

仮想物体の組み立て作業を支援する操作手法

清川 清 竹村 治雄 片山 喜章 岩佐 英彦 横矢 直和
{kiyosi-k, takemura, katayama, iwasa, yokoya}@is.aist-nara.ac.jp

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
〒630-01 奈良県生駒市高山町 8916-5

人工現実感の応用として、仮想環境に没入しながら三次元形状を生成できる没入型形状モデラが注目されている。没入型形状モデラは三次元形状を直観的に把握、操作でき、形状の変更がリアルタイムに確認できるなどの利点がある。しかし、力覚や触覚が提示されない場合、仮想物体を正確に操作するのは困難である。我々は力覚や触覚を伴わずに正確に仮想物体を操作するために、ブロック玩具に倣った形状生成手法を提案し、具体的に没入型ソリッドモデラ VLEGO (Virtual Environment for Generating Objects) を開発している。VLEGO では 1) プリミティブに離散的配置制約を設ける、2) プリミティブ同士の干渉を回避する、3) 両手による自然な操作性を提供する、などの特徴により、正確かつ簡易に仮想物体を組み立てることができる。本報告では、VLEGO の機能を紹介するとともに、組み立て作業に対する干渉回避の有効性を実験により検証する。

A Method for Accurately Assembling Virtual Objects

Kiyoshi KIYOKAWA, Haruo TAKEMURA, Yoshiaki KATAYAMA, Hidehiko IWASA and
Naokazu YOKOYA

Nara Institute of Science and Technology (NAIST)
8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-01, Japan

Immersive solid modelers have many advantages over traditional CAD-based modeling tools in designing three dimensional (3-D) objects in virtual environments. However, it is difficult to manipulate virtual objects precisely without force or touch feedback. Our VLEGO, an immersive solid modeler that incorporates features of objects manipulation method from block toys, assists one in accurate and easy manipulations on virtual objects without force or touch feedback. In VLEGO, 3-D objects can be designed by assembling a few kinds of primitives and VLEGO has the following three features. First, all primitives have grid constraints on their alignment so that their positions and orientations are limited discretely. Second, the system automatically detects if primitives in hands collide against other primitives and adjusts their positions to avoid the collision. Finally, VLEGO supports various two-handed operations and hence it make design environment intuitive and efficient. We show an empirical study to evaluate the effectiveness of collision detection on assembling virtual objects in VLEGO.

1 はじめに

仮想環境に没入しながら三次元形状を生成できる仮想環境没入型形状モデラ（以下没入型モデラ）は、三次元物体を直観的かつ対話的に認識、操作できる利点があり、形状生成における発想支援やプロトタイプ作成に有効である [6, 9, 10]。しかし、一般に力覚や触覚のフィードバックがない場合、描画解像度の低さや位置計測の誤差などが問題となり仮想物体を正確に操作することが困難である。このため実用的な没入型モデラは登場していない。仮想物体の正確な操作を支援するために、力覚や触覚も同時に提示する手法が提案されている [1, 4, 5]。しかし、特殊で大き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の問題となる。

我々はこれまでに、特殊な装置を用いずに正確かつ簡易な仮想物体の組み立て操作を可能とする没入型モデラ VLEGO (Virtual Environment for Generating Objects) を提案している [2, 3]。VLEGO は、ブロック玩具を模倣した簡易な操作手法を導入し、プリミティブ組み立て式の形状生成環境を提供する。VLEGO はブロック玩具と同様に、1) 仮想環境（ワールド）内でプリミティブに離散的配置制約を設ける、2) プリミティブ同士の干渉を回避する、3) 両手によるプリミティブの接合や分割操作を提供する、などの特徴を持つ。VLEGO ではこれらの特徴により正確かつ簡易に仮想物体の組み立て作業が行なえる。本稿では、VLEGO の諸機能について詳細に説明し、さらに組み立て作業における干渉回避の有効性を確認した評価実験について報告する。

2 没入型モデラ VLEGO

力覚フィードバック装置などを用いずに、仮想物体を正確かつ簡易に操作するためには、仮想物体に自然な配置制約を与え、正確な位置合わせを容易にする操作手法が考えられる。VLEGO はそのような手法としてブロック玩具に着目して開発された没入型モデラである [2, 3]。VLEGO の特徴としては、

- 1) プリミティブが離散的配置制約を持ち、プリミティブ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ため、正確な位置合わせが自然に実現できること、
 - 2) プリミティブが互いに干渉判定を行ない、操作中の物体は干渉を回避するよう自動的に位置を調整するため、他のブロックとの接面をすべらせることができるなどの自然で正確な仮想物体操作を支援していること、
 - 3) ブロックの接合や分割など、両手による操作を積極的に支援しており、直観的かつ効率的に形状生成が行なえること [8]、
- があげられる。本章では以下、VLEGO の実行環境や VLEGO における操作の実際について述べる。

2.1 実行環境

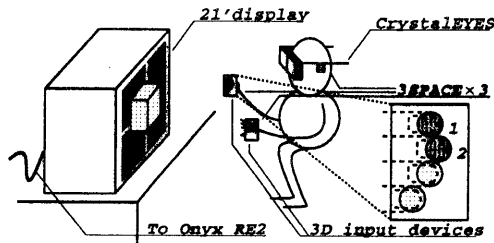


図 1: VLEGO の実行環境

VLEGO の実行環境を図 1 に示す。グラフィック WS として Onyx RE2 (SGI 社) を使用した。ユーザは、三次元デジタルタイザ 3SPACE (Polhemus 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。

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 1 右下)。これはフェーザースイッチ 4 個と三次元デジタルタイザを基板に取付けたものである。現在 VLEGO では、このうち上から二つのスイッチ (第 1, 第 2 スイッチ) を組み合わせて押し下し、仮想物体を操作する。

2.2 プリミティブと基本操作

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 [2]。

プリミティブの形状はクサビ型などの例外を除いて直方体であり、高さは 1cm、横幅および奥行きはその整数倍である。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り、突起に対応した離散的な位置で互いに接合できる。ここでは、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。なお、各プリミティブはメニューボックス (図 4 左) から無尽蔵に取り出すことができる。

三次元カーソルをブロックに十分接近させると、そのブロックは選択され、ハイライトで表示される。選択したブロックは第 1 スイッチを押下している間把持でき、三次元カーソルに追従して移動する。把持したブロックはさらに以下のように操作できる。

複製: 第 2 スイッチを押下する。

消去: メニューボックス内で解放する。

接合・分割: 両手を用いて操作する。(後述)

VLEGO のその他の基本操作としては、画面に表示される座標軸を把持して、水平方向原点周りにワールド全体を回転する機能がある。この機能によりユーザは様々な視点から仮想環境を観察、操作できる。

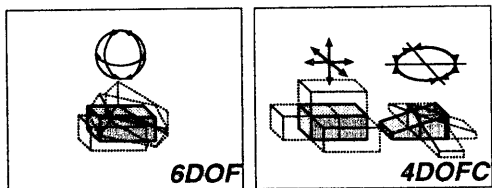


図 2: 把持操作の自由度の二状態

2.3 離散的配置制約と作業状態

通常、VLEGO の各ブロックの位置や姿勢は、互いの接合位置と同様に離散的に制約される。この制約は位置については突起間隔と等しい 1cm 間隔で仮想空間に離散的に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 度単位のみ可能とするものである。VLEGO ではこの離散的配置制約により、正確な仮想物体の操作を可能としている。以下ではこの制約を 4DOFC (4 Degrees Of Freedom with Constraints, 図 2右) と呼ぶ。また、ブロック同士の接合やブロックの分割などの操作を行なう場合、ブロックは位置および姿勢を制約されず自由に操作可能となることがある。この場合の操作自由度を以下では 6DOF (6 Degrees Of Freedom, 図 2左) と呼ぶ。

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、作業状態が次の二つを動的に遷移する。

独立作業状態: 片手のみがブロックを把持している場合、また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, a-1., a-2.), ユーザは把持している物体を仮想空間中の他の物体と位置合わせする意志があるとみなす。従って正確な位置合わせを支援するために、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, a-1.→b-1.).

協調作業状態: 両手で把持するブロックが互いに十分接近している場合 (図 3, b-1., b-2.), ユーザは両ブロック間で位置合わせする意志があるものとみなす。従って、両ブロックをなるべく自由に操作しつつ位置合わせが楽に行なえるように、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。これにより、両手によるブロックの接合や分割がより容易になると考える。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、ブロックはワールド座標に対する 4DOFC で位置・姿勢を整えられ、独立作業状態に移行する (図 3, b-2.→a-2.). なお、この移行に伴って位置・姿勢が突然変化し、ユーザが違和感を覚えることがないよう、500ms 程度の補完アニメーションを行なう。ブロックはアニメーション中も操作可能である。

2.4 両手操作による形状生成

VLEGO では、主に両手を用いてブロックの接合や分割を繰り返し、形状生成を行なう。以下ではブロックの接合と分割の操作について具体的に説明する。

2.4.1 ブロックの接合

VLEGO では、ブロック玩具と同様に、各プリミティブの上面と下面を接合できる。独立作業状態の時、把持しているブロックは仮想空間中の他のブロックと干渉判定を行ない、干渉を回避するよう自動的に位置を補正する。干渉回避の結果、一つ以上のブロックと接合可能な場合、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はハイライトで表示される。このとき把持しているブロックを解放すると、ブロックは接合可能な全てのブロックと接合する。

協調作業状態の場合、両ブロックは互いに干渉回避を行なう。ただし仮想空間中の他のブロックとは接合せず、干渉判定も行なわない。この状態では、両ブロックが接合可能な場合は互いをハイライトで表示する (図 4, 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, D)。

2.4.2 ブロックの分割

接合されたブロックの分割方法は二つある。第一は、接合されたブロックから一つだけプリミティブを取り外す方法である。すなわち、片手に把持したブロックから、他方の手でプリミティブの一つずつ取り外せる。第二は切断平面を用いる方法である。片手でブロック (ベース) を把持し (図 5, A→B), 他方 (ワーク) はどのブロックも選択せずに第 1 スイッチを押下すると、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 5, B→C)。このとき例外的にブロック、切断平面ともに 6DOF で操作可能となり、切断平面を解放することによりベースをプリミティブ単位で分断できる (図 5, C→D)。

以上のように、VLEGO では実際のブロック玩具における両手操作を模倣し、直観的で簡易な形状生成が可能となっている。

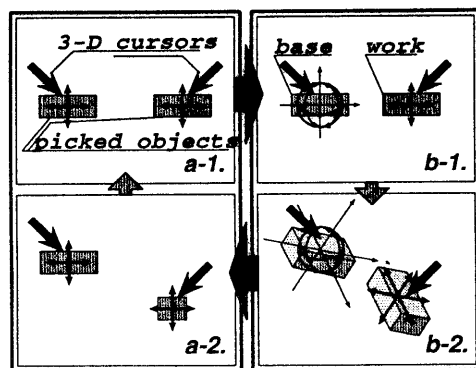


図 3: VLEGO の作業状態の遷移

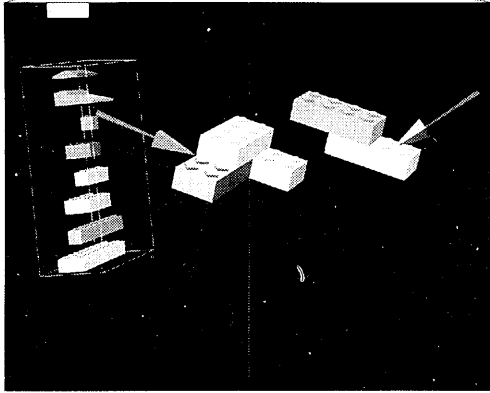
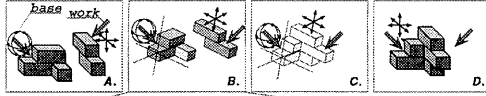


図 4: VLEGO における接合作業例

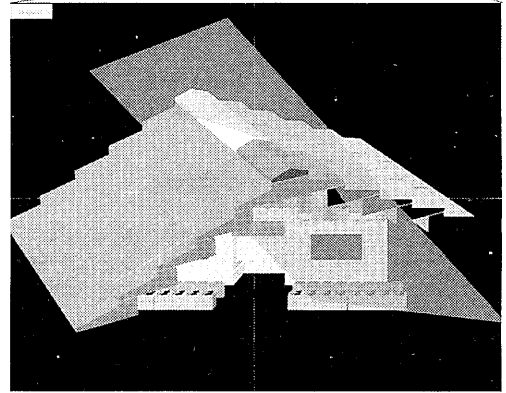
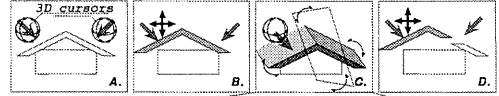


図 5: VLEGO における分断作業例

3 VLEGO における干渉判定の評価実験

我々は既に、VLEGO における離散的配置制約や両手操作の有効性を実験的に確認している [2, 3]。今回は、VLEGO を用いた仮想物体の組み立て作業に対する干渉判定の有効性を検証するための評価実験を行なった。

3.1 実験手法

現在 VLEGO では、干渉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 (ハイライト) 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、干渉判定の有効性を検証するために、表 1 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 1 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 6 に示す。メニューボックス

表 1: 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	○	○

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。ブロックの積み順序や色は任意である。

(3) 最終的に図 7 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

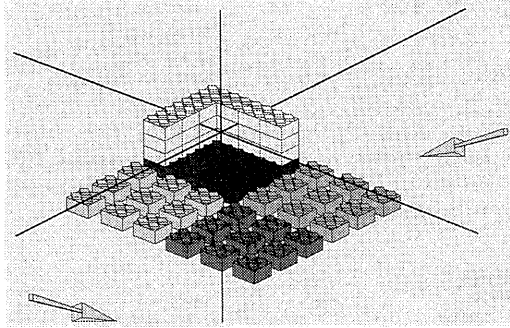


図 6: 各試行の初期状態

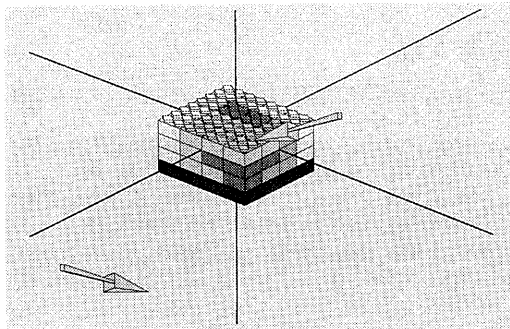


図 7: 試行の完成例

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。

3.2 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。以下では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 2 に示す。

3.2.1 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

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 3)。

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、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。

表 2: 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 3: 典型的分散分析結果

(良) VS = S < V = N (悪)

3.2.2 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 2 の各時間指標を把持回数で割った結果を表 4 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 3 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

表 4: 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 5: 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

表 6: 各提示方法の主観評価の被験者による平均

N	S	V	SV
3.5	9.0	5.0	9.6

表 7: 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

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。

3.2.3 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 5 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% 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。

3.2.4 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 6 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 7)。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。

4 むすび

本稿では、ブロック玩具に倣った形状生成手法を導入し開発した仮想環境没入型モデル VLEGO の諸機能について説明し、VLEGO における仮想物体の組み立て作業における干渉回避の有効性を実験により確認した。今後の課題としては関連研究 [7, 11] を踏まえた干渉判定の高速化の実現や、両手による直観的で正確なプリミティブの変形手法の開発が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は文部省科学技術研究費補助金、課題番号 07244215 により実施した。

参考文献

- [1] 岩田: “非装着型力覚帰還環境”, SICE HI シンポジウム論文集, pp.23-26, 1992.
- [2] 清川, 竹村, 片山, 横矢: “仮想現実環境を構築する簡易モデルについて”, 1995 信学春季全大, A-273, 1995.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 米川, 中山, 小堀, 久津輪: “空間分割モデルを用いた形状モデル”, SICE HI シンポジウム論文集, pp.177-182, 1994.
- [6] Butterworth, J., Davidson, A., Hench, S. and Olano, T. M.: “3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-Mounted Display,” *ACM SIG-GRAPH: Proceedings of 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.135-139, Cambridge, Massachusetts, March 29 - April 1, 1992.
- [7] 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.
- [8] Hinckley, K., Pausch, R., Coble, J. C. and Kassel, 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.
- [9] 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, Nov. 1991.
- [10] 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.
- [11] 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 '95*, pp.135-145, Mar. 1995.