

NAIST-IS-MT9451033

修士論文

両手を用いた仮想環境没入型モデル VLEGO

清川 清

1996年2月16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  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

清川 清

指導教官： 横矢 直和 教授  
千原 國宏 教授  
竹村 治雄 助教授

# 両手を用いた仮想環境没入型モデラ VLEGO\*

清川 清

## 内容梗概

人工現実感を応用したアプリケーションの一つとして、仮想環境に没入しながら三次元形状を生成できるモデラ (以下、没入型モデラ) が注目されている。没入型モデラには、直観的操作性など多くの利点があり大きな期待が寄せられている。しかし、一般に仮想環境内では正確な仮想物体操作が困難であるという問題があり、実用的な没入型モデラは登場していない。この問題は、仮想空間の提示速度や提示精度、あるいは奥行き方向の分別能力などの生理的要素に起因する。この問題を解決するために、力覚や触覚も同時に提示する手法が提案されている。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点が問題となる。本研究では、このような問題点を解決し、特殊な装置を用いずに仮想環境内で高精度のモデリングを可能とすることを目指して没入型モデラ VLEGO (Virtual Environment for Generating Objects) を開発した。VLEGO では、ブロック玩具を模倣した簡易な操作手法を導入し、ブロック玩具と同様に、1) プリミティブ間の離散的接合制約、2) プリミティブ間の干渉回避、3) 両手を使用したプリミティブ操作、を実現している。これらの操作手法の特徴により、VLEGO は操作に熟練を要さずに直観的に正確なモデリングが行なえる三次元形状生成環境を提供する。本論文では没入型モデラの特長と製作上の問題点、VLEGO の実装や機能の特徴について述べる。また、VLEGO の諸特徴が操作性に与える効果を評価したいくつかの実験についても報告する。

## キーワード

人工現実感, 3-D モデラ, 3-D ユーザインタフェース, 両手操作, 干渉判定

---

\*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 修士論文, NAIST-IS-MT9451033, 1996年2月16日.

# VLEGO - VirtuaL Environment for Generating Objects\*

Kiyoshi Kiyokawa

## Abstract

Immersive solid modelers have a number of advantages for three dimensional (3-D) design over traditional computer aided design (CAD) tools. However, most existing immersive modelers do not have sufficient usability; i.e., it is difficult to manipulate virtual objects precisely without force and touch feedback. Our immersive solid modeler, VLEGO, employs some features of block toys to solve such a problem. The characteristics of VLEGO are summarized as follows: 1) Possible location and orientation of primitives are discretely limited, 2) The system detects collisions among picked and all other objects and adjusts the locations of picked objects so as to avoid interference of any two objects, and 3) VLEGO supports a number of two-handed operations such as assembly, decomposition and coloring objects. As a result, precise design of 3-D objects can be achieved easily by using a set of two-handed operations in intuitive way without force and touch feedback. This paper describes the design and implementation of VLEGO as well as some experiments for examining its effectiveness.

## Keywords:

Virtual reality, 3-D modeler, 3-D user interface, two-handed manipulation, collision detection

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9451033, February 16, 1996.

# 目次

1. はじめに	1
2. 没入型モデラの特長と問題点	4
2.1 没入型モデラの特長	4
2.1.1 没入型モデラの持つ視認の直観性	6
2.1.2 没入型モデラの持つ操作の直観性	7
2.1.3 没入型モデラの持つ対話性	8
2.2 両手による空間操作の支援	8
2.3 仮想空間操作の困難性	9
2.3.1 応答遅延とその改善策	10
2.3.2 空間的ズレとその改善策	11
2.3.3 生理的制約とその改善策	12
3. 没入型モデラ VLEGO	13
3.1 開発の趣旨	13
3.2 設計方針	13
3.2.1 システムの機器構成	14
3.2.2 ブロック玩具の特長と仮想物体操作支援手法への適用	15
3.3 実行環境	15
3.4 作業空間の構成要素	17
3.5 片手によるプリミティブの基本操作	19
3.6 離散的配置制約と作業状態	20
3.6.1 二種類のブロック操作自由度	22
3.6.2 二種類の作業状態	22
3.7 ブロック間の干渉回避	24
3.8 両手操作を交えた形状生成	28
3.8.1 ブロックの接合	28
3.8.2 ブロックの分割	30

3.8.3	プリミティブの拡大縮小 . . . . .	32
3.8.4	プリミティブの彩色 . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>評価実験</b>	<b>35</b>
4.1	両手操作の有効性を検証する評価実験 . . . . .	35
4.1.1	実験手法 . . . . .	35
4.1.2	結果と考察 . . . . .	36
4.2	干渉検出の有効性を検証する評価実験 . . . . .	38
4.2.1	実験手法 . . . . .	38
4.2.2	結果と考察 . . . . .	41
<b>5.</b>	<b>VLEGO の共有仮想空間への適用</b>	<b>45</b>
5.1	共有仮想空間を利用した協同設計の特長と従来の研究 . . . . .	45
5.2	VLEGO を利用した仮想物体協調操作補助手法の確立 . . . . .	45
5.3	受渡し操作に関する評価実験: 実験 1 . . . . .	46
5.3.1	実験手法 . . . . .	46
5.3.2	結果と考察 . . . . .	48
5.4	接合操作に関する評価実験: 実験 2 . . . . .	50
5.4.1	実験手法 . . . . .	51
5.4.2	結果と考察 . . . . .	52
<b>6.</b>	<b>考察</b>	<b>54</b>
<b>7.</b>	<b>むすび</b>	<b>56</b>
	謝辞	58
	参考文献	59

## 目 次

2.1	従来の CAD . . . . .	5
2.2	没入型モデラの特長 . . . . .	6
2.3	従来の CAD の設計過程 . . . . .	8
2.4	仮想空間提示ループ . . . . .	11
3.1	VLEGO の実行環境 . . . . .	16
3.2	VLEGO の作業空間の構成要素 . . . . .	17
3.3	パレットボール . . . . .	19
3.4	VLEGO の三特徴と説明の流れ . . . . .	21
3.5	把持操作の自由度の二状態 . . . . .	22
3.6	VLEGO の作業状態の遷移 . . . . .	24
3.7	干渉回避の例 . . . . .	27
3.8	VLEGO における接合作業例 . . . . .	29
3.9	VLEGO における分断作業例 . . . . .	31
3.10	プリミティブ拡大縮小の様子 . . . . .	33
3.11	プリミティブ彩色の様子 . . . . .	34
4.1	タスクブロックの例 . . . . .	35
4.2	実験における操作方法 . . . . .	36
4.3	各試行の初期状態 . . . . .	40
4.4	試行の完成例 . . . . .	40
5.1	実験 1 の配置 . . . . .	47
5.2	4 通りの視覚的フィードバック . . . . .	48
5.3	実験 2 の配置 . . . . .	51

## 表 目 次

3.1	VLEGO におけるブロック操作 . . . . .	19
4.1	操作方法間の比較結果 . . . . .	37
4.2	干渉判定結果の反映方法 . . . . .	38
4.3	各指標の全被験者による平均 . . . . .	42
4.4	典型的分散分析結果 . . . . .	42
4.5	一把持当りの時間指標の全被験者による平均 (秒) . . . . .	43
4.6	各サブタスクの所要時間の総時間に対する比 . . . . .	43
4.7	各提示方法の主観評価の被験者による平均 (10 段階評価) . . . . .	44
4.8	視覚的フィードバックの主観評価 . . . . .	44
5.1	平均受渡しタスク達成時間 (秒 (分散)) . . . . .	49
5.2	平均誤り率 . . . . .	50
5.3	平均共有把持時間 (秒) . . . . .	50
5.4	平均接合タスク達成時間 (秒) と誤り率 . . . . .	53



## 1. はじめに

近年、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広範な分野において、三次元形状を表現したコンピュータグラフィクス (CG) が扱われ、これらの膨大な三次元データを簡便かつ効率良く生成する必要性が高まっている。一般にこれらの三次元 CG は専用の CAD (Computer Aided Design) アプリケーションを用いて生成されるが、通常二次元画面上で三次元形状を視認、操作するため直観的でなく、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 [1]。これに対し、三次元空間を直接提示する手法として、Southerland による Ultimate Display の発表以来、計算機を利用し人工的に生成した視覚や聴覚、触覚などを利用者に提示する事によって、あたかも人工的な空間に実際に入り込んでいるかのような感覚 (没入感) を与える技術が、人工現実感 (AR: Artificial Reality) あるいは仮想現実 (VR: Virtual Reality) と呼ばれ発展してきた。実時間で三次元 CG を処理する必要のある VR 技術は、近年の計算機能力の急速な発達につれて進歩し、その応用範囲を拡げつつある [2, 3, 4]。

そこで、より簡便で効率の良い三次元形状生成を行なう手法として、VR によって提示される仮想環境に没入しながら三次元形状を直観的に生成できるモデラ (没入型モデラ) が注目され、様々な基礎研究がなされている。没入型モデラの利点として、掛井は 1) 変更した三次元形状が直ちに視認でき、設計効率が低い、2) 操作が直観的で簡易である、といった点を指摘し [5]、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三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 [6]。このように没入型モデラは、二次元の製図に基づいた従来の CAD アプリケーションなどに比べ、簡易かつ効率の良い三次元形状の設計環境を提供するものとして期待される。

没入型モデラにおけるもう一つの重要な利点は両手による空間操作が可能である点である。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制感覚を利用し、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 [7]。両手操作を積極的に支援する三次元形状生成アプリケーションは幾つか存在するが [8, 9]、没入型モデラとして形状生成過程に自然な両手操作を採り入れたものは登場していない。仮想空

間内においても両手操作による形状生成を可能とすることにより、自然で直観的な操作性が実現できるものと期待できる。

没入型モデラの試作例としては Butterworth らによる 3DM などが知られている [10]。しかし、一般に仮想物体を正確に操作することが困難であるという問題があり、実用的な操作性を実現した没入型モデラは登場していないといえる。この問題は、仮想空間の計算および描画の遅延、三次元入出力装置の精度による位置のズレ、あるいは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 [7, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]。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 [19, 20, 21]。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。

以上のような背景から、本研究では、力覚提示装置などを用いずに実用的操作性を実現し、仮想環境内で両手を柔軟に用いて簡易に高精度の形状生成が行なえることを目標として没入型モデラ VLEGO (Virtual Environment for Generating Objects) を開発した。VLEGO は、ブロック玩具を模倣した簡易な操作手法を導入し、ブロック玩具と同様に、1) 形状生成の構成単位となるプリミティブ間の位置および姿勢を離散的に制約する、2) プリミティブ同士の干渉を検出し、干渉を回避するよう自動的に位置を補正する、3) 接合や分割など、両手によるプリミティブ操作を積極的に提供する、などの特長を持つ。1) および 2) の特長により正確な仮想物体操作を支援し、2) および 3) の特長により実物体の操作感覚に近い自然で効率的な操作性を提供する。これらの特長により、VLEGO では仮想空間内での正確な形状生成を容易に行なうことが可能となる。

以下、2章で没入型モデラの特長、両手操作を没入型モデラに導入した場合の利点、および仮想空間を正確に操作することの一般的困難性について論じた後、3章で没入型モデラ VLEGO の設計方針や特長、実装した諸機能について述べる。また、4章では VLEGO の特長である両手操作とプリミティブ間干渉回避の有効性を検証した評価実験について述べる。さらに5章では、将来の発展として、没入型モデラをより有益にするとと思われる遠隔協同設計への応用を目指し、協同設計の利点や関連する従来研究について述べた後、仮想物体の協調操作補助手法につい

て行なった実験について述べる. 最後に考察を加えて, むすびとする.

## 2. 没入型モデラの特長と問題点

本章以降で没入型モデラに関する研究の本論に入る前に、本論文で取扱う没入型モデラの定義を簡単に述べておく。没入型モデラとは、VRによって提示される仮想空間に没入しながら三次元形状を生成できるモデラを指す。一般に、VRで仮想空間を提示するために、人間の手や頭部の空間的位置および向きを計測する三次元デジタイザや、両眼に独立した映像を提示できる頭部装着型ディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)などの機器を用いた視点に追従した両眼立体視の再現を行なう。仮想空間への没入感を得るためには正しい立体像の提示が重要であり、本論文でも視点追従を伴う両眼立体視の提示を没入型モデラの要件とする。次に視野角について、通常深い没入感を得るためには水平視野角70度程度以上を確保する必要があるとされている。これに対し、本研究の対象とする形状モデリングでは、対象となる形状を立体視するのに十分な視野角を持つ場合、作業空間に没入可能であると捉える。従って、この場合必要となる視野角はモデリング対象の大きさなどに依存し特定できないため、本論文では没入型モデラの提供すべき視野角を特に規定しない。

以降では、2.1節で従来の三次元形状生成手法と比較した没入型モデラの特長について述べた後、2.2節で没入型モデラをより有用にするとと思われる両手による空間操作支援について述べる。さらに、2.3節で実用的操作性を持つ没入型モデラを構築する上で問題となる仮想物体操作の一般的困難性について、従来の関連研究を紹介しながら論じていく。

### 2.1 没入型モデラの特長

没入型モデラの特長を述べる前に、従来の三次元形状生成手法の特徴についてまとめておく。従来の三次元形状生成手法としては、

1. 粘土や木材などを用いて、実物体を製作する方法。
2. 三面図などを用いた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2.1)。

が一般的である。

1. の実物体を製作する方法は、生成する三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かつ正確に実現できるという利点を持つ反面、三次元形状の直観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。

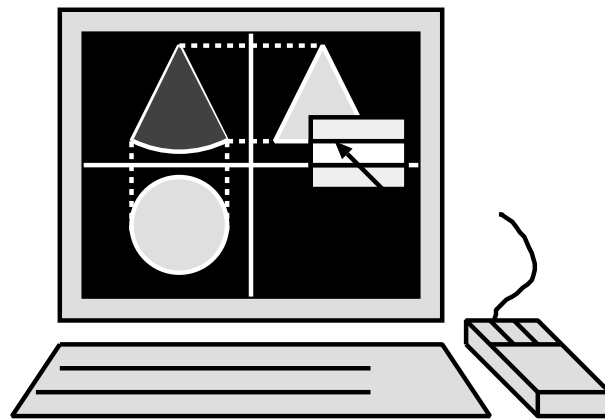


図 2.1 従来の CAD

これに対し没入型モデラでは、計算機によって仮想的な三次元空間を利用者に直接提示し、その仮想空間への働きかけを可能とする VR 技術を用いることにより、上述の二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。この概念図を図 2.2 に示す。まず、1. の実物体を製作する方法と比較した場合、没入型モデラでは三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、没入型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

実空間での作業に近い環境を提供できるという利点は次のようにまとめられる。

- 視認が直観的に行なえる
- 操作が直観的に行なえる
- 対話性の高い形状生成が行なえる

以下では、没入型モデラを持つこれら三点の特長についてさらに詳しく論じる。

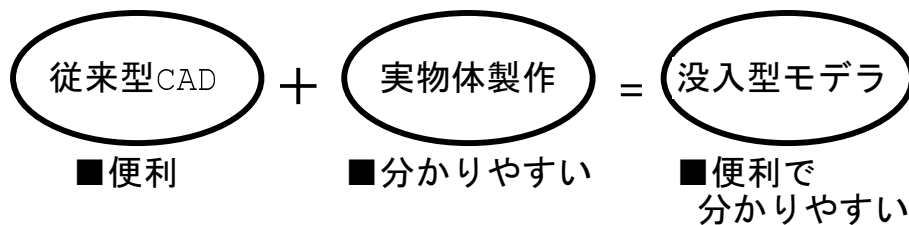


図 2.2 没入型モデラの特長

### 2.1.1 没入型モデラを持つ視認の直観性

視認の直観性とは、三次元形状を直接三次元的に視認できることを指す。人間が三次元形状を直観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。透視投影による遠近法や空気遠近法などの、静止した単一像によって提示可能な奥行き感の提示手法に比べて、左右の目にそれらの輻輳角に応じた異なる像を提示する両眼立体視や、視点と観察対象の相対的移動に伴う運動視差による運動立体視などの、多視点からの同時的または経時的な映像に基づく奥行き情報提示手法は、より正確な三次元形状の把握を促進する。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、三次元形状のより正確な把握が可能となり、形状の直観的理解も促進される [22]。しかし両眼立体視や運動立体視を実現するには、それぞれ特別な出力装置や入力装置が必要になる。従来のモデラでは、両眼立体視などの機能を備える

ものもあるが、形状生成過程において運動立体視が可能なモデラは知られていない [1].

これに対し没入型モデラの提示する仮想空間では、通常頭部の位置を三次元デジタルタイザなどを用いて計測し、HMD (Head Mounted Display) などを出力装置として用いることにより、視点に追従した両眼立体視を可能としている。これにより利用者は、提示される仮想空間を実空間の三次元的知覚刺激に対応づけ、普段から無意識に蓄えている現実世界の知識や経験を活かして、直観的に仮想空間を観察することが可能となる。

### 2.1.2 没入型モデラの持つ操作の直観性

操作の直観性とは三次元形状を直接三次元的に操作できることを指す。通常三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は2自由度のみを持つマウスである。従ってマウスを用いて6自由度を持つ三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 らは操作する三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 [23]。より高い自由度を同時に操作するために、Venolia らは通常の二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三次元マウスを用いることにより、三次元物体の位置を制御する手法を提案している [24]。

高自由度の操作をより直観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 [7]。これに従えば、三次元空間の位置や姿勢を入力する場合はその6自由度に対応して三次元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。磁気トラッカーなどの三次元デジタルタイザを用いれば6自由度の直接入力が可能であるが、従来のアプリケーションでは6自由度の直接入力に対応した三次元形状の直観的視認を行なえないため、直観的操作性に限界があった。没入型モデラでは視認の直観性を持つため、三次元デジタルタイザを用いた作業対象の6自由度操作を直接直観的に行うことができる。

### 2.1.3 没入型モデラの持つ対話性

従来の三次元モデラでは、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、形状の変更を二次元の図面上で行なうため三次元形状の確認がその設計過程と乖離している(図2.3)。また、二次元画面上で三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観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、没入型モデラでは、提示される三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。従って没入型モデラでは、視認や操作の直観性を活かし、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。

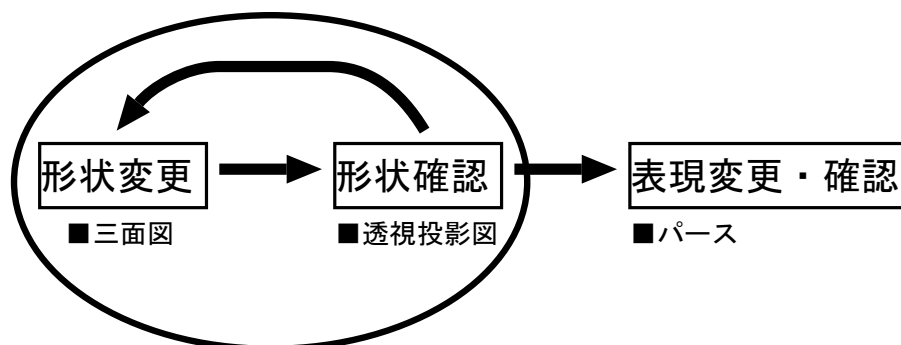


図 2.3 従来の CAD の設計過程

## 2.2 両手による空間操作の支援

両手による空間操作を支援することにより、没入型モデラをより有用にすることができると考えられる。本節では両手操作の特長や両手操作を支援する従来研究、さらに両手による空間操作を没入型モデラの形状生成課程に導入した場合に期待される利点について述べる。



両手による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, 自然で効率的であるとされている. Kabbash らは, 二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 [25]. 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制感覚を利用し, 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 [7]. 両手による操作を積極的に支援するアプリケーションとしては, Hinckley ら自らが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ほか [26], 幾つかのデザイン用アプリケーションが知られている. Bier らは左手で操作する様々な透明の転写版を用いて右手で操作項目と操作対象を同時に指定できる, Toolglass と呼ばれる二次元ドローイングアプリケーションを開発している [27].

両手操作を積極的に支援するデザイン用アプリケーションの中で, 三次元の形状生成を対象としたものとしては Sachs らによる 3-Draw や Shaw らによる THRED が知られている [8, 9]. 前者はタブレットとスタイラスを用いて三次元曲線を描くことができ, 後者は非利き手で視点や種々の作業モードを変更しながら利き手で階層的に連なる三次元の平面集合を生成できる. しかし, これらはいずれも両眼立体視や運動立体視を伴っていないという点で没入的形狀生成手法ではない上, 形状生成の能力もそれほど高くない.

このように, より直観的かつ効率的な操作性を提供すると考えられる, 両手操作に基づいた形状生成手法は, 没入型モデラに導入可能であるにも関わらず未だ採用されていない. 没入型モデラの形状生成過程に自然な両手操作を採り入れることにより, より直観的かつ効率的な操作性を実現できるものと期待できる.

### 2.3 仮想空間操作の困難性

没入型モデラは, 前節までで述べたような多くの利点や可能性を持つ. しかしながら, 様々な要因により仮想空間内では仮想物体の正確な操作が困難なため, 実用に耐え得る没入型モデラは未だ登場していない. 従って実用的操作性を備えた没入型モデラを構築するにあたり, この問題が発生するメカニズムを理解し, 改善の方策を講ずることが非常に重要となる. 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) 応答遅延, 2) 空間的ズレ, を挙げている [28]. 本節ではこれに加えて適切なフィードバックのない場合の 3) 生理的制約, を加えた三つの要因を考慮し, これら三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.

### 2.3.1 応答遅延とその改善策

仮想空間は, 図 2.4 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応答遅延は操作性に重大な影響を及ぼす. 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 [15, 29]. 従って, 快適な操作性を得るには応答遅延を 100ms 以下に押さえることが肝要である. 応答遅延の要因はさらに次のように分類できる.

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

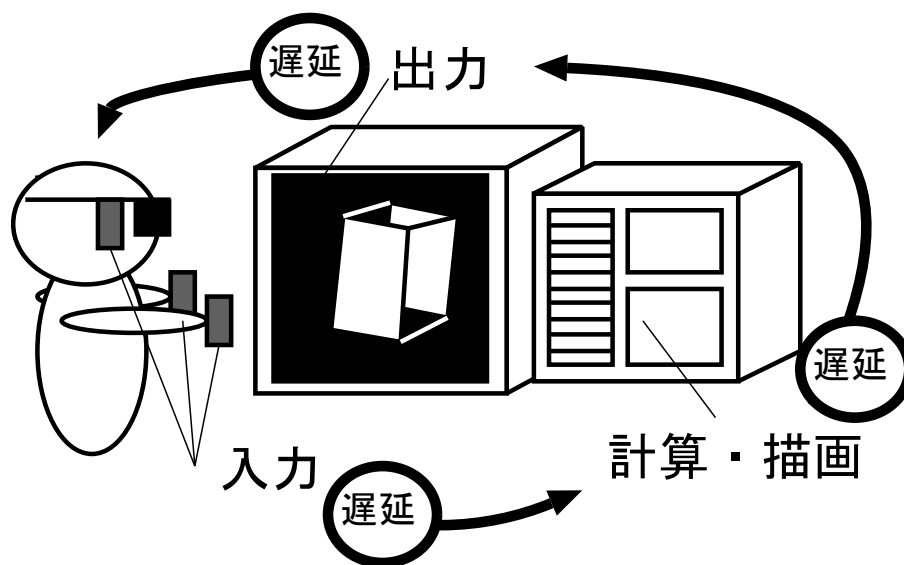


図 2.4 仮想空間提示ループ

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, 1. の処理遅延は通常 30ms 以下で一定ある [14, 16]. これを改善するためには, より処理周期の早い装置を用いる以外にない. 一方, 2. の計算遅延および 3. の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三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.

### 2.3.2 空間的ズレとその改善策

空間的ズレとは, 入力装置の計測精度や出力装置の表示精度の低さによって視認の精度に理論的限界があること, さらには入出力装置のキャリブレーション精度の低さなどによって, 視覚と位置覚にズレを生じることに伴って起こる問題である. 入力装置は機械式, ソース・レシーバー式, 光学式の三方式が知られている. これらは測定精度と計測器具による計測対象の束縛の強さにトレードオフがあるため, 束縛が僅少であり, 精度も悪くないソース・レシーバー式が広く用いられる.

中でも電磁気式はオクルージョンの問題も少なく多用されている。ただし、この方式は周囲の磁場の影響を受けて非線形な誤差を生みやすいため、計測能力を十分発揮させるには金属などを実行環境から極力排除する必要がある。

出力装置は主に HMD 方式と時分割両眼立体視方式が用いられている。表示精度を向上するには、より高解像度の装置を用いる以外にない。このようにして入出力装置の精度を高めた上で、各装置の配置を正確に行ない三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。

### 2.3.3 生理的制約とその改善策

生理的制約は、人間が三次元空間を操作する場合に必然的に伴う要因である。まず、四肢の空間指示能力が低いという問題がある。すなわち、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。また、人間の視覚特性として、奥行き方向の分別能力が、視線に垂直な方向に比べて低いという問題がある。これらの問題は、実空間では触覚や力覚によって補われているが、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 [19, 20, 21]。これらの感覚の伴わない仮想空間内で利用者が意志通りに位置を指示できる精度は 1cm から 2cm 程度と報告されている [12]。仮想空間内で触覚や力覚を伴わずに、正確に位置を指示できるようにするためには、仮想物体の稜線や面、接合可能な箇所に基づいて、指示できる位置を自然に制約する方法が考えられる。

### 3. 没入型モデラ VLEGO

前章の考察を踏まえ,没入型モデラ VLEGO を開発した. 本章では以下, VLEGO 開発の趣旨, システムの設計方針や実行環境, さらに VLEGO の諸機能と操作の実際について述べる.

#### 3.1 開発の趣旨

VLEGO 開発の趣旨は次のようにまとめられる.

- 実用的操作性に優れた没入型モデラの実装例を示す.
  - 没入型モデラは実装例が少なく,形状の操作性を向上する工夫もほとんどなされていない. 従って,没入型モデラを操作性よく構築した上で,実用的操作性を備えた没入型形状生成環境の得失を評価し,得られた知見を整理することに意義がある.
- 仮想物体の操作支援手法を開発,評価する.
  - 没入型モデラの実用性を高めるには,仮想物体の正確な操作を支援する手法を開発する必要がある. 没入型モデラの操作性を向上する仮想物体操作支援手法は,他のあらゆる VR アプリケーションに応用可能であり,こうした手法の開発や定量評価の意義は非常に大きい.

#### 3.2 設計方針

操作性の高い没入型モデラが満たすべき要件として以下を考え,これを VLEGO 設計の基本方針とした.

1. ユーザの行動を極力束縛しない機材構成とする.
2. 正確に三次元形状を生成できる操作性を提供する.
3. 習熟を要しない,直観的かつ簡易な操作性を提供する.

本節では以下, この方針に基づき,

- 2.3 節の考察を踏まえて決定したシステムの機器構成の選定理由と概要,
- 仮想物体操作支援手法として導入した, ブロック玩具を模倣した形状生成手法の採用理由と概要,

について各々順に述べる.

### 3.2.1 システムの機器構成

2.3 節の考察を踏まえ先の設計方針 1. および 2. を満たすために, 力覚帰還装置などの束縛の強い機械式装置を用いずに, しかも遅延や誤差が極力少なくなるような機器構成を次のように選定した.

- 2.3 節で述べた応答遅延の要因のうち, 計算遅延および描画遅延を短縮するために, グラフィック WS として SGI 社の Onyx RE2 を採用した. これは, 本学で利用できる最も高速なハードウェアである.
- 三次元位置入力装置としては, ユーザを束縛する程度や測定精度を考え, 電磁気式を採用した. さらに, コマンド入力方式はデータグローブなどを用いた手ぶり方式 [17, 18, 30] や音声入力によるものなどがあるが, ここでは応答の確実性や処理速度を考え, 単純なスイッチ押下式とした.
- 表示装置としては精度を考慮し, 高精細ディスプレイを通して時分割両眼立体視を行なう方式を採用した.

この結果, 2.3 節の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. また, 空間的ズレに関しても仮想空間中の作業半径内で 1cm 未満に留まっている. これは生理的制約による精度よりも良い. すなわち, この構成においては仮想物体の正確な操作を妨げる最大の要因は, これらの機材でなく, 生理的制約といえる. 従って, 設計方針 1., 2. を満たす機材構成としては十分である. これらの機材を導入した実行環境については次節で整理する.

### 3.2.2 ブロック玩具の特長と仮想物体操作支援手法への適用

VLEGO では、四肢を物理的に束縛する力覚帰還装置などのハードウェアによらずに生理的制約を解消するため、仮想物体に自然な配置制約を設けることとした。仮想物体に自然な配置制約を与え、同時に設計方針 3. を満たす形状生成手法としてブロック玩具に着目した。その特徴としては、1. ブロック同士の配置が容易である。2. 両手による自然な操作が可能である。という二点が挙げられる。これらを順に考察し、その特徴を仮想環境に導入する理由を述べる。

1. ブロック玩具では、ブロック上部の突起と下部の窪みによって、ブロック同士の接合する面の位置および角度が離散的に限定される。また、実物体であり物体同士がすり抜けずにぶつかり合うため、ブロック同士の接触を頼りにして配置を行なえる。このようにして、ブロック玩具では正確な位置合わせを容易に行なうことができる。仮想物体においても位置や姿勢を離散的に制限し、物体間の干渉を検出して回避するような位置補正を行なうことにより、生理的制約が顕在化することなく、正確な配置が容易に行なえるようになるものと期待される。
2. 2.2節で述べたように、両手による作業は自然で効率的である。ブロック玩具では、両手の機能は基本的に等価であり、各々独立してブロックを操作できるのはもちろん、左右に持つブロックの位置や姿勢を協調的に補正しながら接合や分割を繰り返していくことができる。仮想物体に対しても、このような両手による柔軟かつ分かりやすい形状生成を可能とすることにより、自然で効率的な操作性が実現できるものと期待できる。

以上のように、離散的配置制約や干渉回避、さらに両手操作の支援を特徴とする形状生成手法を VLEGO に導入することにより、直観的かつ正確な形状生成が行なえる環境を提供できるものと期待できる。

### 3.3 実行環境

VLEGO の実行環境を図 3.1 に示す。先に述べたように、グラフィック WS として Onyx RE2 (SGI 社) を使用した。ユーザは、三次元デジタイザ 3SPACE (Polhemus

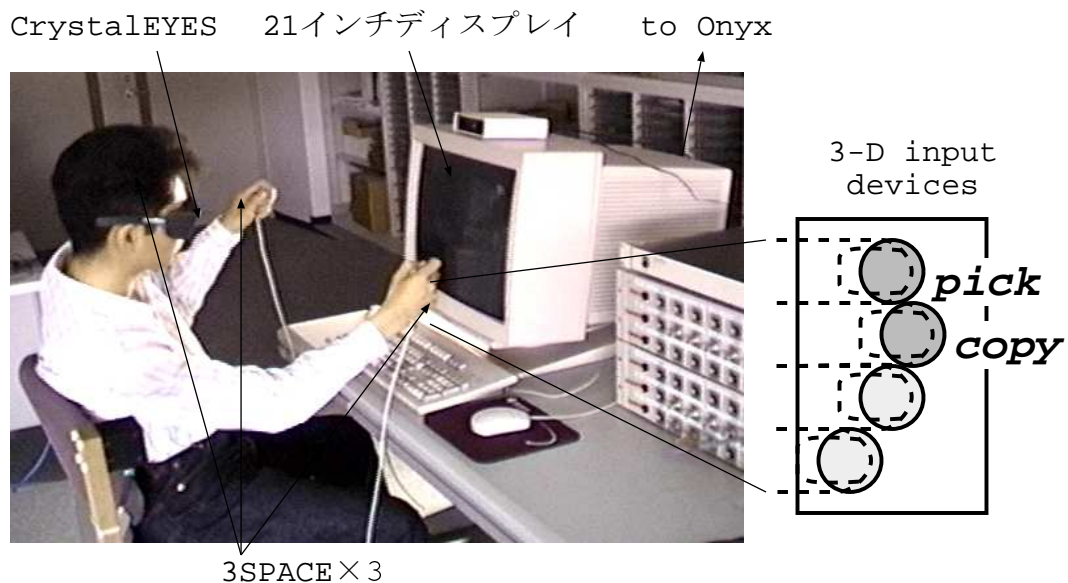


図 3.1 VLEGO の実行環境

社) で測量された視点に基づき, 液晶シャッター眼鏡 CrystalEYES (StereoGraphics 社) を通して, 仮想現実環境を両眼立体視する. この構成では, 利用者はディスプレイからおよそ 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.

また, 仮想物体操作のために, 三次元入力デバイスを両手用に一組製作した (図 3.1 右下). これはフェザースイッチ 4 個と三次元デジタイザを基板に取付けたものである. ユーザはこれらのスイッチを組み合わせることで押し下し, 仮想物体の選択や複製, 消去などを行なう. 特に把持および複製には対応するスイッチが存在する. そこで本論文では, 仮想物体を把持または複製するために対応するスイッチを押し下す, もしくは把持した仮想物体を解放するために対応するスイッチを解放することを単に, 把持する, 複製する, または解放する, という.



### 3.4 作業空間の構成要素

VLEGO 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, 両手を用いて離散的な配置制約に基づいて組合せていくことにより三次元形状を生成する [31]. 図 3.2に示すように, VLEGO の作業空間には, 左右の三次元カーソル, 座標軸, プリミティブボックス, パレットボールが常に存在し, これに加えて形状を構成するプリミティブが適宜存在する. 本節ではこれらについて説明する. なお, 本論文では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.

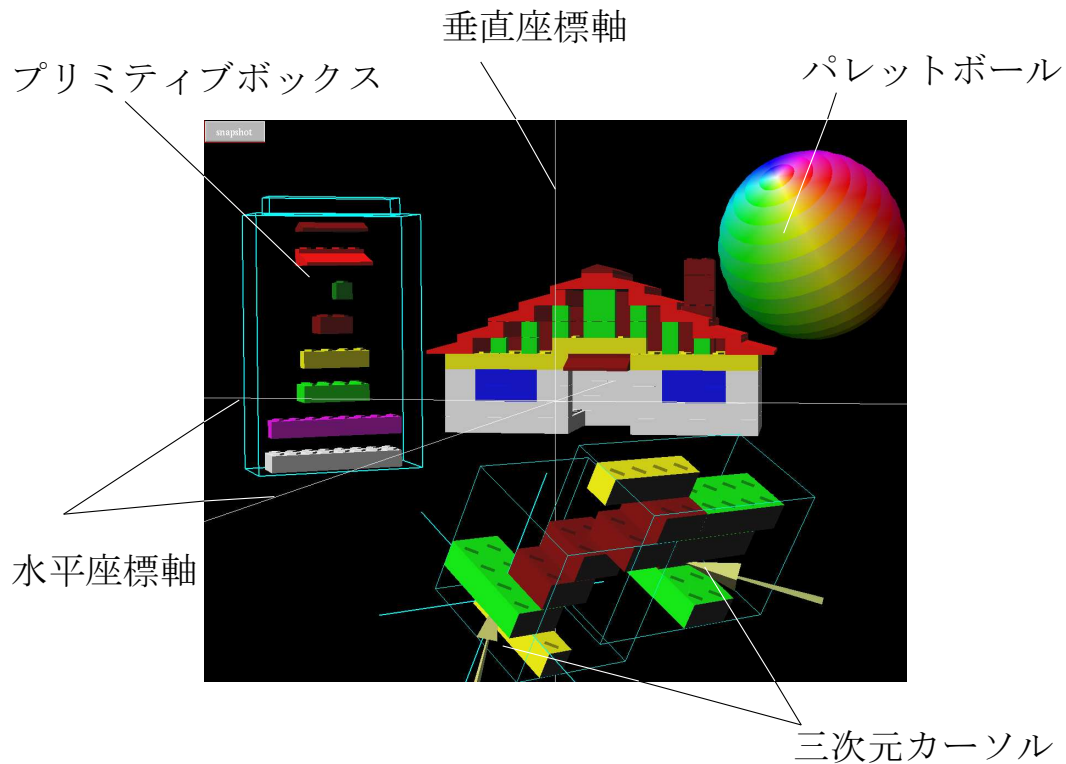


図 3.2 VLEGO の作業空間の構成要素

**三次元カーソル:** 三次元カーソルは矢印型の仮想物体で, 左右の入力デバイスに対応して二つ存在し, 各デバイスの物理的動きに追従して自由に移動する.

利用者は三次元カーソルを利用して VLEGO の全操作を行なう。

**座標軸:** VLEGO における座標系の原点はディスプレイ面の中心であり, 垂直座標軸 1 本と水平座標軸 2 本が互いに直行し各々原点を通るように表示される。水平座標軸は把持し垂直軸まわりに回転することができる。仮想空間全体もこれにつれて回転し, 仮想空間を様々な視点から観察, 操作することができる。

**プリミティブ:** プリミティブの形状は直方体やクサビ型などであり, 高さ, 横幅および奥行きは 1cm の整数倍である。また, 各プリミティブの上面には 1cm 間隔で突起を設けてある。後述するように, あるプリミティブの上面は, 他のブロックの下面と接して離散的な位置で互いに接合することができる。なお, 突起は描画面数を大幅に増大させるため, 描画遅延を短縮するために突起の描画を省略できる。この機能は, Astheimer らによるものなど多くの研究が進んでいる描画の段階的詳細化を行なう場合にも利用できる [32]。プリミティブに対して行なえる各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, 典型的形状のプリミティブ数種類を一つずつ内部に浮かべたワイヤフレームの直方体であり, プリミティブの生成と消去に使用する。プリミティブボックスに浮かぶプリミティブは消去不可能であり, 単に把持することにより複製され, 無尽蔵にプリミティブを生成できる。また逆に把持したブロックをプリミティブボックス内で解放すると, そのブロックを消去できる。プリミティブボックスは, 上部の小さい直方体の領域を把持して全体を自由に移動することができる。

**パレットボール:** パレットボールは図 3.3 に示すように部位によって三次元的に明度, 彩度, 色相の異なる球形であり, 両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, 3.8 節で述べる。

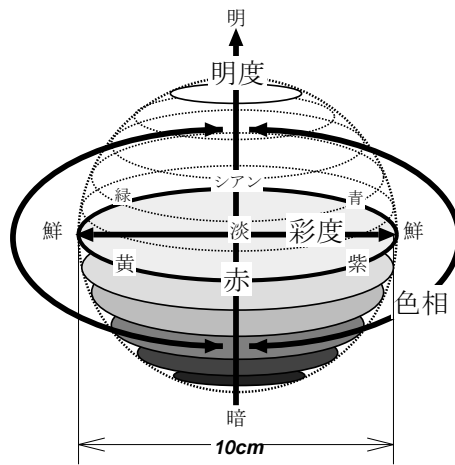


図 3.3 パレットボール

### 3.5 片手によるプリミティブの基本操作

VLEGO 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や両手で行なうものがある。これらを表 3.1 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、両手による操作については 3.8 節で述べる。

**選択:** 三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

表 3.1 VLEGO におけるブロック操作

片手操作	選択, 把持, 複製, 消去, (片手による) 接合
両手操作	(両手による) 接合, 分割, 拡大縮小, 彩色

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でも、いずれか一つの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、三次元カーソルの移動に合わせて通常は後述の離散的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、細かくは二通りの複製方法がある。第一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。第二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。

**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ことにより行なえる。プリミティブボックス内で解放されたブロックは操作不能になり 500ms 程度の期間しだいに縮小しながら最後に消去される。

**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で接合することができる。接合は両手によっても行なうことができ、両手による接合操作は 3.6節と 3.7節で述べる VLEGO の様々な特長を活かしたものであるため、接合操作の詳細は 3.8節で説明する。

### 3.6 離散的配置制約と作業状態

図 3.4に示すように、VLEGO では幾つかな特徴的機能が絡み合っってブロック操作を支援している。把持したブロックは離散的な配置制約と他のブロックとの干渉を回避する位置の補正を同時に受けながら移動する。また、両手を協調的に操

作することで片手のみでは不可能な作業がいくつか行なえる。本節以降、3 節に渡って VLEGO の特長であるこれらの仮想物体の操作支援手法について説明する。まず本節で仮想物体に設ける離散的配置制約について述べた後、3.7節では仮想物体間の干渉回避について述べ、3.8節では両手操作を活かした形状生成の実際について述べる。

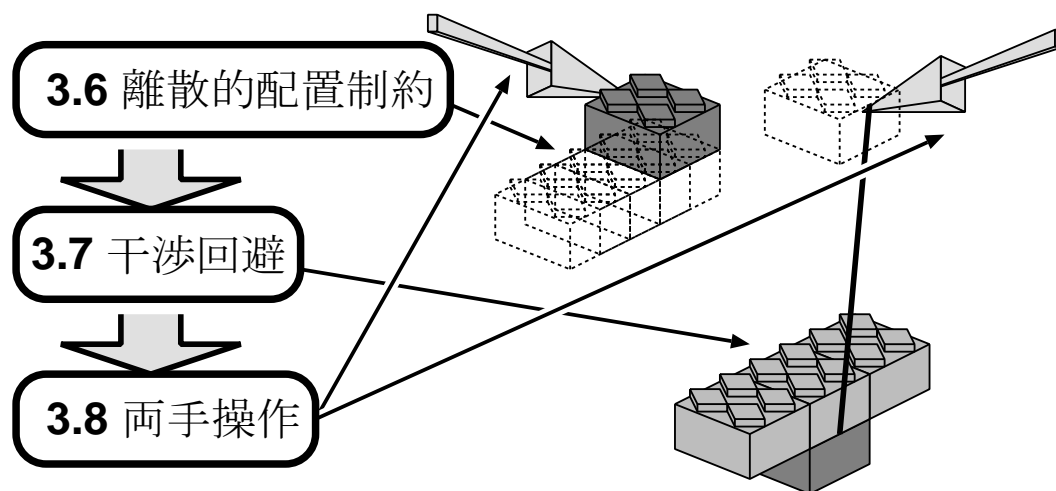


図 3.4 VLEGO の三特徴と説明の流れ

VLEGO では、ブロックの自然な組み立て作業を支援するために、把持したブロックを操作できる自由度に制約を設ける場合がある。このため、制約を設けない場合と合わせて、ブロックに設けられ得る自由度は二通りある。この自由度の組合せによって、VLEGO には作業状態が大きく二つあり、各々独立作業状態と協調作業状態と呼ぶ。作業状態は両手に把持するブロック間の距離に応じて、この二状態を動的に遷移する。作業状態に応じてブロックの位置や姿勢は離散的に制約される。この離散的配置制約は VLEGO の大きな特徴の一つであり、これにより意志通りのブロックの操作を容易にする。本節では、二種類の操作自由度について簡単に述べた後、二つの作業状態について詳しく述べる。

### 3.6.1 二種類のブロック操作自由度

ブロックを把持した場合の操作自由度は, 後述の VLEGO の二つの作業状態に合わせて次の二種類を遷移する.

**6DOF** (6 Degrees Of Freedom): 位置および姿勢について何ら制約を加えない.  
6 自由度の値はすべて連続的に変化する (図 3.5左).

**4DOFC** (4 Degrees Of Freedom with Constraints): 位置については仮想空間に 1cm 間隔で設けられた格子点にのみ配置可能とし, 姿勢については水平方向 90 度単位の 4 通りのみ可能とする (図 3.5右). VLEGO では, この 4DOFC によって正確な仮想物体の操作を容易にしている.

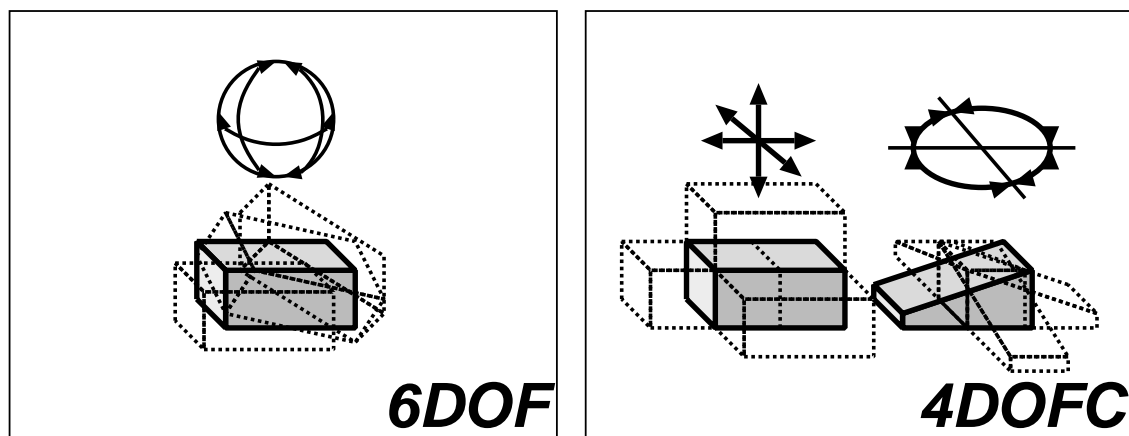


図 3.5 把持操作の自由度の二状態

### 3.6.2 二種類の作業状態

VLEGO では自然な両手操作を支援するため, 両手に把持したブロック同士の距離に基づき次の二つの作業状態を動的に遷移する.

**独立作業状態:** ブロックを片手でのみ把持している場合,あるいは両手で把持しているブロックが互いに十分離れている場合(図 3.6, a-1., a-2.). このとき,ユーザは両手のブロックを接合する意志がなく,仮想空間に置かれている他の物体と位置合わせする意志があるものとみなす. 従って,この場合把持しているブロックは,仮想空間全体のワールド座標に対して 4DOFC で操作可能とした. 両手ともにブロックを把持し,それらが十分に接近すると滑らかに協調作業状態に移行する(図 3.6, a-1.→b-1.).

**協調作業状態:** 両手で各々ブロックを把持しており,それらが十分接近している場合(図 3.6, b-1., b-2.). このとき,ユーザは両ブロックを互いに接合する意志があるものとみなす. 従ってこの場合,自由な操作と位置合わせの容易性を両立するために,先に把持した物体(ベース)は 6DOF,他方(ワーク)はベースを基準とする動的な座標系において 4DOFC で操作可能とした. 一方のブロックを解放するか,両ブロックが互いに十分離れると,ブロックは 500ms 程度の補完アニメーションを伴ってワールド座標に対する 4DOFC で位置や姿勢を整えられ,独立作業状態に移行する(図 3.6, b-2.→a-2.).

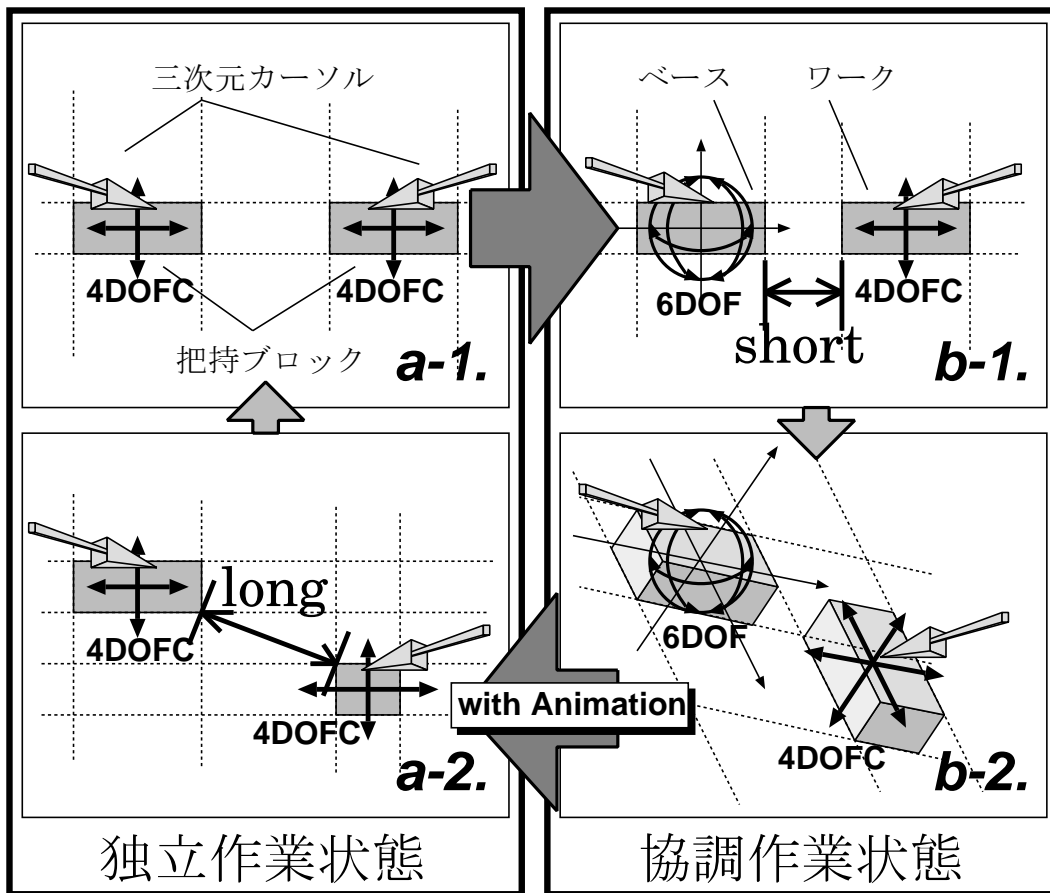


図 3.6 VLEGO の作業状態の遷移

### 3.7 ブロック間の干渉回避

VLEGO は、位置合わせしようとするブロック同士の干渉を検出し、干渉を回避するように把持しているブロックの位置を調節する。このブロック間の干渉回避は、離散的配置制約と並ぶ VLEGO の大きな特徴である。本節では、ブロック間の干渉回避の詳細について述べる。

干渉の検出対象は、作業状態によって異なる。各作業状態における干渉の検出対象は以下の通りである。

**独立作業状態の場合:** この場合、把持されたブロックはそれ以外のブロックと位



置合わせがされるとみなしているので、把持されたブロックと把持されていないブロックとの間でのみ干渉が調べられる。このとき、両手共にブロックを把持しそれらのブロック同士が干渉を起こすことがなく、干渉の起こっていない把持されていないブロック同士が、自然に干渉を起こすこともない。従って、把持ブロックと非把持ブロック間でのみ干渉が調べられれば、新たに起こる干渉をすべて検出できる。

**協調作業状態の場合:** この場合、把持された二ブロック間でのみ干渉が調べられ、把持されていないブロックとの間の干渉は計算量削減のため無視される。

このように検出対象を絞ることにより、検出対象となるブロック同士はすべて既に 4DOFC により制約を受けた位置関係にあると仮定できる。この仮定を利用して干渉の検出は次のようになされる。

**干渉検出:** 把持ブロックのバウンディングボックス領域と、検出対象のバウンディングボックス領域の干渉を調べる。干渉の起こっていない場合はそれ以上調査せず、干渉の起こっている場合はさらに両ブロックの各プリミティブの領域同士の干渉を調査する。これを全検出対象に対して行なう。

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. 入力応答ループにおける前回の把持ブロックの位置を  $O$ 、新たに更新するブロック位置を  $A$ 、現在の三次元カーソル位置を 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 近付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. 決定値に従って把持されているブロックを表示する. このとき, 三次元カーソルの先端と把持ブロックの間に直線を表示し, 干渉回避によるカーソルと把持ブロックの位置ズレを明示する.
5. 入力応答ループの他の処理を行ない,  $A$  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, 他のブロックの面に沿って移動させるなどの自然な操作が実現できる. 図 3.7 に干渉回避の例を示す. はじめ a. では干渉は起こっていない. b. では把持ブロックは右奥 b-3 に移動しようとしたが, 途中で他のブロック b-2 と干渉を起こしたため, 干渉回避の結果 b-1 に移動した. c. ではさらに把持ブロックは c-4 に移動しようとしたが c-2, c-3 との干渉回避の結果, c-1 に引っかかった. d. ではカーソルを上を移動したため把持ブロックは矢印に示すように移動することができた. なお, 複製など必然的に干渉を起こす操作に対処するため, 把持ブロックが一旦干渉を起こすと, その干渉が解消されるまで 4DOFC の範囲で自由に操作できるようにしている. 4.2 節で検証するように, ブロック間の干渉回避は, 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.

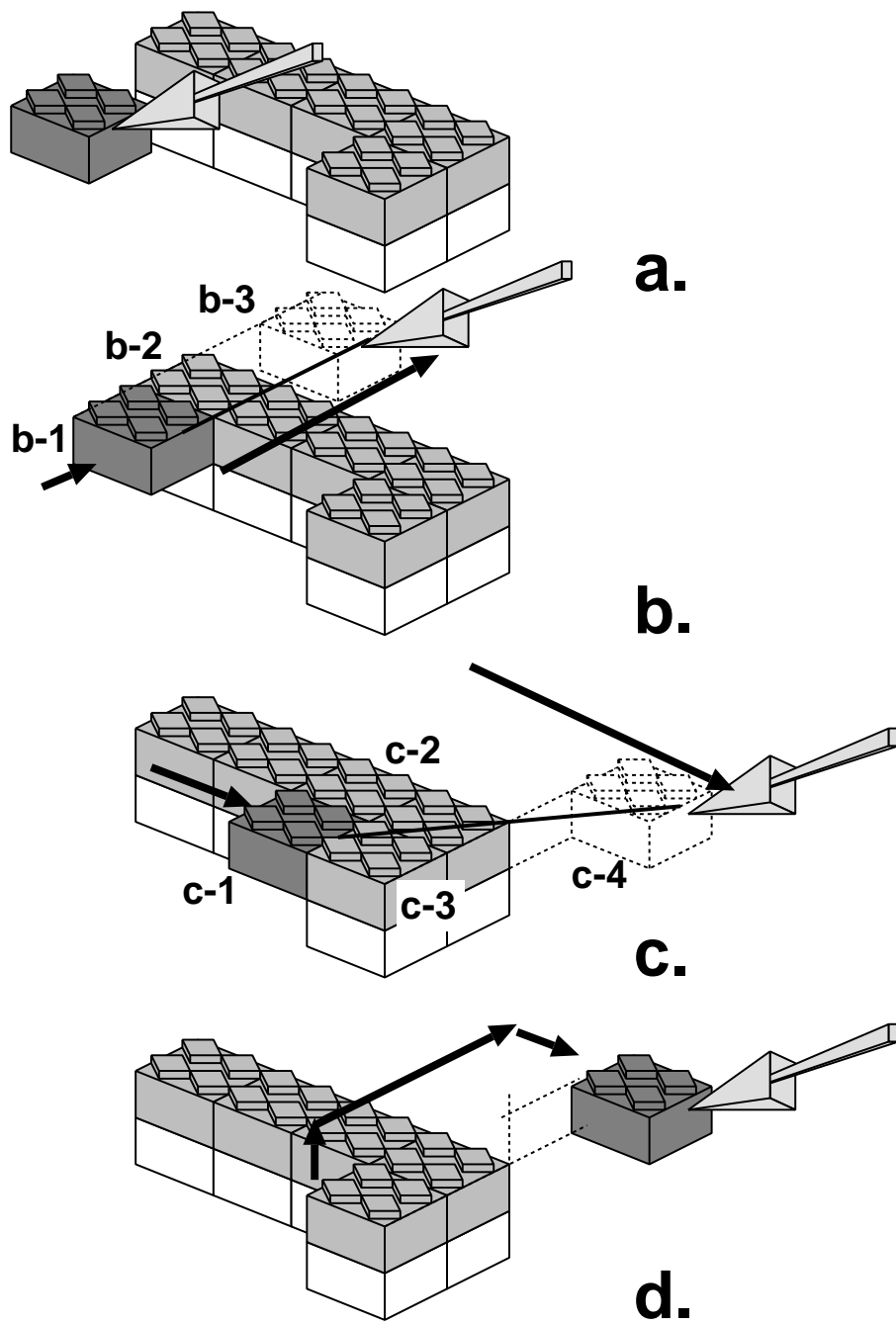


図 3.7 干渉回避の例

## 3.8 両手操作を交えた形状生成

本節では表 3.1 に挙げた VLEGO の機能のうち, 3.5 節で述べた片手によって行なえる基本機能以外の, 両手によって行なう機能について述べる. 両手操作の支援は, 離散的配置制約や干渉回避と並ぶ VLEGO の大きな特徴である. 両手による空間操作は 2.2 節で述べたように直観的かつ効率的とされ, VLEGO の形状生成を分かりやすく能率のよいものになっている. 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 [33, 34, 35].

### 3.8.1 ブロックの接合

VLEGO では, ブロック玩具と同様に, 二つのプリミティブの上面と下面を接合することができる. 接合の方法は作業状態によって若干異なる. 以下に各々の場合を説明する.

**独立作業状態の場合:** この場合, 片手操作によって左右独立に接合可能である.

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 (すなわち上下に接している) 場合, 把持している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.

**協調作業状態の場合:** この場合, 両手の協調操作によって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ワークのブロックが他方が把持しているベースの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 3.8, 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, 独立作業状態に移行する (図 3.8, D).

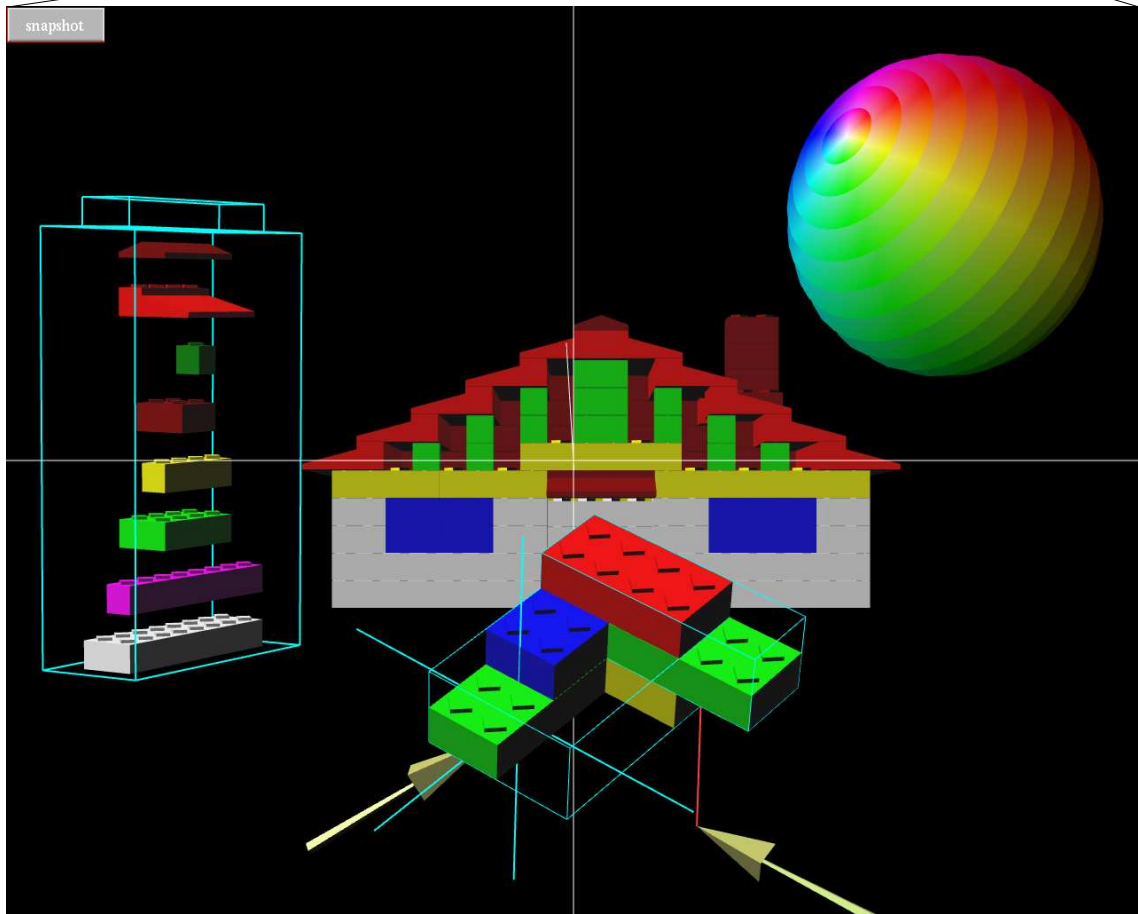
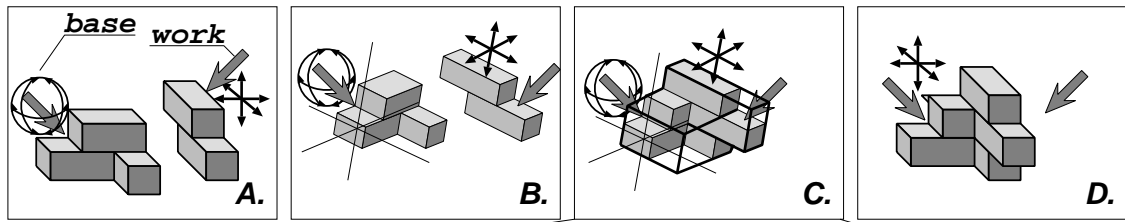


図 3.8 VLEGO における接合作業例

### 3.8.2 ブロックの分割

接合されたブロックは次の二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. プリミティブが取り外されると協調作業状態に移行する.

**分断:** カーソ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. 片手でブロック (ベース) を把持し (図 3.9, A→B), 他方 (ワーク) は何も選択していない位置で把持しようとする, ワーク側の三次元カーソルの形状は半透明の正方平面 (切断平面) となる (図 3.9, B→C). このとき例外的にブロック, 切断平面ともに 6DOF で操作可能となる. 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 3.9, C→D). Zhai らによる *Silk Cursor* に類似して, 切断平面は半透明であるため把持物体との相対位置の把握を促進すると考えられる [36]. 分断が起こると, ベースのカーソ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仮想空間に置かれる. 両者の位置および姿勢は 500ms 程度のアニメーションで補完され 4DOFC で整えられる.

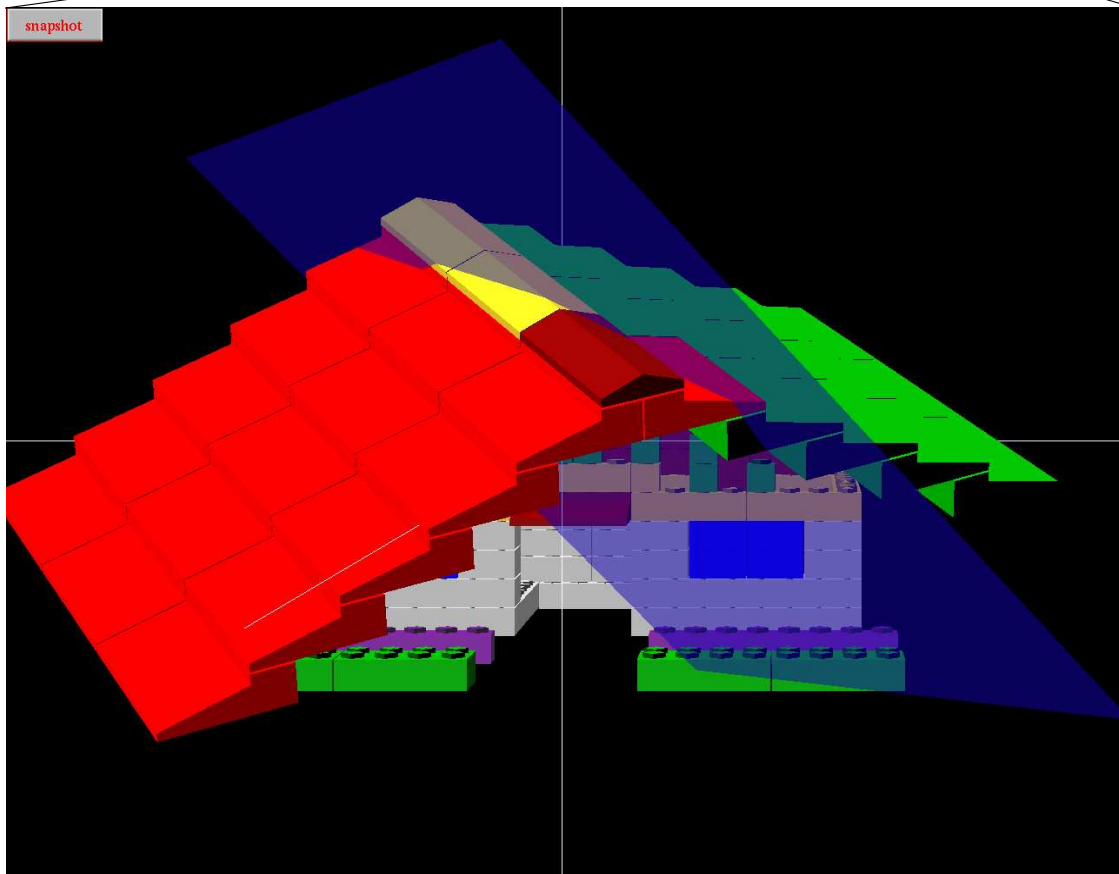
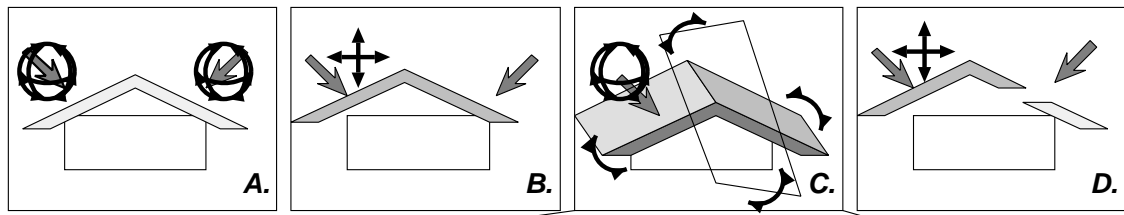


図 3.9 VLEGO における分断作業例

### 3.8.3 プリミティブの拡大縮小

VLEGO 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。両手で同一のプリミティブを把持すると、両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 3.10)。プリミティブ上面に設けた突起も上面の変化に応じて増減するが、プリミティブが自身の突起群の範囲情報のみを持つことにより、データ量の爆発やデータ変更の遅延を防ぐ。変更・追加したプリミティブはデータベースに登録され、再利用が可能である。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。



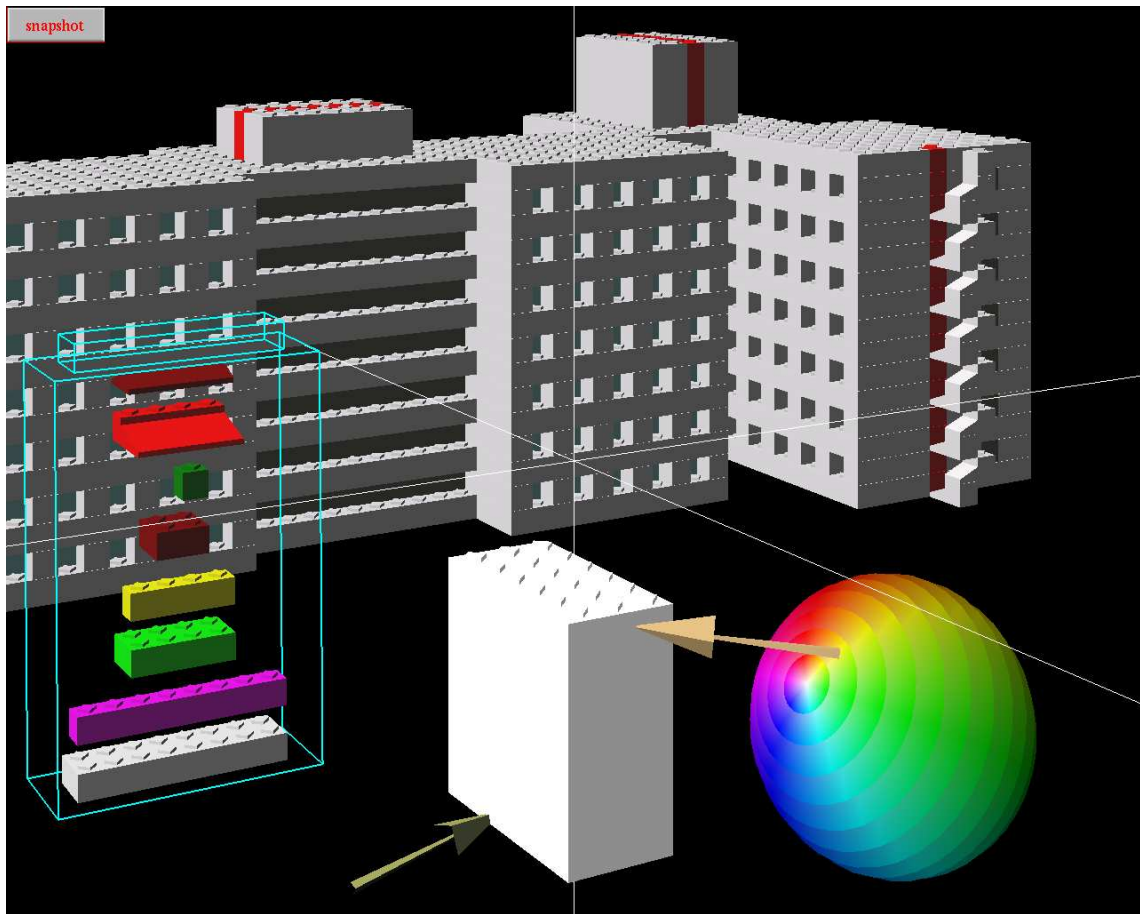


図 3.10 プリミティブ拡大縮小の様子

#### 3.8.4 プリミティブの彩色

VLEGO 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、パレットボールを重ねて立方体のワイヤフレームが表示される (図 3.11, 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 3.11, c. であり、パレットボール上から色を選択する例が図

3.11, 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 3.11, e.)。この時、そのスイッチかパレットボールを解放するまで、カーソル先端が指す各プリミティブを彩色できる (図 3.11, f.→h.)。

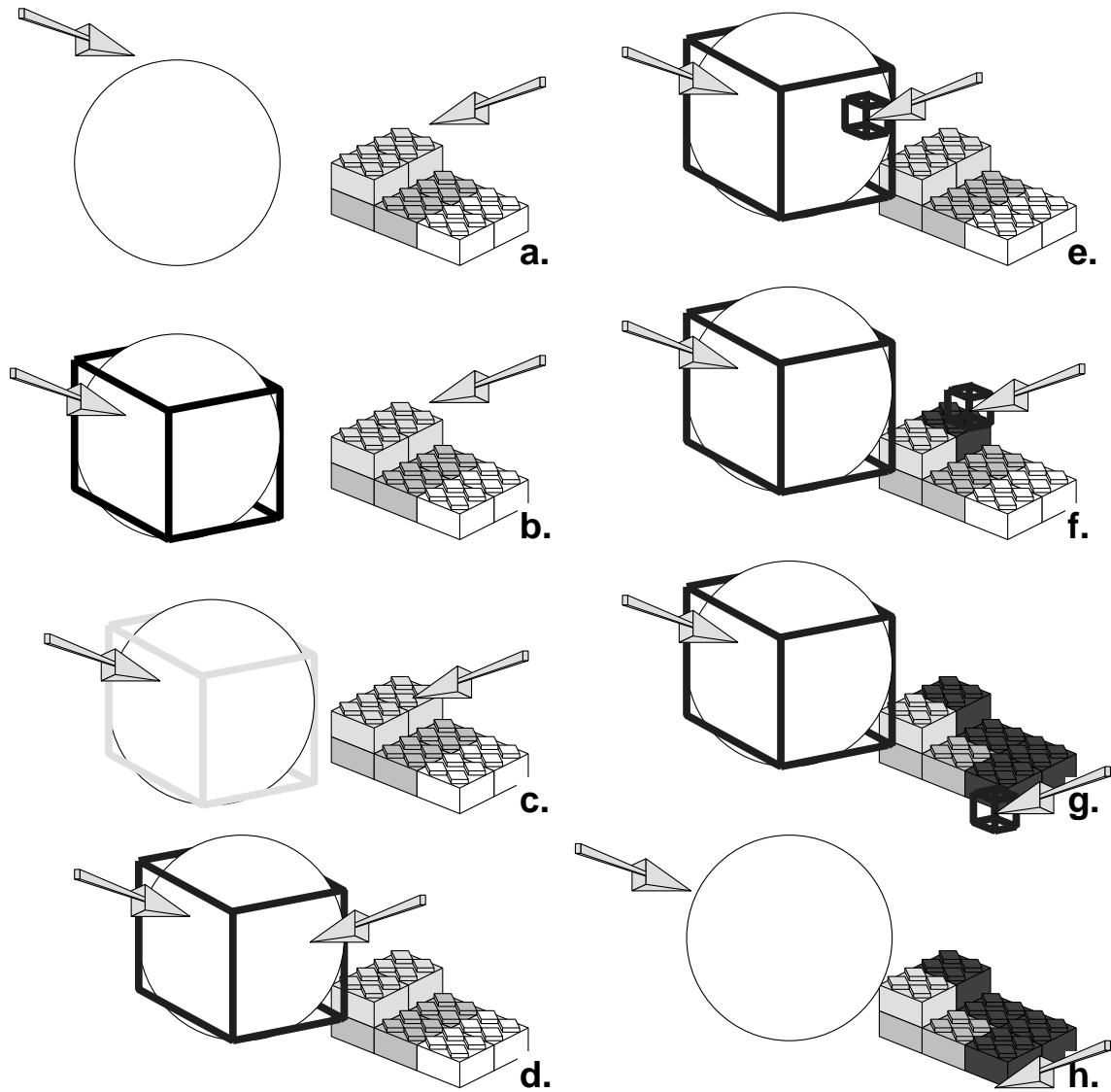


図 3.11 プリミティブ彩色の様子

## 4. 評価実験

本章では, VLEGO が提供する幾つかの特長について, それらが作業効率や操作感に与える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る. まず 4.1 節で両手による空間操作の有効性を検証する実験について述べ, 次に 4.2 節でブロック間の干渉回避の有効性を検証する実験について述べる.

### 4.1 両手操作の有効性を検証する評価実験

本節では, VLEGO が提供する両手による空間操作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る [37]. VLEGO では, 各操作に応じて仮想空間内の位置を選択することがあらゆる作業の基本となる. そこで, VLEGO の選択操作に限定して, 選択操作における両手操作の有効性を検証することとし, 片手のみを用いた場合と比較する.

#### 4.1.1 実験手法

本実験では, 図 4.1 のように 72 個のプリミティブが直方体をくり抜いた酒罎型に接合されたブロック (タスクブロック) を, 以下の 1. ~ 3. の要領で全て白色にするタスクを設定した. VLEGO は実験用に調整され, 表 3.1 のすべての両手操作と複製, 消去機能を無効化し, 仮想空間には座標軸とタスクブロック, 二つの三次元カーソルのみを表示した.

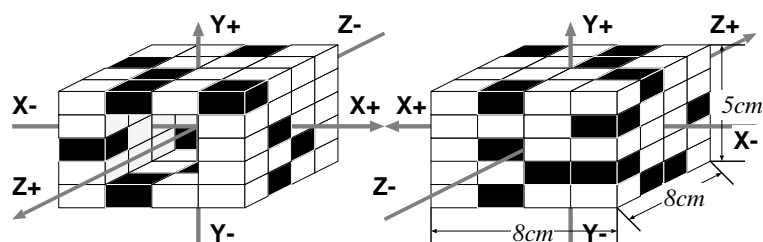


図 4.1 タスクブロックの例

1. 各試行の初期状態では、タスクブロックは図 4.1の原点が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 プリミティブ中ランダムな位置の 18 個が赤, 残りが白となっている. 初期位置で, 被験者は視点を上下左右に移動してタスクブロックの全プリミティブを観察できる.
2. 被験者は三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プリミティブ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, そのプリミティブの色が白なら赤, 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.

このタスクを, 図 4.2に示す三通りの操作方法について行ない, タスクブロックが提示されてからすべてのプリミティブが白色となるまでの時間であるタスク達成時間を比較する. 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.

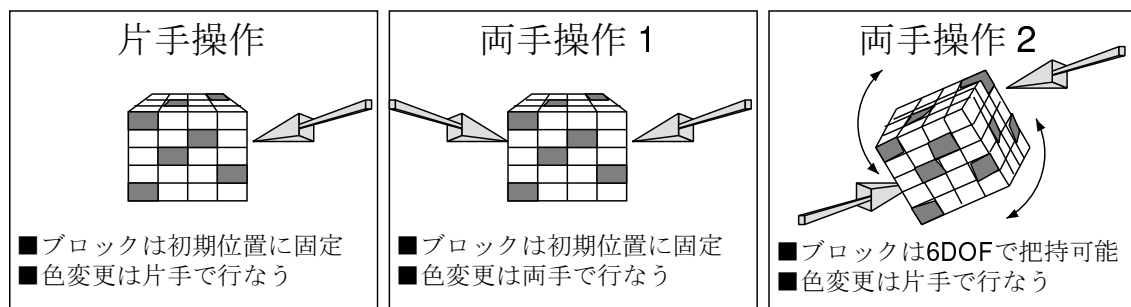


図 4.2 実験における操作方法

#### 4.1.2 結果と考察

VLEGO の操作に熟練した者から全くの初心者まで, 被験者 10 名について実験を行なった. 各操作方法でのタスク達成時間を全被験者について平均し, 分散分析を行なった結果を表 4.1に示す ( $\alpha = 0.05$ ). 以下, この結果について考察する.

両手操作1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。これは両手を並列に操作できたことによる。タスクの平均達成時間が半減しないのは、(1) 人間は二箇所以上同時に注目できないので、三次元カーソルの位置合わせを左右並列に行なえないこと、(2) 利き手に比べて非利き手は正確に動かさないことによると考えられる。

両手操作2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、目的ブロック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) この双方を並列に行なえることによると考えられる。

以上より、VLEGO の選択操作に関して両手操作の有効性を示せたと考える。VLEGO が支援する両手操作全般を調べてはいないが、あらゆる操作の基本となる仮想空間位置の選択操作についての有効性が確認できたことにより、VLEGO の両手操作全般についても一定の有効性が明らかになった。また、プリミティブの色を白から赤へ変更した誤り操作総数を理想的な場合の最短必要操作数 (= 18 × 試行数) で割った値を誤り率とすると、誤り率は片手操作に比べて両手操作1では改善せず、両手操作2では若干の改善傾向が見られた。

被験者の多くは両手操作2(協調操作)を最も使い良いと報告した。仮想物体を任意の視点から観察しつつ、操作を行なえる両手協調操作は、タスク達成時間の改善率以上に使い勝手が改善されていると言え、特に形状生成の発想支援に有効であると思われる。

表 4.1 操作方法間の比較結果

操作方法	平均タスク 達成時間 (秒)	分散	誤り率	タスク達成時間に関する有意差	
				対 片手操作	対 両手操作 1
片手操作	31.7	11.40	0.096	-	あり
両手操作 1	27.1	9.29	0.102	あり	-
両手操作 2	26.8	14.41	0.065	あり	なし

## 4.2 干渉検出の有効性を検証する評価実験

本章では、VLEGO が提供する干渉検出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る [38]. 本実験では、干渉の判定結果の反映方法の違いによる仮想物体の組み立て作業の効率の違いを比較する.

### 4.2.1 実験手法

VLEGO では、干渉の判定結果をユーザに反映する方法として、接合可能時に視覚的フィードバックを与える方法と、干渉回避のために位置補正を行なう方法を共に実装している. そこで、干渉検出の有効性を検証するために、表 4.2 に示すように、視覚的フィードバックの有無と干渉回避の有無による 4 通りの組合せ (N, S, V, SV) について、それぞれの反映方法の違いによる組み立て作業の効率を比較することを考えた.

表 4.2 の 4 通りの反映方法による作業効率を比較するための組み立て作業として、以下の 1. ~ 3. に説明するタスクを設定した.

1. 各試行の初期状態を図 4.3 に示す. メニューボックスは出現させずブロックの消去や生成を不可能とし、複製機能も無効化する.
2. 被験者は利き手のみを用いて、全体が一つの直方体となるように手前側の 3 色 × 9 個のブロックを一つずつ奥側の土台に積んでいく. 接合したブロックを分離、修正する場合のみ、両手の協調操作を用いる. ブロックの積む順序や色は任意である.

表 4.2 干渉判定結果の反映方法

方法	視覚的フィードバック	干渉回避
N	×	×
S	×	○
V	○	×
SV	○	○

3. 最終的に図 4.4 のように、全体が一つの直方体となれば完成である。

次に、干渉の判定結果の反映方法間で対比すべき情報を決定するために、ブロックの組み立て作業をサブタスクに細分化して考察した。ブロックの組み立て作業は、最初に把持するブロックを決定し、そのブロックを三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) 選択したブロックを把持し、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) 把持したブロック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) 解放したブロックが目的位置に正しく解放されたことを確認した後、次に把持するブロックを決定し、そのブロックを三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 種類の情報を記録した。

**把持回数:** タスク達成までにブロックを把持した回数,

**総時間:** 一つ目のブロックを把持してから最後のブロック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、ブロックを把持していた時間,

**総接合時間:** ブロックを把持していた時間のうち、把持しているブロックが他のブロック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こととした。被験者は練習試行として SV を一回行ない、その後 N, S, V, SV の順に 3 周、計 12 回の本試行を行なう。

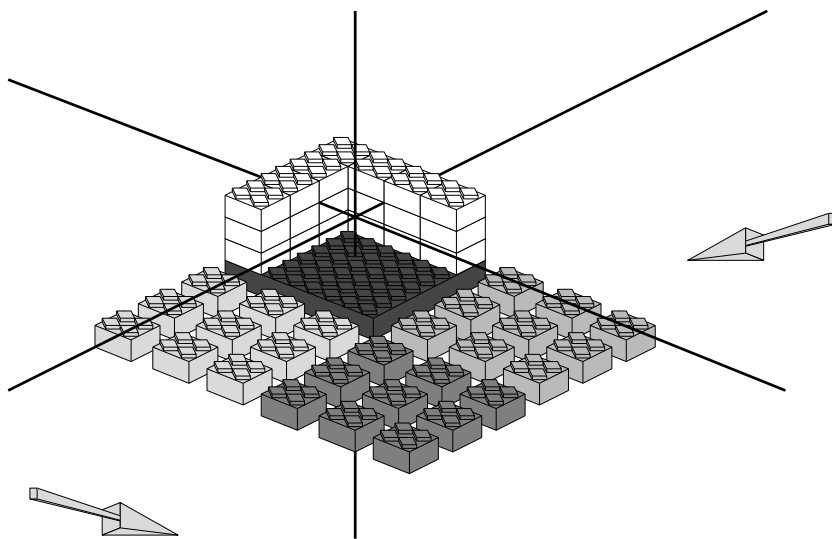


図 4.3 各試行の初期状態

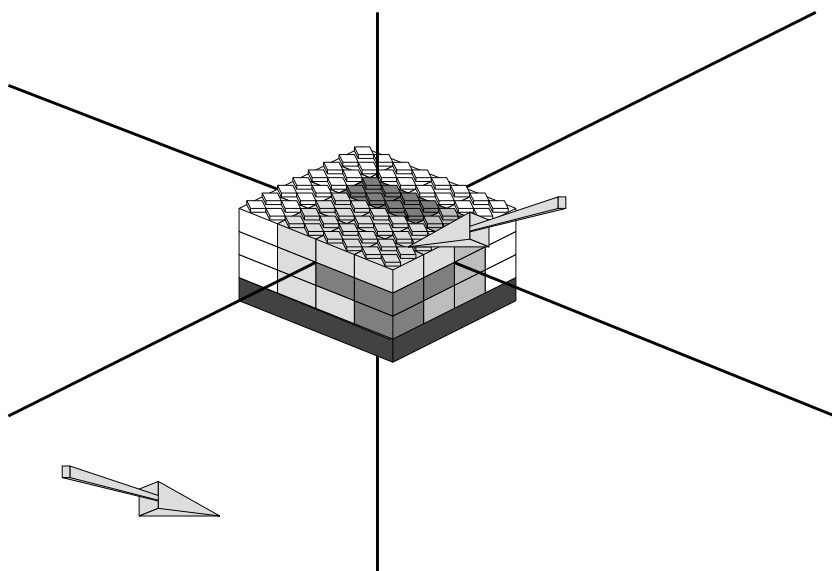


図 4.4 試行の完成例



#### 4.2.2 結果と考察

VLEGO の操作に熟練した者から全くの初心者まで, 被験者 11 名に対し実験を行なった. 以下, 実験結果について考察する. 干渉判定結果の各反映方法について, 把持回数と各時間指標を全被験者で平均した結果を表 4.3 に示す.

**把持回数による比較** 把持回数について分散分析 ( $p = 0.05$ , 以下の分散分析についても同様) を行なったところ, 視覚的フィードバックの有無には差がなく, 干渉回避がある場合はない場合よりも回数が少ないという結果を得た (表 4.4).

干渉回避がある場合, 把持回数が減少したことから, 接合間違いが減少したと言える. 接合間違いが減少した理由は以下のように考えられる. まず観察によれば, 接合間違いの大半はブロックの解放時に位置がずれることによる. さらに, 干渉回避がありブロックが他のブロックに接している場合, 接しているブロック方向に三次元カーソルを移動しても把持しているブロックは位置を変えない. 逆にいえばブロック位置を保つための三次元カーソルの許容移動範囲が広がる. 従ってその位置でブロックを解放した場合に位置がずれる可能性が減少するため接合間違い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ブロックを接合しやすくなっているといえる. 一方, 視覚的フィードバックによる影響が認められなかった理由は次のように考えられる. VLEGO ではブロック同士の相対位置が, 突起などのブロックの形状や立体視の提供などによって視認しやすいため, ブロックが他のブロックと接合可能か否かを容易に把握できる. 従って, 視覚的フィードバック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. なお, 正確な接合をさらに支援する手法として, スイッチ解放時以前の三次元カーソル位置もしくは, 解放時以前のある期間の三次元カーソル位置の平均などを解放位置とする方法が考えられ, 今後検討を要する.

**接合一回当りの接合時間による比較** 干渉判定結果を被験者に反映することにより, ブロックの接合位置の確認に要する負担, すなわち  $T_{adjust}$  が減少し, ブロックの接合一回当りの作業負担が軽減することが期待できる. また本タスクでは接合を伴わずにブロックの移動だけを行なうことは稀であった. そこで把持回数を接

表 4.3 各指標の全被験者による平均

	N	S	V	SV
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 4.4 典型的分散分析結果

(良) VS = S < V = N (悪)
------------------------

合回数とみなして、 $T_{adjust}$ を把持回数で割り、これを各反映方法間で比較することで、一回のブロック接合あたりの接合位置の確認の負担度を調べる。参考のために各反映方法について、表 4.3の各時間指標を把持回数で割った結果を表 4.5に示す。

各試行による一把持当りの $T_{adjust}$ を分散分析したところ、先の表 4.4と全く同様の結果を得た。この結果から、干渉回避によりブロックの接合位置の確認が容易になっていると言える。この理由は、通常は把持しているブロック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ブロックが追随しなくなるため他のブロックに「当たった」ことを感じると報告した。

**各サブタスク作業時間の比較** 反映方法の違いによる、総時間に占める各時間指標の比を表 4.6に示す。干渉判定結果が直接反映される $T_{adjust}$ の、総時間に占める比は干渉回避の結果 35% から 32% ～ 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。

表 4.5 一把持当りの時間指標の全被験者による平均 (秒)

	N	S	V	SV
$T_{next}$ /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 4.6 各サブタスクの所要時間の総時間に対する比

	N	S	V	SV
$T_{next}$ /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

**被験者による主観評価** 各被験者に各自で最も操作感が良好であったものを 10 点として各反映方法を採点させた。採点結果の全被験者による平均を表 4.7 に示す。主観評価によれば、全員が干渉回避のあったものをなかったものより好んだ。また、視覚的フィードバックの有無による使用感の差について干渉回避の有無それぞれについて分類したところ、干渉回避のない場合は視覚的フィードバックが有効であると感じている被験者が多いことが分かった (表 4.8)。この結果により、定量的な違いを得るには至らなかったものの視覚的フィードバックが操作感の向上には寄与したと考えられる。

表 4.7 各提示方法の主観評価の被験者による平均 (10 段階評価)

N	S	V	SV
3.5	9.0	5.0	9.6

表 4.8 視覚的フィードバックの主観評価

$N > V$	$N = V$	$N < V$	$S > SV$	$S = SV$	$S < SV$
3 名	0 名	8 名	3 名	3 名	5 名

## 5. VLEGO の共有仮想空間への適用

本章では, 共有仮想空間を利用した協同設計の利点について触れた後, VLEGO を協同設計に対応させた場合のよりよい仮想物体協調操作補助手法の確立を目指して行なった二種類の実験について述べる [39].

### 5.1 共有仮想空間を利用した協同設計の特長と従来の研究

VLEGO のような没入型モデラは, 複数の利用者が仮想空間を共有して行なう協調作業を可能とすることにより一層有用となる. すなわち, 従来の協同作業において具体的三次元イメージを共有するためには, 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. 共有仮想空間を用いる利点として, 竹村らは (1) 操作者間の距離を克服した遠隔協同作業が可能, (2) 重量, 摩擦などの物理量が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 [39, 40]. 従来の研究としては, 二次元画面上で三次元形状の協同設計を支援する Teledesign [41] や Co-CAD [42], 共有仮想空間を利用して遠隔通信や遠隔会議による問題解決の場を提供する DIVE [43] などがあるが, 共有仮想空間を利用して協同設計を支援するものは知られていない.

### 5.2 VLEGO を利用した仮想物体協調操作補助手法の確立

VLEGO を協同設計に応用することを考えた場合, 複数の利用者によって円滑にブロックの協調操作が行なわれるような仮想物体の操作補助手法を確立しなければならない. 佐藤らや岩田らは, 共有仮想空間において力覚提示を利用した仮想物体操作補助を試みているが [44, 45], VLEGO では離散的配置制約や干渉回避, あるいは視覚的フィードバックといった力覚提示を行なわない仮想物体操作補助手法を両手操作に対して提供している. そこで, VLEGO の両手操作を二人がそれぞれ片手によって実行することにより, VLEGO の仮想物体操作補助手法が複数の利用者間の協調作業に対してどの程度有効であるかを検証し, 補助手法のさ

らなる改善を図るための評価実験を行なった。表示は, Onyx RE2 一台の出力する映像を 40 インチモニタ二台に投影して行なった。このため, 両操作者同時に視点追従を行なうことができない。従って今回は, 操作者が自然に座った位置に合うように視点を固定し, 両眼立体視のみを提示することとした。この構成で, 各操作者はディスプレイから 80cm 離れた視点で水平方向に最大視野角約 54 度を確保することができる。実験を行なった協調作業は, (1) 仮想物体の受渡し, (2) 仮想物体の接合, の二操作であった。以下, それぞれについて順に述べる。

### 5.3 受渡し操作に関する評価実験: 実験 1

計算機により協調作業を行なう場合, 通常一つの操作対象は同時には一人の操作者のみによって操作可能である。仮想物体の操作においても操作権の管理が重要であり, 操作者間で操作権の委譲が円滑に行なえるようにすべきである。特に仮想物体の受渡し操作は仮想物体の協調操作にとって基本的であり, 操作権の委譲を本質的に伴う作業であるため, 仮想物体の円滑な受渡しを実現する意味は大きい。本実験の目的は, VLEGO が仮想物体の選択や把持において提供しているような視覚的フィードバックを応用して受渡し操作に適用し, 力覚を提示せずに円滑な受渡しが行なえるような補助手法について検討することである。

#### 5.3.1 実験手法

二人の操作者  $A, B$  間で一つの仮想物体  $O$  を交互に受渡すタスクを次のように設定した。図 5.1 に示すように, 仮想空間には二つの三次元カーソル, 左右二つのプレート  $P_A, P_B$ , 仮想物体  $O$ , 受渡し場所を示すワイヤフレームの立方体  $HA$  がある。また, 座標軸やその他の仮想物体は描かれない。操作者に許される操作は  $O$  の選択, 把持, 解放のみである。なお,  $O$  と  $P_A, P_B$  間の干渉回避は行なわれる。

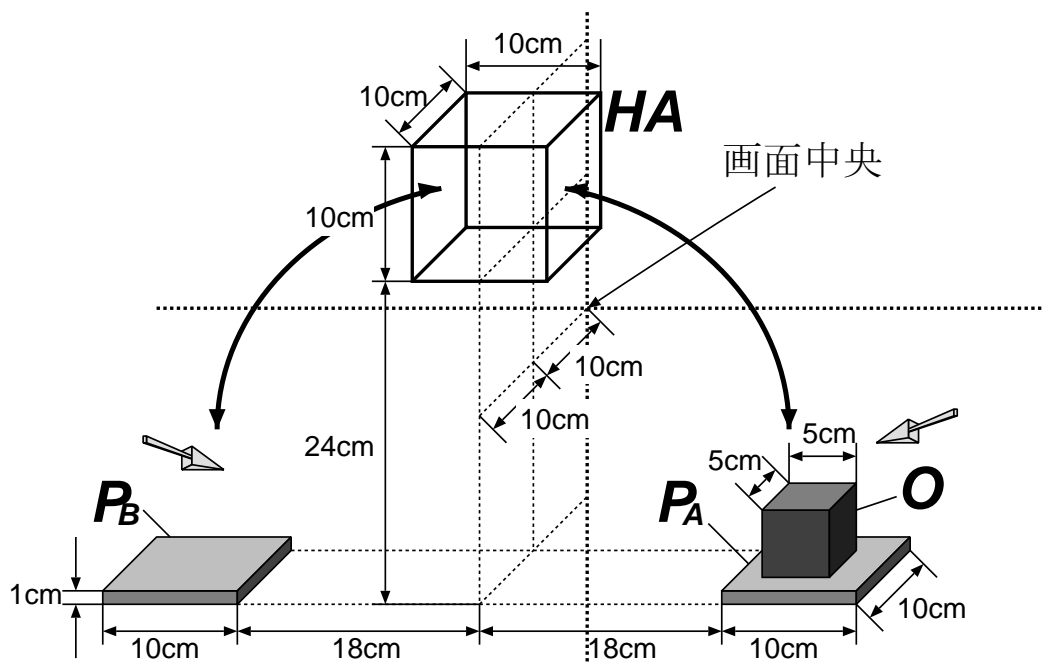


図 5.1 実験 1 の配置

1. 一試行の初期状態で、両操作者は何も把持していない。O は  $P_A$  に乗っている。
2. A は O を選択、把持して HA 内に移動する。
3. A と B は HA 内で協調して O の受渡しを行なう。受渡しは B が O を把持した後 A が解放することによって成立する。B が O を把持する以前に A が解放すると、O は  $P_A$  上に戻り再び 2. から行なわねばならないとする。
4. 受渡しの後、B は把持した O を  $P_B$  に置き、解放する。
5. 一試行の終了状態で、両操作者は何も把持していない。O は  $P_B$  に乗っている。
6. A と B の役割を入れ換えて 1. 以降を繰り返す。

このタスクを,  $O$  の把持に関して以下の4通りの視覚的フィードバックで行なう。フィードバックの様子を図5.2に示す。なお, タスク達成時間は一方が把持した瞬間から受渡しを行ない他方が解放する瞬間までとする。

- (a) 視覚的フィードバックなし。
- (b) 一人以上による把持でハイライトする。
- (c) 二人による把持でハイライトする。
- (d) 一人による把持でハイライトし, 二人による把持でさらにハイライトする。

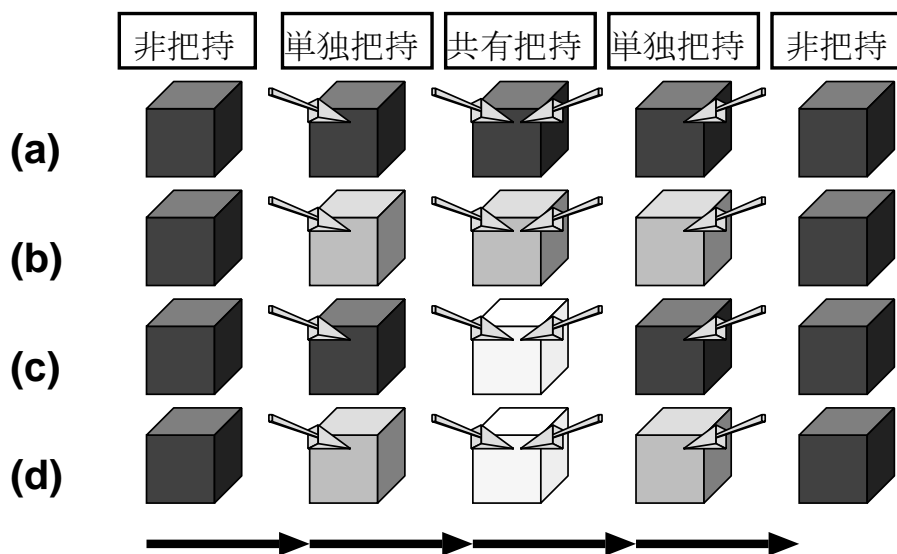


図 5.2 4通りの視覚的フィードバック

### 5.3.2 結果と考察

VLEGO の操作に熟練した被験者 2 名に対し, 練習試行を行なった後に本試行を各条件で各々60 回行なった。以下では実験結果について考察する。視覚的フィードバックの各手法について, 全 60 試行, 後半 30 試行, および受渡しに成功した試行のみ, の三種類の試行群にわけて分析した。これらの試行群における平均タスク達成時間と分散を表 5.1 に, 平均誤り率を表 5.2 に, 両操作者が共に  $O$  を把持していた時間の平均を表 5.3 に各々示す。タスク達成時間について, 表 5.1 からすべ



ての場合で手法 (a) が最も長く, ほとんどの場合について手法 (d) が最も短いことがわかる. また, 表 5.2 から, 視覚的フィードバックを (a) から (d) へ豊富に提供するほど誤り率が 37% から 13% へ(後半 30 試行では 7% へ) 顕著に減少していることが分かる. 一方, 平均共有把持時間は表 5.3 の通り, 手法 (c), (d) において共有把持が視覚的にフィードバックされる場合に長くなっている. これらの結果について, 次のような考察を行なうことができる.

- 視覚的フィードバックの少ない場合に, 共有把持時間が短くなり誤り率が增大するのは, 受渡しを反復するリズムに従って, 相手の把持や解放を推測しながら行なうためであると考えられる.
- 視覚的フィードバックの少ない場合に, 単独把持時間が長くなるのは, 受渡しに成功したことを自分が操作できているか否かによって判別し確認する必要があるためであると考えられる.
- 視覚的フィードバックの豊富な場合に, 共有把持時間が長くなりタスク達成時間が短くなるのはハイライトによるフィードバックによって正確に受渡しを確認し, 単独把持時は迷わず作業が行なえるためであると考えられる.

表 5.1 平均受渡しタスク達成時間 (秒 (分散))

	(a)	(b)	(c)	(d)
全 60 試行	4.39 (11.9)	3.45 (3.68)	3.17 (3.38)	3.02 (2.2)
後半 30 試行	3.98 (5.14)	3.47 (2.72)	3.19 (3.21)	2.87 (1.46)
成功試行のみ	2.87 (0.82)	2.77 (0.66)	2.46 (0.61)	2.48 (0.30)

表 5.2 平均誤り率

	(a)	(b)	(c)	(d)
全 60 試行	0.37	0.23	0.25	0.13
後半 30 試行	0.30	0.26	0.20	0.07

表 5.3 平均共有把持時間 (秒)

	(a)	(b)	(c)	(d)
全 60 試行	0.29	0.28	0.41	0.46
後半 30 試行	0.30	0.30	0.43	0.49

## 5.4 接合操作に関する評価実験: 実験 2

一人の操作者が両手によって協調操作を行なう場合は、自分の両手の位置を体制感覚として捉えることができ、両手共に自分の意志で操作できるために直観的であり効率もよい。これに対して、複数の操作者により協調作業を行なう場合は相手の手について自分の体制感覚が利用できない上、操作者間の意志の疎通を潤滑に行なうことも困難である。従って協調作業においては、単純な作業で目的や方法を共通に理解している場合であっても作業の遂行が困難に成り得るため、作業を容易に遂行できるよう仮想物体の操作補助を適切に行なう必要がある。特に、VLEGO を用いた共同形状生成では、円滑にブロックの協調接合や協調分割が行なえる操作性を提供する必要がある。本実験の目的は、VLEGO を用いて複数の操作者が協調して接合を行なう場合、どのような仮想物体操作補助手法が有効であるかを検討することである。

### 5.4.1 実験手法

二人の操作者  $A, B$  が各々一つずつ仮想物体  $O_A, O_B$  を把持し, 接合するタスクを次のように設定した. 図 5.3 に示すように仮想空間には二つの三次元カーソルと仮想物体  $O_A, O_B$  のみが示され, 座標軸やその他の仮想物体は描かれない. 操作者に許される操作は  $O$  の選択, 把持, 解放または解放に伴う接合のみであり, 各操作者は視点追従の行なわれない両眼立体視を行なう.

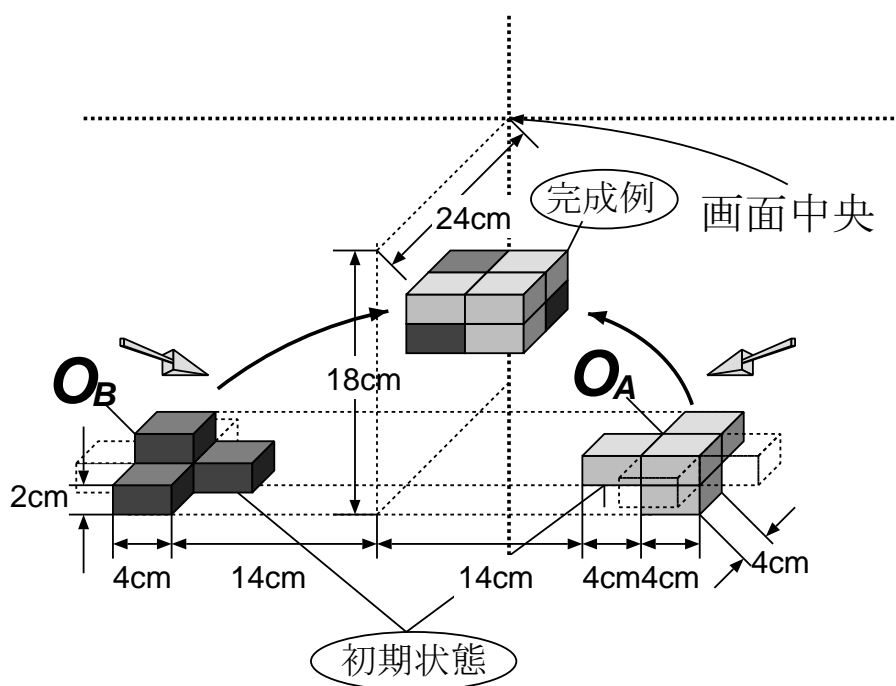


図 5.3 実験 2 の配置

1. 一試行の初期状態で, 両操作者は何も把持していない.  $O_A, O_B$  は各々画面左右の定位置に浮かんでおり, それらの姿勢は試行毎に垂直軸回りに 90 度ずつ異なる  $O_A, O_B$  各々 4 通りの計 16 通りに変化する.
2.  $A$  と  $B$  は各々  $O_A, O_B$  を把持する.

3.  $A$  と  $B$  は各々  $O_A, O_B$  を互いに近付け, どちらか一方が仮想物体を解放して接合する. 接合不可能な位置で解放し, 接合しなかった場合は再び把持して接合を試みる.
4. 他方は接合を確認して, 接合した仮想物体を解放する.

このタスクを, 以下の 4 通りの操作補助で行なう. なお, タスク達成時間はいずれかの仮想物体が初めて把持された瞬間から, 最後に接合した仮想物体が解放される瞬間までとする. また, 図 5.3 の完成例に示すように  $O_A, O_B$  がすき間なく接合された場合を正しい接合とみなす.

- (a) 操作補助なし. 両仮想物体は独立して 6DOF で操作できる.
- (b) 二人目が把持する仮想物体 (ワーク) は一人目が把持する仮想物体 (ベース) に対し 4DOFC で操作できる.
- (c) 両仮想物体は 6DOF で操作できるが, ワークはベースに対し干渉回避を行なう.
- (d) ワークはベースに対し干渉回避を伴って 4DOFC で操作できる.

ただし, 接合可能性や干渉状態は (a)~(d) のいずれの場合も内部でワークを 4DOFC で整えて判定する. また, 実際に仮想物体を接合する場合も 4DOFC で整えた後に接合する.

#### 5.4.2 結果と考察

被験者は受渡し操作に関する実験と同じ 2 名であり, 16 通りの初期状態を 4 度ずつ, 計 64 試行を各条件について行なった. 平均タスク達成時間と, 正しく接合できなかった割合である誤り率を表 5.4 に示す. 表 5.4 から, 平均タスク達成時間は手法 (a) が最も長く, 手法 (c) が最も短いことが分かる. また, 干渉回避のある場合 ((c), (d)) が, ない場合 ((a), (b)) に比べて誤り率が顕著に減少しており, 干渉回避は操作性を向上していると言える. 一方, 4DOFC の効果について, 干渉回避のない (a), (b) で比較した場合は操作性の向上や劣化は認められず, 干渉回避のある (c), (d) で比較した場合は操作性を劣化させていることが認められる. 4DOFC

には離散的配置制約によって位置合わせを容易にするという側面と,その反面,一方の仮想物体の姿勢が他方の仮想物体の姿勢に影響を与えるために目標の姿勢に合わせにくくなるという二つの側面がある. 4DOFC による補助のみではこれら二つの効果が拮抗して相殺され影響が出ず, 干渉回避のある場合では干渉回避自身が位置合わせを容易にする効果を持つために 4DOFC の負の効果がより強く現れたと見ることができる.

表 5.4 平均接合タスク達成時間 (秒) と誤り率

	(a)	(b)	(c)	(d)
平均タスク達成時間	7.69	7.66	3.99	5.09
誤り率	0.18	0.17	0.03	0.02

## 6. 考察

3.1節で VLEGO 開発の趣旨として掲げたことからは, (1) 実用的操作性に優れた没入型モデラの実装例を示す, (2) 仮想物体の操作支援手法を開発, 評価する, の二点であった. 本章では, 幾つかの実験結果や利用者の感想から明らかになった VLEGO の特性について, 二点の VLEGO 開発の趣旨に照らし合わせて考察する.

まず (1) について, VLEGO の提供する形状生成環境について考える. VLEGO は実装例の少ない没入型モデラの具現例としての意義を持つが, 2章で述べた没入型モデラの特長はどの程度実現されたであろうか. まず, 視認の直観性については概ね良好に達成されたと言えるが, 液晶シャッター式眼鏡を用いた場合に必然的に伴うゴースト(左右の画像の混合)の問題や, 両眼立体視の提示距離と焦点調節機能の不一致により近接像の立体視が困難である問題などによって, 立体感を得にくい場合があった. ゴーストについては HMD などを用いた左右の映像を完全に分離する方式により解消できる. 操作の直観性についても概ね良好に実現されたと言えるが, 良好に立体視が行なえる領域に合わせて, 実際の三次元入力装置の位置と表示する三次元カーソルの位置にオフセットをつけたために視覚と位置覚にズレがあり, 直観的操作性を若干損なったことが考えられる. また, 長時間使用した場合に物理的に上腕が疲弊する問題があった. 次に対話性について, 工数の削減という点は自然に実現されたと言えるが, リアルタイム性に問題がある場合が多かった. これは主に干渉検出, 干渉回避に要する計算遅延の影響であった. 干渉検出を行わない場合 50ms 程度であった応答遅延が, 干渉検出処理の結果数百 ms となることもあった. 最近の関連研究を踏まえ [46, 47, 48], VLEGO の干渉検出を高速化する必要がある.

次に (2) について, VLEGO では離散的配置制約, 干渉回避, 両手操作という三手法と幾つかの視覚的フィードバックを採り入れた. この中で, 干渉回避と両手操作に関しては各々作業効率や操作感覚を向上する効果のあったことを実験により確認した. 離散的配置制約は, 独立作業状態については定性的に位置合わせが容易になり操作性を改善することを確認した. 一方, 協調作業状態では, この位置合わせを容易にする効果とともに, 先に把持したブロック(ベース)が他方(ワーク)の姿勢に影響を与えるために, ワークの姿勢を制御しにくいという効果があり, 特

に共同作業では後者の効果による操作性の劣化が見られた。共同作業では、5章の実験結果からも示されたように、視覚的には双方ともに 6DOF でブロックを操作させ、内部的に 4DOFC で判定した干渉回避と組み合わせる手法が良いであろう。また、視覚的フィードバックについては定性的に操作感を向上する効果が見られた他、5章の実験では特定の操作の确实性を向上することを定量的に確認した。これらの結果は次のようにまとめられるが、仮想物体の操作支援手法に関して今後さらなる改良や評価を続けていく必要がある。

- 干渉回避は常に操作効率や操作感を顕著に向上する。
- 離散的配置制約は、離散配置を行なう基準座標系が固定されている、または基準座標系の動きが掌握できる場合は操作性を向上する。逆に、基準座標系の動きが予測できない場合は操作性を劣化させる。
- 両手による操作は操作効率を向上する。特に、両手により協調的に一つの操作対象を操作する場合は操作感も向上する。
- 視覚的フィードバックは操作感や操作の确实性を向上する。

現状の VLEGO は (1) の仮想空間の提示に若干の改善の余地が見られたものの、(2) の操作支援手法を導入した結果、概ね簡易で効率よく正確な形状生成が行なえる環境を提供できていると考える。例えば、図 3.10 に示した 368 個のプリミティブから成る本学情報棟校舎はおよそ 20 分で筆者が作成したが、これは VLEGO の形状生成環境が計算機を用いた他の形状生成環境に比べて操作の容易性に優れるのはもちろん、作業効率においても用途によっては実用的レベルにあることを示していると考ええる。大きさの異なる直方体やクサビ型のプリミティブを組み合わせていく方式である、現状の VLEGO の形状生成能力は限られたものであるが、短時間で三次元形状を生成し、その概観を把握したい場合には充分威力を発揮すると考える。このような用途としては、設計のプロトタイプ作成、積木やブロック玩具など三次元物体を扱った仮想的な遊具、あるいは教育用や訓練用アプリケーションなどが考えられる。

## 7. むすび

本論文では, 仮想環境での没入型形状モデラの利点と製作上の問題点について考察し, これを解決するために開発したブロック玩具に倣った手法を導入した仮想環境没入型モデラ VLEGO について述べた. VLEGO の特徴は次の3点である.

- 仮想物体に離散的配置制約を設け, 仮想物体同士の位置合わせを容易にしていること.
- 仮想物体間の干渉回避を行ない, 直観的かつ正確な仮想物体の操作を支援していること.
- 両手による操作を幾つか支援しており, 自然で効率的な仮想物体の操作が可能であること.

これらの特徴により, VLEGO は直観的かつ効率的に正確な形状生成が行なえる環境を提供している. さらに本論文では VLEGO の特徴の中で, VLEGO における両手操作の片手操作に対する優位性や干渉回避の有効性について実験によって定量的に確認した. また, 将来共有仮想空間で協同作業を行なう場合を想定した仮想物体操作の補助手法についても実験的に検討した. これらの実験や利用者の感想から得られた知見は次のように整理される.

- 干渉回避は常に操作効率や操作感を顕著に向上する.
- 離散的配置制約は, 離散配置を行なう基準座標系が固定されている, または基準座標系の動きが掌握できる場合は操作性を向上する. 逆に, 基準座標系の動きが予測できない場合は操作性を劣化させる.
- 両手による操作は操作効率を向上する. 特に, 両手により協調的に一つの操作対象を操作する場合は操作感も向上する.
- 視覚的フィードバックは操作感や操作の确实性を向上する.

こうした VLEGO の特徴を活かした応用分野としては,



- 簡易に効率良く三次元形状を生成できる利点を活かした, 設計のプロトタイプ生成ツール
- 直観的で自然な仮想物体操作手法を活かした玩具や遊具
- 直接直観的に三次元形状を認識または生成できる利点を活かした, 教育用あるいは訓練用アプリケーション

などが考えられる. これらのアプリケーションを共有仮想空間を通して利用することにより, さらに次のような応用分野が考えられる.

**遠隔協同設計** 住宅設計や都市計画など, 三次元形状を共有する必要がある協同設計を共有仮想空間を通して行なうことにより, 設計作業を効率良く柔軟に行なえる.

**遠隔訓練** VLEGO を組み立て作業などの訓練に用いることができるが, 共有仮想空間を利用すれば指導者と被指導者が同一の視点に立つことにより訓練の効率を向上できる.

今後の課題としては, 両手による CSG モデルや曲面の操作手法などのより多様な形状変更手法の開発や [49], 干渉判定の高速化, 多地点共同作業に対応した VLEGO を用いたより良い仮想物体操作支援手法の開発と評価などが挙げられる.

## 謝辞

本研究の全過程を通して、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御鞭撻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。

本研究の全過程を通して、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。

さらに、日頃より様々な御指導と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。

そして本研究を通じて、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、並びに情報科学センター 片山 喜章助手 に厚く感謝します。

最後に、物心両面において常に温かい御助言を頂き、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 村上 和代嬢に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 河内: “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.
- [2] 服部: 人工現実感の世界, 工業調査会, 1991.
- [3] 廣瀬: バーチャル・リアリティ, 産業図書, 1993.
- [4] Burdea, G. and Coiffet, P.: *Virtual Reality Technology*, John Wiley & Sons, 1994.
- [5] 掛井: “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.
- [6] 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. Conf. on Virtual Reality Software and Technology (VRST '94)*, pp.97-110, Aug. 1994.
- [7] Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. and Kassell, N. F.: “A Survey of Design Issues in Spatial Input,” *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '94)*, pp.213-222, Nov. 1994.
- [8] Sachs, E., Roberts, A. and Stoops, D.: “3-Draw: A Tool for Designing 3D Shapes,” *IEEE Computer Graphics & Applications*, 11, No.6, pp.18-26, Nov. 1991.
- [9] Shaw, C. and Green, M.: “Two-Handed Polygonal Surface Design,” *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '94)*, pp.205-212, Nov. 1994.
- [10] Butterworth, J., Davidson, A., Hench, S. and Olano, T. M.: “3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-Mounted Display,” *Proc. ACM*

*Sympo. on Interactive 3D Graphics (GI '92)*, pp.135–139, Cambridge, Massachusetts, March 29 - April 1, 1992.

- [11] 竹村, 伴野: “時分割両眼立体視を用いた 3次元指示入力操作の評価”, 信学論 (D-I), J74-D-I, 1, pp.33–38, 1991.
- [12] 竹村, 北村, シャネゾン・アラン, 岸野: “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”, テレビジョン学会誌, Vol.48, No.10, pp.1312–1317, 1994.
- [13] 柴崎, 猪田: “CAD の 3次元直接操作手法の検討”, SICE HI シンポ論文集, pp.1–6, 1992.
- [14] Adelstein, B. D., Johnston, E. R. and Ellis, S. R.: “A Testbed for Characterizing Dynamic Response of Virtual Environment Spatial Sensors,” *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '92)*, pp.15–22, Nov. 1992.
- [15] Card, S. K., Moran, T. P. and Newell, A.: *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [16] Liang, J., Shaw, C. and Green, M.: “On Temporal-Spatial Realism in the Virtual Reality Environment,” *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '91)*, pp.19–25, Nov. 1994.
- [17] Sturman, D. J., Zeltzer, D. and Pieper, S.: “Hands-on Interaction With Virtual Environment,” *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '89)*, pp.19–24, Nov. 1989.
- [18] Sturman, D. J. and Zeltzer, D.: “A Survey of Glove-based Input,” *IEEE Computer Graphics & Applications*, 14, No.1, pp.30–39, Jan. 1994.
- [19] 岩田: “非装着型力覚帰還環境”, SICE HI シンポ論文集, pp.23–26, 1992.

- [20] 平田, 水口, 佐藤, 河原田: “組立操作のための仮想作業空間”, 信学論 (D-II), J76-D-II, 8, pp.1788–1795(1993–08), 1993.
- [21] 米川, 中山, 小堀, 久津輪: “空間分割モデルを用いた形状モデラ”, SICE HI シンポ論文集, pp.177–182, 1994.
- [22] Ware, C., Arthur, K. and Booth, K. S.: “Fish Tank Virtual Reality,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93)*, pp.37–42, 1993.
- [23] Houde, S.: “Interactive Design of an Interface for Easy 3-D Direct Manipulation,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '92)*, pp.135–142, 1992.
- [24] Venolia, D.: “Facile 3D Direct Manipulation,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93)*, pp.31–36, 1993.
- [25] Kabbash, P., MacKenzie, I. S. and Buxton, W.: “Human Performance Using Computer Input Devices in the Preferred and Non-Preferred Hands,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93)*, pp.474–481, 1993.
- [26] Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. and Kassell, N. F.: “Passive Real-World Interface Props for Neurosurgical Visualization,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '94)*, pp.452–458, 1994.
- [27] Bier, E. A., Stone, M. C., Fishkin, K., Buxton, W. and Baudel, T.: “A Taxonomy of See-Through Tools,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '94)*, pp.358–364, 1994.
- [28] 木島, 廣瀬: “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”, SICE HI シンポ論文集, pp.467–476, 1995.

- [29] MacKenzie, I. S. and Ware, C.: “Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Systems,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93)*, pp.488–493, 1993.
- [30] Bolt, R. A. and Herranz, E.: “Two-Handed Gesture In Multi-Modal Natural Dialog,” *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '92)*, pp.7–14, Nov. 1992.
- [31] 清川, 竹村, 片山, 横矢: “仮想現実環境を構築する簡易モデラについて”, 1995 信学春季全大, A-273, 1995.
- [32] Astheimer, P. and Pöche, M. L.: “Level-of-Detail Generation and its Application in Virtual Reality,” *Proc. Conf. on Virtual Reality Software and Technology (VRST '94)*, pp.299–309, Aug. 1994.
- [33] 清川, 竹村, 片山, 岩佐, 横矢: “両手を用いた仮想環境没入型モデラ: VLEGO”, *SICE HI シンポ論文集*, pp.375–380, 1995.
- [34] 清川, 竹村, 片山, 岩佐, 横矢: “没入型モデラ VLEGO への形状及び色変更機能の追加”, 1996 信学春季全大, A-417, 1996.
- [35] Kiyokawa, K., Takemura, H., Katayama, Y., Iwasa, H. and Yokoya, N.: “A Two-handed Immersive Modeler: VLEGO,” *Proc. 1st Int. Conf. on Applied Ergonomics (ICAE '96)*, 1996 (to appear).
- [36] Zhai, S., Buxton, W. and Milgram, P.: “The “Silk Cursor”: Investigating Transparency for 3D Target Acquisition,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '94)*, pp.459–464, 1994.
- [37] 清川, 竹村, 片山, 岩佐, 横矢: “両手を用いた仮想環境内モデリング手法”, 1995 情処秋季全大, 3S-3, 1995.
- [38] 清川, 竹村, 片山, 岩佐, 横矢: “仮想物体の組み立て作業を支援する操作手法”, 情処研報, HI63-4, 1995.

- [39] 竹村, 清川, 横矢: “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”, *テレビジョン学会誌*, 1996.
- [40] Takemura, H. and Kishino, F.: “Cooperative Work Environment Using Virtual Workspace,” *Proc. Conf. on Computer-Supported Cooperative Work (CSCW '92)*, pp.226–232, 1992.
- [41] Shu, L. and Flowers, W.: “Groupware Experience in Three-Dimensional Computer-Aided Design,” *Proc. Conf. on Computer-Supported Cooperative Work (CSCW '92)*, pp.179–186, 1992.
- [42] Gisi, M. A. and Sacchi, C.: “Co-CAD: A Collaborative Mechanical CAD System,” *PRESENSE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.3, No.4, pp.341–350, 1994.
- [43] Fahlén, L. E., Brown, C. G., Ståhl, O. and Carlsson, C.: “A Space Based Model for User Interaction in Shared Synthetic Environments,” *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93)*, pp.43–48, 1993.
- [44] Ishii, M., Nakata, M. and Sato, M.: “Networked SPIDER: A Networked Virtual Environment with Visual, Auditory, and Haptic Interactions,” *PRESENSE Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.3, No.4, pp.351–359, 1994.
- [45] 矢野, 岩田: “フォースディスプレイを用いた分散型仮想環境における協 調作業”, *SICE HI シンポ論文集*, pp.389–394, 1995.
- [46] Fairchild, K. M., Poston, T. and Bricken, W.: “Efficient Virtual Collision Detection for Multiple Users in Large Virtual Spaces,” *Proc. Conf. on Virtual Reality Software and Technology (VRST '94)*, pp.271–285, Aug. 1994.
- [47] 北村, 竹村, ナレンドラ・アフジャ, 岸野: “octree と多面体表現を用いた三次元物体間の衝突検出”, *信学技報*, IE94-16, 1994.

- [48] 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 Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS '95)*, pp.135–145, Mar. 1995.
- [49] 鳥谷, 千代倉: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版, 1991.