

NAIST-IS-MT9651091

修士論文

仮想環境没入型モデラにおける幾何制約の付加手法の 提案と実装

開 哲一

1998年2月13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。

開 哲一

指導教官： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

仮想環境没入型モデラにおける幾何制約の付加手法の 提案と実装*

開 哲一

内容梗概

計算機上で 3 次元形状をデザインする際、3 次元物体の位置や姿勢に対する制約 (幾何制約) を定義できることにより、ドアのようにある軸中心にしか回転しない物体や、プロペラのように回り続ける物体などの多様な 3 次元形状をデザインできる。しかしながら、従来 3 次元形状に対して幾何制約を定義するには、特殊な言語や 2 次元のインタフェースを用いるため、操作が繁雑で分かりにくいという問題があった。そこで本研究では、直感的な 3 次元形状生成手法として没入型モデラに着目し、没入型モデラにおける、3 次元形状に対する幾何制約の対話的な付加手法を提案する。

本手法の特長としては次の 3 点が挙げられる。まず、幾何制約を、基準軸や可動範囲などの属性を表す形を持ったプリミティブ (幾何制約プリミティブ) として表すことで、その属性を直感的に把握できる。また、幾何制約プリミティブの位置・姿勢や形状自身を操作することで、対話的にその属性を変更できる。さらに、幾何制約の付加は、幾何制約プリミティブと仮想物体を組み合わせる簡単な操作で実現されるので、複雑な操作の習熟を必要としない。本論文では、提案手法について詳しく述べた後、その提案手法に基づき試作した没入型モデラを紹介し、試作システムを通して提案手法の有効性を考察する。

キーワード

人工現実感, 没入型モデラ, 3-D ユーザインタフェース, 幾何制約, 両手操作

*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-MT9651091, 1998 年 2 月 13 日.

Imposing Geometric Constraints on 3-D Virtual Objects within an Immersive Modeling System*

Norikazu Hiraki

Abstract

This paper describes an intuitive and efficient approach for imposing geometric constraints on 3D virtual objects within an immersive modeler, and introduces a prototype system that adopts the approach. In the system, a user can intuitively understand the behavior of geometric constraints since geometric constraints are represented as visible primitives (*constraining primitives*) that have shapes representing their attributes. Moreover, a user need not learn complex manipulation skills for imposing geometric constraints since geometric constraints are imposed on 3D virtual objects by simply assembling constraining primitives and 3D virtual objects. Through the use of the system, it is found that the proposed approach is useful for imposing geometric constraints on 3-D virtual objects.

Keywords:

virtual reality, immersive modeler, 3-D user interface, geometric constraints, two-handed manipulation

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9651091, February 13, 1998.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究：制約の記述と没入型モデラ	3
2.1 制約の記述	3
2.1.1 記述言語による手法	3
2.1.2 2次元 GUI による対話的な記述手法	4
2.2 没入型モデラ	7
2.2.1 没入型モデラの特徴	7
2.2.2 既存の没入型モデラ	9
3. 没入型モデラにおける制約の付加に関する検討	11
3.1 仮想物体に対する幾何制約	11
3.2 没入型モデラにおける幾何制約の付加手法の提案	13
3.3 幾何制約プリミティブ	16
4. 幾何制約プリミティブを導入した没入型モデラの試作	22
4.1 システムの設計方針	22
4.2 システム概要	23
4.3 基本操作	25
4.4 デザインプロセス	27
4.4.1 プリミティブの選択	27
4.4.2 プリミティブの組み合わせ	28
4.4.3 幾何制約の付加	30
4.5 デザイン例	32
5. 考察	38
5.1 提案手法の妥当性の検証	38
5.2 制約の多様化	39
6. おわりに	42

謝辭	45
參考文獻	46

目 次

1	3DCG ソフトの操作画面例	5
2	SKETCH における操作例	6
3	円並進制約の視覚化	14
4	円並進制約の属性の変更	15
5	仮想物体に対する円並進制約の付加	15
6	基本幾何制約プリミティブ	17
7	範囲付き幾何制約プリミティブ	18
8	範囲付き 1 次元並進制約の並進範囲の変更	20
9	範囲付き 1 次元回転制約の回転範囲の変更	20
10	1 次元回転アニメーションのための幾何制約プリミティブ	21
11	ハードウェア構成	23
12	本システムにおけるシーングラフ例	25
13	消去用ボックス	26
14	プリミティブボックス	28
15	片手組み合わせ操作	29
16	両手組み合わせ操作	30
17	幾何制約の付加操作例	31
18	キャビネットの生成過程	33
19	キャビネットのシーングラフ	34
20	コーンツリー	35
21	パペット	36
22	プロペラ飛行機	37
23	制約の伝搬例：腕モデル	40

1. はじめに

計算機上で3次元形状をデザインする際、3次元形状の位置や姿勢・形状・色などの属性に対する制約を定義できることで、関節や引き出しなどのように位置や姿勢が制限された物体や、常に回り続ける風車などのようなアニメーションを伴う物体など、多様な3次元形状をデザインできる。したがって、3次元形状のモデリングツールでは、形状だけでなく、その属性に対する制約も含めてデザインできることが望ましい。従来、制約を含む3次元形状をモデリングするには、プログラムやスクリプトなどの何らかの言語で記述する手法 [1, 2, 3] や、CRTやマウスといった2次元の入力・表示装置を使用した3次元コンピュータグラフィックス (CG) ソフトなどを用いる手法 [4, 5] が取られて来た。しかしながら、これらの手法では3次元形状の把握や操作が繁雑であるという問題があった。

これに対し近年、仮想環境に没入しながら3次元形状 (仮想物体) を生成する仮想環境没入型モデラ (以下、没入型モデラ) が注目され、様々なシステムが開発されている [6, 7, 8, 9, 10]。没入型モデラは、直感的な視認・操作が可能である、対話的な仮想物体生成が可能である、といった利点を数多く持ち、直感的かつ効率的なモデリング手法として有望視されている。一般に没入型モデラには、応答遅延や3次元入出力装置の精度、人間の空間指示能力の低さなどの要因により、仮想物体の正確な操作が困難であるという問題がある。しかし、人間の物体操作に重要とされる力覚や触覚を同時に提示する手法 [11, 12, 13] や、離散配置制約や干渉回避などのソフトウェアによる操作支援手法 [6, 7, 9, 10] の導入により、作業内容によっては十分実用に耐えうる操作性を実現できる。しかしながら、従来の没入型モデラでは、仮想物体の形状の生成にのみ着目したものが大半であり、物体間に動きの制約のある仮想物体やアニメーションを伴う仮想物体を生成できるものは知られていない。没入型モデラにおいて仮想物体に対する制約の定義を可能とすることで、仮想環境に没入しながら、制約を持つような多様な仮想物体を直感的・対話的にデザインできると考えられる。

以上のような背景から本研究では、モデリング手法として没入型モデラに着目し、没入型モデラの3次元形状生成における優位性を活かした、仮想物体に対する制約の付加手法を提案する。制約の種類として本論文では、ドアや引き出しな

どの多くの現実物体が持っており，仮想物体デザイン時の使用頻度が高いと思われる，仮想物体の並進や回転を制限する制約(幾何制約)に焦点を置く．

幾何制約を没入型モデラで扱う場合，幾何制約自身が実体を持っていないため，基準軸や可動範囲などの幾何制約の属性の把握や，幾何制約に対する操作が困難であるという問題がある．この問題を解決するために本論文では，本来実体を持っていない幾何制約を，その属性を表す形を持った実体(幾何制約プリミティブ)として提供する手法を提案する [14, 15]．これにより，幾何制約の属性を直感的に把握することができ，また，幾何制約プリミティブの位置・姿勢や形状自身を操作することで，対話的に幾何制約の属性の変更が可能になる．さらに，仮想物体と幾何制約プリミティブを組み合わせる簡単な操作で，仮想物体に対する幾何制約の付加を実現することにより，複雑な操作に習熟しなくても，幾何制約を持った仮想物体のモデリングが可能になると考えられる．

以上に述べた提案手法を没入型モデラに導入することにより，仮想環境に没入したまま，仮想物体の形状とふるまいの両者を直感的かつ対話的にデザインできると考えられる．本論文ではさらに，提案手法に基づいて試作した没入型モデラの実装について述べ，提案手法の有効性を試作システムの使用から考察する．

以降，2章では，従来の制約の記述手法について述べ，さらに本研究で着目している没入型モデラの特徴および既存の没入型モデラを紹介する．3章では，没入型モデラにおける幾何制約の付加手法について検討し，提案する．さらに4章では，3章の検討に基づき試作した没入型モデラ的设计方針や操作の実際について述べ，試作システムを用いてデザインした幾何制約を含む仮想物体の例を幾つか示す．最後に，試作システムを通して提案手法を考察し，まとめと今後の課題について述べる．

2. 関連研究：制約の記述と没入型モデラ

前章で述べたとおり，本研究の目的は，仮想物体の生成手法として没入型モデラに着目し，没入型モデラにおける幾何制約の対話的な記述手法を開発することにある．本章では，2.1節において，制約を記述することの利点および制約を記述する従来手法について述べる．また，2.2節では，没入型モデラの特徴について詳しく述べ，幾つかの既存の没入型モデラを紹介する．

2.1 制約の記述

3次元形状をデザインする際，その位置や姿勢，形状，色などの属性に対する制約を定義できることで，位置や姿勢が制限された物体やアニメーションを伴う物体など，多様な3次元形状をデザインできる．制約を記述する従来手法として，1) プログラムやスクリプトなどの何らかの言語で記述する手法や，2) 2次元グラフィカルユーザインタフェース (GUI) を用いて対話的に制約を記述する手法，が挙げられる．以下，それぞれについて詳しく述べる．

2.1.1 記述言語による手法

プログラム言語で3次元形状に対する制約を記述できるシステムの一つとして，3次元グラフィックスアプリケーションの構築を目的とした，TBAG[1]が挙げられる．TBAGは，C++言語をベースとし，インタラクションやアニメーション可能な3次元グラフィックスアプリケーション構築のための種々のクラスやインタフェースを提供するツールキットである．TBAGでは，3次元形状や位置・姿勢，色などの属性をプログラム言語で記述する．また，任意の変数に対して関係式を定義することにより，3次元形状の任意のパラメータに対して制約付けを行うことができる．下に，TBAGにおける制約の記述例を示す．ある2個の3次元形状が変換行列 $xform1$ ， $xform2$ を持っているとし，`identity_trans` はある定数の変換行列とする．

```
assert(xform1 * xform2 == identity_trans)
```

`assert` 関数によりこの制約が有効化されると、`xform1`、`xform2`はこの式を満たすような値のみとり得る。つまり、`xform1`を変更すると、それに応じて`xform2`は自動的に上式を満たすような値に変更される。さらにTBAGでは、フレーム単位ではなく連続時間によるアニメーションを生成できる。

また、Obliq-3D[2]は、3次元グラフィックスアプリケーションを構築するための独自のインタプリタ言語を提供する。Obliq-3Dにおいても、TBAGと同様に任意の変数に対して関係式を定義することにより、3次元形状に対する制約を定義できる。このシステムでは、その言語で記述した内容は即座に3次元シーンに反映されるので、対話的な3次元形状生成が可能である。

これらのシステムでは、3次元形状やそれらに課す制約をなんらかの言語で記述する。3次元形状やそれに対する制約を1次元である言語で記述するので、直感的でないという問題点があり、言語に対する習熟が必要であるが、高度なアニメーションやインタラクションを含む3次元グラフィックスアプリケーションを構築できる。

一方、仮想物体の記述に主眼を置いたものに、Virtual Reality Modeling Language (VRML) [3]が知られている。VRMLでは、仮想物体の形状や色などの記述の他に、複数の時刻における仮想物体の位置・姿勢を指定し、その間の動きを計算により滑らかに補間することによりアニメーションを生成するキーフレームアニメーションを記述できる。

2.1.2 2次元 GUIによる対話的な記述手法

2次元GUIによって制約を持った3次元形状を対話的にデザインできるシステムに、様々な3次元コンピュータグラフィックス(CG)ソフトがある。近年の市販の3次元CGソフトには、精巧な3次元形状をデザインできるだけでなく、オブジェクト間の幾何的な制約や、多彩なアニメーションを定義できるものも多い。例えば、Ray Dream Studio[4]では、オブジェクトの回転をある点中心の回転しか許さない「球関節」や、オブジェクトの移動をある平面上のみに制限する「2D平面」など、オブジェクトの並進・回転に何らかの制限を与える幾何制約が幾つか用意されている。さらに、キーフレームによるアニメーションや、インバース

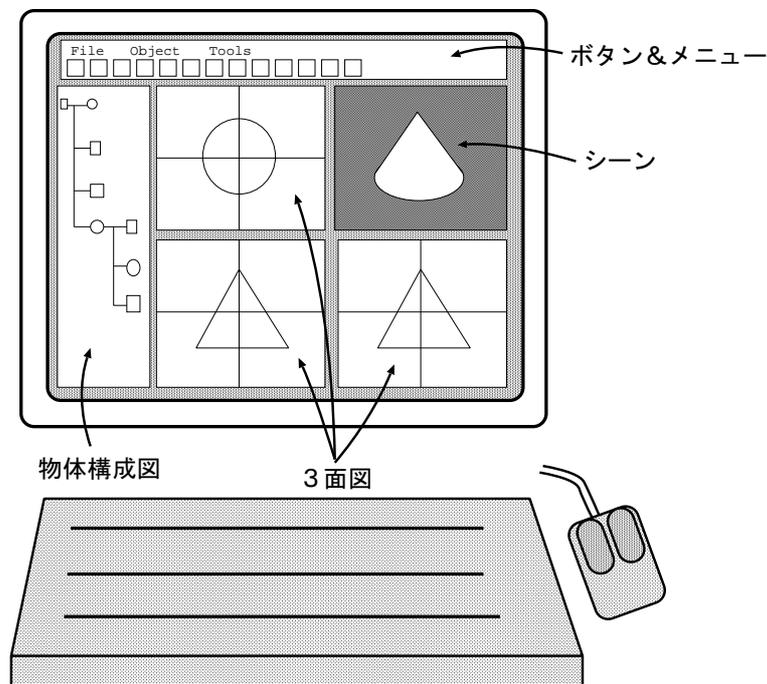


図 1 3DCG ソフトの操作画面例

キネマティクスの採用などにより高度なアニメーションを生成でき、また、「衝突検知」、「重力」、「摩擦係数」などの設定でリアルな物体の動きを再現できる。他にも、LightWave3Dや3D Studio MAXでは、オブジェクトの移動軌跡を指定する「モーションパス」や、その他多様なアニメーションのための様々な機能を装備している [16]。

これらの3次元CGソフトでは一般に図1のように、3次元物体の外観と同時に、3次元物体の3面図や、その物体の構成図(一般にツリー構造)、様々な機能を担う多数のボタンやメニューなどをCRTに表示し、それらに対してマウスなどの2次元の入力装置によって操作を行う。3次元の物体を2次元の入出力装置で扱わなければならないので、あまり直感的でない操作や複雑な操作が要求されるが、自由な3次元形状の生成や高度なアニメーションを扱えるものも多く、かなり複雑な形状やふるまいを持った3次元形状を生成できる。

また、2次元の入出力装置を用いて簡単に3次元形状を生成できる手法を取り

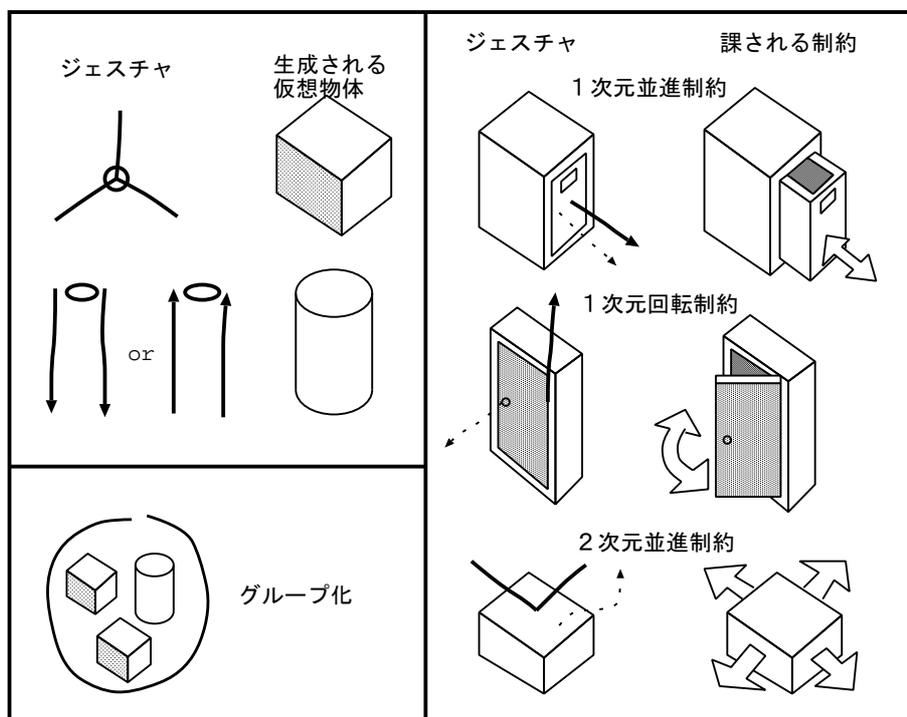


図 2 SKETCH における操作例

入れたモデリングツールとして、SKETCH[5]が挙げられる。SKETCHでは、マウスもしくはタブレットを使用し、ある特定の一連のジェスチャを入力することにより3次元形状を生成・操作できる。例えば、図2左に示されるような3次元形状生成のためのジェスチャや、グループ化などの3次元形状操作のためのジェスチャが用意されている。SKETCHでは、3次元形状の生成に加えて、図2右に示されるような3次元形状の並進や回転を制限する制約が実装されている。

以上のような2次元の入力・表示装置を使用する手法には、HMDや3次元センサといった特殊な装置を必要としないという利点がある反面、3次元形状の視認や操作において直感性に欠けるという問題点もある。

2.2 没入型モデラ

没入型モデラとは、仮想(人工)現実感(Virtual Reality, 以下 VR) 技術を応用して提示される仮想空間に没入しながら仮想物体を生成できるモデラを指す。ここ数年における計算機の処理能力の飛躍的な向上や、HMD(Head Mounted Display) や 3次元センサなどの VR には欠かせない入出力装置の高性能化、様々な仮想環境内での仮想物体操作支援手法の開発などにより、実用的な没入型モデラが登場し始めた。本節では、没入型モデラの特徴について述べ、既存の没入型モデラのいくつかを紹介する。

2.2.1 没入型モデラの特徴

没入型モデラは、マウスや CRT などの 2次元の入出力装置を使用する従来の仮想物体モデリングの手法と比べて、より実世界に近い感覚で仮想物体を操作する環境を提供できるという利点を持つ。この利点は、1) 視認が直感的に行える、2) 操作が直感的に行える、3) 対話性の高い形状生成が行える、という 3つの特長に起因する [10]。まず、これらの特長について述べる。

直感的な視認: 没入型モデラでは、両眼立体視や運動立体視により、仮想空間の 3次元的な視認を可能としている。両眼立体視は、HMD や液晶シャッター眼鏡などの装着により、左右の目にそれぞれの視点に対応する像を提示することによって得られる。また、磁気トラッカなどの 3次元センサを用いて頭部の位置・姿勢を実時間で計測し、その視点からの像を提示することにより、頭部を動かしたときの視点と対象物体の相対的位置関係の変化により生じる運動視差により運動立体視が可能である。これらの立体視手法は、3次元的な視認に不可欠な奥行き情報を提示し、仮想物体の形状や仮想物体間の空間的な位置関係の把握を容易にする。

直感的な操作: 没入型モデラでは一般に、3次元入力装置の使用により、仮想物体の直接操作を可能としている。3次元入力装置には、3次元センサを装着したグローブや 3次元センサにボタンを組み合わせたものなどが挙げられる。これらの装置の使用により、2次元の入力装置では煩雑になりがちな 3

次元仮想物体操作を直接的に行える。

対話的な仮想物体生成: 没入型モデラでは、仮想空間に没入したまま 3 次元仮想物体を実時間で対話的に操作できる。すなわち、仮想物体に対する操作は直ちに反映され、その操作結果が即座に視認できるため、効率的な仮想物体モデリング環境の提供が可能である。

しかし、没入型モデラは上のような利点を数多く持つ反面、仮想物体に対する正確な操作が困難であるという問題がある。この問題は、仮想空間の計算処理などによって起こる応答の遅延、3 次元入力・表示装置の精度の低さなどによって起こる仮想物体を提示する位置のずれ、人間の空間指示能力の低さなどに起因する。この問題点を解決するために、ハードウェアおよびソフトウェアの観点から様々な仮想物体の操作支援手法が研究されている。

ハードウェア的な仮想物体操作支援手法として、人間の物体操作において重要とされている力覚や触覚を同時に提示する手法がある [11, 12, 13]。これらの手法は、特殊で大掛かりな装置が必要であることや、装置の可動範囲にユーザの行動が束縛されるという問題点はあるものの、より現実の物体操作に近い自然な仮想物体操作環境を提供できる。

ソフトウェア的な仮想物体操作支援手法として、仮想物体の位置・姿勢を離散的に制約する離散配置制約 (グリッド制約) や、仮想物体同士の衝突を検出しその位置を補正する干渉回避、本来 6 自由度ある仮想物体の並進・回転の自由度を 2 次元並進や 1 次元回転などに制限する手法などが提案されている [6, 7, 9, 10]。

また、没入型モデラの操作性を向上させる手法に両手による操作を可能とする手法がある。没入型モデラにおける両手操作には、並列操作により作業が効率化するということや、体性感覚として既知である両手の相対位置情報を利用した自然な両手の協調操作を可能にする、といった利点があり、有効な操作支援となり得ることが指摘されている [17]。

以上のような仮想物体操作支援手法や両手操作により、十分実用的な操作性を兼ね備えた没入型モデラも登場し始めた。次項では、ソフトウェアによる仮想物体操作支援手法や両手操作を導入している既存の没入型モデラの幾つかを紹介する。

2.2.2 既存の没入型モデラ

HMD を利用した初期の没入型モデラとして、6 自由度の入力装置を 1 個使用し、仮想環境に没入しながら 3 次元形状を生成できる 3DM[6] が知られている。3DM は、正確な仮想物体操作を支援するために、3 次元カーソルの移動をグリッド単位に制限する機能を備えている。

また、Conceptual Design Space (CDS)[7] では、仮想物体の正確な位置合わせを支援するために、本来各々 3 自由度ある仮想物体の並進・回転操作の自由度を 1 自由度または 2 自由度に制限できる機構を設けている。CDS では、6 自由度の入力装置を 1 個使用し、その入力装置から仮想空間に発せられる光線 (Ray) と呼ばれる直線と交わる仮想物体への操作を可能としている。したがって、離れた位置にある仮想物体への操作が可能である。

両手操作を積極的に取り入れた没入型モデラも幾つか存在する。Stoakley らは、仮想環境内での操作とナビゲーションを支援するユニークな手法として World in Miniature (WIM)[8] を開発している。仮想環境全体を表すミニチュアを提示し、仮想環境での変更はそのミニチュアに反映され、逆にミニチュア内の仮想物体への変更は仮想環境内の対応する仮想物体を変更する。また、ミニチュア内に提示されているユーザを移動させることで、視点を変更することができる。WIM は、仮想環境内において直接届かない位置にある仮想物体への操作を可能にし、また仮想環境の全体像の理解を助ける。

Chapel Hill Immersive Modeling Program (CHIMP)[9] もまた、両手操作を採用している。CHIMP では、円錐型のスポットライトによって操作対象物体を選択する仮想物体の遠隔操作や、視線方向で選択できるメニュー、先に述べた WIM メタファーなどの、仮想環境内での作業を支援するための様々なインタラクション手法を取り入れている。また CHIMP では、CDS と同様に仮想物体の並進・回転操作の自由度を制限できる機能を実装している。

また、ブロック玩具を模倣し、ブロックを組み合わせる簡単な操作だけで 3 次元形状を生成できる没入型モデラとして、VLEGO[10] がある。VLEGO では、ブロックの拡大・縮小や彩色などに両手を協調させて行う自然な操作を取り入れており、簡易に複雑な 3 次元形状を生成できる。さらに正確な仮想物体操作を支援

するために、ブロックの位置・姿勢を離散的に制約する離散配置制約や、ブロック同士の衝突を検出し、自動的に位置を補正する干渉回避といった、ソフトウェアによる操作支援手法を導入している。また、複数のユーザが1つの仮想空間を共有し、お互いに協調しあいながら3次元形状をデザインできる、VLEGOをベースとした没入型モデラ VLEGO II[18] も開発されている。

3. 没入型モデラにおける制約の付加に関する検討

没入型モデラにおいて仮想物体に対する制約を扱えるようにすることにより，没入型モデラの3次元形状生成における利点を活かした，直感的かつ対話的な制約の定義が可能になることが期待できる．その結果，仮想環境に没入したまま，1方向のみにしか移動しない引き出しや常に回転し続ける風車などのような多様な仮想物体をデザインできる．本章では，様々な制約の中でも，制約の種類として本研究で焦点を当てている幾何制約の定義と概要について述べ，没入型モデラにおいて幾何制約を扱う手法として提案する，幾何制約プリミティブを用いる手法について詳しく述べる．

3.1 仮想物体に対する幾何制約

仮想物体は，その位置や姿勢，形状，体積，他の仮想物体との相対位置関係などといった様々な幾何的な属性を持っている．それらの幾何的な属性に与える何らかの制約をまとめて本論文では幾何制約と呼ぶ．幾何制約には様々な種類を考えることができ，その数は膨大である．本項では，本研究で焦点を当てている幾何制約について考察する．なお，仮想物体の幾何的な属性以外に，色や材質，テクスチャ，さらには音といった属性も考えられるが，本研究では扱わない．

幾何制約としてまず考えられるのが，仮想物体の位置や姿勢をある範囲に制限する制約である．本来3次元空間内では仮想物体の並進や回転は各々3自由度，計6自由度であるが，その並進や回転の自由度を制限した方が良い場合も多い．例えば，人体モデルの各部の運動は関節を中心とした回転に限られ，引き出しの運動は1方向のみの並進に限られる．また，2.2.1項で述べたような，仮想物体の位置・姿勢を離散的に制約する離散配置制約や，仮想物体同士の衝突を監視しその位置を補正する干渉回避もこの部類に入る．

また，仮想空間内で物体の動きをシミュレートしたい場合などでは，仮想物体の位置や姿勢に対して何らかの力学的な制約を与えることが要求される．例えば，仮想物体に質量を与え重力を働かせるといったことや，仮想物体間に摩擦力や引力を働かせることが考えられる．

また、建築 CAD などでは、限られた空間内で建築物を設計しなければならない場合も多い。例えば、限られた区画を有効に使うために、常にその区画をはみ出ず、かつ最大の面積になるように、建物の底面を調整するような制約が考えられる。また、ビルの建築では、ビルの底面積に対する最大の高さ (容積率) が定められている。この場合、ビルの底面積と高さの間に制約が存在する。

さらに、アニメーションは仮想物体の属性を時間によって制約したものと捉えることができる。例えば、仮想物体の位置や姿勢を時間と関係付けることで、常に回り続ける風車や、ある一定の軌跡を移動し続ける自動車などを生成できる。複数の時刻における仮想物体の位置・姿勢を指定し、その間を計算により補間するキーフレームアニメーションもこの部類に入る。

以上のような幾何制約を没入型モデラで扱えるようにすることにより、仮想物体の形状だけでなく、仮想物体のふるまいに関しても、仮想環境に没入したままデザインできる。本研究では、ドアやプロペラなどの多くの現実物体が持っており、仮想物体デザイン時の使用頻度も高いと予想されることから、仮想物体の位置・姿勢に与える何らかの制約 (時間による制約を含む) を幾何制約と捉える。その中でも本研究では、まず基本的なものとして、以下のような幾何制約を対象とする。

1 次元並進制約 仮想物体の並進を 1 次元に制限する制約

2 次元並進制約 仮想物体の並進を 2 次元に制限する制約

1 次元回転制約 仮想物体の回転を 1 次元に制限する制約

2 次元回転制約 仮想物体の回転を 2 次元に制限する制約

以降、3.2 節で、没入型モデラにおける幾何制約の仮想物体に対する付加手法を提案し、3.3 節では、その提案手法に基づいて、これらの幾何制約についてさらに詳しく述べる。

3.2 没入型モデラにおける幾何制約の付加手法の提案

幾何制約は、回転軸などの基準軸や、可動範囲、アニメーションスピードなどの属性によって特徴付けられる。本節では、幾何制約を没入型モデラで扱う際の問題点を指摘し、その問題点を解決する手法を提案する。

まず、没入型モデラにおける幾何制約の付加手法を検討するにあたって、幾何制約を扱える3次元CGソフトなどの2次元インタフェースを、そのまま3次元空間に拡張することを考える。この場合、ポップアップメニューなどのメニュー機能やボタンを用いる手法が一般的である。3DM[6]やCHIMP[9]では、3次元空間に浮かべた2次元メニューパネルを使用して、コピーやグループ化といった様々な仮想物体操作を行える。このような2次元メニューを用いる手法には、従来の2次元ユーザインタフェースでの経験をそのまま活かせるという利点がある。しかし、幾何制約の定義に2次元メニューの使用を考えた場合、幾何制約の属性を文字や数値で設定しなければならないので直感的でないという問題点がある。また、幾何制約の種類が増えた場合、メニューが複雑になるという問題点もある。そこで本研究では、没入型モデラの直感的操作性を活かした幾何制約の操作手法について以下で考察する。

幾何制約を没入型モデラで扱うことを考えた場合、幾何制約自身が実体を持っていないため、その扱いが困難であるという問題がある。すなわち、幾何制約自身が目に見えないため、幾何制約の属性の把握が困難であり、またその幾何制約の属性の変更や、仮想物体に対する付加操作が困難である。この問題を解決するためには、

1. 幾何制約の直感的な視覚化を行う、
2. 幾何制約の属性の対話的な変更を可能とする、
3. 仮想物体に対する幾何制約の簡易な付加手法を提供する、

という要件を満たすことが望まれる。

そこで、この要件1を満たすために、本来実体を持たない幾何制約を、その種類や属性を端的に表現する形を持った実体(幾何制約プリミティブ)として提供する手法を提案する。その際、幾何制約プリミティブの形状は、その幾何制約プ

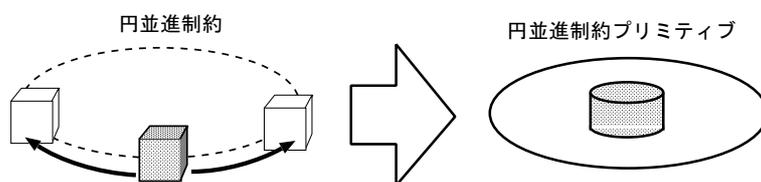


図 3 円並進制約の視覚化

リミティブによって仮想物体がどう制約されるかを視覚的に知るための情報であり、幾何制約の働きの把握のし易さを左右する要因となるため、幾何制約プリミティブに与える形状のデザインは十分考慮する必要がある。例として、仮想物体の並進をある円周上に制限する円並進制約を考える。図 3 に示すように、円並進制約を表す幾何制約プリミティブに、形状として、円並進制約であることを示す円柱と、制約を受ける仮想物体の軌道を表す円を与える。ユーザは円柱を見てこの幾何制約プリミティブが円並進制約を表すものであることを知り、また円を見ることによりこの幾何制約プリミティブによって制約される仮想物体の動きを予想することができる。このように、幾何制約を形を持った実体として 3 次元的に視覚化することで、幾何制約の種類や属性を容易に把握できると考えられる。

また、先に述べた要件 2 を満たすために、幾何制約の属性の変更は、その幾何制約を表す幾何制約プリミティブの位置・姿勢や形状自身への操作で実現する。先の円並進制約の例では、円並進制約プリミティブを並進・回転させることで、仮想物体の並進運動を制限する円の位置・姿勢を定義できる (図 4(a))。また、円並進制約プリミティブに円の半径を操作するための部品 (この例では小球) を与え、その部品を操作することで円の半径を変更できる (図 4(b))。このように、幾何制約プリミティブの移動やその形状自身への操作により幾何制約の属性を変更できることにより、その属性を視覚的に確認しながら対話的に変更できる。

さらに、先に述べた要件 3 を満たすために、幾何制約の仮想物体への付加は、仮想物体と幾何制約プリミティブを組み合わせる操作で実現する。先の円並進制約の例では、ある仮想物体を円並進制約プリミティブに組み合わせることで、その仮想物体の並進が円並進制約プリミティブが表す円周上にのみに制限されるよ

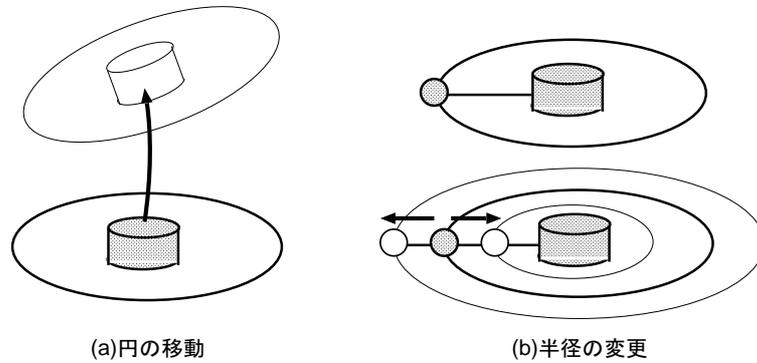


図 4 円並進制約の属性の変更

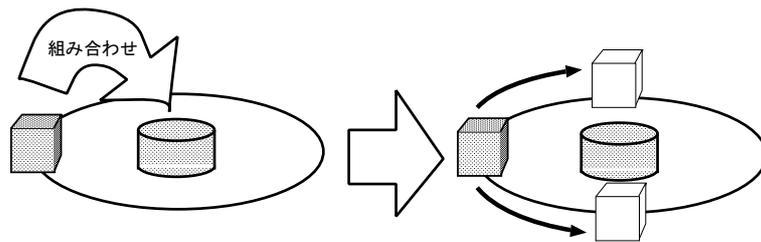


図 5 仮想物体に対する円並進制約の付加

うにする (図 5). これにより, 複雑な操作を必要とせずに, 幾何制約を対象物体に付加できる. この場合, 仮想物体と幾何制約プリミティブを組み合わせる操作は, 仮想物体に対して幾何制約を付加することの容易さを左右するため, 組み合わせ操作についても考慮しなければならない.

以上のように, 没入型モデラに幾何制約プリミティブを導入することにより, 幾何制約を含む多様な仮想物体を直感的かつ対話的にデザインできるようになると考えられる.

3.3 幾何制約プリミティブ

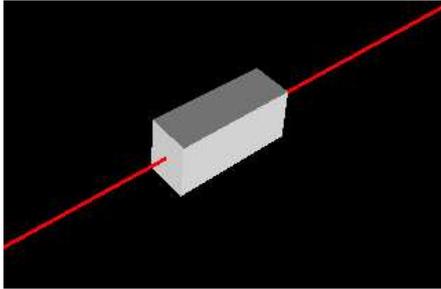
前節で、没入型モデラにおいて幾何制約を仮想物体に付加する手法として、幾何制約をプリミティブとして提供する手法を提案した。本節では、本研究で提供する個々の幾何制約プリミティブの形状や働きについて具体的に述べる。

本研究では、仮想物体の並進や回転の自由度を制限する幾何制約を扱う。これらを表現する基本プリミティブは以下の4つである。基本幾何制約プリミティブをCGによって表示したものを図6に示す。

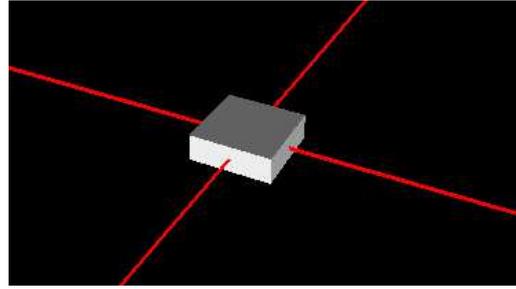
- 1 次元並進制約プリミティブ:** このプリミティブに制約される仮想物体の並進運動は、このプリミティブが表す基準軸と平行な方向に制限される。
- 2 次元並進制約プリミティブ:** このプリミティブに制約される仮想物体の並進運動は、このプリミティブが表す2軸によって定義される平面と平行な並進に制限される。
- 1 次元回転制約プリミティブ:** このプリミティブに制約される仮想物体の回転運動は、このプリミティブが表す1軸を回転軸とするものに制限される。
- 2 次元回転制約プリミティブ:** このプリミティブに制約される仮想物体の回転運動は、このプリミティブが表す2軸を回転軸とするものに制限される。

また、上に述べた4種類の幾何制約において、可動範囲を指定できる幾何制約プリミティブを以下に示す。これらに対応するCGを図7に示す。

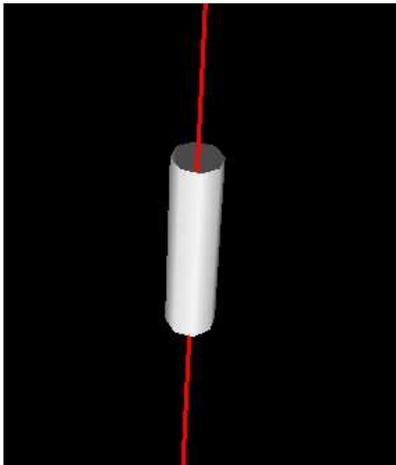
- 範囲付き 1 次元並進制約プリミティブ:** このプリミティブに制約される仮想物体の並進運動は、このプリミティブが表す基準軸と平行、かつ三角錐に挟まれる領域に制限される。また、三角錐を移動することによって、並進範囲を変更できる。
- 範囲付き 2 次元並進制約プリミティブ:** このプリミティブに制約される仮想物体の並進運動は、このプリミティブが表す2軸によって



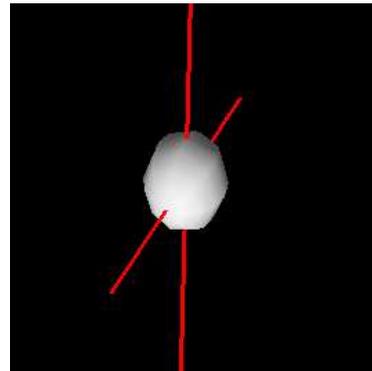
1次元並進制約プリミティブ



2次元並進制約プリミティブ

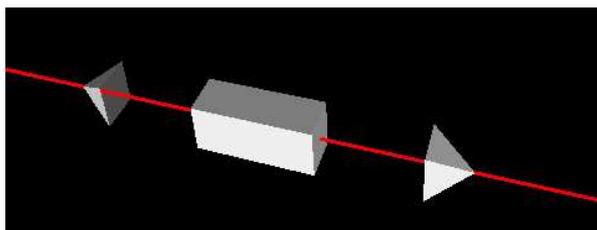


1次元回転制約プリミティブ

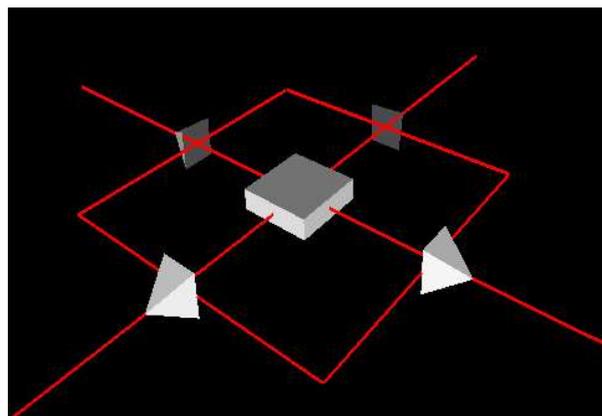


2次元回転制約プリミティブ

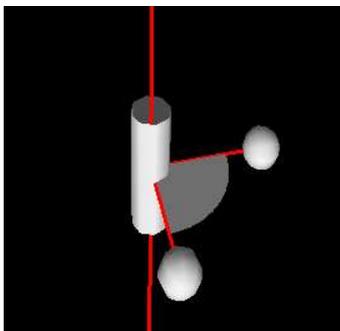
図 6 基本幾何制約プリミティブ



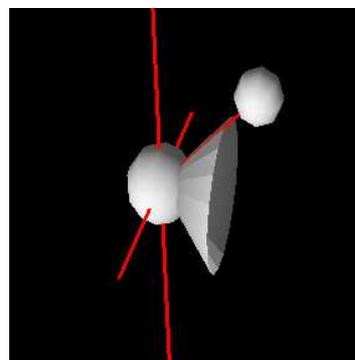
範囲付き
1次元並進制約プリミティブ



範囲付き
2次元並進制約プリミティブ



範囲付き
1次元回転制約プリミティブ



範囲付き
2次元回転制約プリミティブ

図 7 範囲付き幾何制約プリミティブ

定義される平面と平行，かつ各軸方向へは三角錐までに制限される．また，三角錐を移動することによって，並進範囲を変更できる．

範囲付き 1 次元回転制約プリミティブ: このプリミティブに制約される仮想物体の回転運動は，このプリミティブが表す軸を回転軸とした，扇型で表される範囲内に制限される．また，扇型の両端に設けられた 2 個の小球を移動することによって，回転範囲を変更できる．

範囲付き 2 次元回転制約プリミティブ: このプリミティブに制約される仮想物体の回転運動は，このプリミティブが表す 2 軸を回転軸とした，円錐で表される範囲内に制限される．また，円錐の上端に設けられた小球を移動することによって，回転範囲を変更できる．

これらの範囲付き幾何制約プリミティブでは，三角錐や扇型，円錐といった可動範囲を表す部品を操作することによって，その可動範囲を変更できる．例えば，範囲付き 1 次元並進制約プリミティブの場合，図 8 のように，左右の三角錐を移動することにより並進範囲を設定できる．範囲付き 1 次元回転制約プリミティブの場合は，図 9 のように，回転範囲を表す扇型を操作するために設けられた小球を移動させることで，回転範囲を変更できる．

以上の幾何制約プリミティブに加えて，以下のような仮想物体に対してアニメーションを定義できる幾何制約プリミティブを導入する．その CG を図 10 に示す．

1 次元回転アニメーション: 円柱と回転軸を表す 1 本の直線，さらにその回りを回り続ける 2 個の小球から成る．このプリミティブに制約される仮想物体は，回転軸中心に，小球と同じスピードで回転し続ける．

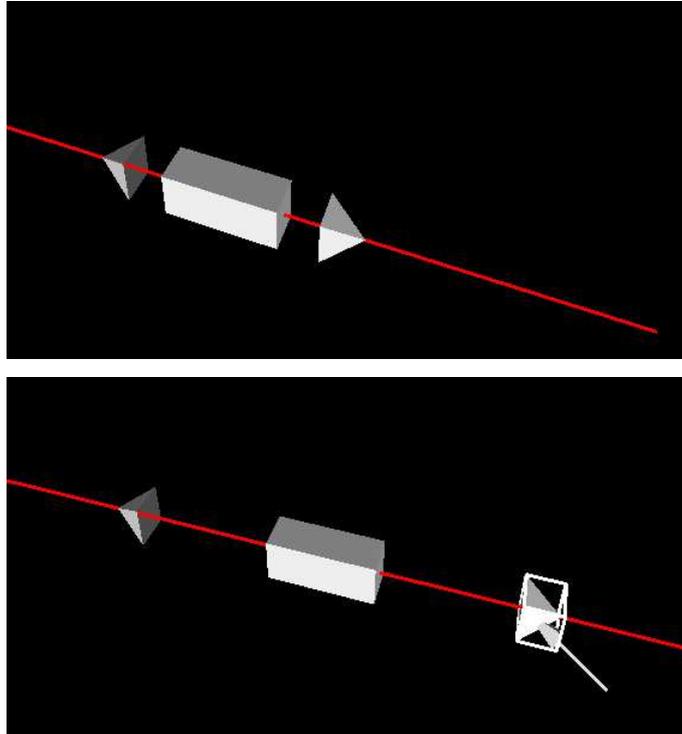


図 8 範囲付き 1 次元並進制約の並進範囲の変更

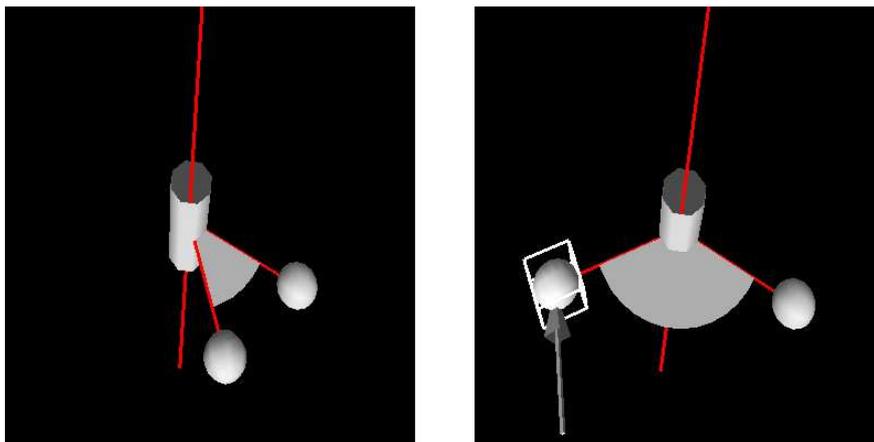


図 9 範囲付き 1 次元回転制約の回転範囲の変更

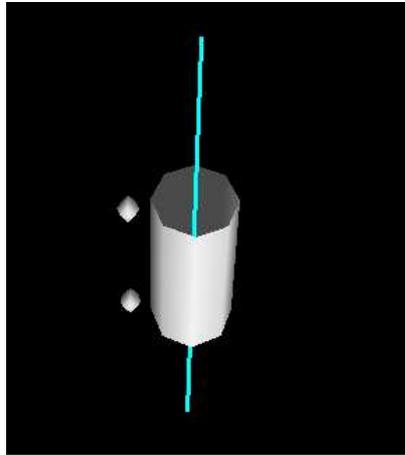


図 10 1次元回転アニメーションのための幾何制約プリミティブ

このプリミティブでは，幾何制約プリミティブの回りを回り続ける小球を観察することにより，アニメーションスピードを把握できる．

本来幾何制約は実体を持っていないので，没入型モデラに幾何制約プリミティブを導入する際には，必要に応じて幾何制約プリミティブを不可視にできる機能を持たせることが望まれる．

4. 幾何制約プリミティブを導入した没入型モデラの試作

前章において，没入型モデラにおける幾何制約の付加手法として，幾何制約プリミティブを用いる手法を提案した．本章では，その提案手法の有効性を示すために試作した没入型モデラの実装について述べる．

4.1 システムの設計方針

本システムの開発の目的は，先に提案した幾何制約プリミティブを用いる手法の有効性を探ることである．したがって，幾何制約プリミティブに主眼を置いた没入型モデラを試作する．そのためにまず，仮想物体と幾何制約プリミティブの組み合わせ操作について考慮しなければならない．

仮想物体と幾何制約プリミティブの組み合わせ操作は，仮想物体に対して幾何制約を付加することの容易さを左右する．本システムでは後述のように，仮想物体の形状も同様の組み合わせ操作を用いて生成するので，組み合わせ操作の操作性は重要であり，簡易な組み合わせ操作が要求される．また，幾何制約には制約する側と制約される側があるという性質上，仮想物体と幾何制約プリミティブを組み合わせる際，両者の間に順序関係を持たせることができなければならない．

また，仮想物体に対して幾何制約を付加する際，両者の間の相対位置を正確に合わせる必要がある．したがって，仮想物体と幾何制約プリミティブ同士の正確な位置合わせを支援する手法が望まれる．本システムでは，仮想物体操作支援手法として，離散配置制約を課すこととする．

以上のような設計方針に基づいて，3.3節で設計した幾何制約プリミティブを導入した没入型モデラを試作し，提案手法の有効性を確認する．以降，4.2節で試作システムの概要について述べる．さらに，4.3節で本システムにおける基本操作の実際について，4.4節で組み合わせ操作や幾何制約の付加操作について，それぞれ詳しく述べる．また，4.5節では，本システムを用いてデザインした幾何制約が付加された仮想物体の幾つかを紹介する．

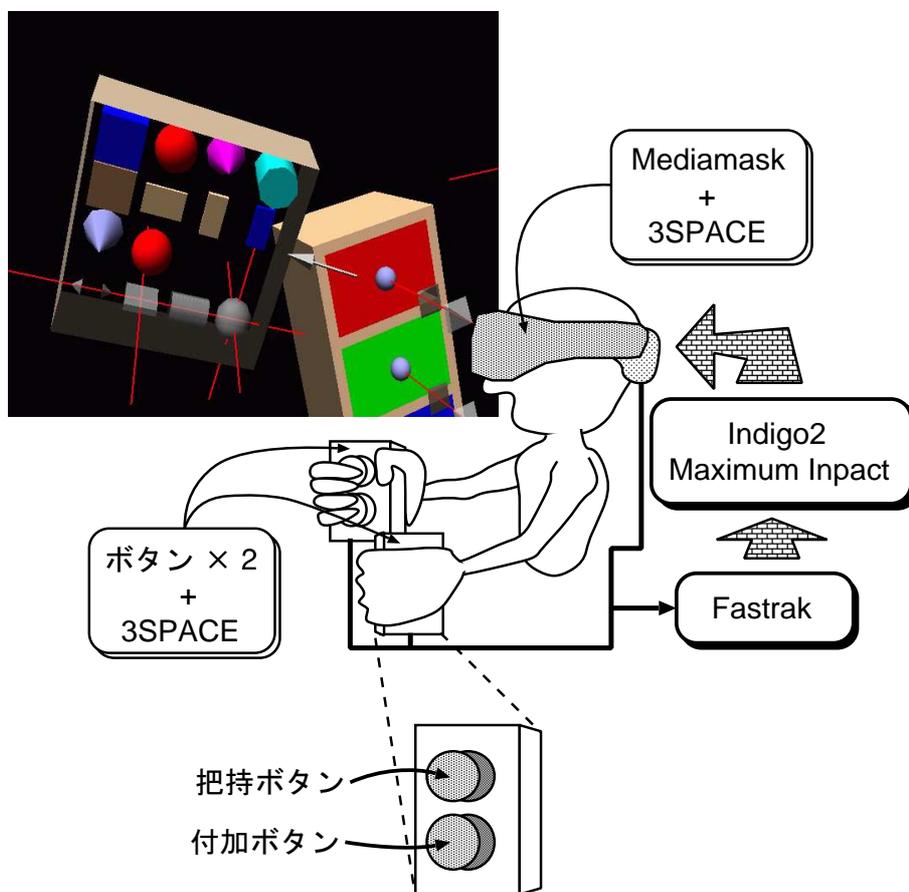


図 11 ハードウェア構成

4.2 システム概要

本節では、前節で述べた設計方針に基づいて試作した没入型モデラのハードウェア構成および仮想物体管理手法、さらに本システムで導入している仮想物体操作支援手法について述べる。

ハードウェア構成: 試作システムのハードウェア構成を図 11に示す。グラフィック WS として Indigo2 Maximum Impact (SGI 社) を採用した。ユーザは HMD Mediamask (Olympus 社) を通して仮想空間を両眼立体視すると同時に、磁気トラッカ 3SPACE Fastrak (Polhemus 社) によって計測される視点

に基づき実時間で仮想空間を運動立体視する。またユーザは、両手用にそれぞれ用意された1組の3次元入力装置を把持し、それらに追従する2つの3次元カーソルを用いて仮想物体を操作する。製作した3次元入力装置には磁気トラックを組み込んでおり、その位置・姿勢を計測することにより6自由度の直接操作を可能としている。さらに、図11に示すように、3次元入力装置にはそれぞれ2個のボタンが装備されている。以降、上方を**把持ボタン**、下方を**付加ボタン**と呼ぶ。それぞれの主な役割は次の通りである。

把持ボタン: 仮想物体を把持し、並進・回転させるためのボタン。

付加ボタン: 主に付加操作を実行するためのボタン。

これらのボタンを用いた具体的な操作については4.3節で述べる。

シーングラフによる仮想物体管理: 本システムにおける仮想物体の形状は、1つ以上の球や直方体、円錐、円筒といった基本的な3次元幾何形状(**形状プリミティブ**)から成る。つまり、予め用意された形状プリミティブを組み合わせることで、仮想物体の形状をデザインする。また、幾何制約を持つ仮想物体は形状プリミティブに加えて、幾何制約プリミティブを含む。

これら仮想物体の管理には、シーングラフの概念を採用した[19]。本システムにおけるシーングラフの例を図12左に示す。この例は、範囲付き1次元回転制約の付加されたドア(図12右)を表す。グループ化ノードは複数のプリミティブを統括し、それらのプリミティブを一つの剛体として扱うことを可能にする、形状を持たないノードである。また、各ノード間には親子関係が存在し、幾何制約プリミティブに子がある場合、その幾何制約プリミティブは子はその属性に応じて制約する。例えば、図12においては、幾何制約プリミティブはグループ化ノード2、すなわち、形状2(板)および形状3(取っ手)を制約する。

仮想物体操作支援手法: 本システムでは、仮想物体の正確な位置合わせを支援するために、形状プリミティブや幾何制約プリミティブの位置や姿勢を離散的に制約する離散配置制約を導入する。すなわち、位置に関しては1cm間

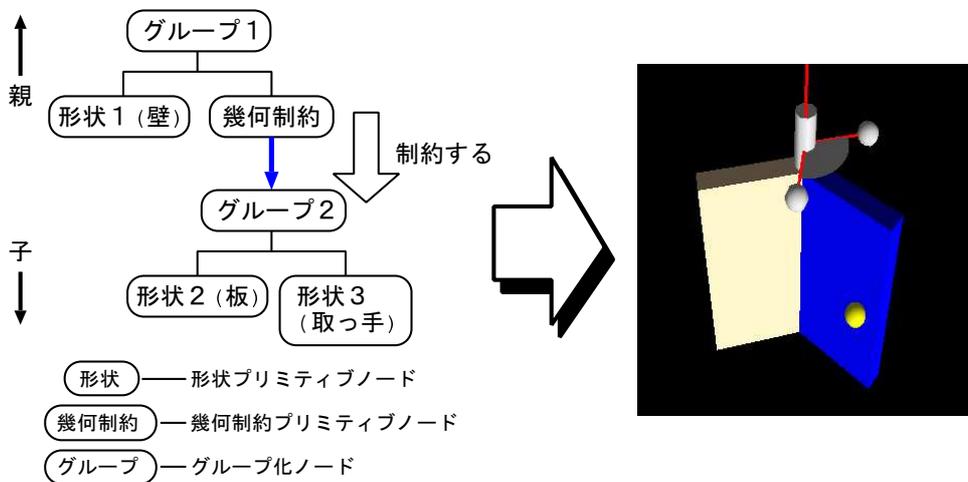


図 12 本システムにおけるシーングラフ例

隔の格子点のみに、姿勢については各軸周り 90 度単位でのみ配置可能とする。これにより、仮想物体同士、あるいは仮想物体と幾何制約プリミティブ間の相対位置を正確に決定できる。ただし、離散配置制約が必要無い場合は、離散配置制約を無効にできる。また、幾何制約プリミティブによって制約を受けている仮想物体は自動的に離散配置制約は無効となり、その仮想物体の動きは幾何制約プリミティブに従う。

なお実装にあたり、プログラミング言語として C++言語 [20] を、そのライブラリとして OpenGL[21]、および独自のツールキット [22] を使用した。

4.3 基本操作

本システムでは、両手に持った 3 次元入力装置に追従する、仮想空間中の 2 個の 3 次元カーソルによって、仮想物体に対する操作を行う。本節では、本システムで実装している仮想物体に対する基本的な操作の実際について以下に述べる。

選択: 3 次元カーソルの先端が仮想物体の内部にあるとき、その仮想物体は選択された状態になる。選択されていることを示すために、そのカーソルの指

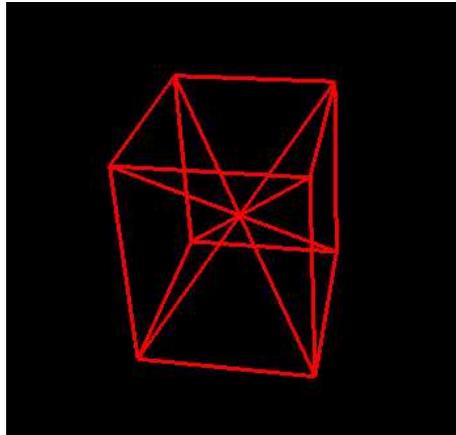


図 13 消去用ボックス

す仮想物体をハイライト表示し，その仮想物体を囲む最小の直方体であるバウンディングボックスをワイヤフレームで表示する．複数の仮想物体が重なっている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仮想物体のみが選択される．

把持: 任意の仮想物体を選択した状態で把持ボタンを押すことで，その仮想物体を把持できる．把持ボタンを押している間，把持された仮想物体は 3 次元カーソルの移動に合わせて，離散配置制約が課されている場合は離散配置制約を伴いながら，並進・回転する．把持ボタンを解放すると，その時点での位置・姿勢で仮想空間中に再配置される．

複製: ある仮想物体を把持した状態で，把持ボタンを押し続けたまま付加ボタンを押すことにより，元の仮想物体を把持したままその仮想物体の複製を仮想空間に生成できる．複製では，元の仮想物体の実体へのリンクを生成するわけではなく，まったく新しい実体を生成するので，それぞれの仮想物体は独立して変更できる．

消去: 把持している仮想物体を，仮想空間に浮かんでいる図 13 に示されるようなワイヤフレームの直方体内へ移動させ，把持ボタンを解放することにより，

その仮想物体は消去される。仮想物体が直方体内にあるとき、消去可能なことを明示するため、その直方体をハイライト表示する。

また、離散配置制約の有効／無効や幾何制約プリミティブの可視／不可視を変更するために、以下の操作が実装されている。

離散配置制約の有効／無効: 何も選択または把持していない状態で把持ボタンをクリックすると、仮想物体に対する離散配置制約を、有効のときは無効に、無効のときは有効に切り替えることができる。

幾何制約プリミティブの可視／不可視: 何も選択または把持していない状態で付加ボタンをクリックすると、幾何制約プリミティブが可視のときは不可視に、不可視のときは可視に変更できる。

4.4 デザインプロセス

本システムで仮想物体をデザインする際には、基本的に以下のステップを踏む。

1. 必要なプリミティブを用意する。
2. 形状プリミティブ同士を組み合わせ、仮想物体の形状をデザインする。
3. 必要ならそれらの形状に幾何制約を付加する。

以降、それぞれのステップについて詳しく述べる。

4.4.1 プリミティブの選択

既に述べたように、本システムにおける仮想物体はすべて、1つ以上のプリミティブから構成される。プリミティブの種類には、球や直方体などの基本的な幾何形状である形状プリミティブに加えて、幾何制約を付加するという特別な働きを持つ幾何制約プリミティブが提供されている。プリミティブはすべて、その種類に関わらず、**プリミティブボックス**と呼ばれる箱の中に予め用意されている(図14)。ユーザはプリミティブボックスから必要なプリミティブを選び取り、次項で

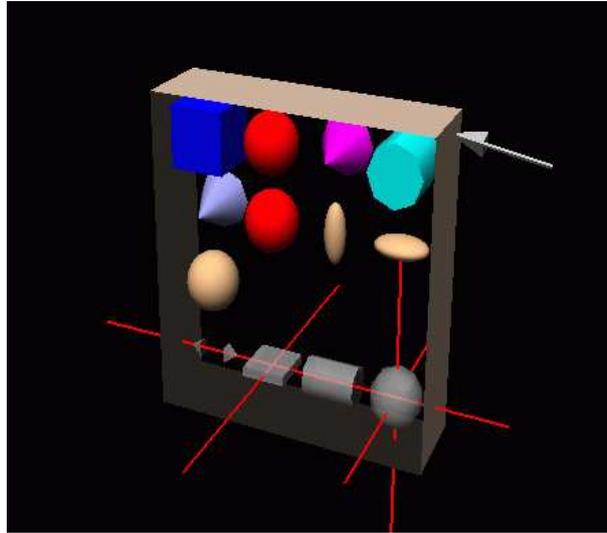


図 14 プリミティブボックス

述べる組み合わせ操作を用いて、それらを組み合わせていながら仮想物体をデザインしていく。

また、生成した任意の仮想物体をプリミティブボックスの空いている場所へ登録すると、予め登録されたプリミティブと同様に、その仮想物体を再利用できる。

プリミティブをプリミティブボックスから選び取るには、通常の把持操作と同様に、プリミティブボックス中の目的とするプリミティブを3次元カーソルで選択し、把持ボタンを押す。プリミティブボックスからプリミティブを把持した時点で、そのプリミティブの複製が生成される。したがって、プリミティブボックスに用意されたプリミティブは、メモリが許す限り幾つでも生成することができる。また、プリミティブボックスからプリミティブを選択する際、プリミティブが選択中であることを明示するために、そのプリミティブをひとまわり大きく、かつハイライト表示する。

4.4.2 プリミティブの組み合わせ

本システムでは、プリミティブの組み合わせ操作として2種類の操作を実装している。1つは片手のみを用いる操作、もう1つは両手を協調させて行う操作であ

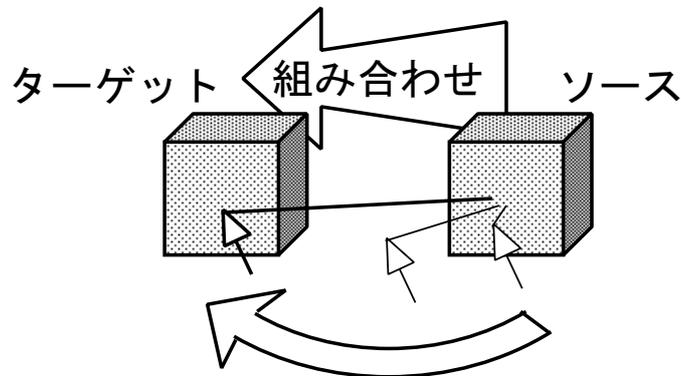


図 15 片手組み合わせ操作

る。片手操作と両手操作のどちらを使用した場合にも，組み合わせた結果に違いはないので，好みの方を使用すれば良い。以下，それぞれについて詳しく述べる。

片手操作: 図 15に片手による組み合わせ操作を示す。この操作では，左右どちらか一方の手のみを使用する。まず，組み合わせたい 2 個の仮想物体のうち，どちらか一方を 3 次元カーソルで選択し，付加ボタンを押す。説明のために，この仮想物体を**ソースオブジェクト**と呼ぶ。この後，付加ボタンが押されている間は，その 3 次元カーソルの先端とソースオブジェクトを結ぶ直線が表示される。次に，残るもう一方の仮想物体 (**ターゲットオブジェクト**と呼ぶ。) の内部まで 3 次元カーソルをドラッグし，ターゲットオブジェクトが選択された状態で，付加ボタンを解放する。この一連の操作の結果，ソースオブジェクトはターゲットオブジェクトに組み合わせられる。

両手操作: 図 16に両手による組み合わせ操作を示す。この操作では，両手を協調させて組み合わせ操作を行う。一方の手でソースオブジェクトを把持または選択し，他方の手でターゲットオブジェクトを把持または選択した状態のときに，ターゲットオブジェクトに対応するの 3 次元入力装置上の付加ボタンをクリックする。これにより，ソースオブジェクトのターゲットオブジェクトへの組み合わせ操作が実行される。

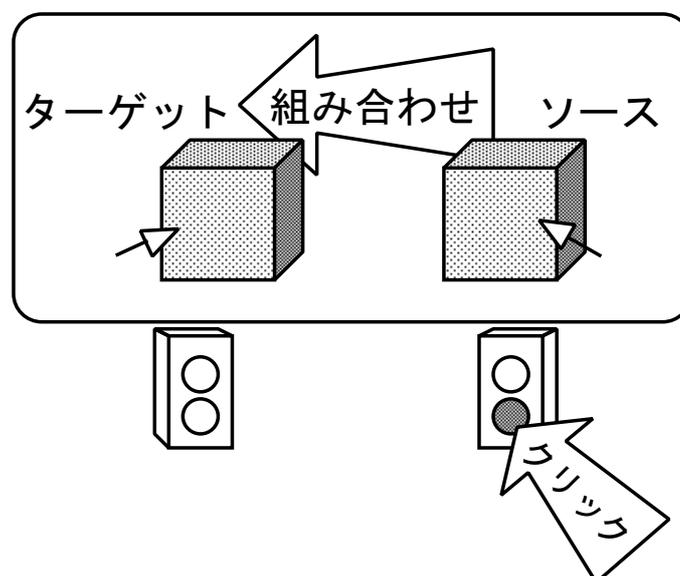


図 16 両手組み合わせ操作

4.4.3 幾何制約の付加

先に述べたとおり、形状プリミティブと幾何制約プリミティブの組み合わせ操作により、幾何制約の付加が実現される。しかしこの場合、組み合わせ操作の方向（どちらがターゲットオブジェクトになるか）が重要となる。ターゲットオブジェクトが幾何制約プリミティブの場合に限り、ソースオブジェクトはその幾何制約プリミティブの属性に応じて制約される。それ以外の場合は、ソースオブジェクトとターゲットオブジェクトはグループ化され、以後1つの剛体として扱われる。

図 17に実際の幾何制約の付加操作例を示す。この例では、2個の形状プリミティブ（壁、板）と1個の1次元回転制約プリミティブを使用し、板が壁に1次元回転制約を受けるドアを作成している。これを達成するために、以下の操作（操作1、操作2）を実行する。なお、操作1と操作2のどちらを先に行っても、最終的な結果に違いはない。

操作 1: ソースオブジェクトを板、ターゲットオブジェクトを1次元回転制約プリミティブとして、組み合わせ操作を実行する（図17-a）。

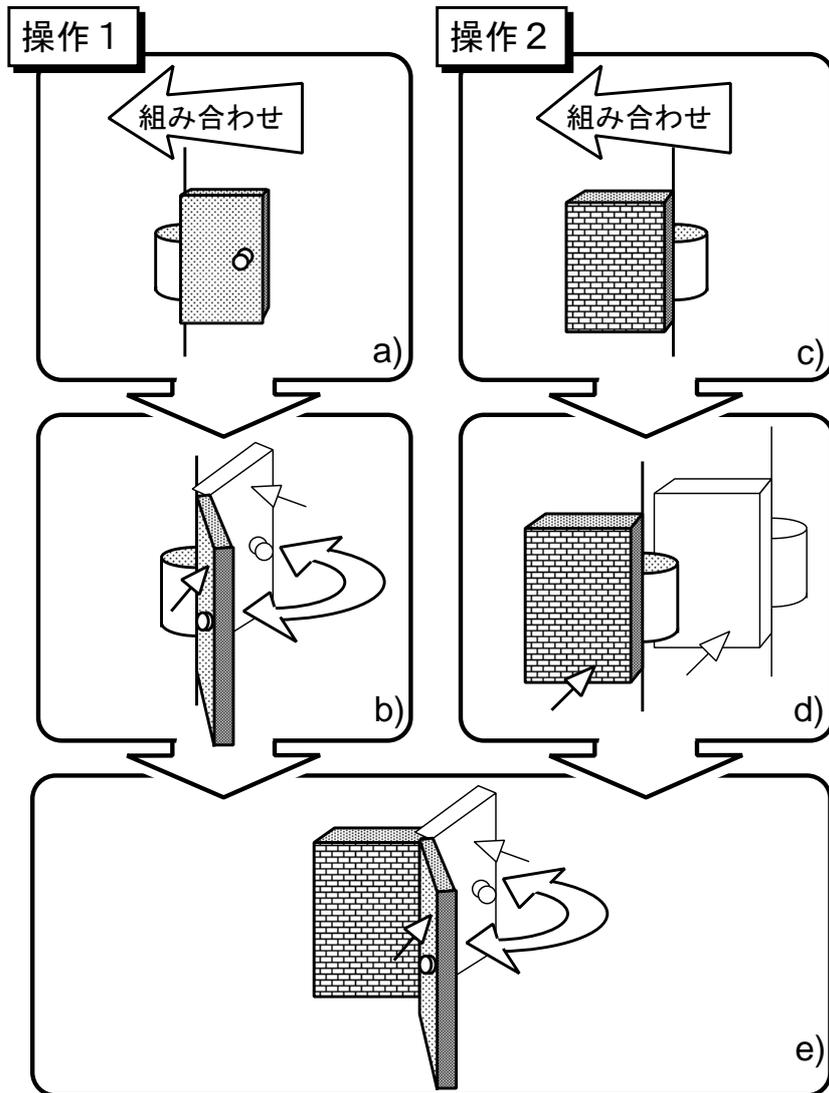
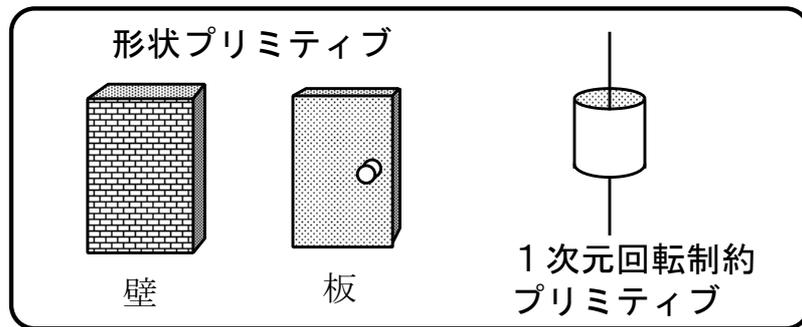


図 17 幾何制約の付加操作例

その結果、板は1次元回転制約プリミティブにより、1次元回転制約を受ける(図17-b).

操作2: ソースオブジェクトを1次元回転制約プリミティブ、ターゲットオブジェクトを壁として、組み合わせ操作を実行する(図17-c). その結果、壁と1次元回転制約プリミティブはグループ化され、互いに追従して移動するようになる(図17-d).

以上の2操作を実行することにより、板は壁に、1次元回転制約プリミティブを通して間接的に制約される.

4.5 デザイン例

本節では、本システムの有効性を示すために、本システムを使用してデザインした、幾何制約を含む仮想物体の例を幾つか示す.

キャビネット: 図18に、1個の範囲付き1次元並進制約プリミティブと幾つかの板および球から成るキャビネットの例を、その生成過程とともに示す. まず、5枚の板と1個の球を組み合わせ操作を用いてグループ化し、赤の引き出し部分を生成する. 同様に、緑および青の引き出しを生成する(a~b). また、7枚の肌色の板からキャビネット本体部分を生成する(c~d). 次に、キャビネット本体部分に対して範囲付き1次元並進制約プリミティブを組み合わせる(e). これにより、範囲付き1次元並進制約プリミティブはキャビネット本体部分に追従するようになる. 最後に各引き出しを、キャビネット本体に対する相対位置を合わせてから、範囲付き1次元並進制約プリミティブに組み合わせる. この際、必要であれば、範囲付き1次元並進制約プリミティブの並進範囲を調整しておく. 以上の操作の結果、f)で表されるような、各引き出し部分が範囲付き1次元並進制約プリミティブが定義する直線と平行に、かつ、2個の三角錐によって定義される範囲にのみ移動できるキャビネットが生成される. このキャビネットの例のシーングラフを図19に示す. 現在のシステムではこの例のように、1個の幾何制約プリミティブ

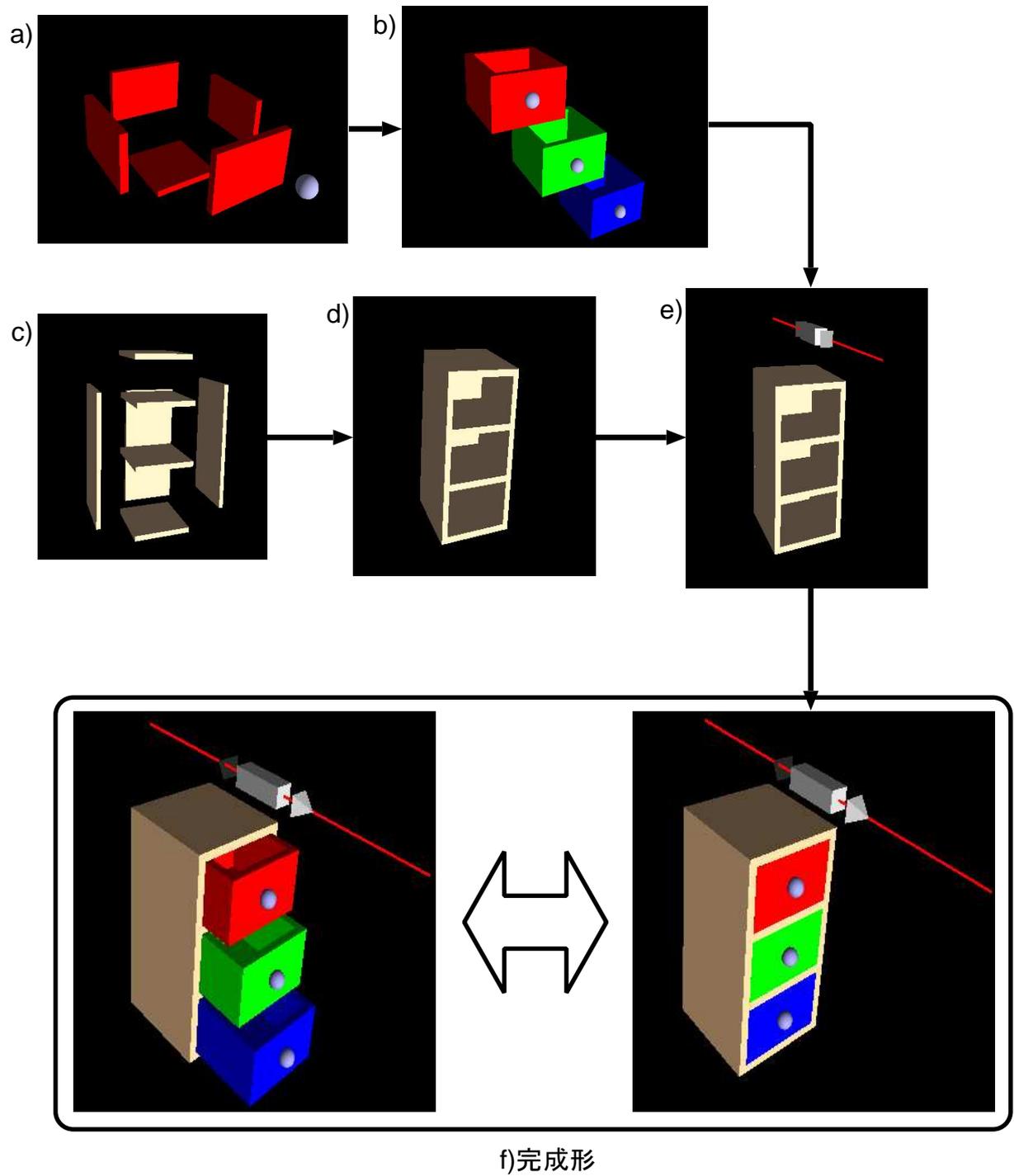


図 18 キャビネットの生成過程

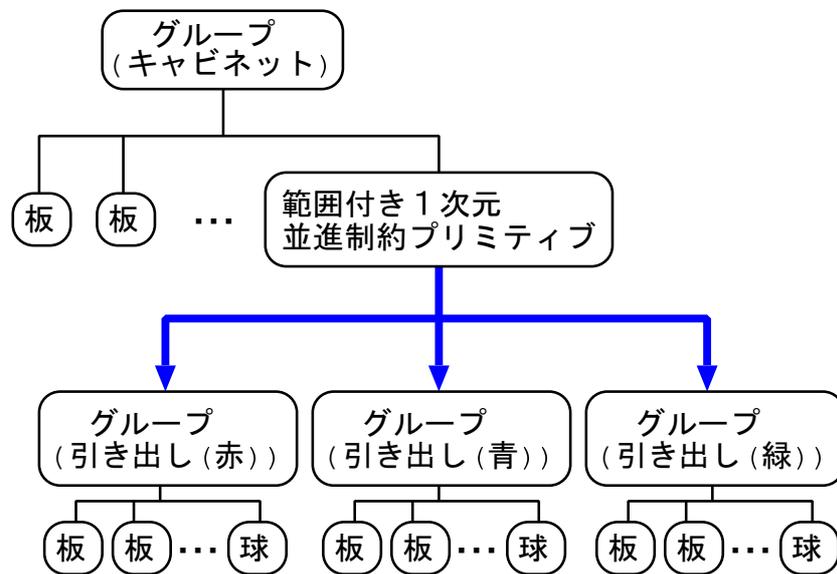


図 19 キャビネットのシーングラフ

ブは複数の仮想物体を制約できるが、1つの仮想物体が複数の制約を受けることはできない。

コーンツリー: 図 20は、1次元回転制約を用いて、階層構造の3次元視覚化手法の1つであるコーンツリー [23] を、本システムで生成したものである。2個の1次元回転制約プリミティブと2個の円錐、および幾つかの球から構成されている。各円錐は、1次元回転制約プリミティブで定義される軸回りのみ回転する。また、円錐間には親子関係が設けられており、シーングラフの特性から、親を回転させた場合には子も同様に回転するが、子を回転させた場合には子のみが回転する。本システムは、この例のように、3次元ユーザインタフェース部品の試作やそれらのレイアウトの検討作業にも有効である。

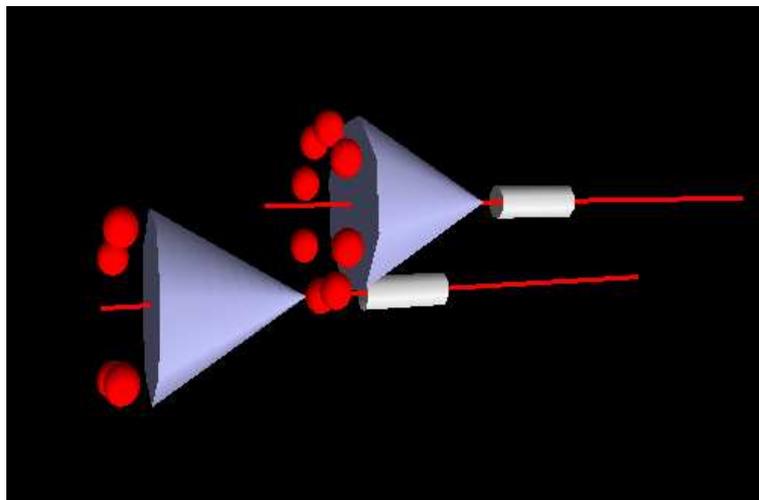
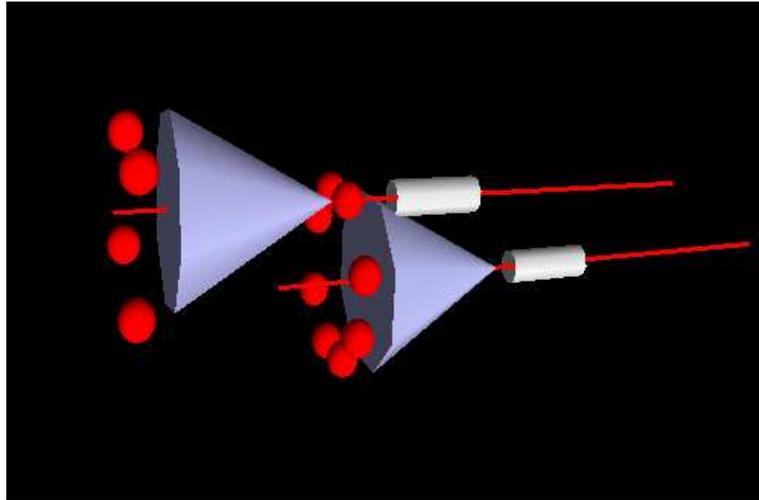


図 20 コーンツリー

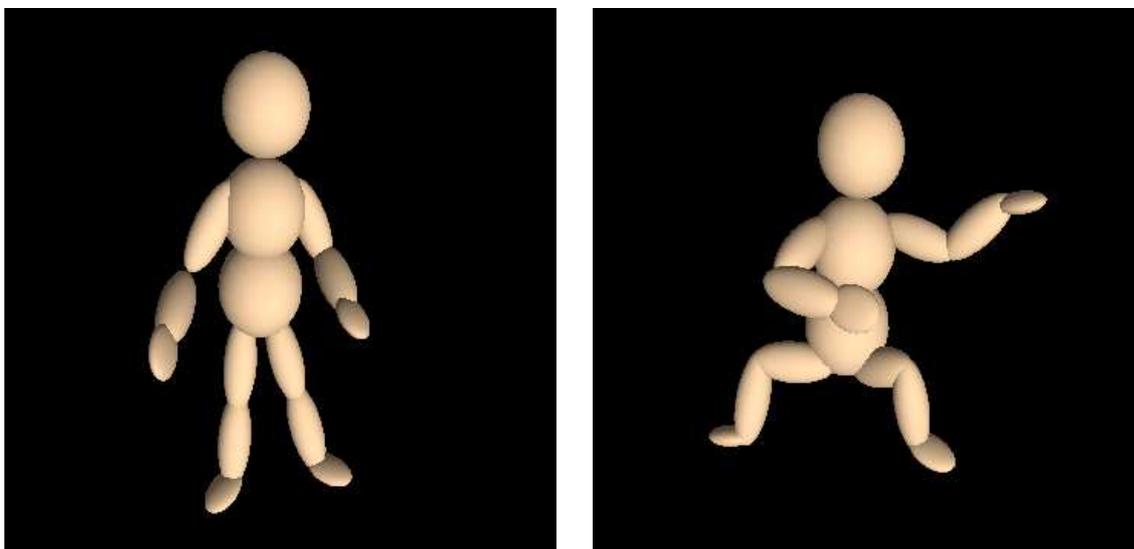


図 21 パペット

パペット: 図 21は、2次元回転制約を用いて、ポーズの違う2体のパペットを生成した例である。15個の楕円球から成るパペットの各関節部に、14個の2次元回転制約プリミティブを付加した。胸の部分の起点に、それぞれ頭・手先・足先の方へ向かうほど子となるような階層構造になっている。また、この例では、制約プリミティブを不可視にしている。

プロペラ飛行機: 図 22は、本システムを用いて、簡単な1次元回転アニメーションをする仮想物体を生成した例である。組み合わされた仮想物体を回転させ続ける1次元回転アニメーションのための幾何制約プリミティブを各プロペラ部分に使用している(図左)。また、プロペラ飛行機自体にも1次元回転制約を課しており、プロペラ飛行機はプロペラを回し続けながら円を描くように旋回する(図右)。

これらのデザイン例の作成を通して、本システムで幾何制約を含む仮想物体を容易に生成できることが確認された。

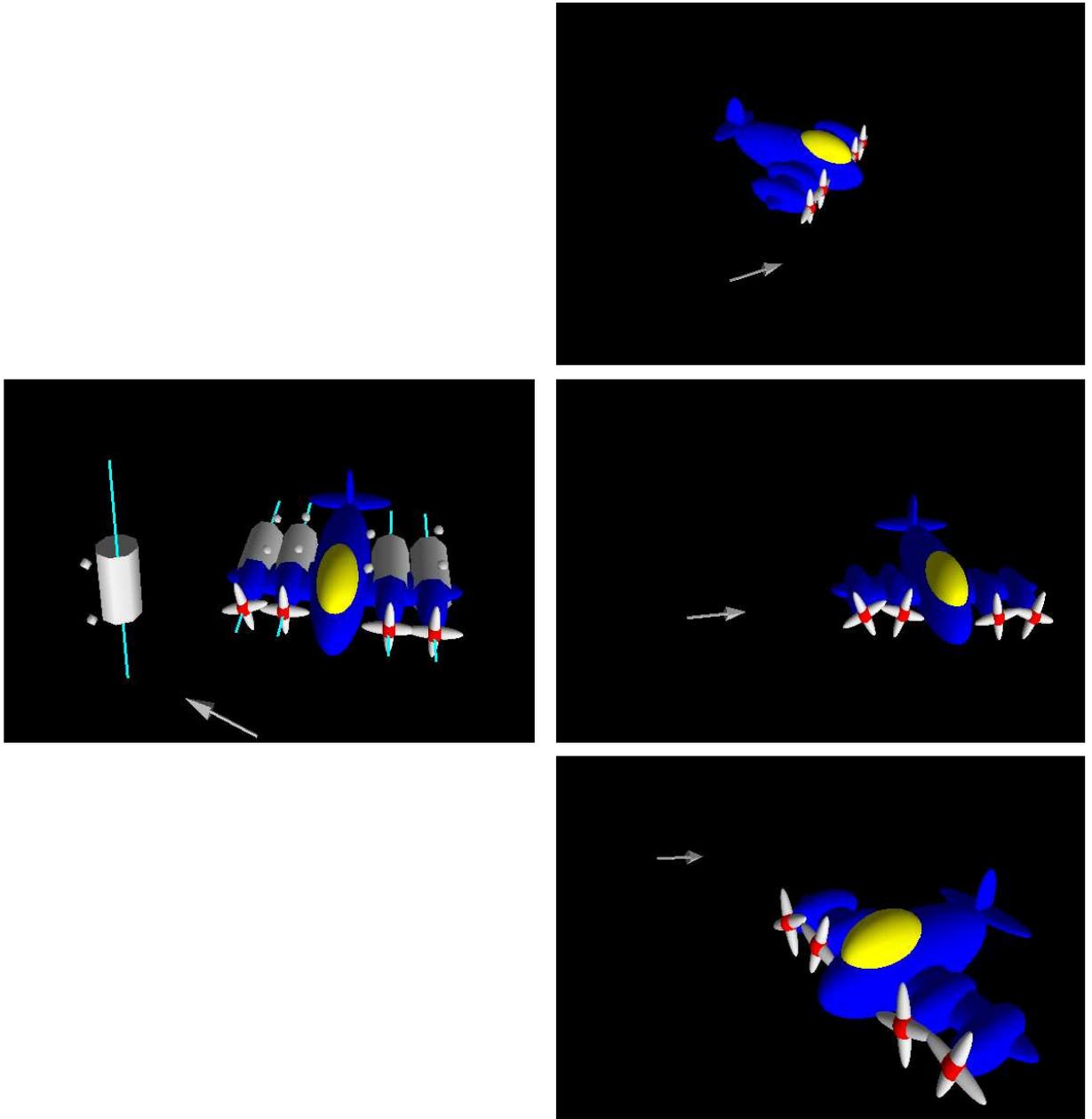


図 22 プロペラ飛行機

5. 考察

本章では，試作した没入型モデラの使用から，提案した幾何制約付加手法について考察する．また，今後，提案手法において制約の種類を多様化するための指針について考察する．

5.1 提案手法の妥当性の検証

本節ではまず，3.2節で述べた，幾何制約プリミティブを提供する際に考慮すべき3点，1) 幾何制約プリミティブの形状，2) 幾何制約の属性の変更手法，3) 仮想物体と幾何制約プリミティブの組み合わせの操作手法，について，試作システムの使用からそれぞれ考察する．

- 1) **幾何制約プリミティブの形状:** 試作システムでは，幾何制約プリミティブ個々にその属性を表現する独自の形状を与えたため，幾何制約の種類を容易に判別でき，またその属性を直感的に把握できた．しかし，本研究で提供する幾何制約プリミティブの形状は筆者が独断で与えたものであり，より多くの人にとって分かりよい形状に改善するためには，評価実験などを行う必要がある．
- 2) **幾何制約の属性の変更手法:** 試作システムでは，幾何制約プリミティブ自身の並進・回転や，可動範囲を変更するための部品を操作することによって，幾何制約の属性を視覚的に確認しながら対話的に変更できた．なお，制約の種類に応じてその属性も異なるので，幾何制約の属性の変更手法は幾何制約の種類に依存している．今後制約の種類を増やす際には，幾何制約の種類に応じた適切な属性変更手法を取り入れるべきである．
- 3) **仮想物体と幾何制約プリミティブの組み合わせ操作手法:** 試作システムでは，仮想物体と幾何制約プリミティブを組み合わせるために，片手操作と両手操作の2種類を実装した．組み合わせる際に若干その方向を意識しなければならないが，これらの組み合わせ操作を用いて，簡易に仮想物体に対して幾何制約を付加できた．しかし，両手操作では同時に2個の仮想物体を

把持または選択しなければならず、その状態を維持するのが困難であるため、両手操作を用いるより片手操作を用いる方が容易であるように感じられた。今後、組み合わせ操作に関しては評価実験による定量的な検討を行う必要がある。

通常、幾何制約が課されていない仮想物体を把持し移動させる場合、仮想物体の動きは3次元カーソルの動きに追従する。それに対して幾何制約を受けている仮想物体の場合、仮想物体の並進や回転は幾何制約に従うため、必ずしも3次元カーソルの動きに追従するわけではなく、仮想物体と3次元カーソルが大きく離れてしまう状態も起こりうる。しかし、幾何制約を受けている仮想物体の並進・回転は、3次元カーソルの移動に対応したものになっているので、違和感はそれほど感じられなかった。

また、現システムでは、どの仮想物体がどの幾何制約プリミティブに制約されるかという制約関係を確認する手段がない。したがって、仮想空間内に存在する制約の数が増大した場合など、制約関係が複雑になった場合に混乱を招く恐れがある。これを解決するためには、有向グラフ表示などの何らかの制約関係の視覚化手法が有効と考えられる。

以上のように改善すべき点は残されているものの、試作システムを用いると、4.5節で示したような幾何制約を含む仮想物体を容易に短時間で作成できる。現システムではまだ制約の種類は少ないが、幾何制約を持つ仮想物体の直感的かつ対話的なデザイン環境の構築に有効であることを試作システムを通して確認できた。

5.2 制約の多様化

3.2節で、幾何制約をプリミティブとして提供する枠組みを提案した。しかし、3.3節で紹介した試作システムで提供する幾何制約プリミティブだけでは、制約の種類としては少ない。提案手法である幾何制約プリミティブを用いる手法において今後、制約を多様化するための指針として、

1. 制約の種類を増やす、
2. 制約の伝播を導入する、

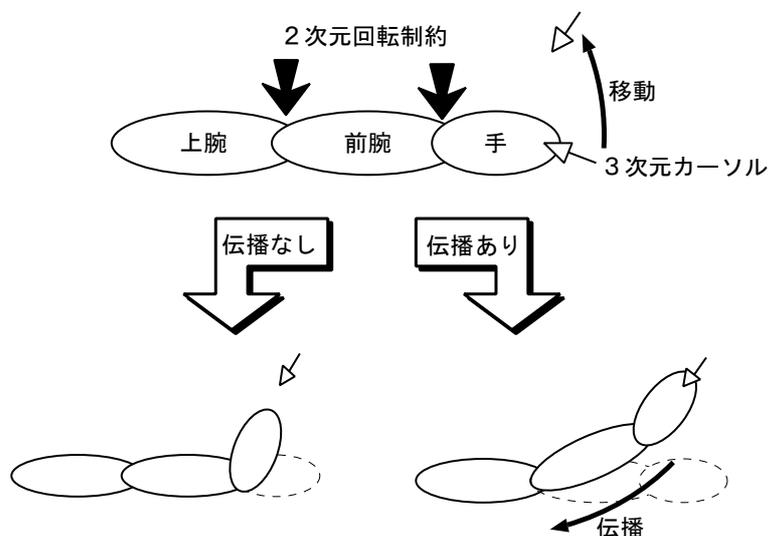


図 23 制約の伝搬例：腕モデル

の 2 点が考えられる．以降，この 2 点について考察する．

まず，予め豊富な種類の制約を提供する，すなわち，制約の数だけ制約プリミティブを用意するという方針について考察する．この方針では，制約プリミティブ 1 個だけでその制約の属性を表しているのので，容易に制約の属性を把握でき，また変更できるという利点がある．また一般に，次に述べる制約の伝播と比べて複雑な計算を必要とせず，制約の計算のコストも低い．しかし，制約の種類を増強すると，それに応じて制約プリミティブの種類も増えるので，その種類が膨大になる可能性がある．また，用意された制約しか利用することができないという問題点もある．

次に，制約が複数連なった場合に起こる制約の伝播を導入する方針について考察する．制約の伝播の例として，各関節部に 2 次元回転制約が課された図 23 のような腕のモデルを考えてみよう．制約が伝播しない場合は，手の部分を操作したとき，その手は手首を中心として回転する．しかし，制約が伝播する場合，手の部分に対する操作が手の部分だけでは吸収できないとき，つまり手の可動範囲を越える操作を行ったとき，吸収できなかった操作は前腕部に伝播し，前腕部を

も移動させる。さらに，前腕部で吸収できなかった操作は上腕部に伝播する。また，他の例として，1次元並進制約を表すプリミティブである1次元並進制約プリミティブを2個組み合わせることにより2次元並進制約を実現するなど，複数の幾何制約プリミティブを組み合わせることで新たな制約を定義することができる。このように制約の伝播が可能になることにより，鎖などのような複数の部品が連なった仮想物体に対して，実物体と同様の操作が可能となり，また，既存の制約を用いて様々な制約を新たに定義することができる。しかし，複数の幾何制約プリミティブを組み合わせるといった余分な手間がかかるといったことや，連なった幾何制約プリミティブから最終的な制約の働きを把握することが困難になるといった問題点がある。また，一般に，以上のような制約の伝播を扱う場合，制約間に競合が生じる場合が多く，その競合を解消するために計算コストが高くなるという問題点もある。

以上に述べたような2つの指針に基づき，幾何制約プリミティブを用いる手法において制約の多様化を図ることができる。これら2つの指針は排他的ではなく，両者を同時に用いることも可能であり，お互いは深く関わりあっている。幾何制約プリミティブの組み合わせで実現できないものは新たな幾何制約プリミティブを提供し，また，それらの幾何制約プリミティブ間の伝播を許すことにより多様な制約を扱えるようになる。

6. おわりに

本研究では、没入型モデラにおいて、仮想物体に対して幾何制約を対話的に付加する手法について検討した。没入型モデラにおいて幾何制約を扱う場合、幾何制約は実体を持っていないのでその扱いが困難であるという問題点があった。そこで本研究では、本来形状を持っていない幾何制約を、その属性を表す形を持った幾何制約プリミティブとして提供する手法を提案した。さらに、提案手法の有効性を確認するために、幾何制約プリミティブを導入した没入型モデラを試作した。提案手法の特徴として以下の2点が挙げられる。

- それぞれの幾何制約にその属性を表す形を持たせ、幾何制約プリミティブとして提供している。
- 幾何制約の付加は、仮想物体と幾何制約プリミティブを組み合わせるという簡単な操作によって実現されている。

前者の特徴により、ユーザは直感的に幾何制約の働きを理解でき、また、その幾何制約プリミティブの位置・姿勢や形状自身を変形させることで、その幾何制約の属性を容易に変更できる。後者の特徴により、ユーザは特別な習熟を必要とせず、簡単に幾何制約を仮想物体に対して付加できる。

さらに、提案手法を導入し、幾何制約プリミティブを用いた没入型モデラを試作した。試作システムは以下のような特長を持っている。

- 両手操作を取り入れている。
- 仮想物体に対して離散配置制約を課している。

両手操作は仮想環境内での作業効率を高め、離散配置制約は仮想物体同士の位置合わせを容易にする。以上のような特長により本システムでは、仮想環境に没入しながら3次元仮想物体を、その幾何制約も含めて、簡単に短時間で生成できる。また、没入型モデラにおける幾何制約の有効性を示すために、本システムで作成した幾何制約を含む仮想物体の例を幾つか示した。

現時点では幾何制約の種類は少ないが、幾何制約をプリミティブとして扱うことの有効性を、試作システムの使用から確かめることができた。本手法を他の制

約に応用することで、さらに多様な制約を含む仮想物体を仮想環境に没入しながらデザインできると考えられる。

今後、試作システムをより実用的にするための指針として、システムの汎用性の向上、および操作性の向上が考えられる。現在のシステムでは、幾何制約プリミティブの操作に重点を置いたため、形状プリミティブの変形は取り入れておらず、仮想物体の形状をデザインする際、予め用意された形状プリミティブしか利用できない。VLEGO[10]では、仮想物体のサイズ変更や彩色などのために、両手を協調させて行う自然で効率的な操作を開発し、導入している。また、筆者の所属する研究室では、仮想環境における曲面変形手法を現在開発中である[24]。試作システムをモデリング環境としてより汎用的にするためには、このような形状プリミティブの変形手法を取り入れることが有効であると考えられる。また、試作システムの操作性を向上させるためには、仮想物体同士の正確な置合わせを容易にする干渉回避などの仮想物体操作支援手法を取り入れることも有効であると考えられる。さらに、離散配置制約の有効/無効や幾何制約プリミティブの可視/不可視の変更操作についても、改善の余地が残されている。

最後に、今後の課題としては、以下の2点が挙げられる。

- 仮想物体の色や音などに対する制約なども範疇にいた、幾何制約に限らない制約の種類のさらなる増強。
- 複数の制約が連なった場合におこる制約の伝搬の本格的な導入や、その際に起こるであろう制約間の競合を解消する処理の検討。

これらは、制約の種類を多様化するためのものである。提案手法は試作システムで実装した幾何制約以外の制約にも応用可能であり、また、制約を表すプリミティブ間に伝播機構を設けることによりより多様な制約を定義できると考えられる。

しかし、制約の種類を増強する場合、制約の種類は多大であり、全ての制約に本手法を取り入れてプリミティブとして表現することに固執した場合、逆に制約の付加が非直感的で繁雑になる可能性がある。また、幾何制約プリミティブの種類が膨大になる可能性もある。したがって、提案手法において制約の種類を増強させる場合には、仮想物体をデザインする際に望まれ、幾何制約プリミティブとし

て提供することが適切と思われる制約を考察する必要がある。また、制約の伝播を導入する場合、一般に、伝播処理や競合の解消処理のために計算コストが高くなるため、没入型モデラの実時間性を損なわないように考慮しなければならない。

謝辞

本研究の全過程を通して，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 に心より感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり，有益な御助言を賜った，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じて，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。

本研究を通して，日頃より有益な御助言，御指導を頂いたソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦 助手，ならびに 山澤 一誠 助手に深く感謝致します。

物心両面において常に温かい御支援を頂いたソフトウェア基礎講座 大隈 隆史 氏，清川 清 氏，ならびに，ソフトウェア基礎講座の諸氏に深く御礼申し上げます。

最後に，日頃より温かく支えて下さった ソフトウェア基礎講座 元事務補佐員 村上 和代 女史，事務補佐員 福永 博美 女史に心より感謝致します。

参考文献

- [1] C. Elliott, G. Schechter, R. Yeung and S. Abi-Ezzi: “TBAG: A High Level Framework for Interactive, Animated 3D Graphics Applications,” *Proc. of SIGGRAPH'94*, pp.421–434, 1994.
- [2] M. A. Najork and M. H. Brown: “Obliq-3D: A High-Level, Fast-Turnaround 3D Animation System,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp.175–193, 1995.
- [3] J. Hartman and J. Wernecke: *The VRML 2.0 Handbook*, Addison Wesley Developers Press, 1996.
- [4] “Ray Dream Studio 5 ユーザガイド”, MetaCreations Corporation, 1997.
- [5] R. C. Zeleznik, K. P. Herndon and J. F. Hughes: “SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes,” *Proc. of SIGGRAPH'96*, pp.163–170, 1996.
- [6] J. Butterworth, A. Davidson, S. Hench and T. M. Olano: “3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-Mounted Display,” *Proc. of ACM Simpo. on Interactive 3D Graphics*, pp.135–139, 1992.
- [7] D. A. Bowman and L. F. Hodges: “User Interface Constraints for Immersive Virtual Environment Applications,” *Graphics, Visualization and Usability Center Technical Report GIT-GVU-95-26*, 1995.
- [8] R. Stoakley, M. J. Conway and R. Pausch: “Virtual Reality on a WIM: Interactive Worlds in Miniature,” *Proc. of ACM SIGCHI'95: the Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.265–272, 1995.
- [9] M. R. Mine: “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.

- [10] 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.
- [11] 平田 幸広, 水口 武尚, 佐藤 誠, 川原田 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 (D-II), vol.J76-D-II, No.8, pp.1788-1795, 1993.
- [12] 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, 1995.
- [13] Yoshiaki Nishino, Yasuharu Kunii and Hideki Hashimoto: “20 DOF Haptic Device for the Interaction with Virtual Environments,” *Proc. of International Conference on Artificial Reality and Tele-existence '97 (ICAT'97)*, pp.85-92, 1997.
- [14] 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”, 情報処理学会第 55 回 (平成 9 年後期) 全国大会, (1AA-2), pp.4-191-192, 1997.
- [15] N. Hiraki, K. Kiyokawa, H. Takemura and N. Yokoya: “Imposing Geometric Constraints on Virtual Objects within an Immersive Modeler,” *Proc. of International Conference on Artificial Reality and Tele-existence '97 (ICAT'97)*, pp.178-183, 1997.
- [16] “最新 CG ソフト購入ガイド '97~'98 年版”, 日経 BP 社, 1997.
- [17] A. Hinckley, R. Rausch, J. C. Goble and N. F. Kassell: “A Survey of Design Issues in Spatial Input,” *Proc. of ACM Simpo. on User Interface Software and Technology (UIST'94)*, pp.213-222, 1994.
- [18] 清川 清, 竹村 治雄, 岩佐 英彦, 横矢 直和: “共有仮想環境空間を用いた協調型仮想物体モデラ - VLEGO”, 情報処理学会第 53 回 (平成 8 年後期) 全国大会, 4H-01, 1996.

- [19] P. S. Strauss and R. Carey: “An Object-Oriented 3D Graphics Toolkit,” *Proc. of ACM Simpo. on UIST’92*, pp.341–349, 1992.
- [20] M. A. Ellis and B. Stroustrup: *The Annotated C++ Reference Manual*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1992.
- [21] M. Woo, J. Neider and T. Davis: *OpenGL Programming Guide Second Edition*, Addison Wesley Developers Press, 1997.
- [22] 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研究報告 (電子ディスプレイ), Vol.97, No.526, pp.95–100, 1998.
- [23] G. G. Robertson, J. D. Mackinlay and S. K. Card: “ConeTrees: Animated 3D Visualizations of Hierarchical Information,” *Proc. of ACM SIGCHI’91: the Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.189–194, 1991.
- [24] 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”, 電子総合通信学会総合大会 一般講演 (A), 1998 (発表予定).