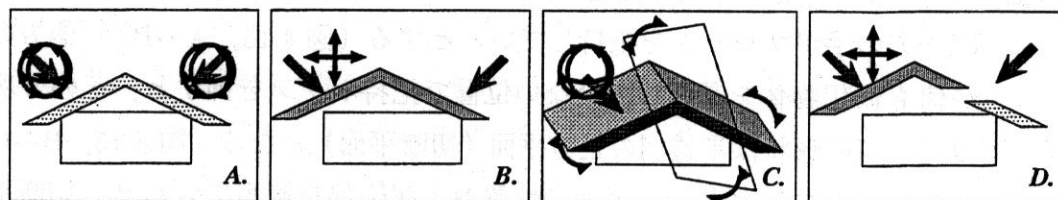


図 4.15 VLEGO II における分断作業例

プリミティブの拡大縮小 VLEGO II では、複雑な形状や大きな形状を生成する場合にも形状生成の工数や描画プリミティブ数を増大させることのないよう、各プリミティブ形状を仮想空間に没入しながら変更することができる。

プリミティブの持つデータ構造は各頂点位置の変更に対応しているが、現在実

装しているインタフェースでは大きさ（高さ，幅，奥行き）の変更のみが可能である．2つの手で同一のプリミティブを把持すると，それらの手の位置に対応してリアルタイムでプリミティブの大きさを1cm単位で変更できる（図4.16）．変更・追加したプリミティブはファイルに保存して再利用することが可能である．このプリミティブ管理方式は，各プリミティブの形状がより多様になった場合にも対応可能である．

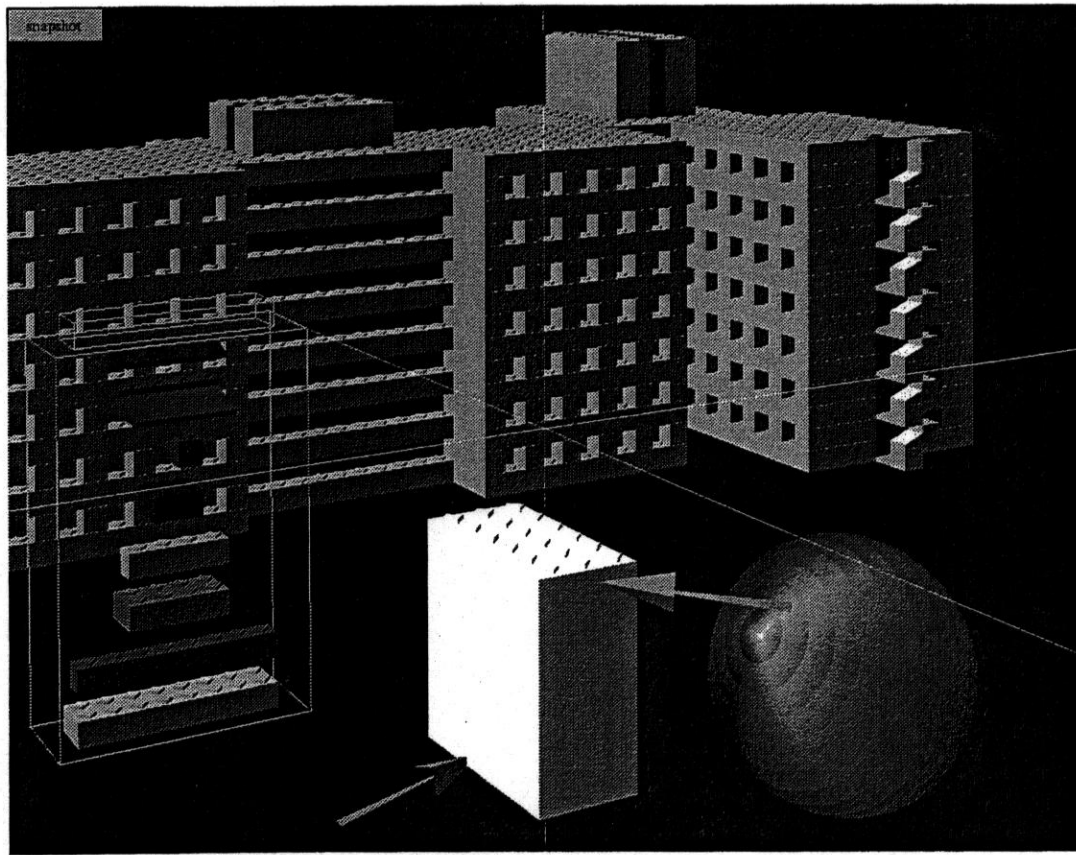


図 4.16 プリミティブ拡大縮小の様子

プリミティブの彩色 VLEGO IIでは，パレットボールを利用して各プリミティブを任意に彩色できる．パレットボールは把持すると6DOFで操作でき，パレットボールに重ねて立方体のワイヤフレームが表示される（図4.17，a.→b.）．パ

レットボールを把持している間、他方のカーソル（ワーク）の先端が指す場所に応じて既に彩色されているプリミティブやパレットボール上から任意の色を選択できる。選択されている色は先に述べたワイヤフレームの色にリアルタイムで反映される。プリミティブから色を選択した例が図 4.17, c. であり、パレットボール上から色を選択する例が図 4.17, d. である。ワーク側の把持を指示するスイッチを押下すると色が決定され、ワークのカーソル先端に該当色の直方体が現れる（図 4.17, e.）。この時、そのスイッチを解放するまで、カーソル先端が指す各プリミティブを彩色できる（図 4.17, f.→h.）。

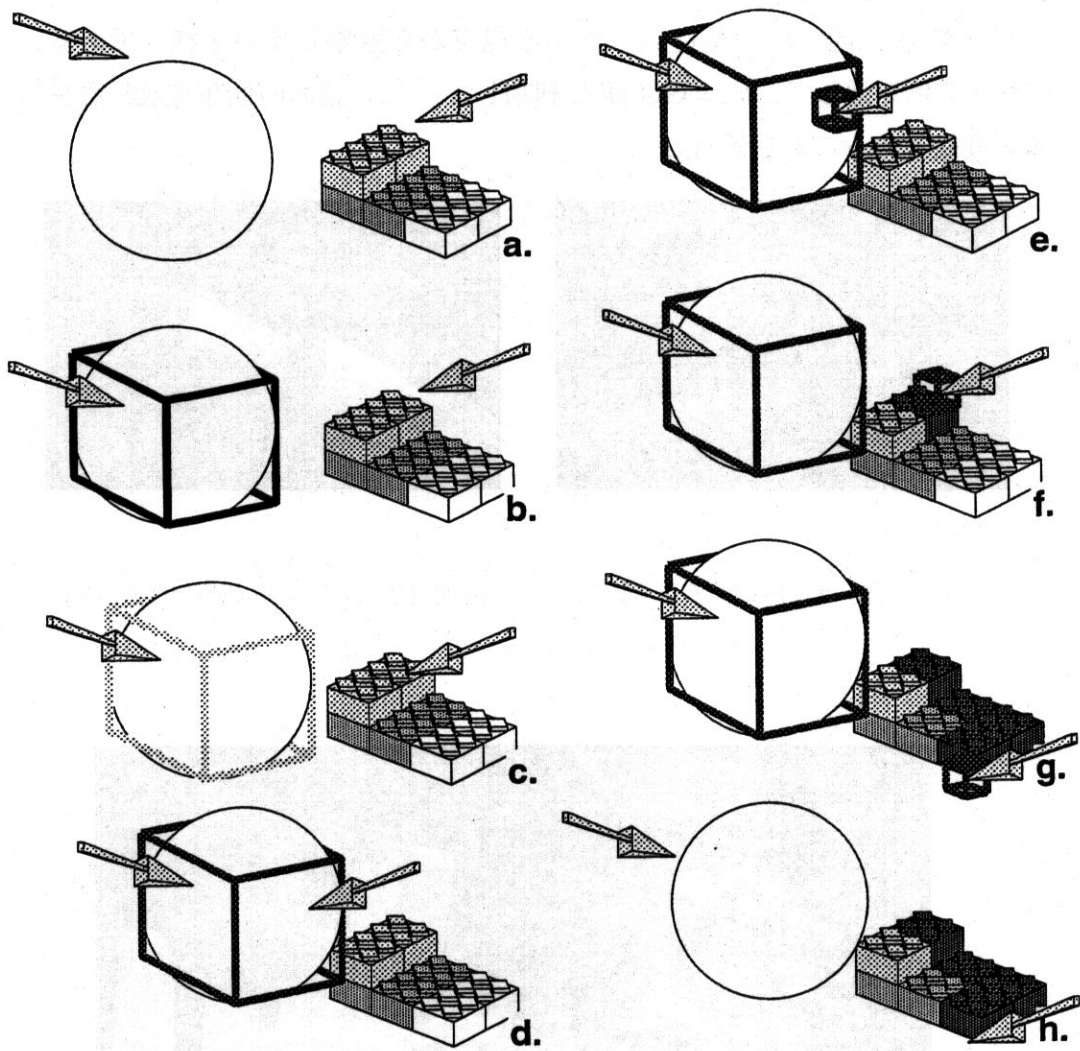


図 4.17 プリミティブ彩色の様子

4.5 仮想物体デザイン例

VLEGO II を利用して、仮想物体のデザインを実施した。製作は VLEGO II の操作に熟練した利用者 1 名が行った。図 4.18 と図 4.19 は犬とロケットのデザイン例であるが、各々 2, 3 分で作成できた。また、より大きくかつ複雑なデザイン例として、筆者の所属する研究室の学生居室を模して制作した仮想物体を図 4.20

に示す。この場合、制作におおよそ30分を要した。

図4.21は、同一の仮想物体を異なる視点から観察している様子である。このデザイン例を通して、VLEGO IIを利用して、広い範囲の仮想環境を容易にデザイン可能であることを確認した。

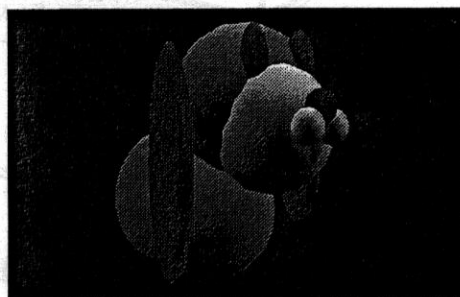


図 4.18 犬のデザイン例

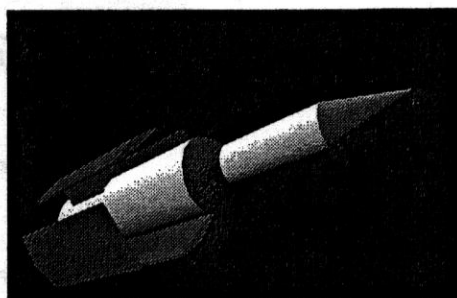


図 4.19 ロケットのデザイン例

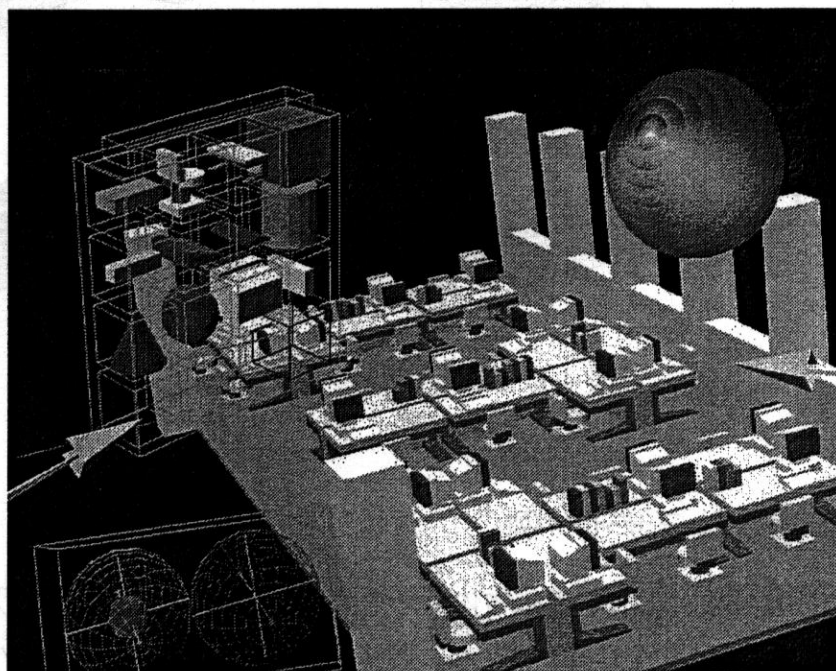


図 4.20 学生居室のデザイン例

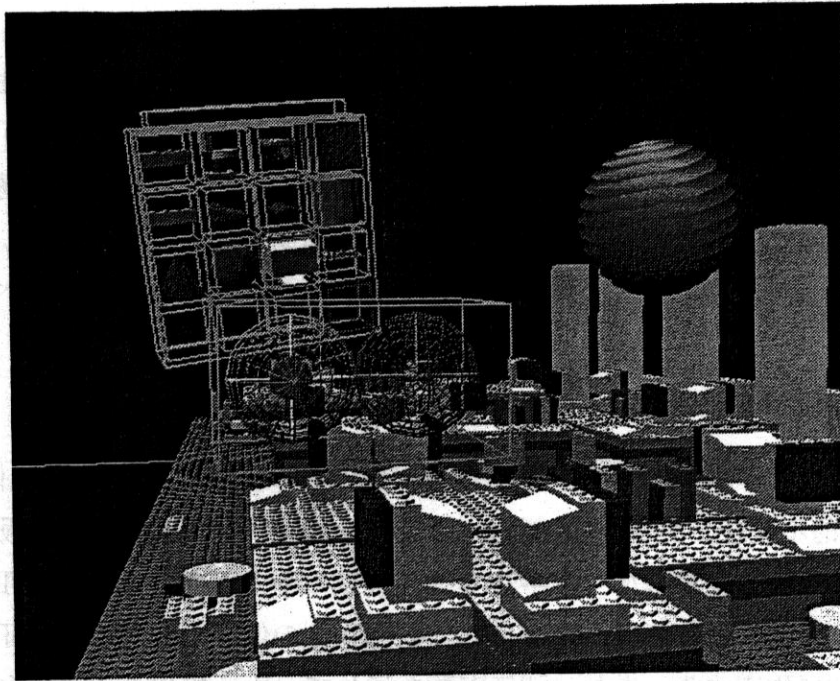


図 4.21 学生居室のデザイン例（近接図）

4.6 結言

本章では、協調型仮想物体モデラの特長について述べ、3章で導出した操作補助手法を導入して、複数人が両手操作や共同操作によって簡易に正確な形状を生成できる協調型仮想物体モデラ VLEGO II を開発した。また、VLEGO II の設計方針や実行環境、提供する緒機能について述べた。さらに、VLEGO II を用いたいくつかのデザイン例を紹介し、実際に VLEGO II を用いて短時間で形状生成が可能であることを確認した。

5. 結論

本研究では，人工現実感分野の重要課題である，仮想物体の操作性を向上するための操作補助手法の開発を行い，本手法を導入したアプリケーションとして複数人で協調モデリングの可能な協調型仮想物体モデラ VLEGO II を構築した．本章では，本論文の総括として，提案した操作補助手法および，開発した形状モデリングシステムの考察と，本研究関連分野の今後の展望について述べる．

5.1 まとめと考察

本研究では，仮想物体の直接操作が困難である要因として，1) 幾何的不整合，2) 時間的不整合，3) 生理的制約，の3点を挙げ，生理的制約を克服するための操作補助手法を提案した．本手法では，複数の手で仮想物体を操作可能とし，仮想物体同士の接触状態などに応じて，仮想物体の位置や姿勢の操作可能な自由度を視覚的に拘束する．また，評価実験を通して，両手操作の片手操作に対する優位性，自由度の動的拘束を行なうために用いている干渉回避や離散配置制約の有効性を示した．特に，自由度の動的制御手法においては，両手操作や共同操作による複数仮想物体の協調操作に対して，干渉回避と離散配置制約の最適な組合せ手法を評価実験を通して導出し，操作補助のない場合に比べて，作業時間を60%程度短縮できることを示した．以上のような手法により，仮想物体の操作性は大幅に改善することが可能である．本手法の多くは，一般の様々な人工現実感アプリケーションに適用可能であると考ええる．

また，本研究では，開発した操作補助手法を導入した人工現実感アプリケーションとして，協調型仮想物体モデラ VLEGO II を構築した．VLEGO II では，ネットワークを介した複数の操作者が1つの仮想空間を共有して協調モデリングを行なうことができる．VLEGO II に取り入れられている形状生成手法は，比較的単純な形状プリミティブを複数組み合わせ，接する面同士で接合することで徐々に複雑な形状を生成するという，ブロック玩具を模倣した手法である．VLEGO II では，形状プリミティブの生成，複製，消去，接合，分離，拡大縮小，彩色などが可能であり，習熟を要さない簡単な操作で，ある程度複雑な形状を比較的短時

間で生成することができる。大きさの異なる基本プリミティブを組み合わせていく方式である、現状の VLEGO II の形状生成能力は限られているが、2次元画面上で作業する従来の3次元モデラに比べて操作が簡単であり、単純な3次元形状の概観を短時間で把握したい場合に有用である。例えば、建築設計初期のデザイン検討の段階では、精細なモデリングを行なう以前に、建物の大まかな立体構造を頻繁に変更し、ボリューム感などを検討する必要がある。このような用途については、現状の VLEGO II でも有効に利用できると考えられる。

VLEGO II は幾つかの学会・展示会で学術展示を行なっており、その度に高い評価を得てきた。これは、VLEGO II の使いやすさ、分かりやすさを示し、本研究の妥当性を裏付けるものである。特に、1997年10月9日より12日までの4日間、名古屋国際会議場において開催された VR Expo '97 では、共有拡張空間を用いた VLEGO II を展示したが、多くの初心者が実際に VLEGO II を用いて簡単に形状生成が可能であることを実証した点で貴重である。図 5.1 に本展示会における VLEGO II の展示の様子を示す。本展示は、連日体験希望者の行列ができる盛況であり、配布したビラは延べ1000枚以上、また、VLEGO II の体験者は、(確認した限り) 最年少で6才、最年長で72才の老若男女、延べ100組、200名以上であった。体験者のほとんどは、人工現実感にある程度の興味はあるが専門知識や仮想空間操作の体験のない人々であったが、数分の操作説明を受けただけで、次の体験希望者への交替を当方が促すまで、没頭して形状生成を楽しんでいた。特に、小学校低学年から中高生までの年代では、習得が早く没頭の度合いの高いことに驚かされた。これらの事実は、適切なインタフェースを備えた人工現実感システムは、広く一般の人々に受け入れられ得ることを示している。



図 5.1 VR Expo '97 における VLEGO II 展示の様子

5.2 今後の展望

1) 操作補助手法の開発, 2) 簡易な操作性を備えた協調型仮想物体モデラの開発, という本研究の2つの目的に対して, 以上のように, 1) に対しては定量評価実験を通して有効性を確認し, 2) に対しては研究室外の多くの体験者から使いやすい形状モデラであるという評価を得ることで, 一定の成果を確認することができた. しかしながら, 操作補助手法や仮想物体モデラは, 本研究の手法や実装が唯一絶対ではなく, 様々な関連分野の研究と絡めて今後さらに発展可能である. 本節では, 本研究とその関連分野の今後の展望について述べる.

まず, 操作性をさらに向上するための手法について考察すると, 幾何的整合性の向上のためには, 電磁気式の3次元位置計測装置でおおまかに求めた頭部の位置・姿勢を, HMD などに取り付けた画像内の情報から補正する手法 [BN95, 佐藤 97] が考えられる. また, 時間的整合性の向上のためには, 見回し遅延の存在しない CAVE 型のディスプレイを利用することや, カルマンフィルタなどの他の予測フィルタを導入することが考えられる. また, 干渉判定に多くの計算時間がかかっていたため, 最近の関連研究を踏まえ [FPB94, SKTK95, 北村 94], 干渉判定処理を高速化することによっても時間的整合性が改善されると考えられる. さらに, 生

理的制約を向上するためには、力覚・触覚のフィードバック装置を利用することや、接触音などの聴覚フィードバックを付加することが考えられる。

次に、仮想物体の形状生成能力について考察すると、現状の VLEGO II の形状生成能力の問題点として、1) 多面体で構成される剛体しか生成できない、2) 静的な空間しか生成できない、という2点が挙げられる。まず、1) について、近年曲面を対話的に生成する手法への要求が強く、様々な手法が検討されて来ている [WW92, 阿川 95, 鳥谷 91, 吉田 96]。自由に変形できる曲面を生成可能とすることで、生体やゴムボール、クッションなどの、可塑性があり柔らかい起伏を持つ物体の表現が可能となる。現在筆者らは、陰関数表現を用いた仮想環境内曲面モデリング手法について研究中である [松宮 98]。また、形状生成能力を向上するために、様々な基本幾何形状を組み合わせて複雑な形状を生成する手法である、CSG の概念を導入することが考えられる [RS97, 鳥谷 91]。

一方、2) に対して、幾何形状間の位置関係に制約を付加し、設計に役立てようという試みがなされている [KE96, 清水 94]。そこで、VLEGO II の拡張として、仮想空間に没入したままで、扉や引き出しのように仮想物体の回転や並進に制限のある物体を対話的にモデリングできる手法を導入することが考えられる。これにより、可動な部分形状を持つ仮想物体に対して操作者が能動的に動きを与えたり、それら仮想物体の動き（アニメーション）を自動的に制御することで自律的な、動きのある仮想空間を生成できる。現在筆者らは、このような幾何制約の仮想物体への対話的付加が可能な手法について検討中である [HKTY97, 開 97]。本手法と VLEGO II を融合することにより仮想空間の表現力を高めることができると考えられる。

最後に、共有仮想空間を形成するネットワークの構成法について、現状のユニキャストによる対称型は、参加者が大人数の場合、あるいは通信遅延の無視できない遠隔地間で通信する場合には適した構成法ではない。今後は他のネットワーク構成手法 [竹村 98] を実装し、それらの比較検討、あるいは参加者数や遅延に応じた構成法の動的な切り替え手法などについて研究する余地がある。

本研究は、人工現実感やネットワークをはじめとする様々な技術分野が複合的に関わっており、本研究とその関連分野について検討すべき課題は多い。当該分

野の研究成果は、21世紀を担う計算機インタフェースの開発に直結している。筆者は今後の当該分野のさらなる発展に寄与できることを望むものである。

謝辞

本研究を行う機会を与えて頂き、研究の全過程を暖かく見守って下さり、直接懇切なる御指導、御鞭撻を賜ったソフトウェア基礎講座 横矢 直和 教授に衷心より感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、終始有益な御助言と励ましの言葉を頂いた像情報処理学講座 千原 國宏 教授に厚く御礼申し上げます。

本研究に関して有益な御助言を頂いた知能情報処理学講座 西田 豊明 教授に深謝します。

本研究の全過程を通して、様々な相談に応じて頂き、手取り足取り懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜ったソフトウェア基礎講座 竹村 治雄 助教授に心より厚く御礼申し上げます。

研究初期に、深く考えることの楽しさを教えて頂き、様々な御助言を頂いた大阪大学基礎工学部情報工学科 萩原 兼一 教授に感謝します。

本研究の全過程を通して、適宜的確な助言を下さった像情報処理学講座 佐藤 宏介 助教授に感謝します。

本研究を通じて、終始熱心に相談に応じて頂き、有益な御助言を頂いたソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦 助手に感謝します。また、研究の相談に応じて頂き、様々な助言を頂いた情報科学センター 片山 喜章 助手 およびソフトウェア基礎講座 山澤 一誠 助手に御礼申し上げます。

計算機言語学講座 関 浩之 教授は、私が大阪大学在学中、奈良先端科学技術大学院大学への進学を強く勧めて頂き、その後も様々な相談に乗って頂きました。ここに御礼申し上げます。

本研究に関して、機会ある毎に様々な助言、励ましの言葉を頂いた大阪大学大学院工学研究科 岸野 文郎 教授 および 北村 喜文 助教授、ならびに ATR (株) 知能映像通信研究所 研究員 野間 春生 博士に心より感謝します。

大隈 隆史 君は、学部時代からの親友であり、本学入学以来常に苦楽を共にし、良き相談相手となって頂きました。ここに、心より感謝の意を表します。

また、物心両面において常に温かい御支援を頂き、また本研究の評価実験においてもこころよく御協力を頂いたソフトウェア基礎講座の諸氏、ならびに、ソフト

ウェア基礎講座事務補佐員 福永 博美 女史および、元ソフトウェア基礎講座事務補佐員 村上 和代 女史に感謝します。

本研究は、ここに書き切れなかった多くの人々の御力添えなくしては決して遂行することができませんでした。私を直接、間接的に支援していただいた多くの方々に、心より御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

最後に、いつまでも就職しない頼りない息子を温かく見守って頂いた両親に深く深く感謝します。そして、仕事の合間を縫っていつも美味しいご飯を作ってくれた妻、薫子に感謝します。

参考文献

- [AB94] Azuma, R. and Bishop, G., "Improving Static and Dynamic Registration in an Optical See-through HMD," *Proc. ACM SIGGRAPH '94*, pp.197-204, 1994.
- [AJE92] Adelstein, B. D., Johnston, E. R., and Ellis, S. R., "A Testbed for Characterizing Dynamic Response of Virtual Environment Spatial Sensors," *Proc. ACM UIST '92*, pp.15-22, 1992.
- [Ake93] Akeley, K., "RealityEngine Graphics," *Proc. ACM SIGGRAPH '93*, pp.109-116, 1993.
- [AP94] Astheimer, P. and Pöche, M. L., "Level-of-Detail Generation and its Application in Virtual Reality," *Proc. VRST '94*, pp.299-309, 1994.
- [Azu97] Azuma, R., "A Survey of Augmented Reality," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, No.4, pp.355-385, 1997.
- [BAC97] Bergamasco, M., Alessi, A. A., and Calcara, M., "Thermal Feedback in Virtual Environments," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, No.6, pp.617-629, 1997.
- [BBF⁺95] Benford, S., Bowers, J., Fahlén, L. E., Greenhalgh, C., Mariani, J., and Rodden, T., "Networked Virtual Reality and Cooperative Work," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.4, No.4, pp.364-386, 1995.
- [BBRG96] Benford, S., Brown, C., Reynard, G., and Greenhalgh, C., "Shared Spaces: Transportation, Artificiality, and Spatiality," *Proc. ACM CSCW '96*, pp.77-86, 1996.
- [BC94] Burdea, G. and Coiffet, P., *Virtual Reality Technology*, John Wiley & Sons, 1994.

- [BD96] Barfield, W. and Danas, E., "Comments on the Use of Olfactory Displays for Virtual Environments," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.5, No.1, pp.109-121, 1996.
- [BDHO92] Butterworth, J., Davidson, A., Hench, S., and Olano, T. M., "3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-Mounted Display," *Proc. ACM Interactive 3D Graphics*, pp.135-139, 1992.
- [BFMZ94] Bishop, G., Fuchs, H., McMillan, L., and Zagier, E. J. S., "Frameless Rendering: Double Buffering Considered Harmful," *Proc. ACM SIGGRAPH '94*, pp.175-176, 1994.
- [BH92] Bolt, R. A. and Herranz, E., "Two-Handed Gesture In Multi-Modal Natural Dialog," *Proc. ACM UIST '92*, pp.7-14, 1992.
- [BH95] Bowman, D. A. and Hodges, L. F., "User Interface Constraints for Immersive Virtual Environment Applications," *Graphics, Visualization and Usability Center Technical Report GIT-GVU-95-26, Georgia Institute of Technology*, 1995.
- [BL91] Bryson, S. and Levit, C., "The Virtual Windtunnel: An Environment for Exploration of Three-Dimensional Unsteady Flows," *Proc. IEEE VISUALIZATION '91*, pp.17-24, 1991.
- [BM86] Buxton, W. and Myers, B. A., "A Study in Two-Handed Input," *Proc. CHI '86*, pp.321-326, 1986.
- [BN95] Bajura, M. and Neumann, U., "Dynamic Registration Correction in Video-Based Augmented Reality Systems," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.14, No.9, pp.52-60, 1995.
- [Bry92a] Bryson, S., "Measurement and Calibration of Static Distortion of Position Data from 3D Trackers," *NASA Ames Reserch Center, Tech Report RNR-92-011*, 1992.

- [Bry92b] Bryson, S., "Virtual Spacetime: An Environment for the Visualization of Curved Spacetimes via Geodestic Flows," *Proc. IEEE VISUALIZATION '92*, pp.291-298, 1992.
- [BSF+94] Bier, E. A., Stone, M. C., Fishkin, K., Buxton, W., and Baudel, T., "A Taxonomy of See-Through Tools," *Proc. ACM CHI '94*, pp.358-364, 1994.
- [BSP+93] Bier, E. A., Stone, M. C., Pier, K., Buxton, W., and DeRose, T. D., "Toolglass and Magic Lenses: The See-Through Interface," *Proc. ACM SIGGRAPH '93*, pp.73-80, 1993.
- [BV93] Bouma, W. J. and Vanecek, G. Jr., "Modeling contacts in a physically based simulation," *Proc. ACM Solid Modeling and Applications*, pp.409-418, 1993.
- [CDS93] Cruz-Neira, C., DeFanti, T., and Sandin, D., "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE," *Proc. ACM SIGGRAPH '93*, pp.135-142, 1993.
- [CH93] Carlsson, C. and Hagsand, O., "DIVE - a Multi-User Virtual Reality System," *Proc. IEEE VRAIS '93*, pp.394-400, 1993.
- [CH94] Cross, R. A. and Hanson, A. J., "Virtual Reality Performance for Virtual Geometry," *Proc. IEEE VISUALIZATION '94*, pp.156-163, 1994.
- [CMN83] Card, S. K., Moran, T. P., and Newell, A., *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [CRM91] Card, S. K., Robertson, G. G., and Mackinlay, J. D., "The Information Visualizer: An information workspace," *Proc. CHI '91*, pp.181-188, 1991.

- [Dai98] Dai, F., *Virtual Reality for Industrial Applications*, Springer, 1998.
- [DB97] DeFanti, T. A. and Brown, M. D., "Virtual Reality Over High-Speed Networks," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.16, No.7, pp.42-43, 1997.
- [Dee92] Deering, M. F., "High-resolution virtual reality," *Proc. ACM SIGGRAPH '92*, pp.195-202, 1992.
- [Dee96] Deering, M. F., "The HoloSketch VR Sketching System," *Communications of the ACM*, Vol.39, No.5, pp.54-61, 1996.
- [EM97] Ellis, S. R. and Menges, B. M., "Judgements of the Distance to Nearby Virtual Objects: Interaction of Viewing Conditions and Accomodative Demand," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, No.4, pp.452-460, 1997.
- [FBSC93] Fahlén, L. E., Brown, C. G., Ståhl, O., and Carlsson, C., "A Space Based Model for User Interaction in Shared Synthetic Environments," *Proc. ACM INTERCHI '93*, pp.43-48, 1993.
- [FMS93] Feiner, S., Macintyre, B, and Seligmann, D, "Knowledge-Based Augmented Reality," *Communications of the ACM*, Vol.36, No.7, pp.53-62, 1993.
- [FPB94] Fairchild, K. M., Poston, T., and Bricken, W., "Efficient Virtual Collision Detection for Multiple Users in Large Virtual Spaces," *Proc. VRST '94*, pp.271-285, 1994.
- [Fun96] Funkhouser, T. A., "Network Topologies for Scalable Multi-User Virtual Environments," *Proc. VRAIS '96*, pp.222-228, 1996.
- [FWK+95] Feiner, S. K., Webster, A. C., Krueger, III, T. E., Macintyre, B., and Keller, E. J., "Architectural Anatomy," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.4, No.3, pp.318-326, 1995.

- [GB95] Greenhalgh, C. and Benford, S., "MASSIVE: a Distributed Virtual Reality System Incorporating Spatial Trading," *Proc. IEEE DCS '95*, pp.27-34, 1995.
- [GM96] Graham, E. D. and MacKenzie, C. L., "Physical Versus Virtual Pointing," *Proc. ACM CHI '96*, pp.292-298, 1996.
- [Gre96] Green, M., "Introduction to Virtual Reality Concepts and Technology," *Tutorial Notes of the ACM VRST '96*, 1996.
- [GS94] Gisi, M. A. and Sacchi, C., "Co-CAD: A Collaborative Mechanical CAD System," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.3, No.4, pp.341-350, 1994.
- [HG94] Halliday, S. and Green, M., "A Geometric Modeling and Animation System for Virtual Reality," *Proc. VRST '94*, pp.71-84, 1994.
- [HKTY97] Hiraki, N, Kiyokawa, K., Takemura, H., and Yokoya, N., "Imposing Geometric Constraints on Virtual Objects within an Immersive Modeler," *Proc. ICAT '97*, pp.178-183, 1997.
- [Hol97] Holloway, R. L., "Registration Error Analysis for Augmented Reality," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, No.4, pp.413-432, 1997.
- [Hou92] Houde, S., "Interactive Design of an Interface for Easy 3-D Direct Manipulation," *Proc. ACM CHI '92*, pp.135-142, 1992.
- [HP97] Hodgins, J. K. and Pollard, N. S., "Adapting Simulated Behaviors For New Characters," *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, pp.153-162, 1997.
- [HPGK94a] Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C., and Kassell, N. F., "A Survey of Design Issues in Spatial Input," *Proc. ACM UIST '94*, pp.213-222, 1994.

- [HPGK94b] Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C., and Kassell, N. F., "Passive Real-World Interface Props for Neurosurgical Visualization," *Proc. CHI '94*, pp.452-458, 1994.
- [INS94] Ishii, M., Nakata, M., and Sato, M., "Networked SPIDAR: A Networked Virtual Environment with Visual, Auditory, and Haptic Interactions," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.3, No.4, pp.351-359, 1994.
- [JKM⁺96] Jalili, R., Kirchner, P. D., Montoya, J., Duncan, S., Genevriez, L., Lipscomb, J. S., Wolfe, R. H., and Codella, C. F., "A Visit to the Dresden Frauenkirche," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.1, No.5, pp.87-94, 1996.
- [KBS94] Kabbash, P., Buxton, W., and Sellen, A., "Two-Handed Input in a Compound Task," *Proc. ACM CHI '94*, pp.417-423, 1994.
- [KE96] Kurmann, D. and Engell, M., "Modelling Virtual Space in Architecture," *Proc. ACM VRST '96*, pp.77-82, 1996.
- [KH96] Kessler, G. D. and Hodges, L. F., "A Network Communication Protocol for Distributed Virtual Environment Systems," *Proc. IEEE VRAIS '96*, pp.214-221, 1996.
- [KMB93] Kabbash, P., MacKenzie, I. S., and Buxton, W., "Human Performance Using Computer Input Devices in the Preferred and Non-Preferred Hands," *Proc. ACM INTERCHI '93*, pp.474-481, 1993.
- [KOTT93] Kishino, F., Ohya, J., Takemura, H., and Terashima, N., "Virtual Space Teleconferencing System - Real Time Detection and Reproduction of 3-D Human images," *Proc. HCI International '93*, pp.669-674, 1993.
- [Kru91] Krueger, M. W., *Artificial Reality II*, Addison Wesley, 1991.

- [KTK⁺96a] Kiyokawa, K., Takemura, H., Katayama, Y., Iwasa, H., and Yokoya, N., "A Two-handed Immersive Modeler: VLEGO," *Proc. ICAE '96*, pp.1-4, 1996.
- [KTK⁺96b] Kiyokawa, K., Takemura, H., Katayama, Y., Iwasa, H., and Yokoya, N., "VLEGO: A Simple Two-handed Modeling Environment Based on Toy Blocks," *Proc. ACM VRST '96*, pp.27-34, 1996.
- [KTY96] Kiyokawa, K., Takemura, H., and Yokoya, N., "An Empirical Study on Two-Handed / Collaborative Virtual Assembly," *Proc. IDW '96, Vol.2*, pp.477-480, 1996.
- [KTY97] Kiyokawa, K., Takemura, H., and Yokoya, N., "Manipulation Aid for Two-Handed 3-D Designing Within a Shared Virtual Environment," *Proc. HCI International '97*, 21B, pp.937-940, 1997.
- [KYK96] Kitamura, Y., Yee, A., and Kishino, F., "Virtual Object Manipulation Using Dynamically Selected Constraints with Real-Time Collision Detection," *Proc. ACM VRST '96*, pp.173-181, 1996.
- [LJVD96] Leigh, J., Johnson, A. E., Vasilakis, C. A., and DeFanti, T. A., "Multi-Perspective Collaborative Design in Persistent Networked Virtual Environments," *Proc. IEEE VRAIS '96*, pp.253-260, 1996.
- [LS97] Livingston, M. A. and State, A., "Magnetic Tracker Calibration for Improved Augmented Reality," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, No.5, pp.532-546, 1997.
- [LSG91] Liang, J., Shaw, C., and Green, M., "On Temporal-Spatial Realism in the Virtual Reality Environment," *Proc. ACM UIST '91*, pp.19-25, 1991.
- [Mac95] Macedonia, M. R., *A Network Software Architecture for Large Scale Virtual Environments*, Dissertation, Naval Postgraduate School,

1995.

- [Min96] Mine, M. R., "Working in a Virtual World: Interaction Techniques Used in the Chapel Hill Immersive Modeling Program," *UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report TR96-029*, 1996.
- [MM95] Mapes, D. P. and Moshell, J. M., "A Two-Handed Interface for Object Manipulation in Virtual Environments," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.4, No.4, pp.403-416, 1995.
- [Mul97] MultiGen, "SmartScene,"
<http://www.multigen.com/prodist/mgproducts/sscene/page1.htm>,
1997.
- [MW93] MacKenzie, I. S. and Ware, C., "Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Systems," *Proc. ACM INTERCHI '93*, pp.488-493, 1993.
- [MW96] Mine, M. R. and Weber, H., "Large Models for Virtual Environments: A Review of Work by the Architectural Walkthrough Project at UNC," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.1, No.5, pp.136-145, 1996.
- [NHM97] Nielson, G. M., Hagen, H., and Müller, H., *Scientific Visualization, Overviews · Methodologies · Techniques*, IEEE Computer Society, 1997.
- [Nom94] Nomura, J., "Virtual Reality Technologies and its Applications to Industrial Use," *Proc. VRST '94*, pp.125-142, 1994.
- [OT96] Oishi, T. and Tachi, S., "Methods to Calibrate Projection Transformation Parameters for See-Through Head-Mounted Displays," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.5, No.1, pp.122-135, 1996.

- [RCM93] Robertson, G. G., Card, S. K., and Mackinlay, J. D., "Information Visualization Using 3D Interactive Animation," *Communications of the ACM*, Vol.36, No.4, pp.57-71, 1993.
- [Rhe90] Rheingold, H., *Virtual Reality*, Summit Books, 1990.
- [Ros95] Rosenblum, L. J., "Alice: Rapid Prototyping for Virtual Reality," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.14, No.5, pp.8-11, 1995.
- [RS97] Rappoport, A. and Spitz, S., "Interactive Boolean Operations for Conceptual Design of 3-D Solids," *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, pp.269-278, 1997.
- [SC92] Strauss, P. S. and Carey, R., "An Object-Oriented 3D Graphics Toolkit," *Proc. ACM SIGGRAPH '92*, pp.341-349, 1992.
- [SF92] Shu, L. and Flowers, W., "Groupware Experience in Three-Dimensional Computer-Aided Design," *Proc. ACM CSCW '92*, pp.179-186, 1992.
- [SG94] Shaw, C. and Green, M., "Two-Handed Polygonal Surface Design," *Proc. ACM UIST '94*, pp.205-212, 1994.
- [SHC+96] State, A., Hirota, G., Chen, D. T., Garrett, W. F., and Livingston, M. A., "Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking," *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, pp.429-438, 1996.
- [SKTK95] Smith, A., Kitamura, Y., Takemura, H., and Kishino, F., "A Simple and Efficient Method for Accurate Collision Detection Among Deformable Polyhedral Objects in Arbitrary Motion," *Proc. IEEE VRAIS '95*, pp.135-145, 1995.

- [SLG⁺96] State, A., Livingston, M. A., Garrett, W. F., Hirota, G., Whitton, M. C., Pisano, E. D., and Fuchs, H., "Technologies for Augmented Reality Systems: Realizing Ultrasound-Guided Needle Biopsies," *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, pp.439-446, 1996.
- [SO95] Smets, G. J. F. and Overbeeke, K. J., "Trade-Off Between Resolution and Interactivity in Spatial Task Performance," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.15, No.5, pp.46-51, 1995.
- [SRS91] Sachs, E., Roberts, A., and Stoops, D., "3-Draw: A Tool for Designing 3D Shapes," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.11, No.6, pp.18-26, 1991.
- [SSOM94] Smets, G. J. F., Stappers, P. J., Overbeeke, K., and Mast, C. V. D., "Designing in Virtual Reality: Implementing Perceptual-Action Coupling with Affordances," *Proc. VRST '94*, pp.97-110, 1994.
- [SSPN94] Singh, G., Serra, L., Png, W., and Ng, H., "BrickNet: A Software Toolkit for Network-Based Virtual Worlds," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.3, No.1, pp.19-34, 1994.
- [Sta96] Stanford Research Institute, "MAGIC home page," <http://www.ai.sri.com/magic/>, 1996.
- [Ste98] StereoGraphics, "StereoGraphics Home Page," <http://www.stereographics.com/>, 1998.
- [Sty96] Stytz, M. R., "Distributed Virtual Environments," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.16, No.5, pp.19-31, 1996.
- [Sun96] Sun Microsystems, "Ahead of the Pack: Ivan Sutherland," <http://www.sun.com/960710/feature3/alice.html>, 1996.
- [Sut65] Sutherland, I. E., "The Ultimate Display," *Proc. IFIP Congress '65*, Vol.2, pp.508, 1965.

- [Sut68] Sutherland, I. E., "A Head-Mounted Three Dimensional Display," *Proc. Fall Joint Computer Conference, Vol.33*, pp.757-764, 1968.
- [SZ94] Sturman, D. J. and Zeltzer, D., "A Survey of Glove-based Input," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.14, No.1, pp.30-39, 1994.
- [SZP89] Sturman, D. J., Zeltzer, D., and Pieper, S., "Hands-on Interaction With Virtual Environment," *Proc. ACM UIST '89*, pp.19-24, 1989.
- [TK92] Takemura, H. and Kishino, F., "Cooperative Work Environment Using Virtual Workspace," *Proc. ACM CSCW '92*, pp.226-232, 1992.
- [TPB⁺89] Terzopoulos, D., Platt, J., Barr, A., Zeltzer, D., Witkin, A., and Blinn, J., "Physically-Based Modeling: Past, Present and Future," *Proc. ACM SIGGRAPH '89*, pp.191-209, 1989.
- [TT94] Tu, X. and Terzopoulos, D., "Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior," *Proc. ACM SIGGRAPH '94*, pp.43-50, 1994.
- [VCWP96] Viega, J., Conway, M. J., Williams, G., and Pausch, R., "3D Magic Lenses," *Proc. ACM UIST '96*, pp.51-58, 1996.
- [Ven93] Venolia, D., "Facile 3D Direct Manipulation," *Proc. ACM INTERCHI '93*, pp.31-36, 1993.
- [WAB93] Ware, C., Arthur, K., and Booth, K. S., "Fish Tank Virtual Reality," *Proc. ACM INTERCHI '93*, pp.37-42, 1993.
- [WBC⁺95] Wilson, J. R., Brown, D. J., Cobb, S. V., D'Cruz, M. M., and Eastgate, R. M., "Manufacturing Operations in Virtual Environments (MOVE)," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.4, No.3, pp.306-317, 1995.

- [Wex93] Wexelblat, A., *Virtual Reality Applications and Explorations*, Academic Press Professional, 1993.
- [WO95] Wu, J. R. and Ouhyoung, M., "A 3D Tracking Experiment on Latency and Its Compensation Methods in Virtual Environments," *Proc. ACM UIST '95*, pp.41-49, 1995.
- [WW92] Welch, W. and Witkin, A., "Variational Surface Modeling," *Proc. ACM SIGGRAPH '92*, pp.157-166, 1992.
- [ZBD⁺97] Zyda, M., Brutzman, D., Darken, R., McGhee, R., Falby, J., Bachmann, E., Watsen, K., Kavanagh, B., and Storms, R., "NPSNET - Large-Scale Virtual Environment Technology Testbed," *Proc. ICAT '97*, pp.18-26, 1997.
- [ZBM94] Zhai, S., Buxton, W., and Milgram, P., "The "Silk Cursor": Investigating Transparency for 3D Target Acquisition," *Proc. ACM CHI '94*, pp.459-464, 1994.
- [Zel91] Zeltzer, D., "Autonomy, Interaction and Presence," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.1, No.1, pp.127-132, 1991.
- [ZP96] Zeltzer, D. and Pioch, N. J., "Validation and Verification of Virtual Environment Training Systems," *Proc. IEEE VRAIS '96*, pp.123-130, 1996.
- [ZPF⁺93] Zyda, M., Pratt, D., Falby, J., Barham, P., and Kelleher, K., "NPSNET and the Naval Postgraduate School Graphics and Video Laboratory," *PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.2, No.3, pp.244-258, 1993.
- [阿川 95] 阿川典夫, 大野義夫, "点列の曲面当てはめによる形状モデリング手法", 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.49, No.10,

pp.1240-1245, 1995.

- [浅田 96] 浅田尚紀, “CVCV-WG 特別報告: コンピュータビジョンにおける技術評論と展望 (XI) - カメラモデルとキャリブレーション手法 -”, 情報処理学会 研究報告, CV102-9, 1996.
- [有本 77] 有本卓, カルマン・フィルター, 産業図書, 1977.
- [石樽 96] 石樽康雄, 大塚作一, 金次保明, 吉田辰夫, 白井支朗, “ステレオ表示における奥行き知覚ひずみとその防止方法”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.50, No.9, pp.1256-1267, 1996.
- [石淵 96] 石淵耕一, 岩崎佳介, 竹村治雄, 岸野文郎, “画像処理を用いた実時間手振り推定とヒューマンインタフェースへの応用”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J79-D-II, 7, pp.1218-1229, 1996.
- [乾 95] 乾敏郎, 認知心理学 1 知覚と運動, 東京大学出版会, 1995.
- [岩田 92] 岩田洋夫, “非装着型力覚帰還環境”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.23-26, 1992.
- [岩田 95] 岩田洋夫, 早川敬介, “仮想物体の把持操作を行うグローブ型フォースディスプレイの開発”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.395-400, 1995.
- [魚森 96] 魚森謙也, “注視および自由視条件における両眼融合領域と立体画像パラメータの検討”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.50, No.9, pp.1283-1291, 1996.
- [大石 94] 大石峰士, 舘暉, “シースルー型 HMD における視覚パラメータの較正法”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.911-918, 1994.
- [大隈 97] 大隈隆史, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和, “ビデオシースルー型拡張現実のための実画像からのカメラパラメータの実時間推定”, 電子情報通信学会 技術報告, PRMU97-113, 1997.

- [大山 84] 大山正, 東洋, 認知心理学講座, 1 認知と心理学, 東京大学出版会, 1984.
- [奥富 96] 奥富正敏, “CVCV-WG 特別報告: コンピュータビジョンにおける技術評論と展望 (X) –ステレオ視 (Stereo Vision) –”, 情報処理学会研究報告, CV102-9, 1996.
- [掛井 93] 掛井秀一, “建築プレゼンテーション・デザインにおける VR の適用”, *PIXEL*, No.132, pp.60-62, 9, 1993.
- [金川 97] 金川将成, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和, “ジェスチャを用いた計算機との対話における 遅延による影響の検討”, 1997 情報処理学会 秋季全国大会, 3W-05, 1997.
- [金川 98] 金川将成, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和, “手の位置計測遅延が仮想物体の操作性に与える影響の検討”, 電子情報通信学会技術報告, IE97-159, 1998.
- [河内 94] 河内隆幸, “プロが使う本格派 7 大 3 次元 CG ソフト”, *PIXEL*, No.146, pp.77-101, 11, 1994.
- [木島 95a] 木島竜吾, 廣瀬通孝, “Virtual Physics: 仮想空間の物体挙動計算”, 電子情報通信学会 技術報告, MVE95-24, 1995.
- [木島 95b] 木島竜吾, 廣瀬通孝, “仮想環境におけるポインティング動作と時間遅れの影響”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.467-476, 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.
- [北村 94] 北村喜文, 竹村治雄, ナレンドラ・アフジャ, 岸野文郎, “octree と多面体表現を用いた三次元物体間の衝突検出”, 電子情報通信学会 技術報告, IE94-16, 1994.

- [北村 96] 北村喜文, イーエイミー, 岸野文郎, “面間の動的拘束を用いた仮想物体の操作補助法”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J79-A, 2, pp.506-517, 1996.
- [北村 97] 北村喜文, 野間春生, 宮里勉, 岸野文郎, “視覚と力覚のフィードバックを利用した仮想物体操作補助”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, 1, pp.256-266, 1997.
- [清川 95a] 清川清, 竹村治雄, 片山喜章, 横矢直和, “仮想現実環境を構築する簡易モデラについて”, 1995 電子情報通信学会春季総合大会, A-273, 1995.
- [清川 95b] 清川清, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和, “仮想物体の組み立て作業を支援する操作手法”, 情報処理学会 研究報告, HI63-4, 1995.
- [清川 95c] 清川清, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和, “両手を用いた仮想環境内モデリング手法の開発”, 1995 情報処理学会秋季全国大会, 3S-3, 1995.
- [清川 95d] 清川清, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和, “両手を用いた仮想環境没入型モデラ: VLEGO”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.375-380, 1995.
- [清川 96] 清川清, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和, “没入型モデラ VLEGO への形状及び色変更機能の追加”, 1996 電子情報通信学会春季総合大会, A-417, 1996.
- [清川 97a] 清川清, 竹村治雄, 岩佐英彦, 横矢直和, “共有拡張空間を利用した共同作業に関する一考察”, 1997 情報処理学会秋季全国大会, 1Y-07, 1997.
- [清川 97b] 清川清, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和, “協調型仮想物体モデラ VLEGO II の共有 AR 空間への適用”, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会論文集, pp.73-74, 1997.

- [清川 97c] 清川清, 竹村治雄, 岩佐英彦, 横矢直和, “複数仮想物体の協調接合操作における一操作補助手法”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.51, No.7, pp.1079-1085, 1997.
- [佐藤 90] 佐藤隆宣, 伴野明, 岸野文郎, “運動視表示の遅延による仮想空間操作への影響”, 電子情報通信学会 技術報告, IE90-57, 1990.
- [佐藤 91] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘, “空間インタフェース装置 spidar の提案”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J74-D-II, 7, pp.887-894, 1991.
- [佐藤 97] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行, “複合現実感における現実空間と仮想空間の融合に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第2会大会論文集, pp.161-164, 1997.
- [柴崎 92] 柴崎, 猪田, “CAD の 3 次元直接操作手法の検討”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.1-6, 1992.
- [島田 96] 島田伸敬, 白井良明, 久野義徳, “確率に基づく探索と照合を用いた画像からの手指の 3 次元 姿勢推定”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J79-D-II, 7, pp.1210-1217, 1996.
- [清水 94] 清水周一, 沼尾雅之, “幾何制約に基づく 3 次元形状の設計”, 人工知能学会誌, Vol.9, No.1, pp.129-138, 1994.
- [志和 96] 志和新一, 大村克之, 岸野文郎, “視線検出により焦点調節を補償する立体表示装置”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.50, No.9, pp.1292-1299, 1996.
- [世利 98] 世利至彦, 大隈隆史, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和, “汎用 3 次元ユーザインタフェースツールキットの実装”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU97-157, 1998.
- [高橋 96] 高橋武秀, 野村淳二, バーチャルハウジング, 日科技連出版社, 1996.

- [竹村 91] 竹村治雄, 伴野明, “時分割両眼立体視を用いた 3 次元指示入力操作の評価”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J74-D-I, 1, pp.33-38, 1991.
- [竹村 94] 竹村治雄, 北村喜文, シャネゾンアラン, 岸野文郎, “仮想現実環境における物体配置タスクの一操作補助手法”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.48, No.10, pp.1312-1317, 1994.
- [竹村 98] 竹村治雄, 清川清, 大隈隆史, “仮想環境の共有技術 (ネットワーク)”, 日本バーチャルリアリティ学会 講習会資料, 1998.
- [出口 93] 出口光一郎, “カメラキャリブレーションの最近の動向”, 情報処理学会 研究報告, CV82-1, 1993.
- [鳥谷 91] 鳥谷浩志, 千代倉弘明, 3次元 CAD の基礎と応用, 共立出版, 1991.
- [中沢 97] 中沢裕二, 中野誠巳, 小松隆, 斎藤隆弘, “画像中の特徴点に基づく実写画像と CG 画像との動画像合成システム”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.51, No.7, pp.1086-1095, 1997.
- [日商エ 96] 日商エレクトロニクス, “Nissho Electronics Virtual Reality Products,” <http://www.tradepia.or.jp/nevc/advanced/vr/vr5.htm>, 1996.
- [野間 96] 野間春生, 北村喜文, 宮里勉, 岸野文郎, “仮想物体操作における力覚と視覚のフィードバックの利用”, 電子情報通信学会技術報告, MVE95-56, 1996.
- [野間 97] 野間春生, 宮里勉, “協調仮想物体操作のための仮想拘束感覚の提示手法”, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 会大会論文集, pp.284-287, 1997.
- [野村 97] 野村淳二, 澤田一哉, バーチャルリアリティ, 朝倉書店, 1997.
- [野呂 92] 野呂影勇, 宮本博幸, 井上哲理, ブルーバックス・バーチャルリアリティ最前線, 講談社, 1992.

- [野呂 96] 野呂影勇, 現代のエスプリ バーチャルリアリティ, 至文堂, 1996.
- [服部 91] 服部桂, 人工現実感の世界, 工業調査会, 1991.
- [原島 94] 原島博, 廣瀬通孝, 下條信輔, 仮想現実学への序曲: バーチャル・リアリティ・ドリーム, 共立出版, 1994.
- [開 97] 開哲一, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和, “仮想環境没入型モデラにおける幾何的制約の付加手法の検討”, 1997 情報処理学会 秋季全国大会, 1AA-2, 1997.
- [平田 93] 平田幸広, 水口武尚, 佐藤誠, 河原田弘, “組立操作のための仮想作業空間”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J76-D-II, 8, pp.1788-1795, 1993.
- [廣瀬 90] 廣瀬通孝, 木島竜吾, 佐藤洋一, 石井威望, “シースルー型 HMD を用いた仮想空間による実空間の修飾の研究”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.1-8, 1990.
- [廣瀬 93] 廣瀬通孝, バーチャル・リアリティ, 産業図書, 1993.
- [廣瀬 95] 廣瀬通孝, 大塚隆治, 多須川治, 福永茂行, “前底感覚ディスプレイの基礎的研究”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.511-514, 1995.
- [廣瀬 97a] 廣瀬通孝, 岩田洋夫, 池井寧, 小木哲朗, 広田光一, 矢野博明, 筧直之, “デバイスに依存しない触覚用共通ソフトウェア (HIP) の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 会大会論文集, pp.202-205, 1997.
- [廣瀬 97b] 廣瀬通孝, 谷川智洋, 石田健亮, “嗅覚ディスプレイに関する研究”, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 会大会論文集, pp.155-158, 1997.
- [舟橋 97] 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”, 第 39 回パターン計測部会研究会, pp.17-24, 1997.

- [星野 97] 星野俊仁, 大関徹, 吉田俊介, 宮崎慎也, 長谷川純一, 福村晃夫, “仮想空間における視覚の知覚誤差を軽減する手法”, 日本バーチャルリアリティ学会第2会大会論文集, pp.304-307, 1997.
- [松宮 98] 松宮雅俊, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和, “陰関数表現を用いた仮想空間内曲面モデリングシステム”, 1998 電子情報通信学会 春季総合大会, A-16-16, 1998.
- [宮里 96] 宮里勉, 岸野文郎, 寺島信義, “臨場感通信会議における参加者の対面状況の保持特性の評価”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J76-A, 2, pp.518-526, 1996.
- [宮里 97] 宮里勉, 岸野文郎, “臨場感通信会議における仮想空間を介した指示動作知覚の評価”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J76-D-II, 5, pp.1221-1230, 1997.
- [元木 96] 元木紀雄, “3次元画像情報技術の動向”, 映像情報メディア学会誌(旧テレビジョン学会誌), Vol.50, No.9, pp.1246-1255, 1996.
- [森田 96] 森田寿哉, 比留間伸行, 三橋哲雄, 元木紀雄, “両眼融合式立体画像における大きさの知覚と輻輳運動”, 映像情報メディア学会誌(旧テレビジョン学会誌), Vol.50, No.9, pp.1300-1310, 1996.
- [柳田 97] 柳田康幸, 稲見昌彦, 館暉, “適切なオプティカルフローを実現する視覚提示法の研究(第1報) - HMD装着時の頭部回転運動に伴う遅延の補償手法 -”, 日本バーチャルリアリティ学会第2会大会論文集, pp.147-150, 1997.
- [矢野 93] 矢野澄男, 三橋哲雄, “両眼融合視での奥行運動知覚と時間周波数特性”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J76-A, 6, pp.887-897, 1993.
- [山澤 98] 山澤一誠, 尾上良雄, 横矢直和, 竹村治雄, “全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス”, 電子情報通信学会 論文誌, Vol.J81-D-II, 5, pp.880-887, 1998.

- [吉田 96] 吉田美寸夫, ジュリ A. ティヘリノ, 宮里勉, 岸野文郎, “手振りと言語による仮想物体形状生成インタフェース”, 映像情報メディア学会誌 (旧テレビジョン学会誌), Vol.50, No.10, pp.1482-1488, 1996.
- [吉村 91] 吉村哲也, 中村康浩, “作業空間中に不透過性と重力を持つ配置支援システム”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.99-104, 1991.
- [米川 94] 米川和利, 中山敦司, 小堀研一, 久津輪敏郎, “空間分割モデルを用いた形状モデラ”, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.177-182, 1994.

研究業績

学術論文誌

1. 清川 清, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “複数仮想物体の協調接合操作における一操作補助手法”, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.7, pp.1079-1085, 1997. (本論文 2章, 3章に関連)
2. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “両手操作を用いた仮想物体モデラ VLEGO”, 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J80-A, No.9, pp.1517-1526, 1997. (本論文 2章, 3章, 4章に関連)

国際会議

1. Kiyoshi Kiyokawa, Haruo Takemura, Yoshiaki Katayama, Hidehiko Iwasa and Naokazu Yokoya, “A Two-Handed Immersive Modeler: VLEGO,” *Proceedings of the 1st International Conference on Applied Ergonomics (ICAE '96)*, pp.1-4, Istanbul, 1996. (本論文 2章, 3章, 4章に関連)
2. Kiyoshi Kiyokawa, Haruo Takemura, Yoshiaki Katayama, Hidehiko Iwasa and Naokazu Yokoya, “VLEGO: A Simple Two-handed Modeling Environment Based on Toy Blocks,” *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology 1996 (VRST '96)*, pp.27-34, Hong Kong, 1996. (本論文 2章, 3章, 4章に関連)
3. Kiyoshi Kiyokawa, Haruo Takemura and Naokazu Yokoya, “An Empirical Study on Two-Handed/Collaborative Virtual Assembly,” *Proceedings of the third International Display Workshop (IDW '96)*, 3D1-8, pp.477-480, Kobe, 1996. (本論文 2章, 3章に関連)
4. Kiyoshi Kiyokawa, Haruo Takemura and Naokazu Yokoya, “Manipulation Aid for Two-Handed 3-D Designing Within a Shared Virtual Environment,” *Proceedings of the 7th International Conference on Human-Computer Interaction jointly with 13th Symposium on Human Interface (Japan) (HCI*

International '97), 21B, pp.937-940, San Francisco, 1997. (本論文 2章, 3章に関連)

5. Norikazu Hiraki, Kiyoshi Kiyokawa, Haruo Takemura and Naokazu Yokoya, "Imposing Geometric Constraints on Virtual Objects within an Immersive Modeler," *Proceedings of the seventh International Conference on Artificial Reality and Tele-existence '97 (ICAT'97)*, pp.178-183, Tokyo, 1997.
6. Takashi Okuma, Kiyoshi Kiyokawa, Haruo Takemura and Naokazu Yokoya, "An Augmented Reality System Using a Real-Time Vision Based Registration," *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition '98 (ICPR '98)*, Brisbane, 1998 (発表予定).

研究会・シンポジウム

1. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, "両手を用いた仮想環境没入型モデラ: VLEGO", 第 11 回計測自動制御学会ヒューマンインタフェースシンポジウム (HIS '95), 1518, 1995. (本論文 2章, 4章に関連)
2. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, "仮想物体の組み立て作業を支援する操作手法", 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会研究報告, HI63-4, 1995. (本論文 2章, 3章に関連)
3. 竹村 治雄, 清川 清, 横矢 直和, "共有仮想空間における仮想物体操作補助手法の提案と評価", テレビジョン学会ヒューマンインフォメーション研究会技術報告, HIR96-29, 1996.
4. 清川 清, 世利 至彦, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和, "仮想物体組み立て操作における表示装置による影響の検討", テレビジョン学会ヒューマンインフォメーション研究会技術報告, HIR96-87, 1996.
5. 竹村 治雄, 清川 清, 岩佐 英彦, 横矢 直和, "仮想環境没入型モデラ VLEGO を拡張したデザイン環境の試作", 電子情報通信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会技術報告, MVE96-66, 1997. (本論文 4章に関連)

6. 大隈 隆史, 清川 清, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “ビデオシースルー型拡張現実のための実画像からのカメラパラメータの実時間推定”, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会, PRMU97-113, 1997.
7. 金川 将成, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “手の位置計測遅延が仮想物体の操作性に与える影響の検討”, 電子情報通信学会画像工学研究会技術報告, IE97-159, 1998.
8. 世利 至彦, 大隈 隆史, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “汎用3次元ユーザインタフェースツールキットの実装”, 電子情報通信学会画像工学研究会技術報告, IE97-157, 1998.

全国大会

1. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 横矢 直和, “仮想現実環境を構築する簡易モデラについて”, 電子情報通信学会春季全国大会, A-273, 1995. (本論文4章に関連)
2. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “両手を用いた仮想環境内モデリング手法の開発”, 情報処理学会秋季全国大会, 3S-3, 1995. (本論文2章, 3章, 4章に関連)
3. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “没入型モデラ VLEGO への形状及び色変更機能の追加”, 電子情報通信学会春季全国大会, A-417, 1996. (本論文4章に関連)
4. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “両手を用いた協調型仮想環境没入型モデラ VLEGO II”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 '96, 21 昼 12, 1996. (本論文4章に関連)
5. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “共有仮想空間を用いた協調型仮想物体モデラ - VLEGO II”, 情報処理学会秋季全国大会, 4H-01, 1996. (本論文2章, 3章, 4章に関連)

6. 世利 至彦, 清川 清, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “HMD による仮想物体モデラ VLEGO の作業空間の拡大”, 日本バーチャルリアリティ学会第 1 回大会, pp.45-46, 1996.
7. 清川 清, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “仮想物体の協調操作に適した操作補助手法”, システム制御情報学会第 39 回自動制御連合講演会, 3036, 1996. (本論文 2章, 3章 に関連)
8. 世利 至彦, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “汎用 3 次元ユーザインタフェースツールキットの設計”, 電子情報通信学会春季全国大会, A-16-16, 1997.
9. 清川 清, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “協調型仮想物体モデラ VLEGO II の共有 AR 空間への適用”, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会, pp.73-74, 1997.
10. 清川 清, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和, “共有拡張空間を利用した共同作業に関する一考察”, 情報処理学会 秋季全国大会, 1Y-07, 1997.
11. 開 哲一, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “仮想環境没入型モデラにおける幾何的制約の付加手法の検討”, 情報処理学会 秋季全国大会, 1AA-2, 1997.
12. 金川 将成, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “ジェスチャを用いた計算機との対話における遅延による影響の検討”, 情報処理学会 秋季全国大会, 3W-05, 1997.
13. 松宮 雅俊, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “陰関数表現を用いた仮想空間内曲面モデリングシステム”, 電子情報通信学会総合大会, A-16-35, 1998.

解説記事

1. 竹村 治雄, 清川 清, 大隈 隆史, “仮想環境の共有技術 (ネットワーク)”, 日本バーチャルリアリティ学会講習会資料, 1/20, 1998.

学術展示

1. “協調型仮想環境モデラ VLEGO II”, VR Expo '97 デモ展示, 1997.

新聞記事

1. “仮想現実感使う3次元設計装置”, 日経産業新聞 一面記事, 5/15, 1996.
2. “最新マルチメディア事情 バーチャルリアリティ”, 中國新聞 経済欄記事, 10/20, 1997.

表彰

1. 1995年 計測自動制御学会, 第11回ヒューマンインタフェースシンポジウム (HIS '95) 最優秀プレゼンテーション賞受賞
2. 1997年 情報処理学会, 第53回大会奨励賞受賞
3. 1997年 電子情報通信学会, 平成8年度学術奨励賞受賞
4. 1998年 電気通信普及財団, 第13回電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術学生賞) 入賞

付録

A. 対応機器

VLEGO II は、様々な機器に対応している。以下では計算機、入力装置、表示装置のそれぞれについて、VLEGO II が対応している機器について述べる。

A.1 計算機

VLEGO II は、SGI 社製グラフィクス WS 上で動作する。OS としては IRIX 5.3, 6.2, 6.4, 機種としては Indy, Indigo² Extreme, Indigo² Maximum Impact, OCTANE MXI, Onyx RE2 上での動作を確認している。

A.2 入力装置

VLEGO II では、表 A.1 に示す 3 次元位置計測装置が利用できる。また、仮想物体操作のための 3 次元入力デバイスとして、1) スイッチ式自作 3 次元入力デバイス、2) 手形状入力装置 日商エレクトロニクス SuperGlove (図 A.2) が利用できる。スイッチ式デバイスには 2 種類あり、それぞれ両手用 2 つ 1 組から成る。1 種類目は押しボタンスイッチ 4 個と 3SPACE のレシーバ 1 つを組み合わせ、スイッチ値の転送をシリアル経由で行なうものであり (図 A.1)、2 種類目は押しボタンスイッチ 4 個と 3SPACE のレシーバ 1 つを組み合わせ、スイッチ値の転送をネットワーク経由で行なうものである。利用者はこれらのスイッチを組み合わせ、仮想物体の選択や複製、消去などを行なう。

表 A.1 VLEGO II で利用できる 3 次元位置計測装置

機械リンク式	分解能	精度	更新間隔	遅延
ADL-1 (Shooting Star)	約 0.63mm	5mm	3ms ~	2ms 以下
電磁気式				
3SPACE Fastrak (Polhemus)	0.005mm, 0.025 度	0.8mm, 0.15 度	8.3ms ~ 33ms	4ms
3SPACE Isotrak II (Polhemus)	0.038mm, 0.1 度	2.4mm, 0.75 度	16.7ms ~ 33ms	20ms



図 A.1 自作 3次元入力デバイス

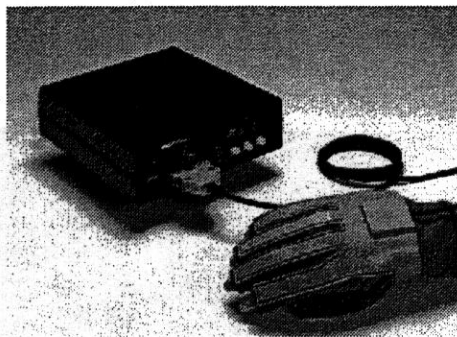


図 A.2 SuperGlove ([日商エ 96]

より引用)

一方、SuperGlove は両手用 1 組が利用でき、各スイッチの機能に対応する 5 指の曲がり具合 (ポスチャ) を定義して各機能を実行できる。標準では、手を握る、手を開く、というポスチャにより、把持と解放が行なえるが、他のスイッチに該当する機能は割り当てられていない。利用者は、様々な機能を簡易かつ確実に実行できるスイッチ式デバイスと、直感的な操作が可能な手形状入力装置を、好みに応じて使い分けることができる。

A.3 表示装置

VLEGO II では、機器の大きさ (画角)、接続ポート、液晶シャッタ使用の有無、ステレオ視の方式 (フィールドシーケンシャルステレオ式か 2 画面独立提示式か) などのパラメータが設定可能であり、多種多様な表示装置に対応している。その一部として本研究室で利用できる表示装置を表 A.2 に示す。HMD 式の表示装置である SeeThrough Vision と Mediamask の外観を図 A.3 と図 A.4 にそれぞれ示す。なお、据え置き型ディスプレイの場合、時分割液晶シャッタ眼鏡 StereoGraphics 社 CrystalEYES (図 A.5) と併用して立体表示を行う。

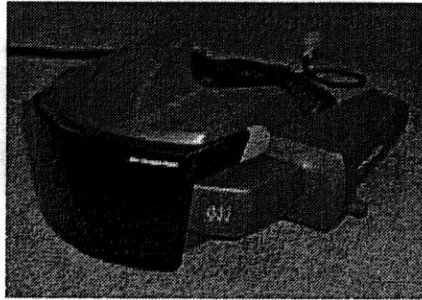


図 A.3 SeeThrough Vision

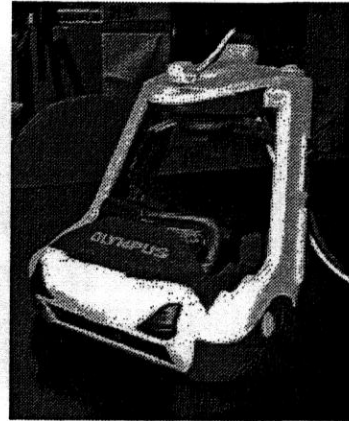


図 A.4 Mediamask

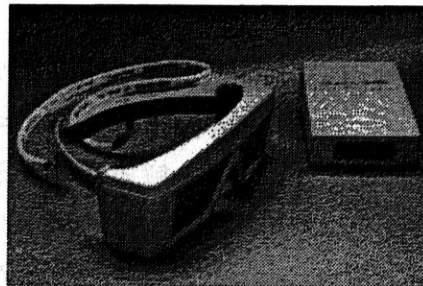


図 A.5 CrystalEYES ([Ste98] より引用)

表 A.2 本研究室で利用できる表示装置

据え置き型ディスプレイ	解像度	画像サイズ
SGI グラフィクスワークステーション標準 CRT (SGI)	1280 x 480	21 インチ
背面プロジェクタ Desktop Data RVP-4010QJ (SONY)	1280 x 480	40 インチ
背面プロジェクタ SuperData EX VPM-1271QJ (SONY)	1280 x 480	100 インチ
HMD	解像度	水平画角
i-glasses!(virtual i.o)	18 万画素 ¹	26 度
See-Through Vision STV-E (鳥津製作所)	87 万画素 (350 本)	48 度
Mediamask MW601 (Olympus)	51 万画素 ¹	60 度

¹RGB の合計

B. 投影パラメータの調整例

3次元位置計測で得られた値を正しく利用するためには，世界座標系から3次元位置入力装置の局所座標系への変換マトリクス，計測される点から実際に計測したい点への変換マトリクスなどを指定できる必要がある．VLEGO IIでは，表示装置に正しく提示するために，機器構成や利用者個々の違いに対応して以下の投影パラメータの調整が可能である．

1. 利用者個々に異なるパラメータとして，頭部の実際に計測される点から視点への対応づけを行なう変換マトリクスや，両眼間隔が指定できる．
2. 据え置き型ディスプレイに対して，表示装置の大きさや，世界座標系におけるディスプレイの位置・姿勢を示す変換マトリクスが指定できる．
3. HMDに対して，水平・垂直画角や，視点とディスプレイの位置関係から定まる視体積の形状を決定するためのパラメータを指定できる．

以下では，正確な仮想空間提示のためのパラメータ決定方法の例として，光学透過型HMDを用いる場合について，必要なパラメータと現在行なっている簡易なキャリブレーション手法について述べる．

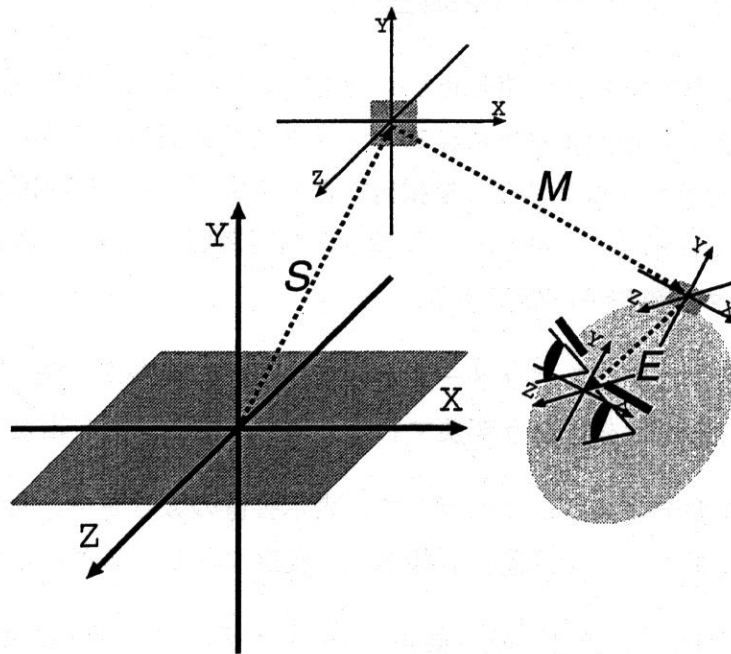


図 B.1 3次元座標変換パラメータ

光学透過型 HMD を用いれば、実空間と仮想空間を同時に観察して、それらの位置ずれを目視により補正することでパラメータを決定できる [大石 94, AB94, BN95]。一般に、実空間中に仮想物体を表示するためには、

- 実空間内に設けた世界座標系から 3次元センサの計測空間の座標系（計測座標系）への座標変換行列 S
- 計測座標系から頭部位置計測点の局所座標系（計測点座標系）への座標変換行列 M
- 計測点座標系から両眼位置で定まるカメラ座標系への座標変換行列 E

などの 3次元座標変換パラメータ（図 B.1 参照）と、

- 描画面の水平視野角 F_z

- 描画面の縦横比（アスペクト） A
- 両眼間隔 I

などの、3次元座標を2次元ディスプレイに描画する際の投影変換に用いるパラメータ（図 B.2 参照）が必要である。VLEGO II ではこれらのパラメータは自在に設定可能であり、高い幾何的整合性を達成するための機構を備えている。この機構を用いて実際に高い幾何的整合性を得るために、現在、以下の手順で簡便にキャリブレーションを行なっている。なお、STHMD 描画面の樽型歪みや観察方向による眼球位置の変化などは考慮していない。

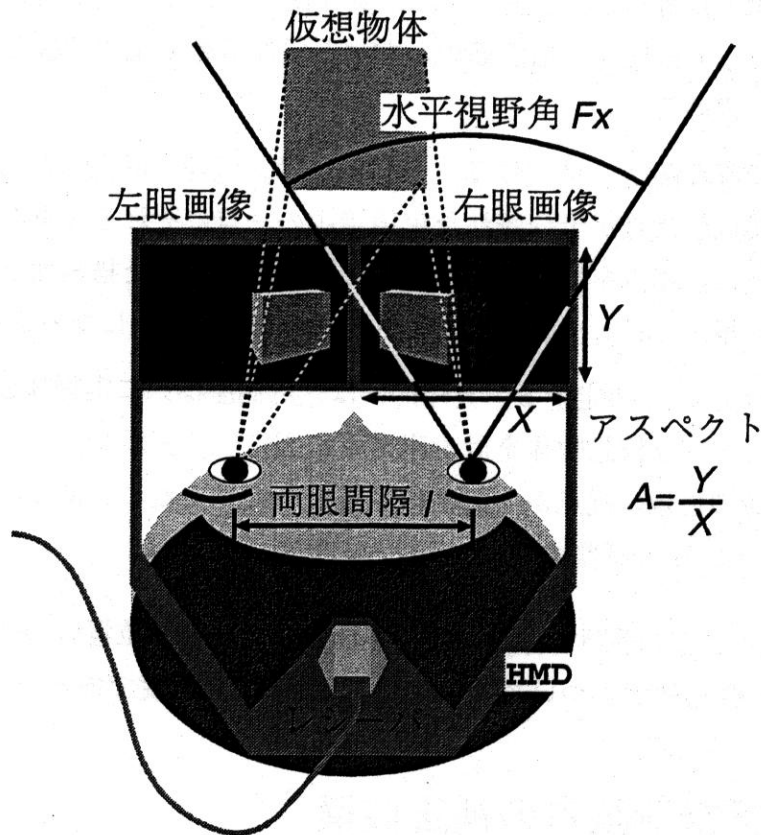


図 B.2 ディスプレイおよび操作者固有のパラメータ

1. 利用者に依存しないパラメータを決定する.
 - (a) アスペクト A を決定する. 具体的には, 45 度回転した直交する十字線 (実物体) を光学透過により観察しながら, この十字と同様の CG を重畳表示し, これらが重なって見えるように A を調整する.
 - (b) 行列 S を決定する. 具体的には, 格子状に設定した既知の 3 次元位置を順次 3 次元センサでなぞり, S の並進, 回転成分を決定する.
2. STHMD と頭部の位置関係で決まる, 利用者に依存するパラメータを決定する.
 - (a) 水平視野角 F_v を決定する. 具体的には, 距離 d だけ離れた壁面を正対して観察し, 描画面の左右端と重なる壁面上の位置と d から近似的に求める.
 - (b) 両眼間隔 I を決定する. 具体的には, 頭部を静止した状態で, 両眼に描画した点が十分離れた実環境中の一点にそれぞれ重なって見えるように描画点を並行移動する. このとき得られた描画面上のオフセットを用いてビューボリュームが左右の眼で鏡対象になるように設定する.
 - (c) 行列 E を決定する. 具体的には, 計測座標系に実物体を固定し, これと合同な仮想物体を計測座標系に固定して表示する. このとき作業領域の任意の視点から両物体が重なって見えるように 3 次元センサを用いて E を調整する.

なお, このような手順で得られる実空間と仮想空間の位置合わせ誤差は, 半径 50cm 程度の作業領域について目測で数 mm ~ 2cm 程度である.

C. 位置計測誤差の補正機構

VLEGO II で利用可能な, ルックアップテーブルを用いた 3 次元位置計測装置の計測誤差の補正機構について説明する. まず, 作業空間の必要な範囲に渡って実空間上の格子点で 3 次元位置計測を行ない, 格子状の実空間座標値から実測値

への対応である3次元配列 *GridToMeasure* を得る。次に、この配列を用いて、実測値が格子点上に来るような実空間座標を逆算し、3次元配列 *MeasureToGrid* を得る。配列 *MeasureToGrid* が1度得られると、高速に実測値を補正できる。すなわち、実測値の8近傍に対応する3次元配列 *MeasureToGrid* 内の添字を求め、それら8点に対応する実空間座標8値を線形補間して補正する。本アルゴリズムの動作を確認するために行なった2つのシミュレーション結果を図 C.1 と図 C.2 に示す。図 C.1 は、一辺 120cm の立方体中の 64 箇所の格子点での計測値に、誤差 $f_x = 4x^2, f_y = 4x^2 + 4z^2, f_z = -4z^2(\text{cm})$ を与えた場合である。この場合、補正後に最大誤差は 88.2 cm から 15.1 cm へ減少し、最も改善率の悪い場合でも誤差が 82%以上削減されている。図 C.2 は、同じ格子点の計測値に、誤差 $f_x = x^2, f_y = x^2 + z^2, f_z = -z^2(\text{cm})$ を与えた場合である。この場合、補正後に最大誤差は 22.0 cm から 0.36 cm へ減少し、最も改善率の悪い場合でも誤差が 95%以上削減されている。なお、格子状に3次元位置を実測することは大変な手間であり、正確に実空間座標を計測することは困難であるため、本機構は有効・無効を選択できる。

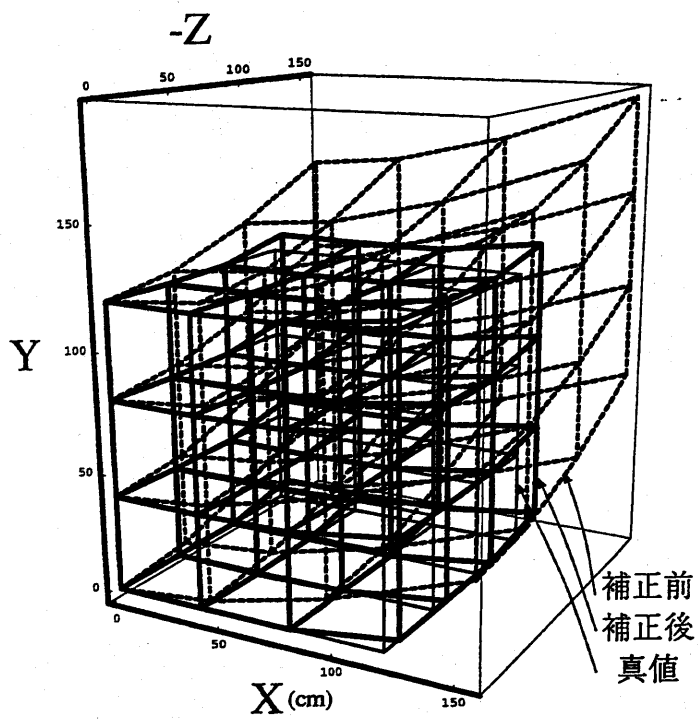


図 C.1 磁場補正のシミュレーション (誤差の大きい場合)

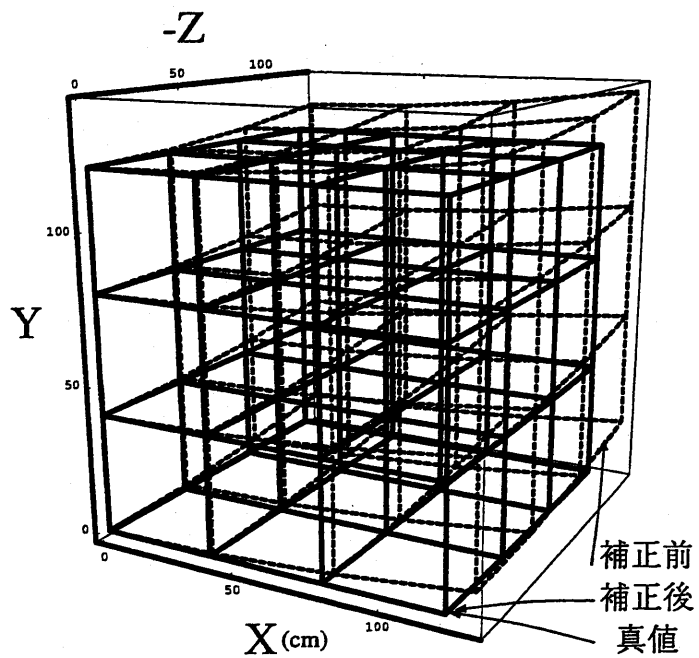


図 C.2 磁場補正のシミュレーション (誤差の小さい場合)

D. 遅延予測フィルタ

VLEGO IIで利用可能な、遅延予測フィルタについて説明する。予測フィルタでは、過去 n 時刻の計測値とそれらの時刻から n 次予測式を用いて現在の値を予測する。 n は256までの任意の自然数を指定できる。図D.1から図D.4に周期関数に対する予測フィルタの適用例を示す。図D.1, 図D.2, 図D.3, 図D.4は、それぞれ予測式が1次, 2次, 3次, および4次式の場合である。この場合、4次式を用いた時に誤差を80%以上低減できている。なお、予測フィルタは急激な変化に弱く、必ずしもうまく機能しないため、本機能は有効・無効を選択できる。

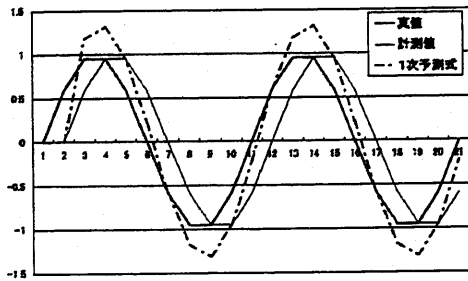


図 D.1 予測フィルタの動作シミュレーション (1次予測の場合)

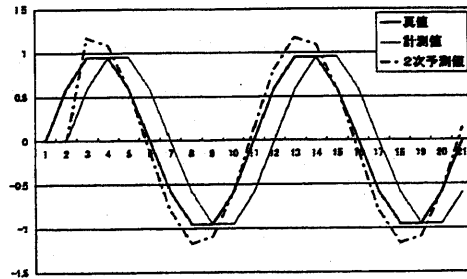


図 D.2 予測フィルタの動作シミュレーション (2次予測の場合)

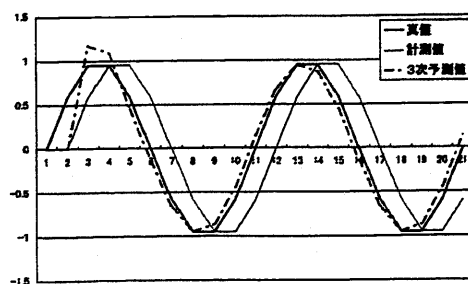


図 D.3 予測フィルタの動作シミュレーション (3次予測の場合)

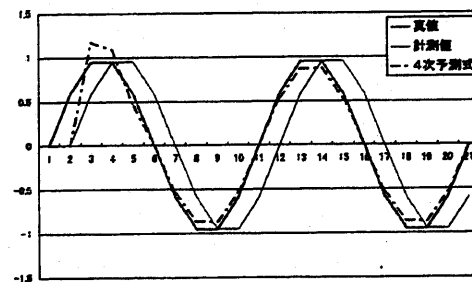


図 D.4 予測フィルタの動作シミュレーション (4次予測の場合)