

## 両手操作を用いた仮想物体モデラ VLEGO

清川 清<sup>†</sup>      竹村 治雄<sup>†</sup>      片山 喜章<sup>†</sup>      岩佐 英彦<sup>†</sup>  
横矢 直和<sup>†</sup>

VLEGO — A Simple Two-handed 3-D Modeler in a Virtual Environment

Kiyoshi KIYOKAWA<sup>†</sup>, Haruo TAKEMURA<sup>†</sup>, Yoshiaki KATAYAMA<sup>†</sup>, Hidehiko IWASA<sup>†</sup>,  
and Naokazu YOKOYA<sup>†</sup>

あらまし 仮想空間内で3次元形状を生成できるモデラ（仮想物体モデラ）には直感的操作性など多くの利点がある。仮想物体モデラの利用者を束縛せずに、効率良くかつ正確な形状生成を可能とするには、特殊な装置を要する力覚提示装置などを用いずに、ソフトウェアによる適切な操作補助手法を導入することが有効である。このような考えに基づき、我々は仮想物体モデラ VLEGO を開発した。VLEGO はブロック玩具を模倣し、1) 形状プリミティブ同士の相対位置を離散的に制約する、2) 形状プリミティブ同士の干渉を検出し、干渉を回避するよう位置を補正する、3) 2つのカーソルを用いて柔軟な両手操作を可能にする、の3つの特長を有する仮想物体操作補助手法を導入している。この結果、VLEGO は操作に熟練を要せずに直感的に正確な形状生成が行える環境を提供する。本論文では VLEGO の設計方針と基本機能について述べる。さらに、VLEGO の仮想物体操作補助手法が作業効率に与える影響を実験により評価する。

キーワード 人工現実感、3次元モデラ、3次元ユーザインタフェース、両手操作、干渉判定

### 1. ま え が き

近年、計算機的能力が飛躍的に向上し、あらゆる映像表現分野において3次元形状を表現したコンピュータグラフィクスが利用されるようになった。これに伴い、3次元の形状データを簡便かつ効率良く生成したいという要求が高まっている。こうした要求に応えるツールとして、人工現実感技術を用いて提示される仮想の空間内で3次元形状を生成できる「仮想物体モデラ」が注目され、Butterworth らによる 3DM や Deering による HoloSketch など、いくつかの研究事例が報告されている[?], [?], [?], [?]。仮想物体モデラの利用者は、自らの左右の視点に対応する透視投影像を見ることで、3次元形状の立体像を観察しながら、その形状を直接3次的に編集できる。このため仮想物体モデラは、3面図を編集して3次元形状を決定するような従来の3次元形状生成手法に比べ、直感的で分かりやすい操作性を持ち、対話的で作業効率の高い環境を提供すると期待される。しかしながら、さまざまな

要因により実用的操作性を備えた仮想物体モデラを構築することが困難なため、操作性の向上を目指す研究が続けられている。

我々は、仮想物体モデラの操作性を向上する手法として、仮想物体の動的自由度制御と、2つのカーソルを用いた仮想物体の両手操作の2つの操作補助手法に着目し、これらの手法を導入した仮想物体モデラ VLEGO (Virtual Environment for Generating Objects) を開発した[?]。VLEGO は、これらの操作補助手法をブロック玩具を模倣した簡易な仮想物体モデラとして統合し、実物体の操作感覚に近い自然で直感的な操作により仮想空間内で正確な形状を効率良く生成できる環境を提供する。本論文では以下、まず、?? 章で操作性向上の方策に関する考察より決定した VLEGO の設計方針について述べ、?? 章で VLEGO の実装について述べる。?? 章では VLEGO の提供する操作補助手法の有効性を検証した評価実験について報告する。

### 2. 仮想物体モデラ VLEGO の設計方針

仮想物体モデラの操作性が優れているとはすなわち、第1に操作者が意志通りに正確に形状を操作でき、第2

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学, 生駒市  
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, 630-01  
Japan

にその操作体系が実空間の経験から類推可能な効率の良い自然で直感的なものであることであろう。そこで本章では、この2条件について各々考察し、VLEGOの設計方針を決定する。

### 2.1 正確な仮想物体操作を支援する方策

仮想物体を意志通りに正確に操作するためには、操作に対する応答の遅延や仮想物体を提示する位置のずれが十分少ないことが前提となる。CardやMacKenzieらによれば、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[?], [?]。一方、竹村らによれば、操作者が触覚などに頼らずに空中で位置を指示する精度は1cm程度であるため、位置ずれはそれ以下に抑えることが望ましい[?]。精度良く仮想空間を提示するには、表示装置に通常の高解像度ディスプレイを用いるデスクトップ型または水槽型と呼ばれる人工現実感システムが適している[?], [?]

遅延や位置ずれが許容量以下の状態で、意志通りの操作を最も困難にする要因は、手腕の空間指示能力の低さである。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。この問題を解決する手法として、ハードウェアにより触覚や力覚の再現を目指す方法があるが[?], [?]、装置が特殊で大がかりになる上、利用者の作業範囲を装置の可動域に束縛するという問題がある。一方、ソフトウェア的解決策として、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手法がある[?], [?]。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手法である。これは自由度の制約方針が自然であれば簡便かつ確実な手法といえる。

以上のことから、VLEGOではデスクトップ型人工現実感システムを用いて応答遅延や位置ずれを十分に抑えた上、仮想物体の操作自由度にソフトウェア的に適切な制約を設ける手法を取り入れることとする。

### 2.2 直感的操作を支援する方策

仮想空間内で3次元形状を生成する操作を直感的にするためには、実空間における人の立体造形活動に倣った形状生成手法を取り入れることが有効であると考えられる。このような造形活動には、彫刻や粘土細工のように素材を自由に変形するものと、積木やプラモデルのように基本部材を組合せるものがあり、物体の幾何特性に応じて自由度を制約するには後者がより適すると考えられる。そこで、仮想空間内で部材の組

合せにより形状生成を行うことを考える。

さらに、組合せ操作を効率的かつ直感的にする要因として、実物体は通常は両手を協調して組合せている、という事実に着目する。一般に、両手による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[?], [?], [?], [?]。特に3次元操作に両手を用いた場合、組合せ作業などに見られるように、両手で各々物体を操作しそれらの相対位置を協調して決定することができる。この両手協調操作は対象を自在に観察しつつその対象を操作でき、操作の直感性や作業効率を向上させる優れた手法といえる。さらに仮想空間操作の場合、1) 体制感覚として既知である両手の相対位置情報を利用して仮想物体間の相対位置関係の理解を促進する、2) 位置センサのノイズなどから生じる画面の揺れに対し、比較的安定な両手の相対位置を利用して操作精度の低下を回避する、などの利点が考えられる。

両手操作を積極的に支援する3次元形状生成ツールとしてはSachsらによる3-DrawやShawらによるTHREDが知られている[?], [?]。前者は3次元曲線を、後者は平面集合からなる3次元疑似曲面を生成できる。しかし、これらはいずれも非利き手の役割がモードや視点の変更程度に留まっている。両手協調操作のように両手ともに3次元空間の直接操作を行う利点を十分活かした仮想物体モデラはまだまだ知られておらず、柔軟な両手操作を取り入れた仮想物体モデラを構築する意義は大きいと考えられる。

以上のことから、VLEGOでは柔軟な両手操作により基本形状プリミティブを組合せて形状生成を行う手法を取り入れることとする。

## 3. 仮想物体モデラ VLEGO の実装

前章の設計方針を満たす形状生成手法として、ブロック玩具を模倣した簡易な手法を開発し、VLEGOを構築した。操作者は互いに離散的な位置で接合可能な数種類のプリミティブを両手で組合せていき、3次元形状を生成する。VLEGOの特徴は以下の3点にまとめられる。

**[離散配置制約]** 形状生成の構成単位となるプリミティブ同士の位置および姿勢を離散的に制約する。

**[干渉回避]** 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。

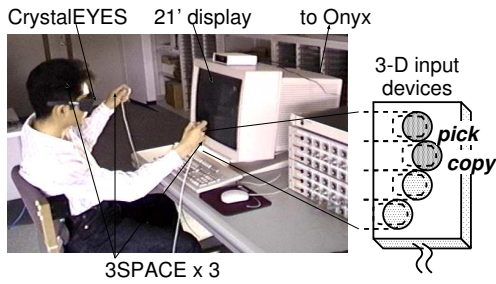


図1 VLEGOの実行環境  
Fig.1 Hardware components of VLEGO.

[両手操作] 接合や分割など、両手によるプリミティブ操作を可能にする。

以下、本章ではVLEGOの実行環境、基本機能、および操作の実際について述べる。

### 3.1 実行環境

VLEGOの実行環境を図??に示す。応答遅延を短縮するために、グラフィックWSとしてOnyx RE2 (SGI社)を採用した。3次元デジタイザは、ユーザを束縛する程度と測定精度を考え、電磁気式の3SPACE (Polhemus社)を採用した。ユーザは液晶シャッター眼鏡CrystalEYES (StereoGraphics社)を通して仮想空間を両眼立体視する。また同時に、ユーザは3次元デジタイザで測量される視点に基づき実時間で仮想空間を運動立体視できる。ディスプレイは21インチCRTまたは40インチプロジェクタを使用する。ユーザは左右の手で各々3次元入力デバイスを把持し、これらに追従する2つの3次元カーソルを用いて仮想物体を操作する。図??右に示すように、製作した入力デバイスには仮想物体の把持と複製に対応したボタンがある。この入力デバイスは、5指による入力を可能とするグローブ型デバイスと比較して操作の直感性にやや劣るが、仮想物体の6自由度操作を可能とする点で同等であり、1) コマンド判定処理が高速である、2) ユーザ毎のキャリブレーションが不要で応答が確実である、といった点で有利である。

なお、こうしたハードウェア構成を選択した結果、応答遅延は概ね100ms以下に抑えられ、位置ずれも通常の作業半径内で概ね1cm未満に抑えられている。

### 3.2 作業空間の構成要素

図??に示すように、VLEGOの作業空間には、左右の3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、および目的の形状を構成するプリミ

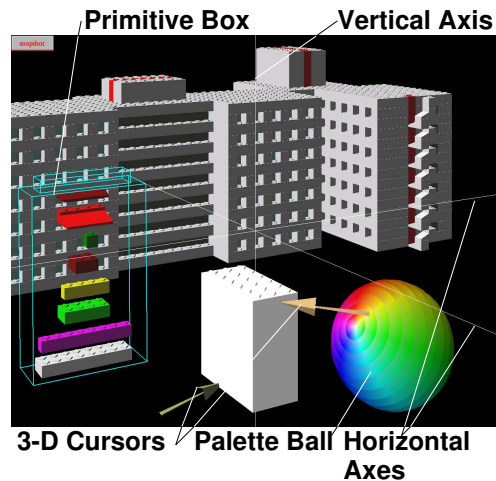


図2 VLEGOの作業空間の構成要素  
Fig.2 Software components of VLEGO.

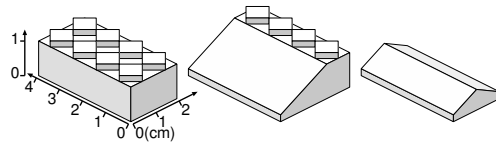


図3 プリミティブの例  
Fig.3 Primitives.

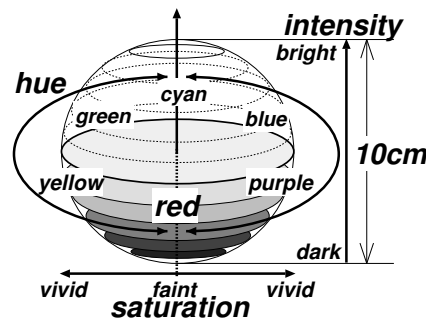


図4 パレットボール  
Fig.4 Palette ball.

ティブが存在する。本節ではこれらの構成要素について説明する。

- 3次元カーソル (3-D cursor) は矢印型で2つあり、入力デバイスに追従して動き、各操作に用いる。
- 座標軸は垂直軸 (vertical axis) 1本と水平軸 (horizontal axis) 2本が存在し把持できる。垂直軸は視点の平行移動に、水平軸は垂直軸まわりの視点の回

転に用いる。

- プリミティブ (primitive) は図?? に示すような直方体やクサビ型であり、高さ、横幅、奥行きは1cm 単位の離散的な大きさを持つ。プリミティブ同士の上面と下面は離散的な位置で互いに接合できる。なお、本論文では単独のプリミティブ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よぶ。

- プリミティブボックス (primitive box) は、プリミティブ数種を内部に浮かべた移動可能な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用いる。内部のプリミティブは把持すると複製 (生成) される。把持したブロックはボックス内部で解放すると消去される。

- パレットボール (palette ball) は図?? に示すように部位によって明度、彩度、色相の変化する移動可能な球であり、後述するブロックの彩色に利用する。

### 3.3 ブロックに対する基本操作

VLEGO のブロックに対する操作には、片手で行える基本的な操作と両手を協調して行う操作がある。これらを表?? にまとめる。片手操作のうち、把持および複製は対応するボタン (図?? 参照) により行う。消去は前述の通りプリミティブボックス内で解放して行う。接合はブロックの解放時に上下に接触する他のブロックと自動的になされる。両手操作については?? 節でさらに詳しく述べる。

#### 3.4 ブロック操作の補助手法

?? 章で述べた仮想物体の正確かつ直感的な操作の支援を目指し、VLEGO は本章の冒頭に述べたいくつかの操作補助手法を導入している。本節ではこのうち離散配置制約と干渉回避について述べた後、これらを活かした両手による柔軟なブロックの組合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。

##### 3.4.1 離散配置制約

原則として VLEGO では把持したブロックの取り得る位置と姿勢は離散的に制限される。すなわち、図?? 左に示すように位置については1cm 間隔の格子点のみに、姿勢については垂直軸回り 90 度単位の4通りだけに配置可能とする。これにより手指による正確な位置指示の困難性を解消し、ブロック同士の位

表1 VLEGO におけるブロック操作  
Table 1 Manipulations on blocks.

|      |                          |
|------|--------------------------|
| 片手操作 | 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 |

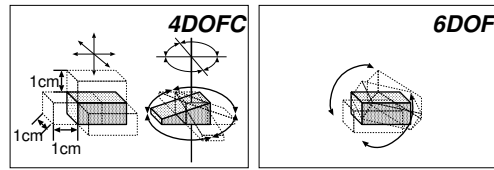


図5 2種類の操作自由度  
Fig. 5 Two types of DOF.

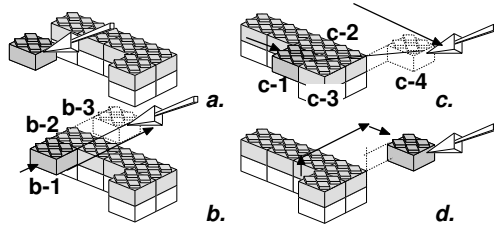


図6 干渉回避の例  
Fig. 6 Example of collision avoidance.

置合せを容易にする。以降この離散制約つき自由度を 4DOFC (4 Degrees Of Freedom with discrete placement Constraints) とよぶ。これに対し、6自由度 (6DOF, 6 Degrees Of Freedom) でブロックを操作できる場合、位置と姿勢の値はすべて連続的に変化する (図?? 右参照)。

##### 3.4.2 干渉回避

VLEGO は、ブロックの運動に自然な拘束を与えるため、ブロック間の干渉を検出して干渉を回避するよう把持ブロックの位置を補正する。図?? 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) では把持ブロックを右奥 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) では把持ブロックを 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) ではカーソルを上に移したため把持ブロックは矢印に示すように移動した。このように、干渉回避により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。

##### 3.4.3 動的自由度制御

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間の距離に基づき次の2つの作業モードを動的に遷移する。なお、以降本論文では、両手の協調操作において、先に把持した物体またはそのカーソルをベース、他方をワークと呼び区別する。

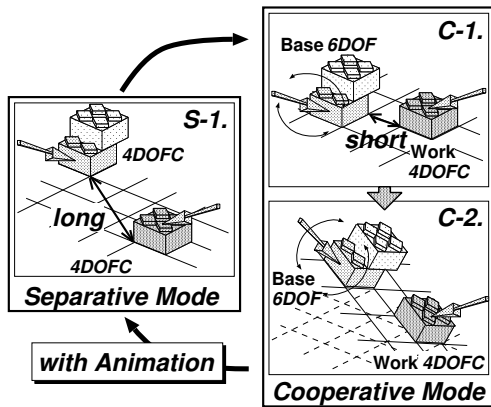


図7 自由度の動的遷移の様子  
Fig. 7 Illustration of dynamic DOF transition.

独立作業モード (separative mode) は、両手が互いの相対位置を合わせる必要のない独立的作業を行っているときとみなす場合に選択される。具体的には、片手のみがブロックを把持する場合、あるいは両手でそれぞれ把持するブロックが互いに十分離れている場合である。このとき、把持ブロックを把持していないブロックと位置合せするため、図?? の S-1 に示すように作業空間全体の大域座標系に対して 4DOFC で操作可能とした。両手ともにブロックを把持し、ブロック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、両手が互いの相対位置を合わせる必要のある協調的作業を行っているときとみなす場合に選択される。具体的には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?? 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、ブロック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。この際ブロックは、ユーザが違和感を覚えないよう 500ms 程度の補完アニメーションを伴って大域座標系に対する 4DOFC で位置や姿勢を整えられる。

### 3.5 両手操作を交えた形状生成

本節では、接合や分割など、両手操作を交えた VLEGO の形状生成について述べる。

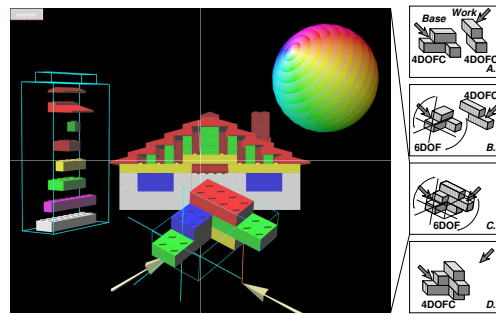


図8 VLEGO における接合作業例  
Fig. 8 Example of assembly.

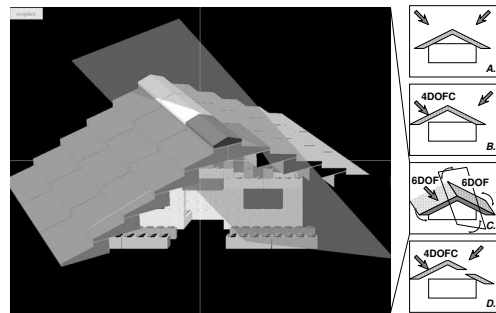


図9 VLEGO における分断作業例  
Fig. 9 Example of decomposition.

#### 3.5.1 ブロックの接合

ブロックの接合は VLEGO の形状生成の根幹である。独立作業モードでは、?? 節で述べたように、片手で 1 つの把持ブロックを把持していないブロックに接合できる。一方、協調作業モードでは、両手で協調して 2 つの把持ブロックを接合できる。図?? に両手の協調接合の例を示す。A) はじめに両手ともにブロックを把持して互いに接近させ、B) ワークとベースの相対位置を合わせる。C) さらに干渉回避を利用して両ブロックを接合可能な位置に維持する。D) 接合可能な位置で一方のブロックを解放すると両ブロックを接合できる。

#### 3.5.2 ブロックの分割

接合したブロックは、2 通りの方法で両手を用いて分割できる。すなわち、把持したブロックから他方の手でプリミティブを 1 つずつ取り外す方法と、切断平面を用いてブロックを分断する方法である。図?? に分断の例を示す。A) はじめに何も把持していない状態で、B) まず片手のみでブロック (ベース) を把持する。C) ここで、把持可能な物体のない位置でワーク

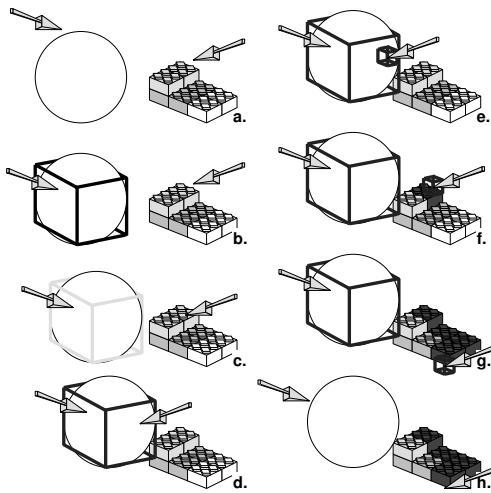


図 10 ブロック彩色の様子  
Fig.10 Example of coloring a block.

の把持ボタンを押下すると、ワークの形状を正方形の半透明な切断平面に変更できる。D) さらに、ブロックと切断平面の相対位置を決定し切断平面を解放すると、ブロックをプリミティブ単位で分断できる。なお、状態 C, D) で切断平面（ワーク）とベースはともに 6DOF で操作可能である。また、分断後にベースのカーソルが指すプリミティブのある側は把持され続け、分断された残りのブロックは仮想空間中に 4DOFC で整えられて置かれる。

3.5.3 プリミティブの拡大縮小

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プリミティブの高さ、横幅、奥行きを 1cm 単位で変更できる。先に示した図?? は拡大縮小の例である。この図では画面中央の白いプリミティブを両手で縦に引き伸ばしている。

3.5.4 ブロックの彩色

VLEGO では、3次元の色空間を表すパレットボールを用いて直感的かつ効率良く色を選択し、ブロックを彩色できる。図?? に彩色の例を示す。b) パレットボールは把持すると 6DOF で操作でき、選択色を示すワイヤフレームの立方体が見える。c, d) パレットボールを把持する間、他方（ワーク）が指す場所に応じて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。e) ワークの把持ボタン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見える。f ~h) この時、ワークの把持ボタンを解放す

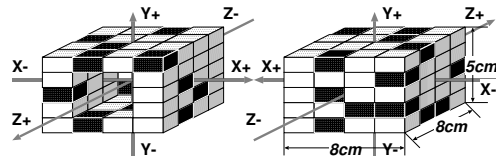


図 11 実験 1 におけるタスクブロックの例  
Fig. 11 Example of task block in Experiment 1.

るまで、決定した色によりプリミティブ単位でブロックを彩色できる。

以上のように、VLEGO では離散配置制約や干渉回避を用いた動的自由度制御によって両手を用いて直感的かつ正確にブロックを接合し、分断や拡大縮小を繰り返して簡便に形状を生成できる。さらに 3次元の色空間を操作して効率良くブロックを彩色できる。

4. 仮想物体操作補助手法の実験的評価

本章では、VLEGO が提供する操作補助手法の有効性を検証するために行った評価実験について述べる。まず最初に、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、接合操作における離散配置制約と干渉回避の有効性を検証する実験について述べる。

4.1 実験 1: 両手操作の評価

本節では、VLEGO が提供する両手による空間操作の有効性を評価実験により検証する。VLEGO のあらゆる操作は、仮想空間内の位置を順次選択することにより行われる。例えば、接合はブロックの把持と解放の位置を順次選択して行う。そこで、両手操作の有効性を仮想空間内の位置を選択する操作によって検証することとし、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?? のように 72 個のプリミティブが酒樽型に接合されたブロック（タスクブロック）を、以下の要領ですべて白色にするタスクを設定した。こ

表 2 実験 1 における操作方法  
Table 2 Three types of manipulations in Experiment 1.

| 操作方法 | 片手操作 | 両手独立操作 | 両手協調操作    |
|------|------|--------|-----------|
| ブロック | 固定   | 固定     | 6DOFで把持可能 |
| 色変更  | 片手   | 両手     | 片手        |

のような設定により、片手操作、両手独立操作、両手協調操作を同一の尺度で評価できる。なお、VLEGOは実験用に可能な操作を制限または変更してある。

(1) 各試行の初期状態では、タスクブロックは図??の原点が表示面の中心にあり、くり抜かれた側を手前に向け、全72プリミティブ中ランダムな18個所が赤、残りが白となっている。初期位置で、被験者は視点を移動して全72プリミティブを観察できる。

(2) 被験者は複製ボタンにより最寄りのプリミティブの色を白から赤、または赤から白に反転できる。

(3) 被験者はタスクブロックがすべて白色になるまで(2)を繰り返す。

このタスクを、表??に示す3通りの操作方法で行い、タスクブロックの提示から色変更の完了までの時間であるタスク達成時間を比較する。試行数は各操作方法について各々30試行、計90試行である。

4.1.2 結果と考察

VLEGOの操作の初心者から熟練者まで、被験者10名に対し実験を行った。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×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、 $\mu$ および $\sigma$ 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??に示す。ここで、誤り率とは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最少必要操作数(=18×試行数)で割った値を指す。また、30試行中のタスク達成時間の推移を図??に示す。図??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。以下、これらの結果について考察する。

- 両手独立操作は片手操作よりもタスク達成時間

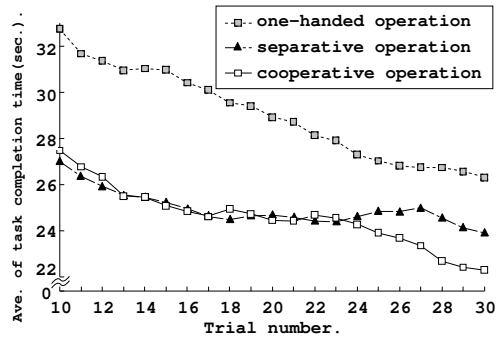


図12 直前10試行分のタスク達成時間の平均値の推移  
Fig.12 Ave. of task completion time of last 10 trials.

が有意に短い。これは並列性による効率向上の結果である。平均タスク達成時間が半減しないのは、1) 人の注視点は一箇所であり、左右並列に3次元カーソルを位置合わせできない、2) 非利き手の位置指示精度が利き手に比べて低い、などの理由によると考えられる。また、図??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%であった。すなわち、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顕著な傾向が認められる。

● 両手協調操作は片手操作よりもタスク達成時間が有意に短い。また、誤り率は片手操作に比べ若干の改善傾向が見られる。これは、1) ベースを移動・回転できるため、目標を発見しやすい、2) ベースの移動・回転の結果ワークの必要移動量が減少し、迅速かつ正確に位置合わせできる、3) ベースとワークの移動・回転を並列に行える、などの理由によると考えられる。なお、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。

本実験により、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。なお、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。このように、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。

4.2 実験2: 離散配置制約と干渉回避の評価

本節では、VLEGOがブロックの操作補助手法として提供する離散配置制約と干渉回避の有効性を実験に

表3 実験1の結果  
Table 3 Results of Experiment 1.

|                        | 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  |

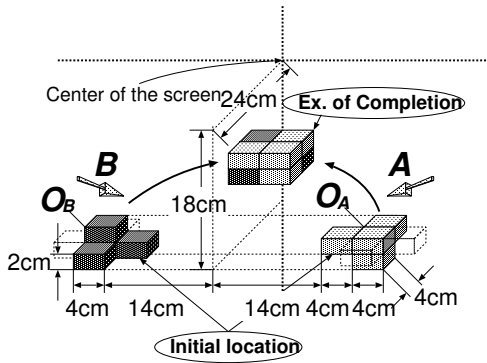


図13 実験2におけるブロックの配置  
Fig.13 Configuration of blocks in Experiment 2.

より検証する。具体的には、両手の協調操作によるブロックの接合を離散配置制約や干渉回避の有無を切り替えて行い、作業効率を比較する。

4.2.1 実験手法

図?? に、本実験で用いるブロックの配置を示す。実験タスクは以下の要領で実施する。

(1) 各試行の初期状態で、2つのブロック  $O_A, O_B$  は定位置にある。それらの姿勢は試行毎に垂直軸回りに90度ずつ異なる各々4通りの計16通りの組合せとする。

(2) カーソルAとBで各々  $O_A, O_B$  を把持する。

(3)  $O_A, O_B$  を互いに接近して接合し、接合したブロックを解放する。接合不可能な位置で解放した場合は再び把持して接合を試みる。

このタスクを、離散配置制約(D)と干渉回避(C)それぞれの有無、計4通り(NN, DN, NC, DC)の操作補助のもとで行う。なお、本実験では以下の時間指標を記録する。

[タスク達成時間]  $O_A$  か  $O_B$  が初めて把持されてから、接合したブロックが解放されるまでの時間間隔。

表4 実験2の結果  
Table 4 Results of Experiment 2.

|                         | NN     | DN     | NC     | DC     |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 平均タスク達成時間(秒)            | 9.15   | 9.83   | 7.90   | 5.95   |
| (分散)                    | (43.7) | (77.2) | (23.5) | (6.28) |
| 有意差 ( $\alpha = 0.05$ ) | = > >  |        |        |        |
| 平均接触時間                  | 3.16   | 2.63   | 2.54   | 1.23   |
| (分散)                    | (6.84) | (3.08) | (2.71) | (0.62) |
| 有意差 ( $\alpha = 0.05$ ) | > = >  |        |        |        |
| 誤り率                     | 0.15   | 0.13   | 0.17   | 0.03   |

[接触時間] 両ブロックが接合可能な時間および(回避処理以前に)互いに干渉している時間の合計。

4.2.2 結果と考察

VLEGOの操作に不慣れた2名を被験者として実験を行った。試行数は各操作補助手法で16通りの初期状態を4度ずつ、計64試行であった。各操作方法での各時間指標を全被験者について平均して行った分散分析結果、および隙間なく接合できなかった誤り率を表?? に示す。以下、この結果について考察する。

ブロックの接合を、i) 両者の相対的姿勢を合わせる、ii) 相対的姿勢を維持して両者を接近し接合位置を確認して一方を解放する、の2ステップに分解すると、離散配置制約と干渉回避について各々以下の考察が得られる。

- 離散配置制約は、干渉回避の有無によらず接触時間を有意に短縮する。これは離散配置制約がある場合、微小な手の揺れが吸収されて位置や姿勢の維持が容易になり ii) の位置確認が容易になるためと考えられる。一方、NNとDNを比べれば離散配置制約は接触時間短縮の割にタスク達成時間を短縮しないことがわかる。これは離散配置制約がある場合、ワークの姿勢に強い制約があるため i) の意図通りの姿勢変更が困難になるためであると考えられる。

- 干渉回避は、離散配置制約の有無によらず接触時間を有意に短縮する。これは干渉回避が接触時の位置を維持しやすくするためであると考えられる。また、被験者は干渉回避により物体同士が「当たった」ことを感じると報告しており、干渉回避は作業効率のみならず操作感を向上しているといえる。

本実験により、VLEGOの接合操作に関して離散配置制約と干渉回避の有効性が示せたと考える。以上2つの実験により、VLEGOが提供する仮想物体操作補助手法の有効性が示せたといえる。なお、離散配置制約に関して示唆された姿勢制御の困難性を回避するために、接合しようとする2つの物体が接触するときに限り離散配置制約を設け、接触していない場合は干渉回避のみを設ける手法がさらに優れる可能性があり、今後の検討を要する。

5. むすび

本論文では、仮想空間内で効率的かつ正確に3次元形状を生成可能な仮想物体モデラとして、VLEGOを提案した。また、VLEGOに導入している仮想物体の操作補助手法の有効性を実験により確認した。VLEGO



は形状プリミティブの操作可能な自由度を動的に制御し、両手による柔軟な操作手法を取り入れることにより、ブロック玩具に倣った簡便な形状生成環境を提供する。大きさの異なる基本プリミティブを組合せていく方式である現状の VLEGO 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 でも有効に利用できると思われる。

最後に、より形状生成能力の高い CSG モデルや曲面などの操作手法としても[?], VLEGO の各操作補助手法が有効に機能する可能性について考察する。こうした高度な形状生成の過程においても、制御点や幾何的特徴点の選択や移動および物体の配置などの、空間位置を順次選択する操作は必須である。従って、空間位置選択の時間効率や操作感を向上する両手操作は、高度な形状生成を行なう際にも有効に機能することが期待できる。また、離散配置制約は選択できる空間位置を限定するため、形状生成能力とは関係なく常に空間位置の正確な指示を支援できる。特に CSG モデルや曲面の操作においては、VLEGO に採用した格子点制約だけでなく、最近傍の制御点や幾何的特徴点への拘束手法を導入することで、離散配置制約の適用範囲を広げることができると考えられる。さらに、形状生成を剛体部品の組合せとみなせる場合には、干渉回避は有効に機能することが期待できる。この際、形状が直方体の組合せであれば現状のアルゴリズムでも対応できるが、より複雑な形状に対しても高速に干渉を判定できるアルゴリズムを導入することが課題となる[?].

今後の課題としては、両手を用いた CSG モデルや曲面の操作手法などの多様な形状変更手法の開発、直感性に優れるグローブ型インタフェースの採用、汎用的で高速な干渉判定アルゴリズムの導入などが挙げられる。

**謝辞** 本研究の一部は文部省科学研究費補助金、課題番号 08234218 および 08555103 により実施した。

#### 文 献

- [1] J. Butterworth, A. Davidson, S. Hench and T. M. Olano: "3DM: A three dimensional modeler using a head-mounted display," Proc. ACM Sympo. on Interactive 3D Graphics, pp.135-139, 1992.
- [2] G. J. F. Smets, P. J. Stappers, K. Overbeeke and C. V. D. Mast: "Designing in virtual reality: implementing perceptual-action coupling with affordances," Proc. Conf. on Virtual Reality Software and Technology (VRST '94), pp.97-110, 1994.
- [3] M. F. Deering: "The HoloSketch VR sketching system," Communications of the ACM, vol.39, no.5, pp.54-61, 1996.
- [4] D. Kurmann and M. Engell: "Modelling virtual space in architecture," Proc. ACM Sympo. on Virtual Reality Software and Technology (VRST '96), pp.77-82, 1996.
- [5] K. Kiyokawa, H. Takemura, Y. Katayama, H. Iwasa and N. Yokoya: "VLEGO: A simple two-handed modeling environment based on toy blocks," Proc. ACM Sympo. on Virtual Reality Software and Technology (VRST '96), pp.27-34, 1996.
- [6] S. K. Card, T. P. Moran and A. Newell: "The psychology of human-computer interaction," Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [7] I. S. MacKenzie and C. Ware: "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.
- [8] 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", テレビ誌, vol.48, no.10, pp.1312-1317, 1994.
- [9] C. Ware, K. Arthur and K. S. Booth: "Fish tank virtual reality," Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93), pp.37-42, 1993.
- [10] 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", 信学論 (D-II), vol.J76-D-II, no.8, pp.1788-1795, Aug. 1993.
- [11] 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", 第11回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.395-400, 計測自動制御学会:ヒューマンインタフェース部会, 1995.
- [12] 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", 信学論 (A), vol.J79-A, no.2, pp.506-517, Feb. 1996.
- [13] W. Buxton and B. A. Myers: "A study in two-handed input," Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '86), pp.321-326, 1986.
- [14] P. Kabbash, I. S. MacKenzie and W. Buxton: "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.
- [15] E. A. Bier, M. C. Stone, K. Fishkin, W. Buxton and T. Baudel: "A taxonomy of see-through tools," Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '94), pp.358-364, 1994.
- [1] J. Butterworth, A. Davidson, S. Hench and T. M. Olano: "3DM: A three dimensional modeler using a

- [16] D. P. Mapes and J. M. Moshell: "A two-handed interface for object manipulation in virtual environments," PRESENSE Teleoperators and Virtual Environments, Vol.4, No.4, pp.403-416, 1995.
- [17] E. Sachs, A. Roberts and D. Stoops: "3-Draw: A tool for designing 3D shapes," IEEE Computer Graphics & Applications, vol.11, no.6, pp.18-26, 1991.
- [18] C. Shaw and M. Green: "Two-handed polygonal surface design," Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '94), pp.205-212, 1994.
- [19] 鳥谷浩志, 千代倉弘明: "3次元CADの基礎と応用", 共立出版, 1991.
- [20] A. Smith, Y. Kitamura, H. Takemura and F. Kishino: "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, 1995.

(平成年月日受付, 月日再受付)

#### 清川 清 (学生員)

平6 阪大・基礎工・情報工中退. 平8 奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了. 現在同大学院大学博士後期課程在学中. 3次元ユーザインタフェース, 仮想現実, インタラクティブモデリング, CSCWの研究に従事. 情報処理学会, ACM, 日本

VR学会各会員.

#### 竹村 治雄 (正員)

昭57 阪大・基礎工・情報工卒. 昭62 同大学院博士後期課程単位取得退学. 同年(株)ATR入社. 3次元ユーザインタフェース, CSCW, 仮想現実の研究に従事. 平6 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科助教授. 工博. 情報処理学会,

IEEE, ACM, 日本VR学会各会員.

#### 片山 喜章 (正員)

平2 阪大・基礎工・情報卒. 平6 同大学院博士課程中退. 同年奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科助手. 平7 同大情報科学センター助手. 分散アルゴリズム, HCIなどに関する研究に従事. 情報処理学会各会員.

#### 岩佐 英彦 (正員)

平2 阪大・工・通信工卒. 平6 同大学院博士後期課程中退. 同年奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター助手. 現在同情報科学研究科助手. 人工知能, 機械学習の研究に従事. 情報処理学会, 人工知能学会各会員.

#### 横矢 直和 (正員)

昭49 阪大・基礎工・情報卒. 昭54 同大学院博士課程了. 同年電子技術総合研究所入所. 以来, 画像処理ソフトウェア, 画像データベース, コンピュータビジョンの研究に従事. 昭61~62 マツギル大・知能機械研究センター客員教授. 平4 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授. 現在, 同大情報科学研究科教授. 平1 情報処理学会論文賞受賞. 工博. 情報処理学会, 人工知能学会, 日本認知科学会, テレビジョン学会, IEEE 各会員.