

寄贈	
高山毅氏	平成 年 月 日

DA  
1398  
1994  
HG

L-reps : 2次元ディスプレイ上で  
3次元ピンポイントを可能にする  
幾何形状モデリングアプローチ

1995年3月

高山 毅

95016104

# 目次

論文概要	3
キーワード	4
1 序論	5
2 3D ピンポイントの現状	7
2.1 3D ピンポイントの定義	7
2.2 現在の3D ピンポイント法と問題点	9
2.3 3D ピンポイント実現へ向けての環境の再考	11
2.3.1 ディスプレイ代替策の限界	11
2.3.2 3D 幾何形状モデル代替策に関する考察	15
2.3.3 変換系代替策としての2D 指向幾何変換モデル	15
3 L-reps	18
3.1 L-reps のデータ定義	18
3.1.1 線図	18
3.1.2 線図からL-reps への拡張	21
3.2 L-reps のデータ操作	24
3.2.1 基本操作	24
3.2.2 応用操作	27
4 L-reps の特徴	29
4.1 L-reps 上での3D ピンポイント法	29
4.2 3D ピンポイント法の総合比較	31
4.2.1 3D ピンポイント法のラインナップ	31
4.2.2 3D ピンポイント法の単純比較	36
4.2.3 多面体形状設計環境への適合性比較	38
4.2.4 3D ピンポイント法の最終比較	42
4.3 L-reps の評価	42
5 L-reps を含む3D 機械形状設計環境の実現	44
5.1 ハイブリッド3D 幾何形状モデリング環境	44
5.2 ハイブリッド3D 幾何形状モデリング環境のデータベース化	44
5.2.1 CAD データのデータベース化のメリット	46

5.2.2	ハイブリッド3D幾何形状モデリング環境のスキーマ定義 . . . . .	46
5.3	L-reps と B-reps の相互変換 . . . . .	49
5.3.1	B-reps から L-reps の変換 . . . . .	49
5.3.2	L-reps から B-reps への操作レベルでの逆変換 . . . . .	49
5.4	L-reps と CSG の相互変換 . . . . .	53
<b>6</b>	<b>試作システムによる3D機械形状設計</b>	<b>54</b>
6.1	試作システムの概要 . . . . .	54
6.1.1	外部仕様 . . . . .	54
6.1.2	実装環境 . . . . .	54
6.1.3	作成手順 . . . . .	55
6.2	具体例：カメラのシャッターの位置決め . . . . .	55
6.3	ディスプレイ画面上での複雑度を緩和するコマンド群 . . . . .	55
6.3.1	優先度制御コマンド . . . . .	58
6.3.2	部分表示コマンド . . . . .	60
6.3.3	局所拡大コマンド . . . . .	60
6.3.4	部分的断面表示コマンド . . . . .	60
<b>7</b>	<b>結論</b>	<b>62</b>
	謝辞	65
	Bibliography	67

# 論文概要

近年、「ユーザが計算機の表現する3次元(以降3Dと約す)空間内の指定したい点の位置を、計算機に正確に指示する」という操作を実現する適切な方法を開発することの重要性が指摘されている。上記の操作そのものに定着した用語はまだないので、本論文ではこれを「3Dピンポイント」と呼ぶことにする。

従来、3D立体の幾何情報を記述する幾何形状モデリングアプローチには、ソリッドモデルと投影変換が使われてきた。2次元(以降2Dと約す)ディスプレイ上での現在知られている3Dピンポイント法は、いずれもこれらを基盤として実現されている。なお、ソリッドモデルの出現以前から存在する「3D座標値入力法」を、直接視覚的なデータ入力に比べてユーザに負担がかかるという理由により、本論文での考察対象からは除外する。3Dピンポイント法に要請される重要な性質は、

- 誤った点を指示しにくく、
- 手続きが煩雑でない

こととされている。

本論文の目的は、2Dディスプレイ上で上の2条件をともに満たすような3Dピンポイント法を実現するための幾何形状モデリングアプローチを示すことである。

まず、ソリッドモデル-ユーザ間で幾何情報を双方向に伝達する際の損失を投影変換よりも縮小できる幾何変換モデルの概念を導入し、多面体形状の立体という範囲において3Dピンポイントに適合性のある幾何変換モデル *L-reps* (Lines Representations) を提案する。*L-reps* は、旧来、船体や自動車などの形状設計に用いられてきた図面である線図を拡張したものである。*L-reps* 上で3Dピンポイント法は、上の2条件において従来法よりもすぐれている。

次に、*L-reps* を3D機械形状設計環境下で利用するための方法論を示す。*L-reps* は幾何変換モデルであるので、ソリッドモデルとともに用いる必要がある。本論文では *L-reps* と代表的なソリッドモデルのひとつである *B-reps* を混在させたハイブリッド3D幾何形状モデリング環境を、その構築法とともに提案する。そして、実装と評価を通じて、その有用性を検証する。

# キーワード

機械系 CAD, 多面体形状設計, ハイブリッド 3D 幾何形状モデリング環境, 意匠設計, 精度良い設計, 3D ピンポイント,

3D 幾何形状モデル, ソリッドモデル, CSG, B-reps,

ディスプレイ, バーチャルリアリティ,

3D 幾何形状モデル-ディスプレイ変換系, 投影法,

幾何変換モデル, 2D 指向, 三面図, 等高線, CT, 線図, L-reps,

オブジェクト指向データベース

# Chapter 1

## 序論

近年、「ユーザが計算機の表現する3次元(以降3Dと約す)空間内の指定したい点の位置を、計算機に正確に指示する」という操作を実現する適切な方法を開発することの重要性が指摘されている(SIGGRAPH'94でも同テーマと密接に関連するパネルが開催された[SIGGRAPH 94]). 上記の操作そのものに定着した用語はまだないので、本論文ではこれを「3Dピンポイント(3D pinpoint)」と呼ぶことにする. 3Dピンポイントの必要性が最も強く生じる環境のひとつに、3Dの幾何形状を対話的に生成、修正する環境がある. そのような環境では、個々の頂点(vertex)の位置指定に加えて、切断などに代表される応用操作をおこなう場合の作業平面を指定するために3点を順次に位置指定する必要性も生じる.

従来、3D立体の幾何情報を記述する幾何形状モデリングアプローチには、ソリッドモデル(solid model) (たとえば[Mäntylä 88]) と投影変換(projection transformation) [Foley, *et al.* 90] が使われてきた. 2次元(以降2Dと約す)ディスプレイ上での現在知られている3Dピンポイント法は2.2節で述べるように、いずれもこれらを基盤として実現されている. なお、ソリッドモデルの出現以前から存在する「3D座標値入力法」を、直接視覚的なデータ入力に比べてユーザに負担がかかる[安居院ほか 87]という理由により、本論文での考察対象からは除外する. 3Dピンポイント法に要請される重要な性質は、

- 誤った点を指示しにくく、
- 手続きが煩雑でない

こととされている[SIGGRAPH 94]. しかしながら、残された現在の3Dピンポイント法には、上の2条件をともに充足するものはない.

問題を解決する一つの方法として、ディスプレイを2Dディスプレイ以外のものに代えることが考えられる. バーチャルリアリティ環境(virtual reality environment) (たとえば[廣瀬 93])でおこなわれているような、力覚ディスプレイなどに代表される種々のディスプレイや、3Dディスプレイ(たとえば[Clifton; *et al.* 93])などの利用である. しかしながら、2.3節で述べるように、こ

れらを用いて上で述べた2条件をともに充足するような3Dピンポイントを実現することは、ハードウェア面での問題を中心として、現状では困難と言わざるを得ない。

本論文の目的は、2Dディスプレイ上で上の2条件をともに満たすような3Dピンポイント法を実現するための幾何形状モデリングアプローチを示すことである。

その第一段階として、ソリッドモデル-ユーザ間で幾何情報を双方向に伝達する際の損失を投影変換よりも縮小できる幾何変換モデルの概念を導入し、多面体形状の立体という範囲において3Dピンポイントに適合性のある幾何変換モデル *L-reps* (Lines Representations) を提案する。*L-reps* は、旧来、船体や自動車などの形状設計に用いられてきた図面である線図 (Lines) (たとえば [橋本ほか 92]) を拡張したものである。詳しくは3章で述べる。そして4章では、*L-reps* 上での3Dピンポイント法を示した上で、他の3Dピンポイント法との比較をおこなうとともに、表現としての *L-reps* の一般的な評価もおこなう。

第二段階として、*L-reps* を3D機械形状設計環境下で利用するための方法論を示す。*L-reps* は幾何変換モデルであるので、ソリッドモデルとともに用いる必要がある。本論文の5章では *L-reps* と代表的なソリッドモデルのひとつである *B-reps* (たとえば [Mäntylä 88]) を混在させたハイブリッド3D幾何形状モデリング環境を、その構築法とともに提案する。その構築法の中心は両表現間の相互変換アルゴリズムであり、設計工程で必要に応じてどちらの表現を操作することも可能にしている。以上の構築法に基づき、6章では実装とその評価を、カメラのシャッターの位置決めという具体例を用いつつおこなう。

7章では全体を総括し、今後の展望を述べる。

## Chapter 2

# 3D ピンポイントの現状

本章では関連用語を定義した後、3D ピンポイントに関する諸概念を定義する。また、既存のモデリングアプローチにおける3D ピンポイント法の問題解析をおこない、本研究での解決方針を定める。

### 2.1 3D ピンポイントの定義

まず、以下の7つの用語の定義をおこなう(図2.1)。

- ディスプレイ (display) : 通常意味する視覚的表示装置だけでなく、聴覚、触覚などの各種感覚チャンネルに対応した情報提示装置。また、マウスを用いて2D ディスプレイ上で情報入力をおこなう場合の「マウスカーソルの位置を読み込む」というような情報入力の基本ソフトウェアも概念に含める。
- ビューボリューム (view volume) : 世界座標系 (world coordinates)[Foley, *et al.* 90] 内でオブジェクトが表現され得る領域を抽象化した、3D 空間内の有界領域。
- 3D 幾何形状モデル (3D geometric model) : ビューボリューム内に置かれた3D の幾何形状を表現するための記号系。
- ディスプレイポインタ (display pointer) : ディスプレイ上の最小要素 (2D ディスプレイなら画素) の集合を指し示すもの。
- ビューボリュームポインタ (view volume pointer) : ビューボリューム内のある領域を指し示すもの。
- 3D 幾何形状モデル-ディスプレイ変換系 (3D geometric model-display transformations) : 3D 幾何形状モデルによって表現されるビューボリューム内のある領域と、ディスプレイ上の最小要素の集合の間の対応関係を定めるもの。なお以降では、単に変換系と呼ぶこともある。



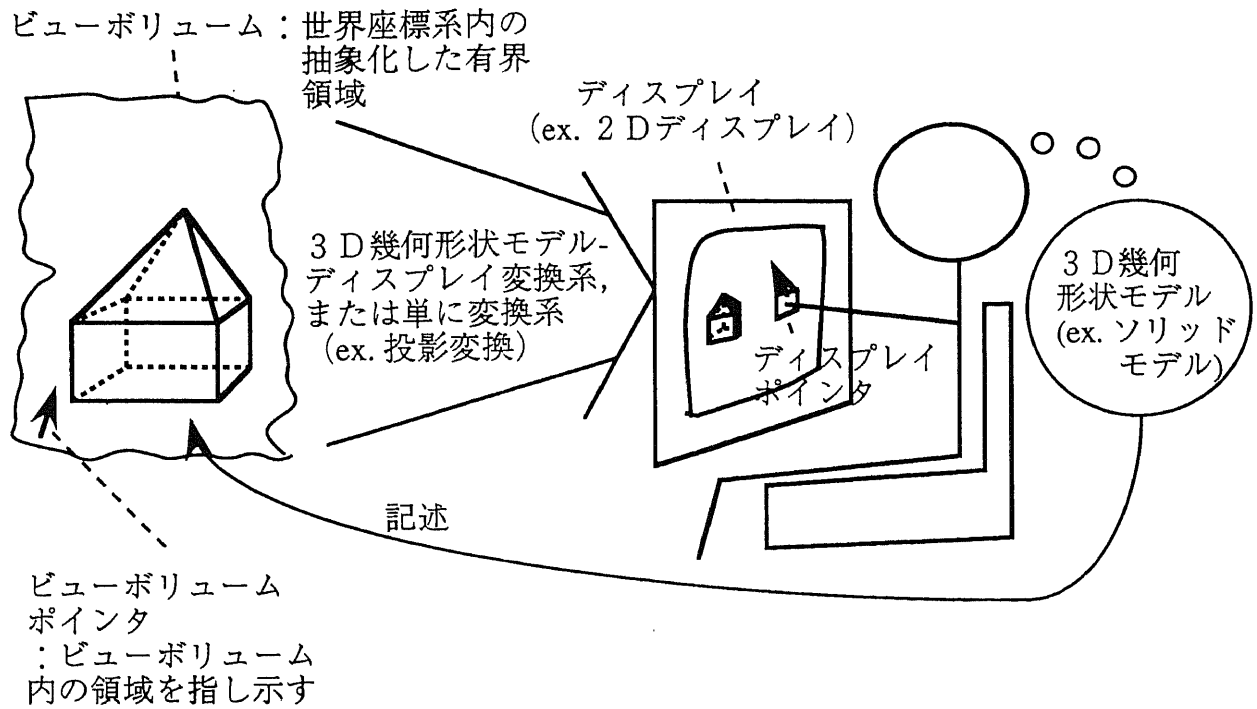


図 2.1: 関連用語の定義と相互関係

3D 幾何形状モデル, 変換系, ディスプレイの 3 つによって環境を定義する.

- 環境 (environment) : 3D 幾何形状モデル, ディスプレイ, および変換系によって構成される系のこと.

以上の用語を用いて, 3D ピンポイントに関する 3 つの概念を以下のように定義する.

### 定義 2.1 3D ピンポイントの定義

ユーザがディスプレイポインタでディスプレイ上の最小要素の集合を指定することによって, ビューボリューム内のユーザの指定したい点を指し示すこと.

### 定義 2.2 点単位での 3D ピンポイント可能 (3D pinpointable) の定義

環境  $e$  とビューボリューム内の点  $vp$  に対して, 以下の 4 条件がすべて充足されるならば, 環境  $e$  は点  $vp$  を 3D ピンポイント可能である.

1. ディスプレイ内に  $vp$  に対応する最小要素の集合  $ds$  が存在する.
2. 3D 幾何形状モデル-ディスプレイ変換系が存在し, ディスプレイポインタとビューボリュームポインタの動きは相互に依存する.
3. ディスプレイポインタが指し示す最小要素の集合が変換系によって変換されるビューボリューム内の領域の位置を, ユーザは必要があればいつでも奥行きを含めて正確に確認できる.
4. 3. によるフィードバックを用いて, ユーザはディスプレイ上で  $vp$  へ変換される  $ds$  の位置を, 試行錯誤的に探し求めることができる.

### 定義 2.3 ビューボリューム単位での 3D ピンポイント可能の定義

環境  $e$  とビューボリューム  $vv$  が与えられたとき, ビューボリューム  $vv$  内のすべての点が環境  $e$  によって 3D ピンポイント可能であるならば, 環境  $e$  はビューボリューム  $vv$  において 3D ピンポイント可能である.

## 2.2 現在の 3D ピンポイント法と問題点

現在, ディスプレイとしてワークステーション等で用いられる通常のラスタ型 2D ディスプレイ (以降, 単に 2D ディスプレイと呼ぶ), 3D 幾何形状モデルとしてソリッドモデルを使う環境では, 変換系として正投影法, 軸測投影法, 透視投影法などの種々の投影法 (projection method)[磯田ほか 86] が使われている (図 2.2(a)). ここで, 2D ディスプレイ上での最小要素である画素は, ビューボリューム内の一点ではなく, 視線方向に広がりをもった領域に対応する. すなわち, ディスプレイ上での最小要素の指定が 3D ピンポイントには直結しない. 現在の 3D ピンポイント法で, この

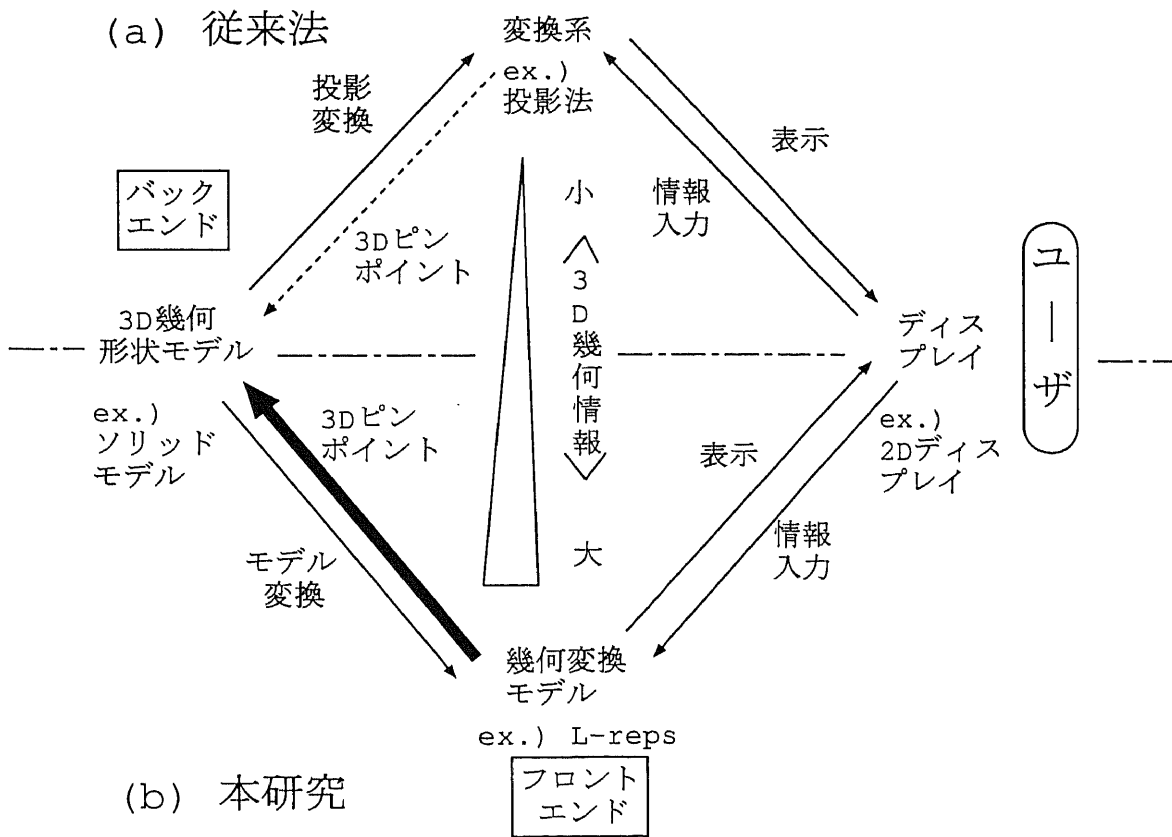


図 2.2: 変換系に代わる幾何変換モデルの導入

2D ディスプレイ上で 3D ピンポイントを可能にするために、3D 幾何情報の損失が少ない幾何変換モデルを導入する。

問題を考慮して、ある稜線 (edge) の中点などの特殊な点のみならず、定義 2.3 の条件まで充足し得るものには以下の 2 つがある：

1. 3D 座標値が既知である点から、投影図内の各座標軸の正負の計 6 方向のみの移動を組み合わせて、相対的な移動量によって一点を指定する (図 2.3)[安居院ほか 87]<sup>1</sup>.
2. 既存の頂点を選んだ後、その頂点が含まれる既存の面 (face) を次々に表示し、ユーザに面を一枚選択させる。そして平行移動、回転等を加えて作った作業面上の一点を指定する (図 2.4)<sup>2</sup>.

以降、それぞれ従来法 1,2 と呼ぶことにする。従来法 1 では、

- 投影法に依存して、寸法や角度の歪み (distortion) を補正する必要があるため、誤った点を指定する可能性を否定できないこと (たとえば図 2.5),

従来法 2 では、

- 補助作業が必要であり、手続きが煩雑であること

が問題である。

## 2.3 3D ピンポイント実現へ向けての環境の再考

前節で示した問題点が緩和された、真の 3D ピンポイントの実現を目指して、2.1 節で定義した環境を再考する。ここでは、ディスプレイ、3D 幾何形状モデル、変換系の順にそれぞれの代替策を検討する。

### 2.3.1 ディスプレイ代替策の限界

まず、昨今活発に研究されているバーチャルリアリティ環境で 3D ピンポイントを実現することを考える。バーチャルリアリティを包括的に記述した文献 [廣瀬 93] によれば、バーチャルリアリティ分野では、ヘッドマウンテッドディスプレイ (Head Mounted Display; HMD)、聴覚ディスプレイ、触覚ディスプレイ、力覚ディスプレイ、平衡感覚ディスプレイなど、さまざまなディスプレイに関する研究が進行中である。しかしながら、それらにおいては定義 2.2 中の条件 3,4 の不備を代表として解決すべき課題がまだ多く存在する。たとえば、同文献 [廣瀬 93] 中で指摘されている、

- 奥行き感の正確な認識ができない、
- 環境の影響で精度が劣化する、

<sup>1</sup>商用 CAD システム MicroGDS Pro は、この方法を採用している。

<sup>2</sup>商用 CAD システム I-DEAS, DESIGNBASE など採用されている方法である。

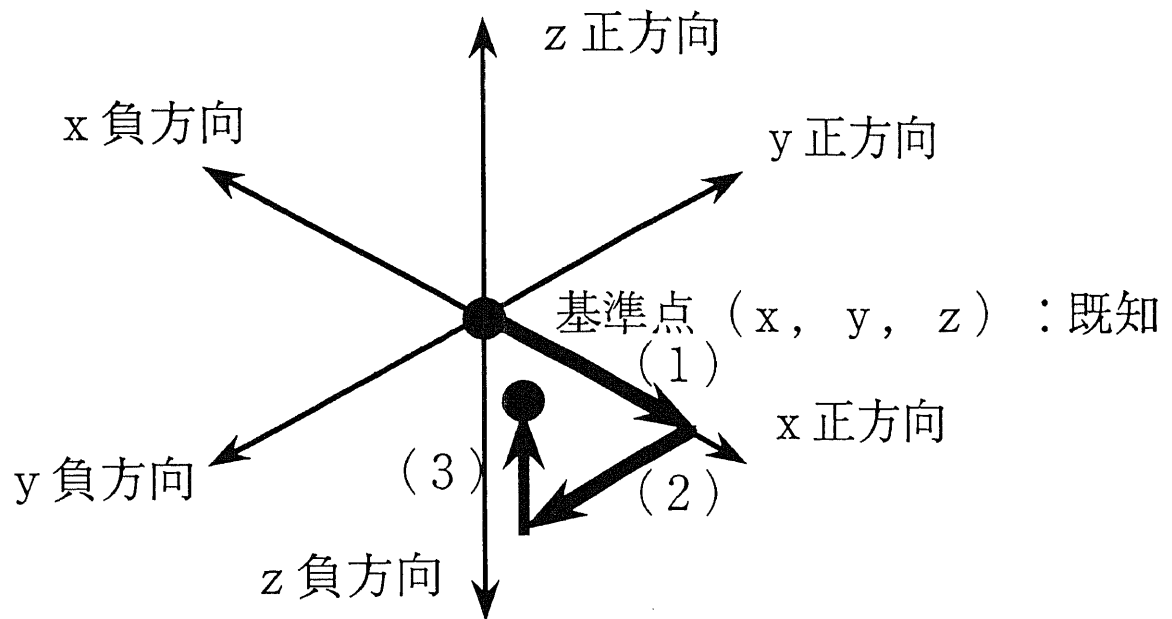


図 2.3: 従来法 1 : 座標軸方向のみの移動の組み合わせによる方法

図は、変換系として等角投影法を採用している場合、基準点から (1) → (2) → (3) の順に座標軸方向の移動量を指定する。

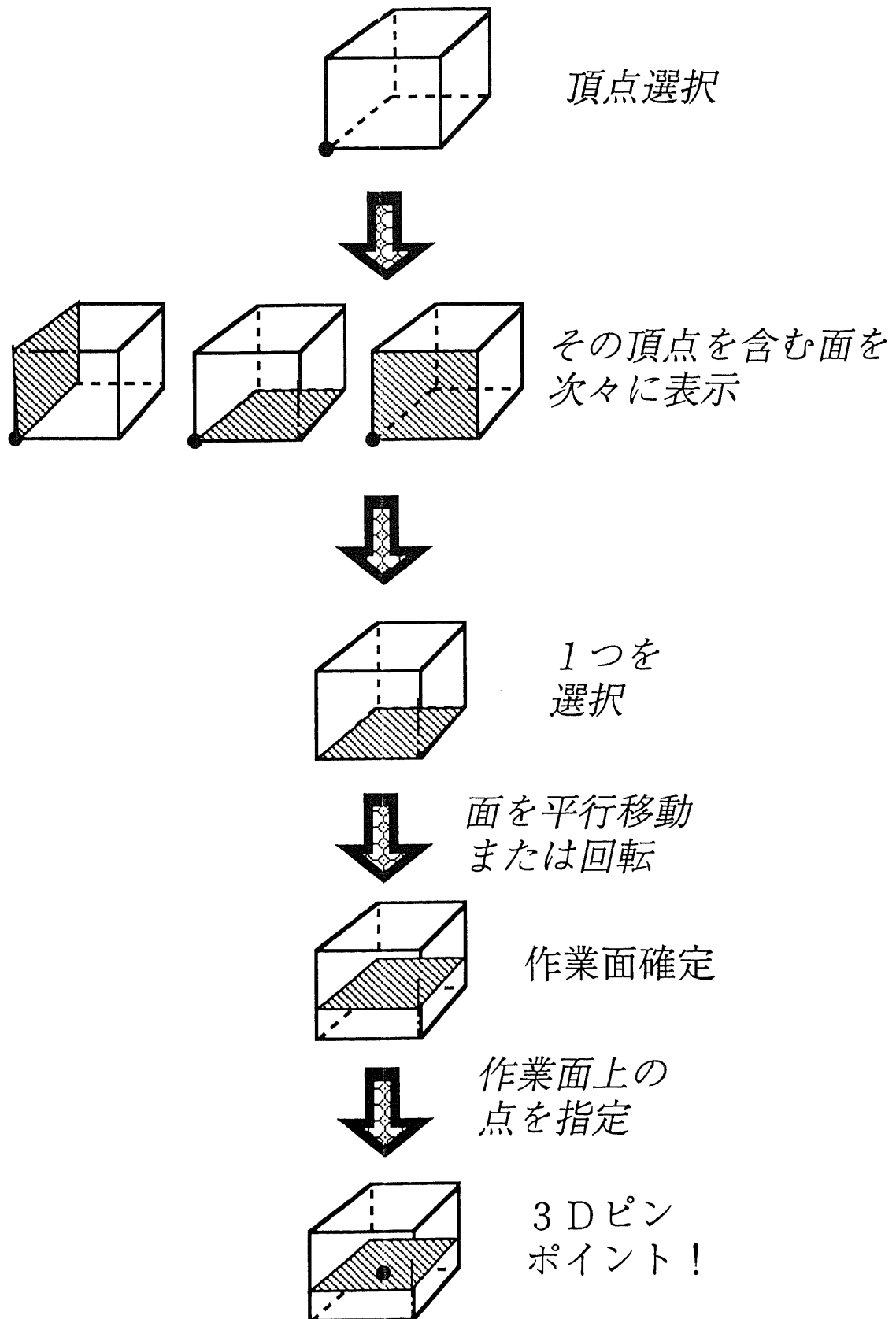
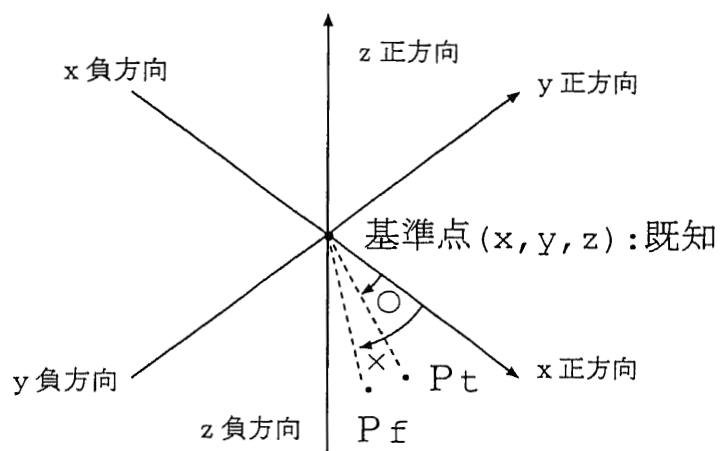


図 2.4: 従来法 2: 作業面生成による方法

3D 空間から 2D の作業面を切り出し、2D ディスプレイと 1 対 1 に対応させた上で、ディスプレイ上で 1 点を指定する。



$P_t$ : 指定したい点. x 軸正方向と-20度をなす線上の点.  
 $P_f$ : 誤って指定してしまう点. x 軸正方向と-23度をなす線上の点.

図 2.5: 従来法 1 によって 3D ピンポイントする場合におこる, 誤った点の指定

投影図内の角度は実世界における角度と一致しないので, 意図した角度とは異なった位置にある点を指定してしまう可能性がある.

- 位置によって精度がばらつく,
- 熟練を要す,
- 高価である,

といった問題点に直面する。さらに、バーチャルリアリティの特徴のひとつは、対象を符号化せず直接人間の感覚にうったえることであるため、

- 人間の能力の限界から精度が不十分,
- ユーザによって精度がばらつく,

といった問題点も指摘されていることから [廣瀬 93], バーチャルリアリティの体質そのものが3Dピンポイントに向いているとは言えない。

次に、

- 対象世界と操作の次元が違くと、混乱を引き起こす [van Dam 93]

ことから、3Dディスプレイを利用して3Dピンポイントを実現することも考えられる。3Dディスプレイは開発に関する報告もないわけではないが [Clifton, *et al.* 93], まだ実用化のめどはたっていない。

以上見てきたように、現段階では、2Dディスプレイ以外のディスプレイを用いた環境での3Dピンポイントには、ハードウェア面を中心に問題があり、3D幾何形状モデルと変換系の工夫のみでは、前節で述べた2つの問題点を解決できない。そこで本研究では、ディスプレイとしては2Dディスプレイを用いることを確定する。

### 2.3.2 3D幾何形状モデル代替策に関する考察

さまざまな応用に対応するために、3D幾何形状モデルにソリッドモデルを置いて、3D幾何情報を管理することは妥当である。逆に言えば、新たに3D幾何形状モデルを構築して3Dピンポイントの実現を試みるためには、構築するモデルはソリッドモデルである必要がある。そして、それに見合った変換系も新たに構築する必要がある。もし、従来のソリッドモデルを利用し、変換系の代替のみで問題解決がはかれるのであれば、3D幾何形状モデルまで代替するよりは低コストでの実現が期待できる。以上のことから、本研究では変換系のみでの代替策にその焦点を合わせる。

### 2.3.3 変換系代替策としての2D指向幾何変換モデル

#### 幾何変換モデル導入の意義

変換系は、3D幾何形状モデルからディスプレイへの変換規則を具備している。しかしながら、逆方向の変換である3Dピンポイントには問題があり、3D幾何形状モデルの幾何要素の操作が不



十分なものとなっている (図 2.2(a)). その原因を突き詰めると,

- 変換系が幾何要素に関する 3D 情報 (以降, 3D 幾何情報と呼ぶ) を過度に損失していること.
- 変換系が個々の操作, あるいは操作間の性質の差異を十分に考慮したものとなっているとは言い難いこと.

の 2 つが言える. これらを改善するためには,

- 3D 幾何形状モデルによって表現されるビューボリューム内のある領域と, ディスプレイ上の最小要素の集合の間の対応関係を定める

という, 変換系の機能だけでは不十分であり, この機能に加えて, 3D 幾何形状モデルとディスプレイの仲介をするものは, 3D 幾何形状モデルと同様に,

- 3D 幾何形状に関するデータ定義, データ操作機能を持つ

ことが必要不可欠である. これらの 2 条件をともに充足するものを, 本研究では幾何変換モデル (geometric transformation model) と呼び, 変換系の代わりに環境内へ導入する (図 2.2(b)) [高山ほか 94].

得られる環境をユーザ側から見ると, 3D 幾何形状モデルはバックエンド (backend), 幾何変換モデルはフロントエンド (frontend) と位置づけることができる. ユーザの操作は, フロントエンドを介してバックエンドへ伝達される. さまざまな応用に対応するために, バックエンドには従来通りソリッドモデルを置いて 3D 幾何情報を管理させ, フロントエンドには単一の幾何変換モデルに固定せずに, 個々の操作に適した幾何変換モデルを用意する. 一般に, 従来の形状操作のための画面は, 「コマンド群」, 「形状表示」, 「操作のための対話的なメッセージ」などから構成されている. そして, このうちの形状表示は, ユーザがコマンドを使って変更しない限り, 初期画面での表示方式, 多くの場合には「鳥瞰する」ことに適した表示方式が継続され, すべての操作がこの上でおこなわれる. しかしながら, すべての操作に対して最適な表現が存在しない [Naylor 94] のと同様, すべての操作に対して最適な形状表示は存在しない. 本研究では, 与えられた形状表示に対して操作を要求するのではなく, 操作を要求すると, それに最適な形状表示が提供される, という方法をとる. なお, このことは表示方式のコマンドによる選択を禁止するものではない.

言うまでもなく, 「鳥瞰する」ことは操作の一つである. 多数の形状表示を同時に表示することが可能なディスプレイでは, 鳥瞰するために最適な形状表示は, 常駐させるものの最も有力な候補のひとつと言える.

### 3D ピンポイント操作に適した 2D 指向

ディスプレイとして 2D ディスプレイを確定した環境における 3D ピンポイント操作において考慮すべきことは, 人間と計算機でやりとりする情報の次元である. ディスプレイ上に 3D 立体を投

影し、3自由度を同等に取り扱う3Dインタラクションに関しては、考慮する自由度の多さや2Dデバイスとの次元の不一致から、困難さが強く指摘されてきている(たとえば[SIGGRAPH 94]). 定義2.2中の条件3において、ディスプレイ画面上の2D情報からビューボリューム内の3Dの位置を正確に確認するためには、次元の変換が必要である。ユーザにとって不可避なこの変換の負荷は、幾何変換モデルを「3D幾何情報をより2Dに近い形で表現する2D指向」のものとするこ  
とによって緩和できる。

一般に、3D空間内での点の位置の移動に関する自由度は3である。この移動を、マウス操作のような本論文で志向している視覚的直感性に富む情報で表現することを考える。2D平面に2自由度をそのまま割り当てた場合、平面に垂直な残りの1自由度を表現する何らかの方法が必要である。

本研究で提案する2D指向幾何変換モデルL-repsの基礎になっている線図は、デカルト座標系の3方向を奥行き方向として立体を等間隔で離散的にサンプルした断面の奥行き番号でこの1自由度を表現する図面である。

# Chapter 3

## L-reps

本章では本研究の根幹をなす L-reps の提案をおこなう。まず 3.1 節で、L-reps のデータ定義を線図 (Lines) (たとえば [橋本ほか 92]) のデータ定義と、それに加えた拡張というかたちで述べる。次に 3.2 節では、L-reps のデータ操作を基本操作と応用操作に分けて述べる。

### 3.1 L-reps のデータ定義

#### 3.1.1 線図

図 3.1 は船体形状を表現する線図である。線図では、3D 立体の形状を、「前方、側方、上方の 3 方向から見たときの各方向の断面図の集まり」として表現する。断面は、各座標軸方向の奥行き座標値に関して、最大、最小である点を奥行きの両端とし、その間を等間隔に分割して切り出す。断面を切り出す枚数は、必要に応じて設計者により決められる。図 3.1 では、各方向に関してそれぞれ 10 枚の断面を切っている。線図がもっともよく使われている船体や自動車の形状は、通常面対称であるので、断面図は省略の規則が適用されて、半分の形状のみを描くことが多い。断面図内の曲線は奥行きを表現する番号が付加され、各方向ごとに重ねて書かれる。以上のようにして、正面線図 (cross lines)、側面線図 (longitudinal lines)、平面線図 (horizontal lines) の 3 つの部分からなる線図が構成される。基準面から等距離の点を線で結び、3D 形状を表現するという点では、方法論として等高線に類似している。

各断面曲線に奥行き情報が付加されているので、2D 指向ということで共通する三面図 (orthogonal views) (たとえば [西原 93]) の曖昧性の唯一の原因である、複数の稜線が射影された面図内で重複する場合<sup>1</sup>でも、稜線情報の損失は起こらない。しかしながら、形状を離散的にしか記述していないので、幾何要素、すなわち頂点、稜線や面のすべてを格納してはおらず、幾何要素を意識した形状の修正が完全にはできない。断面間を一次補間などで機械的に補間したとしても、メッシュ生成 (mesh generation) が限度である。そこで本論文では線図に 4 項目の拡張 (表 3.1) を加え

<sup>1</sup>筑波大学電子・情報工学系西原清一教授 ('93-11-26) の助言による。

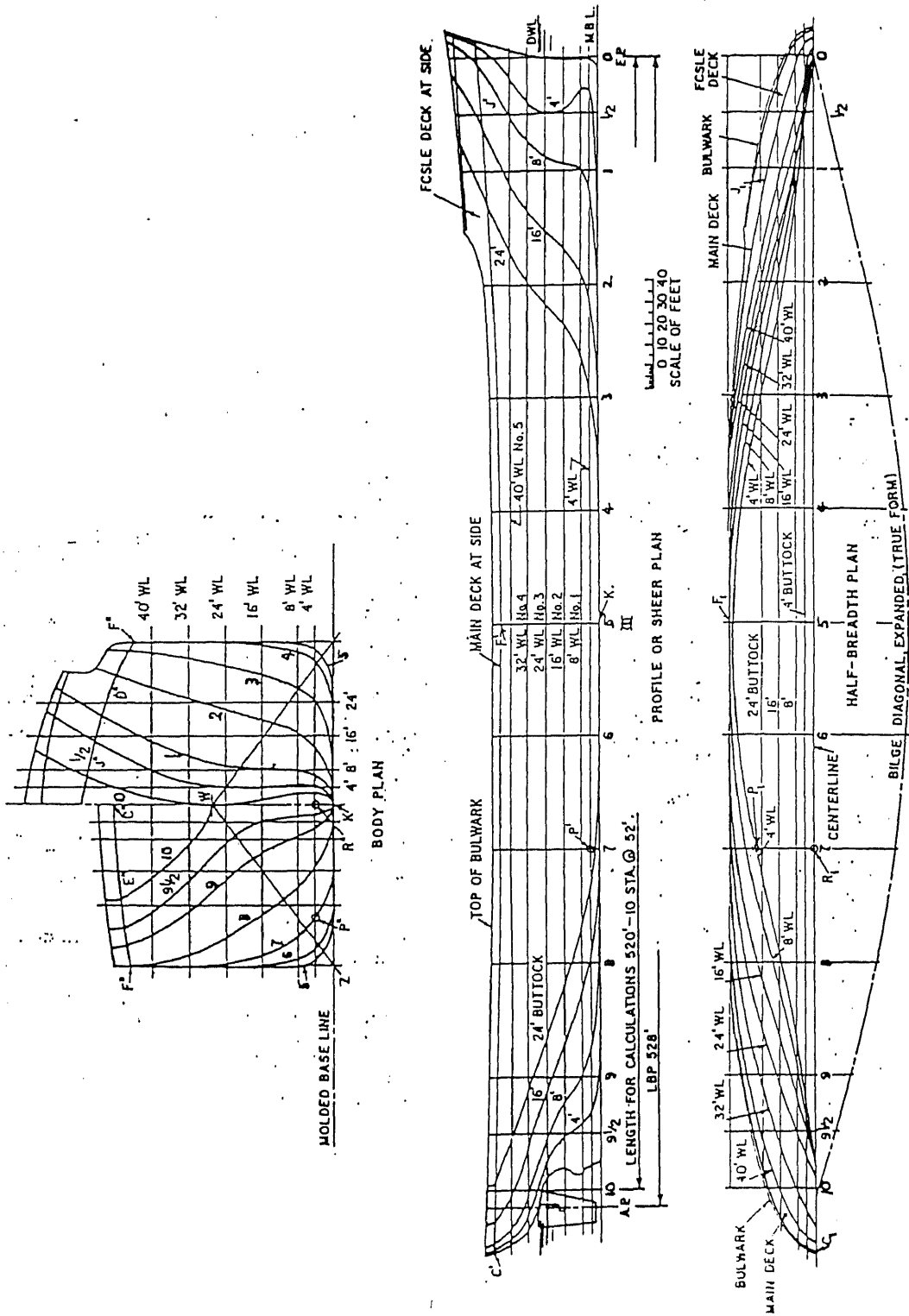


図 3.1: 船体形状を表現する線図 ([柴田ほか 79] より)  
 線図は船体や自動車などの曲面形状を表現するために使われている図面である。

表 3.1: 線図から L-reps への拡張  
 線図を以下の 4 項目において拡張し, L-reps を構築する.

	線図	L-reps
(1) 表現範囲	半分の形状 (対称性考慮)	全形状
(2) 断面の切り出し	等間隔. 奥行きは番号で表現.	頂点ごとにデカルト座標系の 3 平面方向. 奥行きはラベルと座標値の対応表で表現.
(3) 斜交稜線	明示しない	明示する
(4) 断面の方向	直交する 3 軸方向	直交する 3 軸方向 + 任意に付加可能

て、多面体形状に関しては全稜線と全頂点の表現が可能な 3D 幾何変換モデル L-reps を構築する [Takayama, *et al.* 94]. L-reps の L は、その基礎が線図 (Lines) にあることを示すものである。

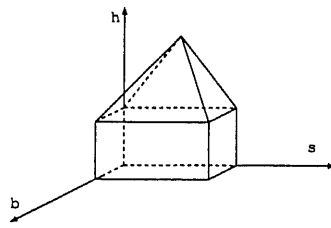
### 3.1.2 線図から L-reps への拡張

拡張項目を説明するにあたり、図 3.2(a) の面対称な家型の立体形状を対象形状の例として用いる。この形状を線図で表現したのが、同図 (b) である。ここでは各方向に関してそれぞれ 4 枚の断面を切っている。表 3.1 中、拡張 (1) によって、対称性を持たない形状も表現可能になる。拡張 (2) によって、すべての頂点はいずれかの断面に必ず含まれるようにすることができる。たとえば、図 3.2(b) では欠落している家の頂上の頂点が、同図 (c) では陽に表現される。拡張 (3) の目的は、断面の切り出しをデカルト座標系 (cartesian coordinates) の 3 平面方向に限定した場合、どの断面内にも線分として陽に表現され得ない、3 方向のいずれとも平行でない斜交稜線 (oblique edges) を、形状修正のための操作が可能な対象とすることにある。図面内では図 3.2(c) の平面線図にあるように、有向辺で表現する。ここで、有向辺を導入した理由は、白黒の媒体においても識別を可能にするためのみであって、カラーの利用が可能なディスプレイ画面上では、色の利用を導入して、斜交稜線のみを、直交稜線 (orthogonal edges)、すなわち断面上にのる稜線、と異なる色で表現する方法でもよい。

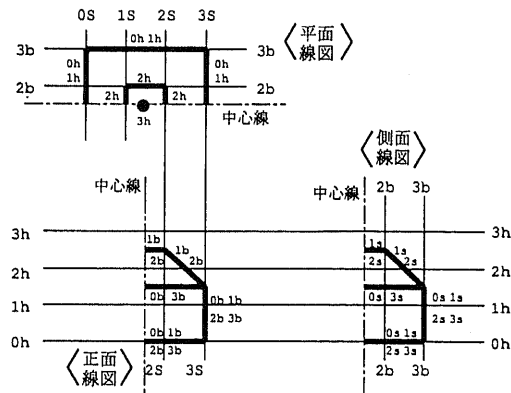
以上 (1)~(3) の拡張によって、多面体形状の、全稜線と全頂点の表現が可能になる。面情報に欠落が生じる事実は否めないが、少なくとも全頂点と全稜線が表現されていれば、頂点や稜線の移動はもちろんのこと、拡大縮小 (scale)、平行移動 (translate)、切断 (cut)、接合 (glue)、リフト (lift)、鏡像 (mirror image) 生成などの応用操作までも立体に対して適用できる。

拡張 (4) の目的は、曲がった管のような形状において形状の理解に必須な、立体を直交する 3 軸方向のいずれとも一致しない方向から見ることを可能にすることにある。本論文では、この任意の方向を軸とする断面図の集まりと、線図にもある正面線図、側面線図、平面線図のことを、要素線図 (component lines) と呼ぶ。斜交稜線を含む平面に垂直な方向を斜交稜線の両端点の座標などから計算によって求め、その方向を奥行き方向とする要素線図を導入すれば、斜交稜線として表現されていた稜線を、直交稜線として表現することが可能である。

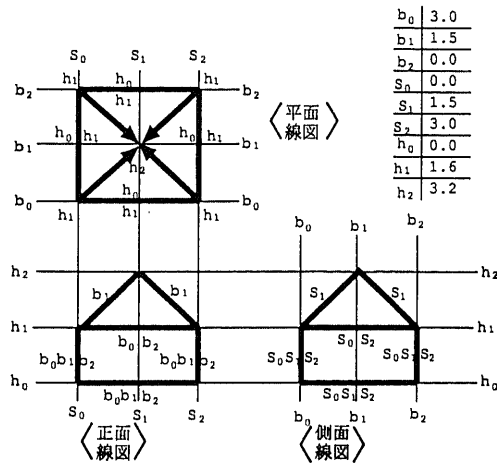
これまで定義してきた L-reps を文献 [Kim 90b] の記法を基にして階層的に表現したのが図 3.3 である。図中、「クラス/サブクラスリンク」(class/subclass link) とは、これによって結ばれる上位のクラスが下位のクラスよりも、より広い概念を抽象化した汎化 (generalize) されたクラスであることをあらわす。逆の見方をすれば、下位のクラスは上位のクラスよりもより概念を特化 (specialize) したクラスである。ここで、上位、下位はあくまで相対的なものであって、クラス/サブクラスリンクが再帰的につながれることによって、クラス階層 (class hierarchy) が構成される。「属性/定義域リンク (attribute/domain link)」とは、これによって結ばれる右側のクラスが、左側のクラスの対応する属性 (attribute) の定義域 (domain) になっていることを表現する。属性/定義域リンク



(a) 面対称な家型の形状



(b) 線図による(a)の立体の表現



(c) L-repsによる(a)の立体の表現

図 3.2: 線図と L-reps の例

(a) の形状を線図で表現したのが (b), L-reps で表現したのが (c) である。

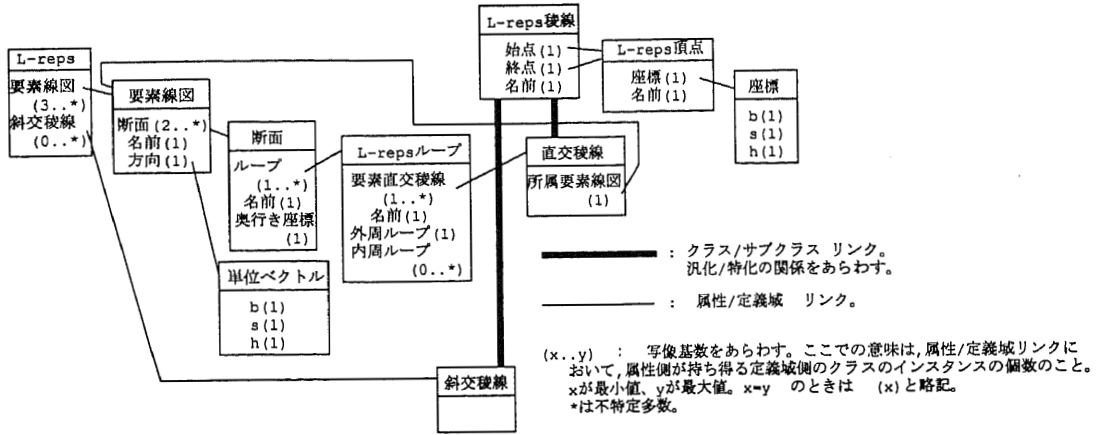


図 3.3: L-reps を表現する階層

Kim のモデル [Kim90b] を拡張し、写像基数も併記している。



が再帰的につながれることによって、クラス合成階層 (class composition hierarchy) が構成される。「写像基数」 (mapping cardinality) (たとえば [酒井 87]) は、文献 [Kim 90b] の記法にはないが、本研究において付加したものであり、ここでの意味は、属性/定義域リンクにおいて、属性側が持ち得る定義域側のクラスのインスタンスの個数のことである。(x..y) とは、その最小値が x、最大値が y であることをあらわし、x=y のときには (x) と略記する。また、\*は不特定多数をあらわす。

図 3.3 は次節で述べるデータ操作のための基本データ構造を与える。データの操作を伴う応用でデータの一貫性を保つためには、データの相互関係を管理することが不可欠である。図 3.3 は、表示とは異なった形でデータの相互関係を階層的に表現している。そして、データの操作をこの階層で表現されているデータ構造をもとにおこなうことによって、一貫性を保ちながらおこなうことができる。以上のことから、図 3.3 は図 3.2(c) のような表示の定義とは分離した、L-reps の表現としてのデータ定義を与える。このような「表現としてのデータ定義」については、[Yamaguchi, et al. 82] でも述べられている。

## 3.2 L-reps のデータ操作

前節で示したデータ定義をもとに、L-reps のデータ操作を定義する。L-reps では、3 つまたはそれ以上の要素線図によって単一の 3D 幾何形状を表現するので、いかなるデータ操作がおこなわれる場合にも、その意味 (semantics) はすべての要素線図において一貫性がとれたかたちで表現される必要がある。しかし、通常一時に人間が修正を加えることができるのは、単一の要素線図上においてである。L-reps におけるデータ操作には、単一の要素線図上で施行された修正を、他の要素線図へ整合性のとれた形で自動的に波及させるメカニズムを含有させる。これによって、ユーザの形状操作時の煩雑性は緩和されるとともに、誤った修正をおこなう確率も抑制される。

文献 [Toriya, et al. 86] にならい、位相操作 (topological operations)、幾何学操作 (geometric operations)、大域的操作 (global operations) の 3 つから基本操作群 (primitive operations) を構築し、この基本操作の列として、応用操作 (high-level operation) を構築する。この方法における位相操作はオイラー操作 (Euler operations) [Mäntylä, et al. 82] のみから構成され、位相的にありえない立体の生成が防止されるとともに、アンドゥー (undo)、リドゥー (redo) 機能が実現される。結果として得られる L-reps の操作体系は、表 3.2 のようになる。

### 3.2.1 基本操作

図 3.4 は、オイラー操作の一つである、既存の稜線の途中に頂点をつくり、もとの稜線を二つに分離する MVE (Make a Vertex and an Edge) 操作の流れ図である。なお、本論文で用いる流れ図はすべて、日本工業規格 (JIS X 0121) で定められている記法に準ずる。

表 3.2: L-reps の操作体系

基本操作は文献 [Toriya, *et al.*86] に基づいており, 応用操作はその列として実現される.

基 本 操 作	位相操作	MEL(Make an Edge and a Loop)
		KEL(Kill an Edge and a Loop)
		MVE(Make a Vertex and an Edge)
		KVE(Kill a Vertex and an Edge)
KCLMPL(Kill a C-Loop and Make a P-Loop)		
KPLMCL(Kill a P-Loop and Make a C-Loop)		
MEV(Make an Edge and a Vertex)		
KEV(Kill an Edge and a Vertex)		
MEKL(Make an Edge and Kill a Loop)		
KEML(Kill an Edge and Make a Loop)		
MEVVL(Make an Edge, a Vertex, a Vertex and a Loop)		
KEVVL(Kill an Edge, a Vertex, a Vertex and a Loop)		
MZEV(Make a Zero-length Edge and a Vertex)		
KZEV(Kill a Zero-length Edge and a Vertex)		
	幾何学操作	TV(Translate a Vertex)
	大域的操作	TS(Translate a Solid) RS(Rotate a Solid)
応 用 操 作	リフト操作	稜線 頂点
	鏡像生成操作	
	カット操作	
	接合操作	

[副プログラム]

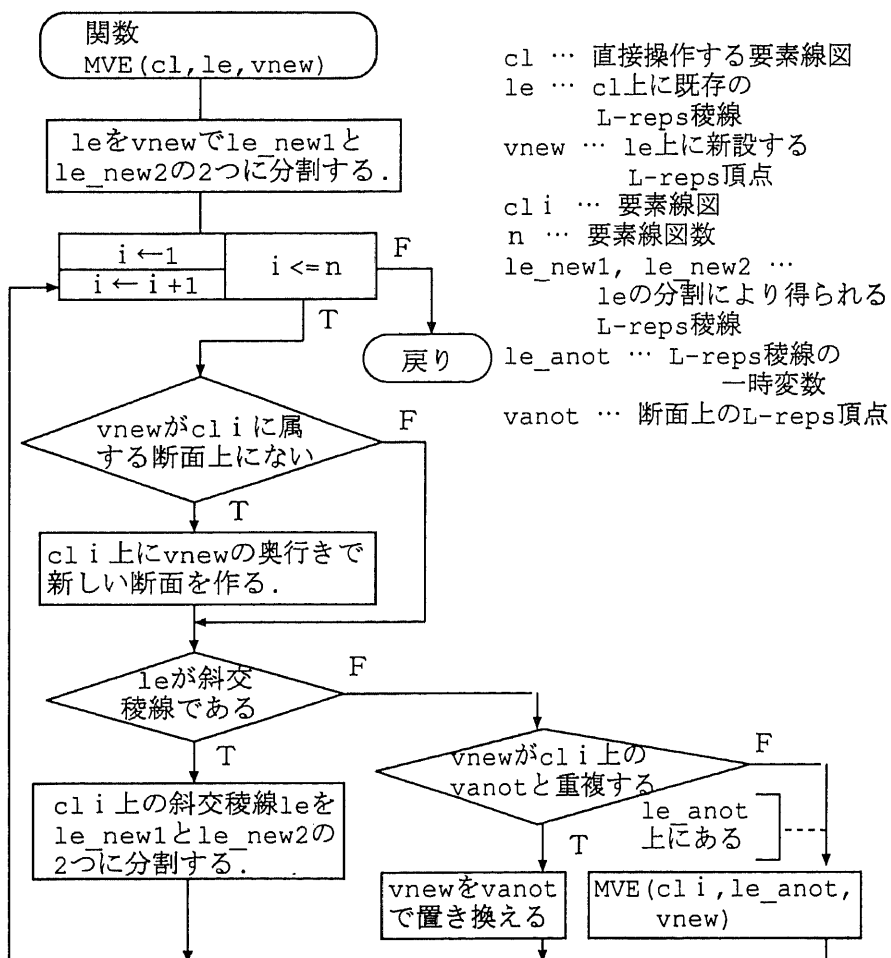


図 3.4: 要素線図間の波及を含む MVE の流れ図

要素線図 cl 上の L-reps 稜線 le 上に L-reps 頂点 vnew を生成し、le を二分割する。以降を含め、流れ図はすべて、日本工業規格 (JIS X 0121) に準拠している。

その他の基本操作についても、3D 空間内における操作の意味を適宜、各要素線図に波及させることによって、アルゴリズムを構築することができる。

ひとつ注意点として、大域的操作における RS(Rotate a Solid) 操作や幾何学操作における TV(Translate a Vertex) 操作では、一般に斜交稜線が増加する可能性がある。これにより見た目の煩雑度が増すだけでなく、斜交稜線を含む多角形においては、寸法や角度の直感的な理解度が、直交稜線のみから構成される多角形に比べて劣る点が問題となる。これに対する対応としては、

- RS,TV 操作後、斜交稜線が最小になるような方向への視点切り替えアルゴリズムの開発

が考えられる。また、L-reps の RS,TV 操作への不適応を許容するという立場からは、

- B-reps のような他の形状モデルに一時的に変換し、B-reps 上で RS,TV 操作施行後に再び L-reps のデータを得る

という方法も考えられる。後者の B-reps との相互変換に関しては、5.3 節で詳述する。

モデルの完全性 (completeness)[Requicha 80] に関する議論をおこなうためには、上記の基本操作群について、その極小性 (minimality) に関する議論が不可欠である。しかしながら、これらの基本操作群について詳述しており、L-reps でもこれらを基本操作群として採用するきっかけとなった文献 [Chiyokura 88] では、この極小性については言及されていない。本論文では、L-reps の幾何変換モデルとしての有効性を提起することに主眼を置き、L-reps に対する一般的な評価が得られた後、この問題に取り組む予定である。

### 3.2.2 応用操作

文献 [佐藤ほか 90] で示されている応用操作のうち、「リフト操作」、「鏡像作成」、「カット操作」、「接合操作」の4つが3D ピンポイントを必要とし、L-reps の操作として導入することが効果的である。リフト操作は、その操作対象によって頂点と稜線に分類できる。ここでは「頂点に対するリフト操作」の概略を、図 3.5 の流れ図に示す。実際には入力を受け付けた直後など、エラー調査が必要だが、冗長になると、本来のリフト操作の実現部分をはっきりさせるために、ここでは割愛する。流れ図にある通り、応用操作では、その核となる部分に前項で定義した基本操作が使われる。また逆に、整合性維持の観点から、基本操作以外によってデータを操作することは禁止する。

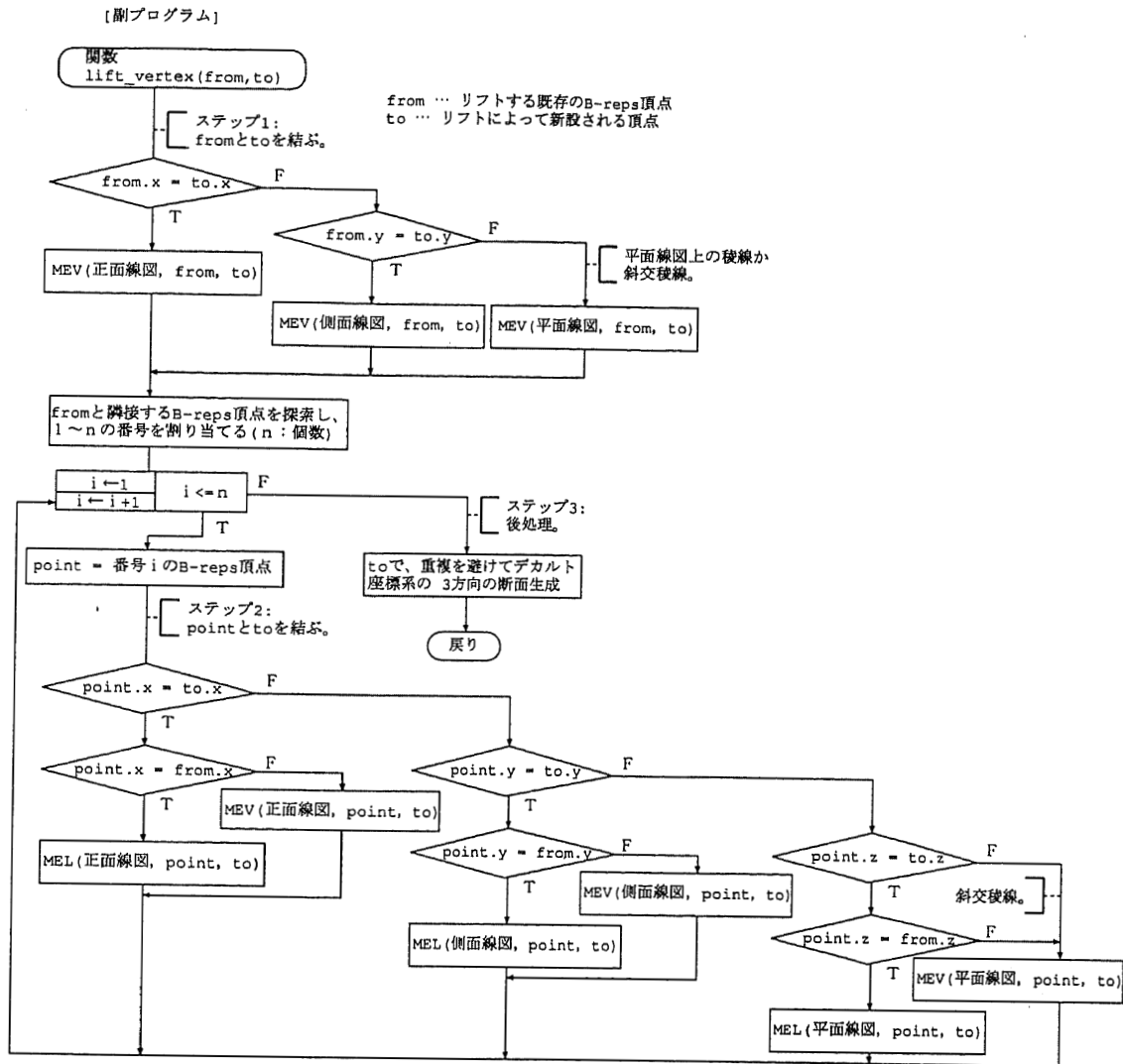


図 3.5: 頂点に対するリフト操作の流れ図  
B-reps 頂点 from をリフトして頂点 to をつくる。

# Chapter 4

## L-reps の特徴

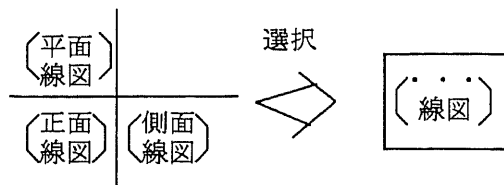
本章では前章で提案した L-reps について、3D ピンポイント法を従来法と比較するとともに、L-reps の表現としての一般的な評価もおこなう。

### 4.1 L-reps 上での 3D ピンポイント法

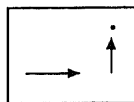
表 3.2 中のすべての応用操作と基本操作 MVE(Make a Vertex and an Edge), MEV(Make an Edge and a Vertex), MEVVL(Make an Edge, a Vertex, a Vertex and a Loop), および TV(Translate a Vertex) において、3D ピンポイントの必要が生じる。3D ピンポイント法を図 4.1 のように提案する。いずれの要素線図も 3 自由度の表現が可能であることを考えれば、手順 1 ではどの要素線図を選択してもよいが、上に示した応用操作、あるいは基本操作を遂行しやすい要素線図を選択する。手順 2 で 2 自由度、手順 3 で最後の 1 自由度が確定される。ここで定義 2.2 の 4 条件のうち、従来法で問題があった条件 3,4 について考えると、2D 平面に 2 自由度がそのまま割り当てられているので、ユーザは 2D 平面内の位置によって直感的に 2 自由度方向の位置を確認できる。そして、手順 3 より、奥行き方向の位置の確認も正確におこなえる。以上のことから、手順 3 までで、既存の断面上のすべての点について定義 2.2 の 4 条件のすべてを満たすことができる。次に、既存の断面上にない点の場合にも手順 4 を加えることによって定義 2.2 の 4 条件のすべてを満たすことができる。したがって、図 4.1 は、ビューボリューム内のすべての点について 3D ピンポイント可能な 3D ピンポイント法である。

ここで、図 4.1 の方法の他に、複数の要素線図の利用による 3D ピンポイント法も考えられるが、ユーザの視点の移動範囲が拡大する。本研究では、ユーザの操作時の煩雑性を緩和するという観点から、視点の移動範囲も極小に抑制し、図 4.1 の方法を 3D ピンポイント法として定める。

また、図 4.1 の方法では、既存の頂点や稜線の中点などの特殊な点を 3D ピンポイントする際に、位置のずれた誤った点を指定してしまい、特殊な点としての条件が満たされない危険性がある。これを防止するためには、指定する点の特殊性に関する条件を指定する前に与える、すなわち、あらかじめ特殊な点を指定するという制約を与えればよい。この制約の存否によって、特殊

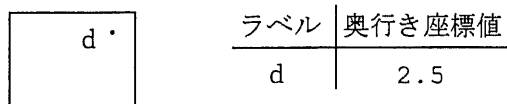


(手順1) 3つまたはそれ以上の要素線図から任意の1つを選択する。

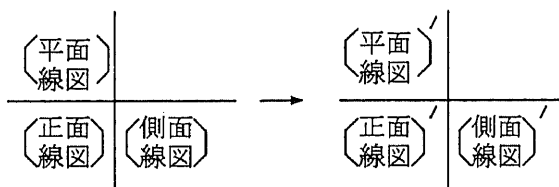


選択された要素線図

(手順2) 選択された要素線図上で, 図面と平行な2自由度について, ディスプレイ上で位置指定をおこなう。



(手順3) (手順2)で指定された選択された点について, 図面と垂直な1自由度をラベルと奥行き座標値で指定する。



(手順4) 指定した点が既存の断面上にない場合には, その点を通る断面を各要素線図について生成する。

図 4.1: L-reps 上でのピンポイント法

な点, 特殊でない点のいずれの3Dピンポイントにも適した環境が提供可能である。

## 4.2 3Dピンポイント法の総合比較

本節では3Dピンポイント法の総合比較をおこなう。

### 4.2.1 3Dピンポイント法のラインナップ

2.3.2項で, 3Dピンポイント操作の実現に当たっては2D指向のアプローチをとることが重要であることを述べた。そこでここでは, ソリッドモデルと投影変換に基づく従来の3Dピンポイント法に加えて, L-reps 以外にも2D指向のアプローチとして三面図, 等高線(contour), コンピュータ・トモグラフィ(Computer Tomography; CT)の3つを考え, これらを基にした3Dピンポイント法を総合的に比較する。

#### 三面図

三面図(図4.2)は, デカルト座標系の3方向に立体を射影して表現する。正面図(front view), 平面図(top view), 側面図(side view)の3つから構成され, 2D指向の試みの中でも代表的である。L-repsの基礎として採用した線図との決定的な差異は, 各面図が射影によって構成されていることで, 複数の稜線の射影が射影面上で重複する場合には, 稜線情報が損失することがある。

三面図上での3Dピンポイント法は以下のようなものである。

1. 3つの面図から任意の1つを選択する。ここでは, 選択した面図のことをA面図と呼ぶ。
2. A面図上で, 図面と平行な2自由度について, ディスプレイ上で位置指定をおこなう。
3. 1.で選択されなかった2つの面図から, 任意の1つを選択する。ここでは, 選択した面図のことをB面図と呼ぶ。
4. B面図上で, 2.で指定していない, 残りの1つの自由度方向の位置を, ディスプレイ上で指定する。ここで, A, Bの2つの面図で共通にあらわれる自由度方向については, 同一の位置でなければならない。

#### 等高線

等高線は鉛直方向を奥行き軸として等間隔にスライスした断面の集まりによって構成される。線図との決定的な差異は, 奥行き軸の方向が鉛直方向のみであることで, したがって, 断面の方向も水平方向のみである。ここでは, 幾何要素の操作性を念頭に置き, 通常の等高線のままで比較することはせず, 線図の場合と類似の以下の2項目の拡張を加えて等高線表現(contour representations; 等高線-reps)(図4.3)を構成し, その上での3Dピンポイント法を比較対象とする。拡張項目とは,



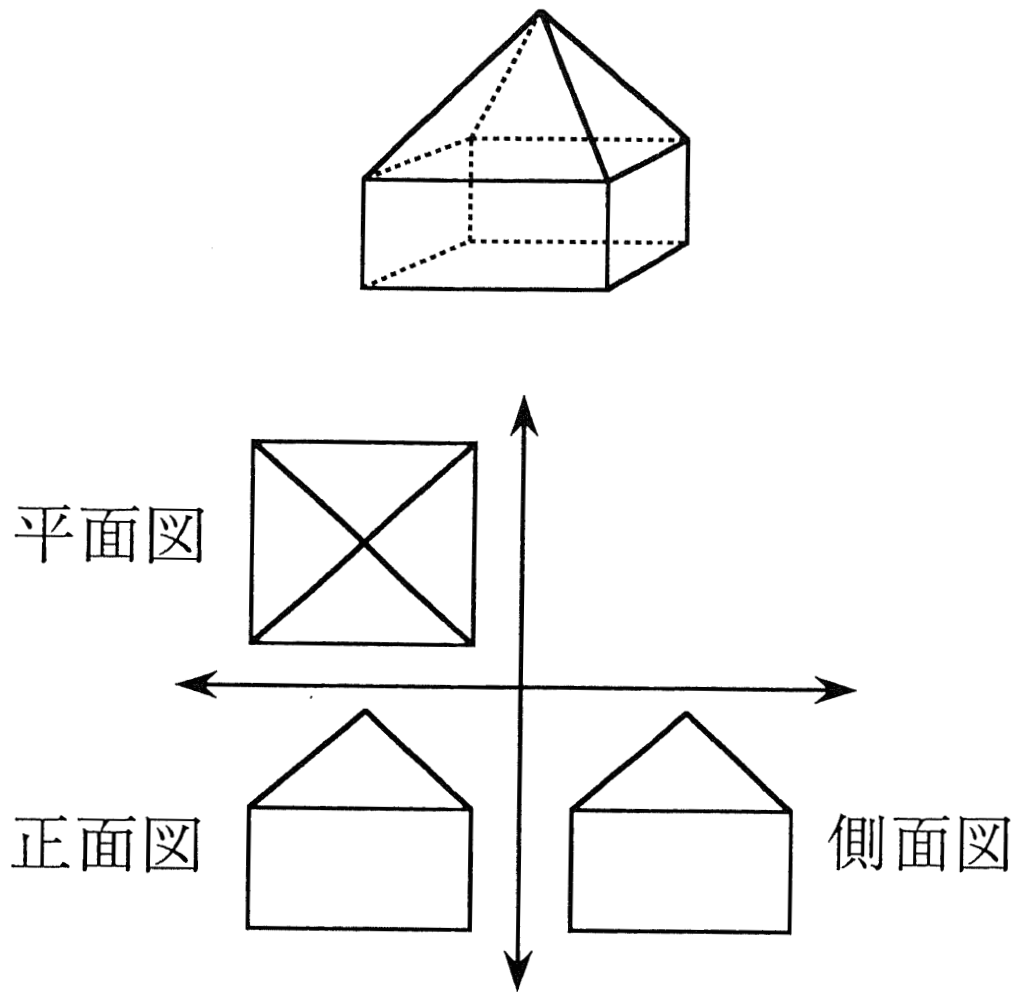


図 4.2: 三面図

3D 立体をデカルト座標系の 3 平面に射影して表現する.

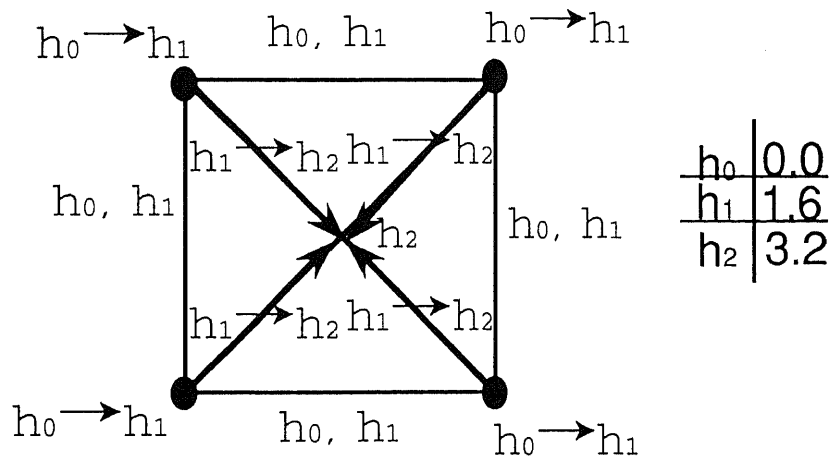
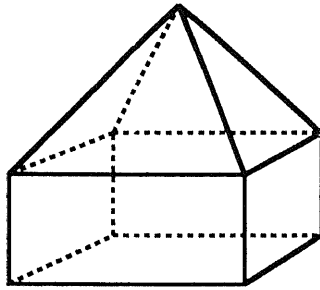


図 4.3: 等高線-reps

3D 立体を、鉛直方向を唯一の奥行き軸とする、頂点を通る水平断面によって表現する.

- 全頂点を表現するために、断面のスライス等を等間隔ではなく、頂点ごとにおこなうこと。
- 全稜線を表現するために、断面上にのる稜線だけでなく、断面方向と一致しない、断面にのらない稜線を陽に表現すること。

の2つである。

得られた等高線-reps 上での 3D ピンポイント法は、以下のようなものである。

1. 断面方向と平行な 2 自由度について、ディスプレイ上で位置指定をおこなう。
2. 1. で指定された点について、断面方向と垂直な 1 自由度方向の位置をラベルと奥行き座標値で指定する。
3. 指定した点が既存の断面上にない場合には、その点を通る断面を生成する。

## CT

CT はデカルト座標系の 3 方向を奥行き軸として等間隔にスライスした断面の集まりによって構成される。線図との決定的な差異は、興味のある中心が断面の境界ではなく、断面の内部にあることで、データも断面の内部の物質の分布状態を表現するものとなる。材質が均一の多面体を表現した場合には、その物質の分布の境界が、頂点や稜線として解釈可能である。また、断面は重ねては書かれず、個々の断面を同一方向ごとに羅列して表現する。等高線の場合と同様、ここでも幾何要素の操作性を念頭に置き、通常の CT のままで比較することはせず、線図の場合と類似の以下の 2 項目の拡張を加えて CT 表現 (CT representations ; CT-reps)(図 4.4) を構成し、その上での 3D ピンポイント法を比較対象とする。拡張項目とは、

- 全頂点を表現するために、断面のスライス等を等間隔ではなく、頂点ごとに 3 方向おこなうこと。
- 断面の奥行き軸の方向として、デカルト座標系の 3 方向に加えて、任意の方向も付加できること。

の 2 つである。以降では便宜上、三面図の場合の正面図、側面図、平面図、および面図に対応させる形で、正面 CT、側面 CT、平面 CT、および要素 CT と呼ぶことにする。

得られた CT-reps 上での 3D ピンポイント法は、以下のようなものである。

1. 3 つまたはそれ以上の要素 CT から任意の 1 つを選択する。なお、これは断面の方向を定めるだけであって、この時点では同一方向の複数の断面が選択される。
2. 選択された要素 CT の中から、指定したい奥行きと同一の奥行きの CT 断面を探す。

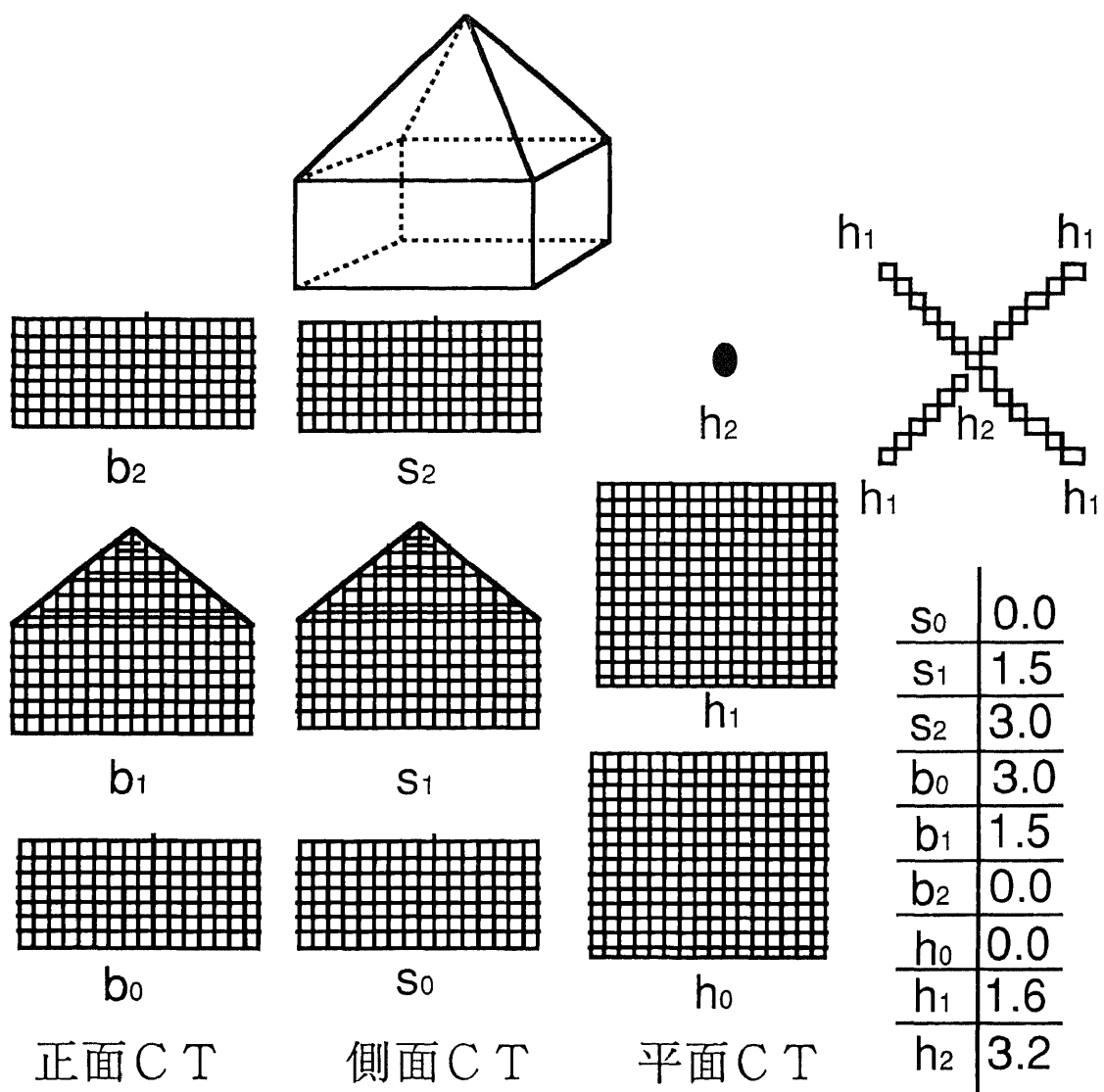


図 4.4: CT-reps

3D 立体を、デカルト座標系の 3 方向を奥行き軸とし、頂点を通る 3 方向の断面の内部を記述することによって表現する。

3. そのような奥行きが見つかった場合には4.へ、見つからない場合には、その奥行き CT 断面を新たに生成する。
4. 得られた CT 断面上で、断面方向と平行な 2 自由度について、ディスプレイ上で位置指定をおこなう。

L-reps 上での 3D ピンポイント法に対して、以上で定義した三面図、等高線-reps、CT-reps それぞれに基づく 3D ピンポイント法、および、ソリッドモデルの投影に基づいて 2.2 項で示した従来法 1,2 を比較対象としてラインナップする。

#### 4.2.2 3D ピンポイント法の単純比較

表 4.1 が 3D ピンポイント法比較表である。表の通り、評価項目として、

- (1) 寸法、角度の歪みの発生
- (2) 補助作業が必要な頻度
- (3) 指定に必要な最小要素数

の 3 つを考える。評価項目の (1) は「誤った指定」に、(2),(3) は「手続きの煩雑さ」に、関わる。評点は、相対的にすぐれている順位をあらわす。したがって、数値が小さいほどすぐれていると言える。順位が等しいものが複数存在する場合、その次にすぐれているものは、それ自身よりもすぐれているものの個数に 1 を加えたものを順位とする。たとえば、最もすぐれているものが 2 つ存在する場合、その次にすぐれているものの順位は、3 である。

以下、評価項目ごとに、評点の理由を述べる。

##### (1) 寸法、角度の歪みの発生

従来法 2 は、3D ピンポイントする平面上にある面に回転操作を加えてディスプレイ画面の方向と一致させることによって、発生を極小に抑制できる。L-reps と CT-reps は、斜交稜線が含まれる場合にのみ、発生する。三面図は、デカルト座標系の 3 平面と平行な面の稜線の寸法は正確であって、歪まない。等高線-reps は水平方向のみ、寸法、角度が歪まない。従来法 1 は、投影法に依存して寸法、角度に歪みが発生する。

##### (2) 補助作業が必要な頻度

L-reps、等高線-reps、CT-reps とも、既存の断面上にない点を指定する場合に、新たに断面を追加生成する必要が生じるが、断面数が少ない分、等高線-reps は頻度が高く、不利と言える。従来法 2 は、位置によって平行移動、回転を複数回適用する可能性もあり、最も不利であると評価できる。それらに比較して、三面図と従来法 1 は、補助作業と呼ぶにふさわしい作業はない。

表 4.1: 3D ピンポイント法の単純比較  
 評点は、すぐれている順位。値が低いほどよい。

評価項目\表現	L-reps	三面図	等高線-reps	CT-reps	従来法 1	従来法 2
(1) 寸法、角度の歪みの発生	2	4	5	2	6	1
(2) 補助作業が必要な頻度	3	1	5	3	1	6
(3) 指定に必要な最小要素数	1	6	1	1	1	1
(1)~(3) の合計	6	11	11	6	8	8
同評価	1	5	5	1	3	3

### (3) 指定に必要な最小要素数

三面図のみが、2つの最小要素を指定しなければならない。それ以外はすべて、1つで可能である。

表 4.1 より、L-reps と CT-reps が、評点合計に基づく総合評価から、従来法 1,2 よりすぐれており、また、2D 指向のアプローチとしても 3D ピンポイント操作に最適なものであるといえる。

#### 4.2.3 多面体形状設計環境への適合性比較

1 章で述べたように、3D ピンポイントの需要は幾何形状の設計環境が中心である。本項では、L-reps の表現範囲を念頭に置いて幾何形状を多面体へ限定し、前項で比較した各表現の多面体形状設計環境への適合性比較をおこなう。

表現の適合性を論じる上では、従来法 1,2 を分離する必要性はないので、これらをソリッドモデルとしてまとめる。その他の比較対象としては、前項で 3D ピンポイントを実現する基礎となる表現としてラインナップしたものを、そのままラインナップする。

表 4.2 が多面体形状設計環境への適合性比較表である。表の通り、評価項目として、

- (1) 全頂点を表現可能であること
- (2) 全稜線を表現可能であること
- (3) 全面を表現可能であること
- (4) データ構造の頂点操作への適合性
- (5) データ構造の稜線操作への適合性
- (6) データ構造の面操作への適合性
- (7) 初期形状入力の適性
- (8) 対象形状を考える負担
- (9) 外観の意匠設計への適合性
- (10) 寸法、中心線等の付加情報の表示のしやすさ
- (11) 紙面上の設計経験者(プロ)への浸透性
- (12) ディスプレイ上での複雑度
- (13) 3D ピンポイント法

の 13 個を考える。評価項目の (1)~(6) は「3D 幾何形状モデル」、(7) は「初期形状入力のための幾何変換モデル」、(8)~(13) は「形状修正のための幾何変換モデル」としての適合性に関わる。評点が、相対的にすぐれている順位をあらわし、順位が等しいものが複数存在する場合、その次にすぐれているものは、それ自身よりもすぐれているものの個数に 1 を加えたものを順位とすることは、前項と同じである。

以下、評価項目ごとに、評点の理由を述べる。

表 4.2: 多面体形状設計環境への適合性比較  
 評点は, すぐれている順位. 値が低いほどよい.

評価項目 \ 表現	L-reps	三面図	等高線-reps	CT-reps	ソリッドモデル
(1) 全頂点を表現可能であること	1	5	1	1	1
(2) 全稜線を表現可能であること	1	5	1	1	1
(3) 全面を表現可能であること	3	2	3	3	1
(4) データ構造の頂点操作への適合性	2	5	2	4	1
(5) データ構造の稜線操作への適合性	2	5	3	4	1
(6) データ構造の面操作への適合性	3	2	3	3	1
(7) 初期形状入力の適性	3	2	3	3	1
(8) 対象形状を考える負担	2	5	2	2	1
(9) 外観の意匠設計への適合性	3	2	5	4	1
(10) 寸法, 中心線等の付加情報の表示のしやすさ	1	1	5	1	4
(11) 紙面上の設計経験者(プロ)への浸透性	2	1	3	3	3
(12) ディスプレイ上での複雑度	3	1	5	4	1
(13) 3D ピンポイント法	1	4	4	1	3
(1)~(6) の合計	12	24	13	16	6
同評価	2	5	3	4	1
(8)~(13) の合計	12	14	24	15	13
同評価	1	3	5	4	2



### (1) 全頂点を表現可能であること

三面図の場合にのみ、射影面内で稜線が重複することによって、3D 形状の再構成時に多義解釈 (multiple interpretations)(たとえば [西原 93]) が生じることがある。この場合に、実際には存在する頂点を表現しない立体候補もあらわれるので、他の表現と比較して劣ると言える。その他の表現については、頂点情報の損失はいっさい起こらない。

### (2) 全稜線を表現可能であること

(1) と同様に、三面図の場合には稜線情報の損失が起こり得る。

### (3) 全面を表現可能であること

一意かつ完全に表現できるのは、ソリッドモデルのみである。完全に表現する候補を含むものの、多義解釈が生じ得る三面図が続く。その他はすべて、完全には表現できない。

### (4) データ構造の頂点操作への適合性

操作後にも多義解釈の発生が有り得る三面図は、ここでも相対的に劣ると言わざるを得ない。L-reps, 等高線-reps, CT-reps は、いずれも多義解釈は生じないものの、操作後に補助作業が加わる可能性があり、ソリッドモデルより劣る。中でも CT-reps は、データ構造そのものに頂点という概念がなく、頂点の移動時など、周囲のデータにも変更の必要が生じるので、順位としては4になる。

### (5) データ構造の稜線操作への適合性

三面図, CT-reps, およびソリッドモデルの位置づけは、(4) の頂点の場合と同様である。等高線-reps の場合、L-reps と比較して断面にのる稜線数が少ない。このことは、3 自由度すべてのデータ操作が必要な場合が L-reps より多いことを意味し、適合性としては劣る。

### (6) データ構造の面操作への適合性

一意かつ完全に表現できるのは、ソリッドモデルのみである。完全に表現する候補を含むものの、多義解釈が生じ得る三面図が続く。その他はすべて、面情報に欠落があるため、対応できない場合が生じる。

### (7) 初期形状入力の適性

幾何情報をすべて決定できることが必要条件となるので、ソリッドモデルと三面図のみが適性を持つ。一意性からソリッドモデルがまさる。ここで、ソリッドモデルの中でも特に CSG(Constructive

Solid Geometry) (たとえば [Mäntylä 88]) が, その適性においてすぐれていることは, よく知られているところである.

#### (8) 対象形状を考える負担

三面図は, ユーザが頭の中で形状を操作してリドゥロー (redraw) するか, ソリッドモデルを仲介して対話的選択<sup>1</sup>をしない限り, 面図間で形状の修正を一意には波及できない. 文献 [金 92] では形状入力の繁雑さを緩和する手法として, 面図間対応入力を提案しているが, これによって波及可能な場合は限定されている. したがって, 単体としては三面図が最も負担が大きいと言える. 3D 立体が表示されるソリッドモデルが, 当然のことながら最も負担が軽い. L-reps と CT-reps は, それぞれ要素線図, 要素 CT が単体で 3 自由度の束縛を可能であるため, 単一の要素線図または要素 CT 上の修正で, 現実世界の修正の意味を一意に決定できる. そのため, 3.2.1 項の L-reps の基本操作が要素線図間の波及を含んでいるように, 要素 CT 間の波及もアルゴリズム化することが可能である. 等高線-reps の場合には, ディスプレイ上で構成要素が独立しておらず一定の範囲に混在しているため, 波及の必要性はないが, ソリッドモデルほどの形状の直感性はない. 以上のことから, ユーザ側から見れば, L-reps, 等高線-reps, および CT-reps の 3 者の負担は, 同順位と考えられる.

#### (9) 外観の意匠設計への適合性

(8) と同様の理由で, ソリッドモデルが最も適合する. しかしながら, (8) と決定的に異なることは, 外観の意匠設計では, 形状を静止しているものとして考えて良い点であり, そのような条件下では, デカルト座標系の 3 方向からの立体の外観と一致する三面図が, ソリッドモデルの次に適合する. 逆に, 上方以外からの外観の理解が相対的に困難な等高線-reps は, 最も適合性が低い. L-reps は, 各断面が重ねて書かれる分, CT-reps より外観の把握がしやすい.

#### (10) 寸法, 中心線等の付加情報の表示のしやすさ

一般に, ソリッドモデルは 2D 指向に比べて表示が困難であるが<sup>2</sup>, 2D 指向の中でも等高線-reps のみは, 断面の方向が水平方向に限定されているので, 鉛直方向の中心線の表示がソリッドモデルよりも困難である. そこでソリッドモデルに 4, 等高線-reps に 5 を順位として与える. 残りの L-reps, 三面図, および CT-reps は, いずれも断面の方向を 3 方向持っており, 同一の順位と考えられる.

<sup>1</sup>商用システムの AutoCAD Designer や ViSion 3D モジュールなどでおこなわれている [日経 CG 94c][PIXEL 94].

<sup>2</sup>筑波大学電子・情報工学系西原清一教授 ('93-7-15) の助言による.

### (11) 紙面上の設計経験者(プロ)への浸透性

従来、紙面上の形状設計では、三面図を中心とする2D図面が使われてきた。現在でも、プロの設計者たちの2D図面との結びつきは決して弱いとは言えない<sup>3</sup>。

L-repsは、三面図との類似性から、三面図の次の順位が期待できる。等高線-reps、CT-reps、およびソリッドモデルの3者間では、明確に差異を与える材料は見当たらない。

### (12) ディスプレイ上での複雑度

三面図とソリッドモデルは、断面をスライスしないので、相対的に小さい。等高線-repsは、一方向のみですべてを表現するため、最も大きい。CT-repsは、断面が個々に羅列されるため、全断面を表示するために断面数の増加に応じて表示のスケールを小さくしなければならない場合が生じる。L-repsは一定スケールでの表示を確保できるので、複雑度もCT-repsより抑制しやすい。

### (13) 3Dピンポイント法

これは前項の比較結果を用いている。

#### 4.2.4 3Dピンポイント法の最終比較

4.2.2項で、3Dピンポイント法のみをとって単純比較をおこなった結果では、L-reps、CT-reps上での3Dピンポイント法が両者同レベルで最もすぐれていた。しかしながら前項で、3Dピンポイントの需要の中心である形状設計環境への、適合性比較をおこなった結果では、L-repsの方がCT-repsより適合しやすい。以上のことから総合的に判断すれば、L-repsによって3Dピンポイントを実現することが最も望ましい、と結論づけられる。

## 4.3 L-repsの評価

これまでの議論より、L-repsの表現としての評価として、以下の5項目が挙げられる。

1. L-repsの長所としては、以下の6項目がある。

- 単一の要素線図上の形状操作によって、対象形状の修正の意味を一意に確定できること。
- 前項目により、単一の要素線図上での形状操作の他の要素線図への波及をアルゴリズム化できること。
- 前項目により、三面図の場合に問題である、形状操作時に対象形状を考える負担が緩和されること。

<sup>3</sup>具体的な数値例として、設計コンサルティング会社のインクスでは、顧客から提供される図面の8割は2Dデータである[日経CG 94b]。

- 前々項目により、ユーザの操作を伴う図面では頻出する、線分どおしの接続部分での線分の分離や重複に起因する要素線図間の不整合などのエラーの発生を回避できること。
- 誤った点を指定しにくい、手続きが煩雑でない、など、3D ピンポイント法が従来法よりすぐれていること。
- 2D 指向であるため、寸法、中心線等の付加情報が表示しやすいこと。

2. L-reps の短所としては、以下の 2 項目がある。

- 面情報を完全には表現できないこと。
- 形状入力が煩雑であること。

3. 3D ピンポイントを含む形状操作環境における幾何変換モデルに適している。

4. 3D 幾何形状モデルには適していない。

5. 形状入力のための幾何変換モデルには適していない。

前章で L-reps を提案し、本章の解析で幾何変換モデルとして適していることがわかった。次章では具体的に L-reps を幾何変換モデルとして用いるための方法論を述べる。

## Chapter 5

# L-reps を含む 3D 機械形状設計環境の実現

本章では、L-reps を 3D ピンポイントを中心とした幾何変換モデルとして利用することを試みる。

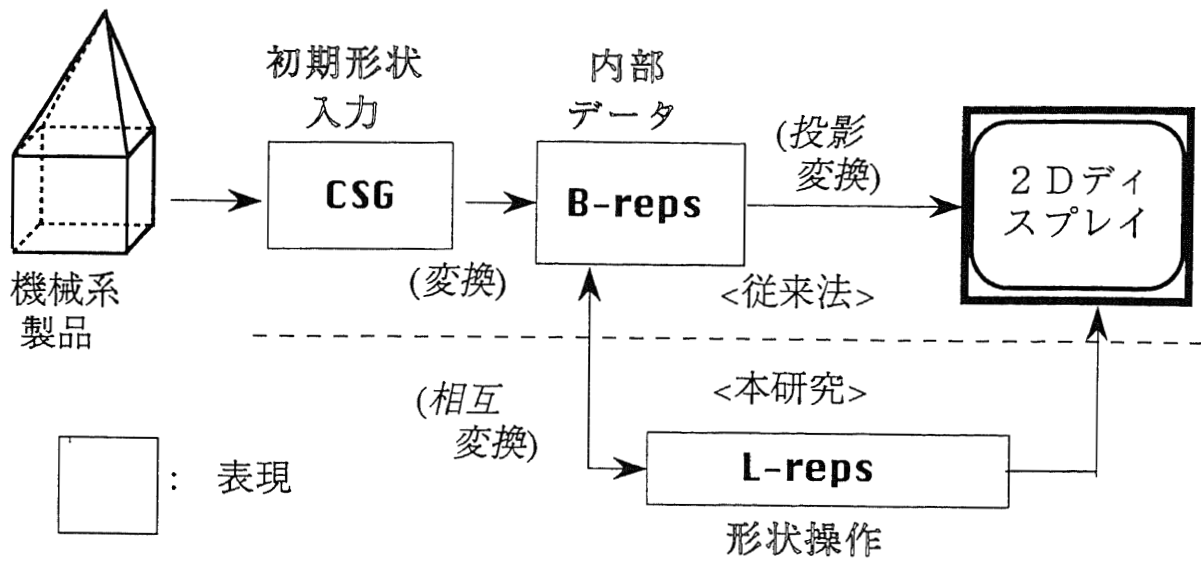
### 5.1 ハイブリッド 3D 幾何形状モデリング環境

3D 機械形状設計環境においては、多面体の形状設計は重要な設計項目の 1 つである。4.3 節で述べたとおり、L-reps は多面体の形状設計環境では、3D ピンポイントを中心とした幾何変換モデルとして適している。一般に、幾何変換モデルはある特定の操作をしやすいように設けるものであって、必ずしもすべての幾何情報を表現するソリッドモデルである必要はない。3D 幾何形状モデルとして利用可能なものを少なくとも一つ含む他の複数のモデルと組み合わせて、ハイブリッド 3D 幾何形状モデリング環境 [Requicha 80] を構成することが適切である。前掲の図 2.2(b) は、このハイブリッド環境を表現しているとも言える。

それでは具体的に、ハイブリッド環境をいかなるモデルによって構成するかについて述べる。機械形状設計環境で用いるソリッドモデルとしては、CSG と B-reps が代表的であり、ISO(国際標準化機構)の TC184 でも、ソリッドモデルの国際標準 STEP を CSG と B-reps をもとに定めている [ISO 92]。本研究でもそれぞれの特長を考慮した従来の慣習にしたがい、CSG を初期形状入力を主目的とした L-reps とは別個の幾何変換モデルに、B-reps を 3D 幾何形状モデルとして用いる。以上の役割づけをおこなったハイブリッド環境で、L-reps のすぐれた 3D ピンポイント能力を用いた精度良い設計と B-reps を用いた外観の意匠設計を両立させる (図 5.1)。

### 5.2 ハイブリッド 3D 幾何形状モデリング環境のデータベース化

本節では CAD システムとしての機能を向上させるために前節で決定したハイブリッド環境のデータベース化をおこなう。



3D幾何形状モデル： B-reps  
 幾何変換モデル： L-reps, CSG  
 ディスプレイ： 2Dディスプレイ

図 5.1: ハイブリッド幾何形状モデリング環境を構成する表現とその役割  
 L-reps に基づく精度良い設計と B-reps に基づく意匠設計を両立させる。

### 5.2.1 CAD データのデータベース化のメリット

まず、ハイブリッド環境を離れた一般的な考察として、CAD データをデータベース化することには、以下の6項目のメリットがある [藤代 90].

1. 設計データの標準化を促進する.
2. 次の製品開発のための事例提供や再利用がしやすい.
3. 設計データの共有が容易である.
4. 生産工程へのスムーズな情報の受け渡しが可能である.
5. 生産工程からのフィードバックがしやすい.
6. 上記項目はすべて工期の短縮につながり、その結果、コスト削減がはかれる.

設計データが標準化されれば、類似の商品の開発が容易になるので、1. と 2. は、密接な関係がある。また、設計データの標準化は、CAD システムにおけるファイルフォーマットの標準化の促進にもつながる。現状では、複数の CAD 関係ソフトウェアを組み合わせ利用した場合には、データ互換において問題が多いが [日経 CG 94a], ファイルフォーマットの標準化の一層の促進によって、問題が緩和される可能性がある。

最近では単一の設計対象に対して複数の設計者が打ち合わせを重ねながら設計をすすめていたり、設計工程を細分化して個々の設計者が自分の担当の設計工程を完了した後、より下流の設計工程の担当者へ情報を渡すことは、計算機上でも広くおこなわれているが、このような状況では、設計データの共有が容易であることは、必須条件といえる。

製品の設計工程だけでなく、生産工程までも一貫して計算機によって支援する活動は、統合的 CAD/CAM と呼ばれる (たとえば [高山 92]). 4,5 はこの統合的 CAD/CAM 環境の構築において必須となる事項である。

以上の各種のメリットは、設計活動をより容易にするという、単体としてのメリットばかりでなく、6. に示した通り工期の短縮やコスト削減という、いわば2次的なメリットへとつながってくる。

このように、CAD データをデータベース化することには、さまざまなメリットがある。このことはもちろん、ハイブリッド 3D 幾何形状モデリング環境を用いる CAD 環境においてもあてはまる。

### 5.2.2 ハイブリッド 3D 幾何形状モデリング環境のスキーマ定義

CAD データの特質として、ある部品は他のある複数の部品から構成されている、といった具合に、複合オブジェクト (composite objects) (たとえば [Kim 90a]) があらわれることが少なくない。

この複合オブジェクトを適切に表現するために、CADにおける対象世界の概念のモデル化においては、オブジェクト指向データモデル(object-oriented data model)の利用が活発におこなわれている。本論文では3.1.2項と同様、オブジェクト指向データモデルとして代表的な、Kimのモデル[Kim 90b]を用いて、ハイブリッド環境のスキーマ定義(schema definition)をおこなう。

5.1節では、CSG, B-reps, L-repsの3つの表現を用いて、ハイブリッド環境を構築すると述べたが、CSGからB-repsへの変換(たとえば[Mäntylä 88])は、もはや商用のCADシステムにおいても常識化している。そこでここでは、B-repsのデータまでは得られるものと仮定して、B-repsとL-repsを含む環境のスキーマ定義をおこなう。

図5.2が、検討の結果得られたスキーマ図である。図のように、B-repsのデータは、3.1.2項でも述べたクラス階層、クラス合成階層を用いて表現できる。これと図3.2に示したL-repsを組み合わせるスキーマ統合(schema integration)がなされ、図5.2のハイブリッド環境のスキーマが構成されている。オブジェクト指向データモデルには、このようにスキーマ統合が容易、という長所がある。実のところ、3.1.2項において、L-repsをKimのモデルを用いて表現しておいた主たる理由のひとつはここにある。

ここで、図5.2のスキーマについて、1点注意を述べておく。関係モデル(relational model)[Codd 70]では、更新不整合(update anomaly)(たとえば[増永 91])を防ぐために、データ間の関数従属性(functional dependency)(たとえば[増永 91])を考慮し、互いに従属関係にある属性は、データベース中には一方のみを表現し、必要時には応用プログラム(application program)(たとえば[穂鷹 88])によって導出するのが通常のやり方である。この方針はオブジェクト指向においても共通のものである。

しかしながら、ハイブリッド環境において複数の表現間で属性間に従属関係があるからといって一方の表現内の属性を省略してしまうと、形状操作時に、操作に適切なインスタンスが存在しない、などの問題が生じかねない。もともと、L-repsは幾何変換モデルとして用いるものであって、3D幾何形状モデルとして用いるB-repsとの間でデータの冗長性があることは当然である。そこで本論文では、一般のデータベースの場合のような冗長性の排除はせず、基本的に個々の表現を構成するインスタンスがそのままの形で得られるようにスキーマ定義をしておく。そして、属性間の従属関係を正しく維持するために、ある表現中のインスタンスが更新された場合には、その意味を一貫性がとれた形で、他の表現中のインスタンスへ波及させる。この波及のためにも、L-repsとB-repsの相互変換アルゴリズムは必須となる。詳細は5.3節で述べる。

なお、このようにあるイベント(event)に呼応してデータベース中のデータの更新が自動的に発せられるようなデータベースは、アクティブデータベース(active database)と呼ばれ、さまざまな研究が進行中である。文献[石川 94]にアクティブデータベースのサーベイがあるので、ここでは詳細は省略する。



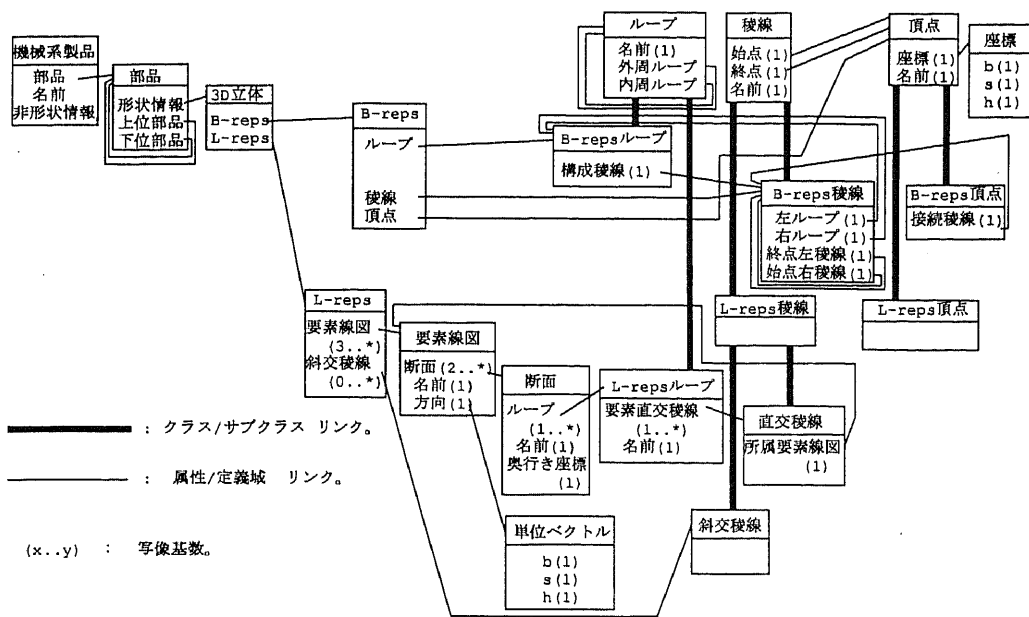


図 5.2: ハイブリッド幾何形状モデリング環境を表現する階層 (一部)  
 Kim のモデル [Kim90b] を拡張し、写像基数も一部併記している。

## 5.3 L-reps と B-reps の相互変換

### 5.3.1 B-reps から L-reps の変換

図 5.3 は、B-reps から L-reps への変換の流れ図である。流れ図中に出てくる各種変数は、図 5.2 中のものである。図中の関数“gen\_section”にあらわれる“depth の奥行きで 3D 立体を切断する”がアルゴリズムの中心であるので、以下にその方法論を詳述する。なお、この方法論は文献 [Chiyokura 88] 中で述べられている「B-reps 上での和操作のアルゴリズム」にヒントを得ている。

#### “depth の奥行きで 3D 立体を切断”の詳細

1. 個々の B-reps ループについて、それを構成する B-reps 稜線の端点の座標から、奥行き depth の平面と交わる B-reps ループを絞る。
2. 候補として残った B-reps ループを構成する B-reps 稜線と奥行き depth の平面との交点を求める。
  - ここで得られた点集合が L-reps 頂点集合である。B-reps 頂点と重なるものもあれば、そうでないものもある。
  - 図 5.4 に示すように、平面どおしの交点であるので、これらの L-reps 頂点集合はかならず直線上に分布する。
3. 得られた点集合をソート (sort) して順に 2 つずつ組にし、それらを端点とする線分の集合を作る。
  - ここで得られた線分集合が直交稜線集合である。B-reps 稜線と完全に重なるものもあれば、そうでないものもある。

以上に沿った考え方をを用いれば、L-reps 上で 3D ピンポイントする際に生じ得る補助作業の断面生成を自動化することも可能である。

### 5.3.2 L-reps から B-reps への操作レベルでの逆変換

3.2 節で示したように、L-reps の基本操作はすべて、文献 [Toriya, *et al.* 86] の基本操作に準拠している。よって、L-reps 上の基本操作に対応する B-reps 上の基本操作を一意に決めることができる。たとえば、MVE 操作の B-reps への波及の流れ図は図 5.5 のようである。

その他の基本操作についても、同様の方針によって逆変換が実現される。なお、図 5.5 は逆変換部分のみの記述であるが、これと図 3.3 を統合したものが、ハイブリッド環境での“L-reps 上の MVE 操作”になる。

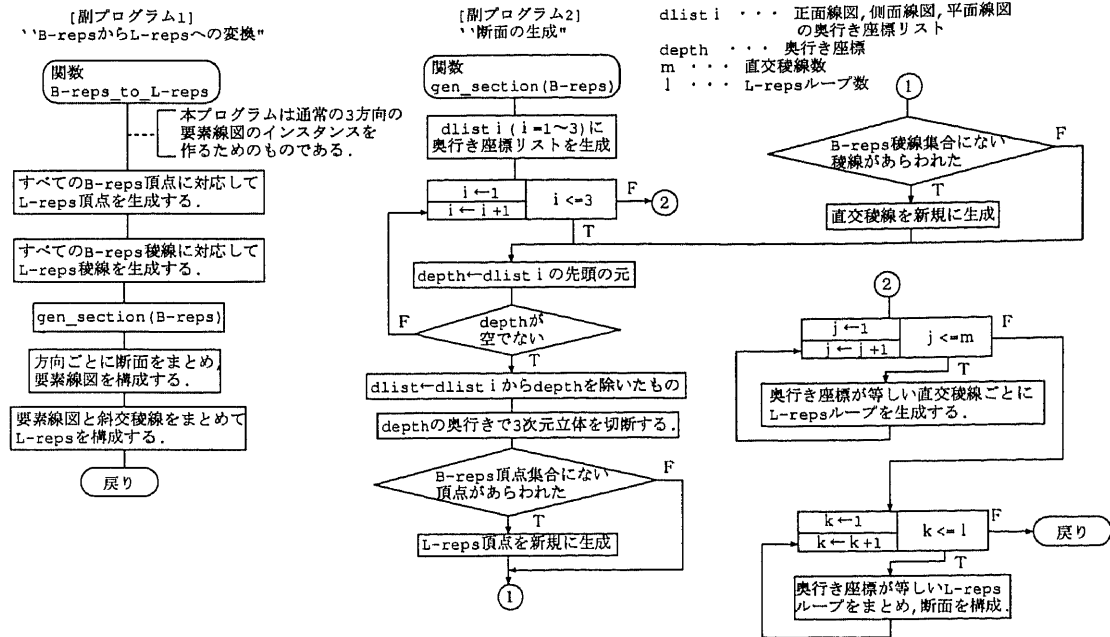


図 5.3: B-reps から L-reps への変換の流れ図  
B-reps のデータから L-reps の全データを導出する。

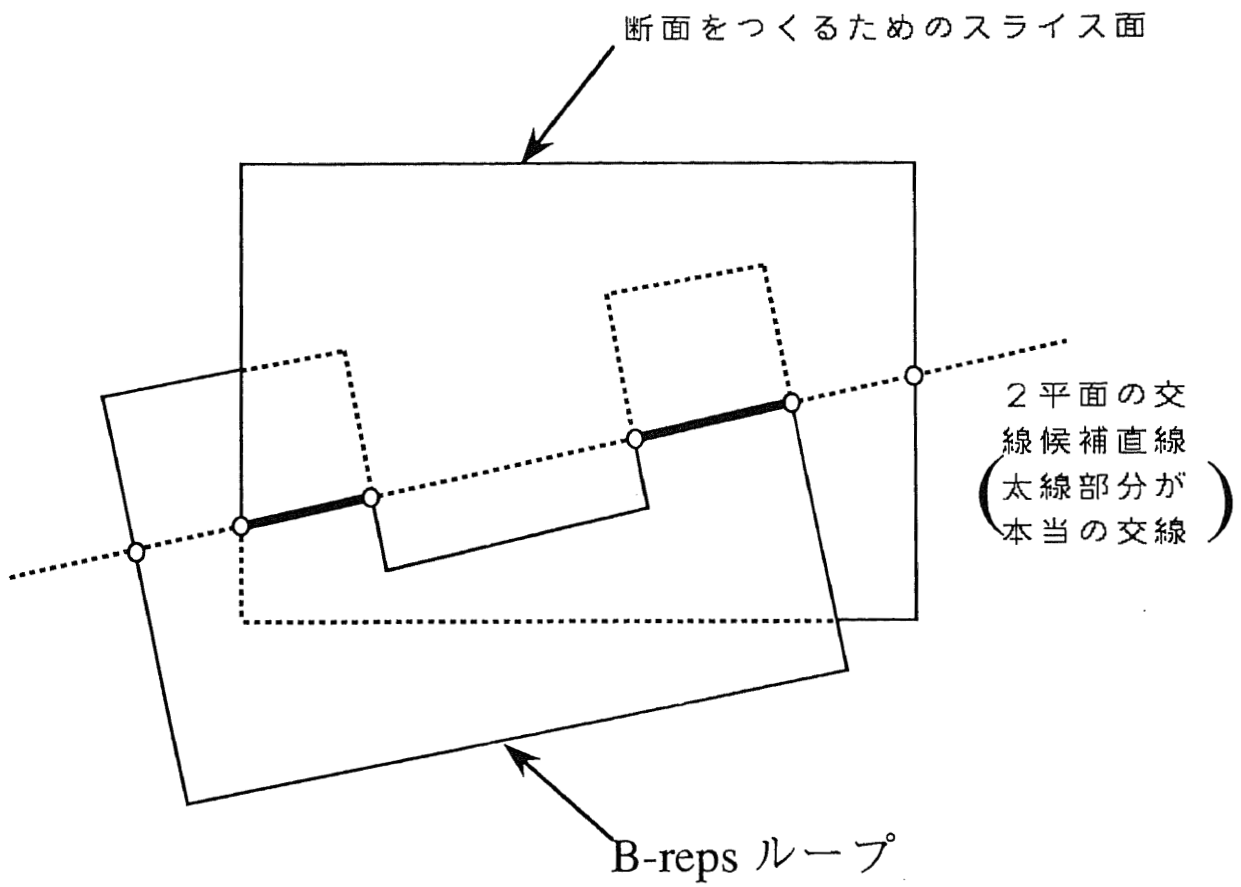


図 5.4: B-reps ループとスライス面の干渉  
平面どおしの交線は一直線上にあらわれる.

[副プログラム]

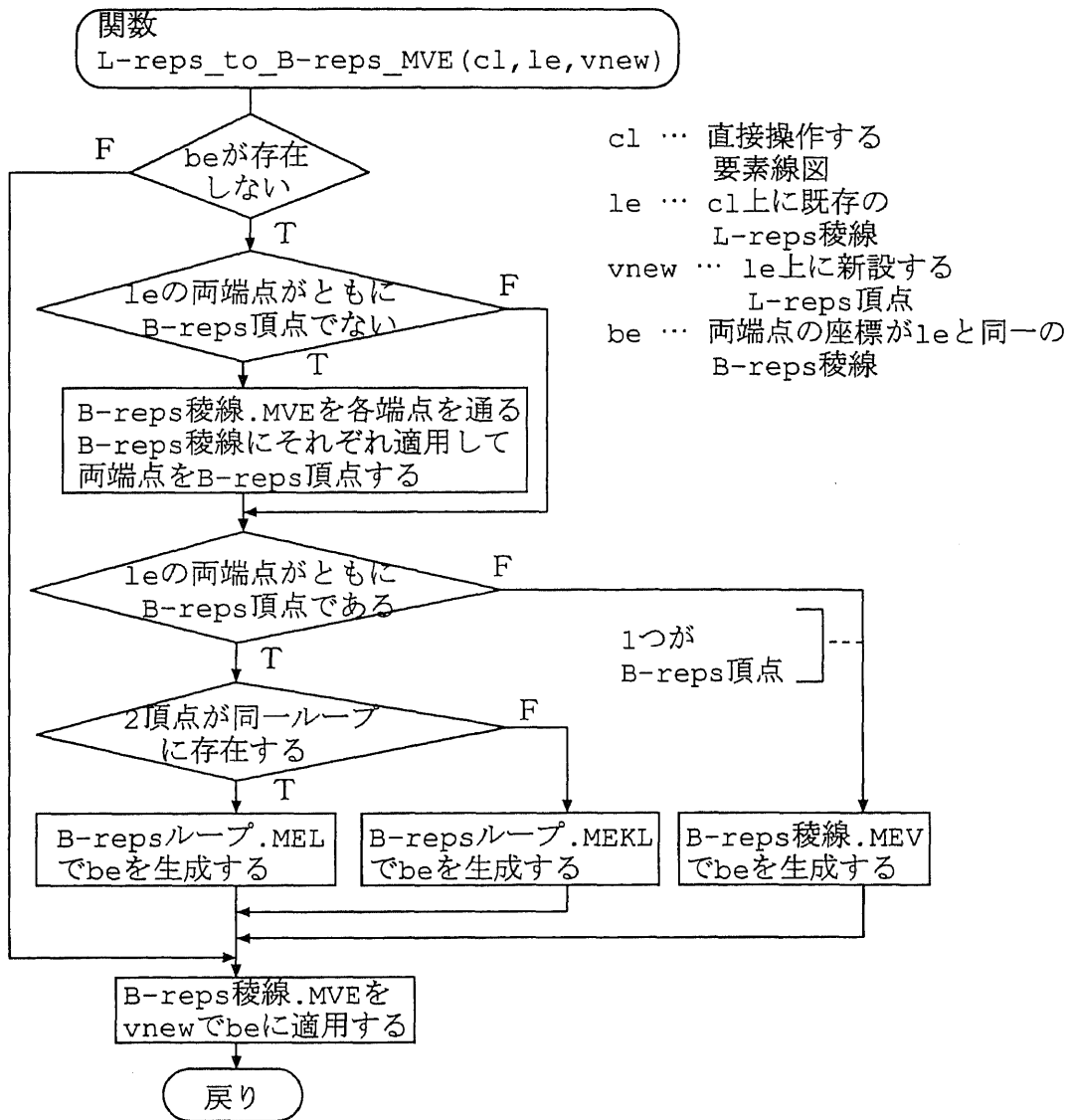


図 5.5: L-reps から B-reps への MVE の逆変換の流れ図  
要素線図 cl 上の稜線 le 上に L-reps 頂点 vnew を生成し, le を二分割する.

## 5.4 L-reps と CSG の相互変換

まず、CSG から L-reps へ直接変換することによって、初期形状入力をおこなった後、ただちに L-reps のデータを得ることが考えられる。これは原理的には可能であるが、

1. 3D 幾何形状モデルとして B-reps のデータは必須であること。
2. 面情報に欠落がある L-reps のデータのみから B-reps の全データを得ることはできないこと。
3. 2. により、5.1 節で定義したハイブリッド環境では、B-reps のデータは CSG より得るより他はないこと。
4. 頂点、稜線、ループ、3D 座標値など、L-reps のデータ項目は、CSG よりも B-reps のデータ項目と共通点が多いため、L-reps のデータの導出は CSG からよりも B-reps からの方が容易であること。

などから、その有用性は大きいとは言えない。

次に、L-reps から CSG への逆方向の変換について述べる。L-reps から B-reps への逆変換と同様、L-reps は面情報に欠落があるので L-reps のデータのみから CSG の全データを導出することは情報量の大小から言って不可能であり、操作レベルで変換することが考えられる。しかしながら 5.1 節で述べたように、本研究のハイブリッド環境では CSG は初期形状入力のための幾何変換モデルにその役割を限定されているので、実際にこの変換に対する需要は生じない。

以上のことから、本研究では L-reps と CSG の相互変換の需要はないと考える。

## Chapter 6

# 試作システムによる 3D 機械形状設計

本章では L-reps の実装について述べ、その有用性を検証する。

### 6.1 試作システムの概要

#### 6.1.1 外部仕様

本試作システムの外部仕様は、以下のようである。

- 形状操作のためのコマンド群が、画面右端に存在する。
- 初期形状入力は、CSG 的におこなう。
- 内部データの B-reps は、初期形状入力後、コマンド一つで全データが生成される。
- 以上のソリッドモデルによる鳥瞰図が画面右上 (コマンド群の左) に存在する。
- 鳥瞰図ではシェーディングがコマンド一つで実行可能である。
- 鳥瞰図から、L-reps に基づく形状修正のためのウィンドーがコマンド一つで作られ、鳥瞰図の左に平面線図、左下に正面線図、下に側面線図が描かれる。
- 画面上の複雑度を考慮して、表示するコマンドの数は必要最小限に抑制する。たとえば、形状操作時には、表 3.2 に示される基本操作と応用操作のみを直接クリックできるコマンドとし、ファイル管理のためのコマンド群など、必要性が相対的に低いものは、ポップアップメニューとする。

#### 6.1.2 実装環境

シリコングラフィックス社製の IRIS INDIGO-2 上で、グラフィックスライブラリ GL を基本にプログラミングし、ヒューマンインタフェースの作成にあたっては、X11, OSF/Motif 等を用いる。

### 6.1.3 作成手順

以下の手順によって試作システムの作成をおこなう。

1. 6.1.1 項の外部仕様から、画面構成を検討する。
2. 基本操作、応用操作、モデル間の変換などの各種操作のアルゴリズムの詳細を検討する。
3. 前項目で得られたアルゴリズムについて、インスタンス例を使ってトレースをおこない、アルゴリズムの正当性を検証する。
4. 以上ののち、コーディングをおこない、必要に応じて1.~3.へフィードバックする。

以上の作業を押し進めて得られた試作システムの形状設計画面が図 6.1 である。次節で具体例を用いて、その利用法を述べる。

## 6.2 具体例：カメラのシャッターの位置決め

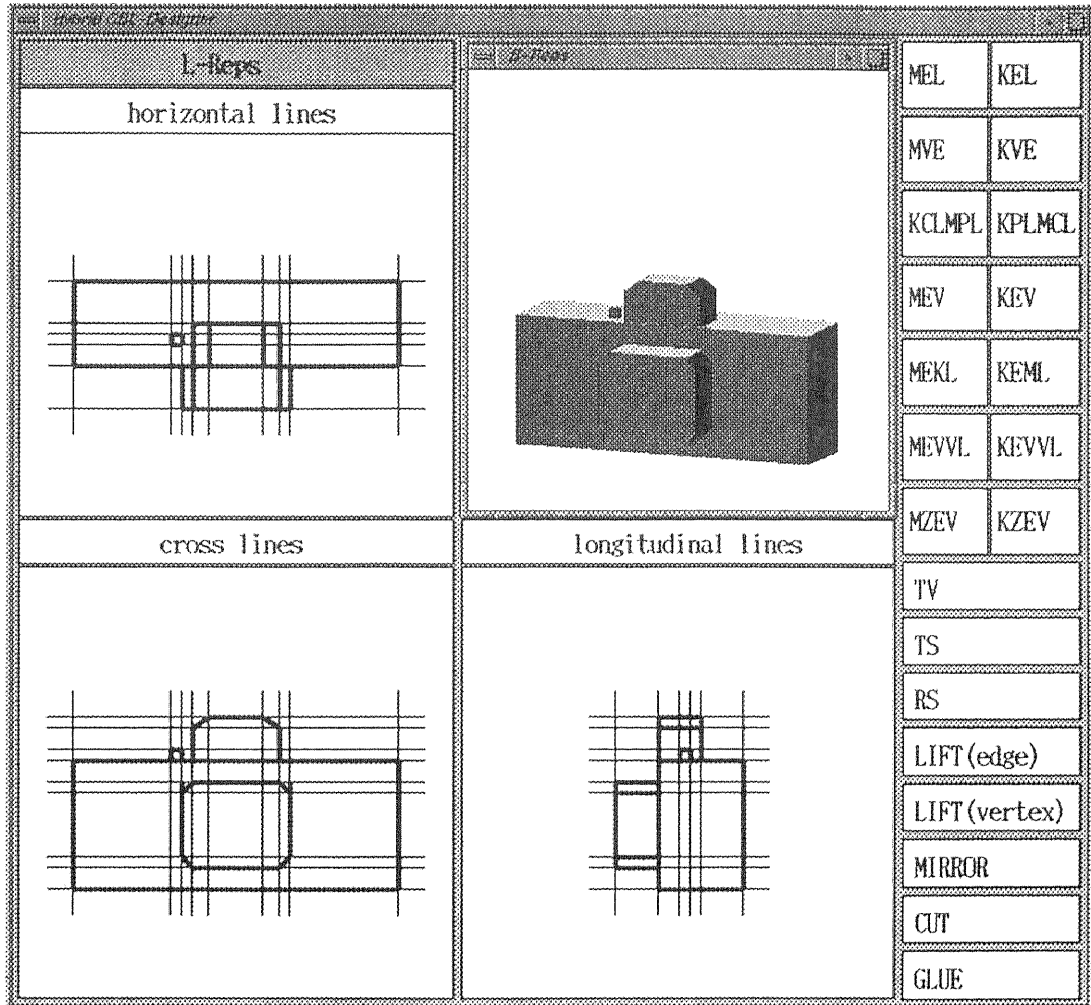
図 6.1(a) 中の鳥瞰図は、B-reps からの透視投影によって得られるものであり、現在設計途上にあるカメラの外観を表現している。初期形状入力は終了しており、詳細設計のフェーズでシャッターの位置決めをおこなうところである。設置場所という点で、シャッターはレンズとともに、カメラの形状設計において、意匠的にも機能的にも重要な要素になる。図 5.3 にしたがって、B-reps から L-reps のデータが得られ、同図中の L-reps による形状修正ウィンドーが得られる。このウィンドー上でシャッターの位置をやや外側に移す操作を施した結果が同図 (b) 中の L-reps 表示であり、図 4.1 に示した 3D ピンポイント法にしたがってこの移動は精度よくかつ煩雑さが従来法より緩和されつつおこなわれる。そしてこのとき、B-reps 側にも操作が波及し、カメラの外観を同図中の鳥瞰図で確認することができる。

## 6.3 ディスプレイ画面上での複雑度を緩和するコマンド群

図 3.2(c) にも見られるように、L-reps では各要素線図が 3D の情報を持っているので、同じ 2D 指向の図面である三面図と比較して、データ量が多い。3D 情報をなるべく損なわないように 2D 指向で表現しているため、複雑さは回避できない。CAD システムとしてみた場合、L-reps の全データをディスプレイ画面上で表示すると、このデータ量の多さが複雑度に直結し、設計者に圧迫感を与える危険性がある。試作システムではこれを回避するため、暫定的な方法として、奥行きを表現するラベルや稜線名、頂点名、寸法等は、必要に応じて対象をクリックし、指定されたもののみ表示するという方針を採っている。

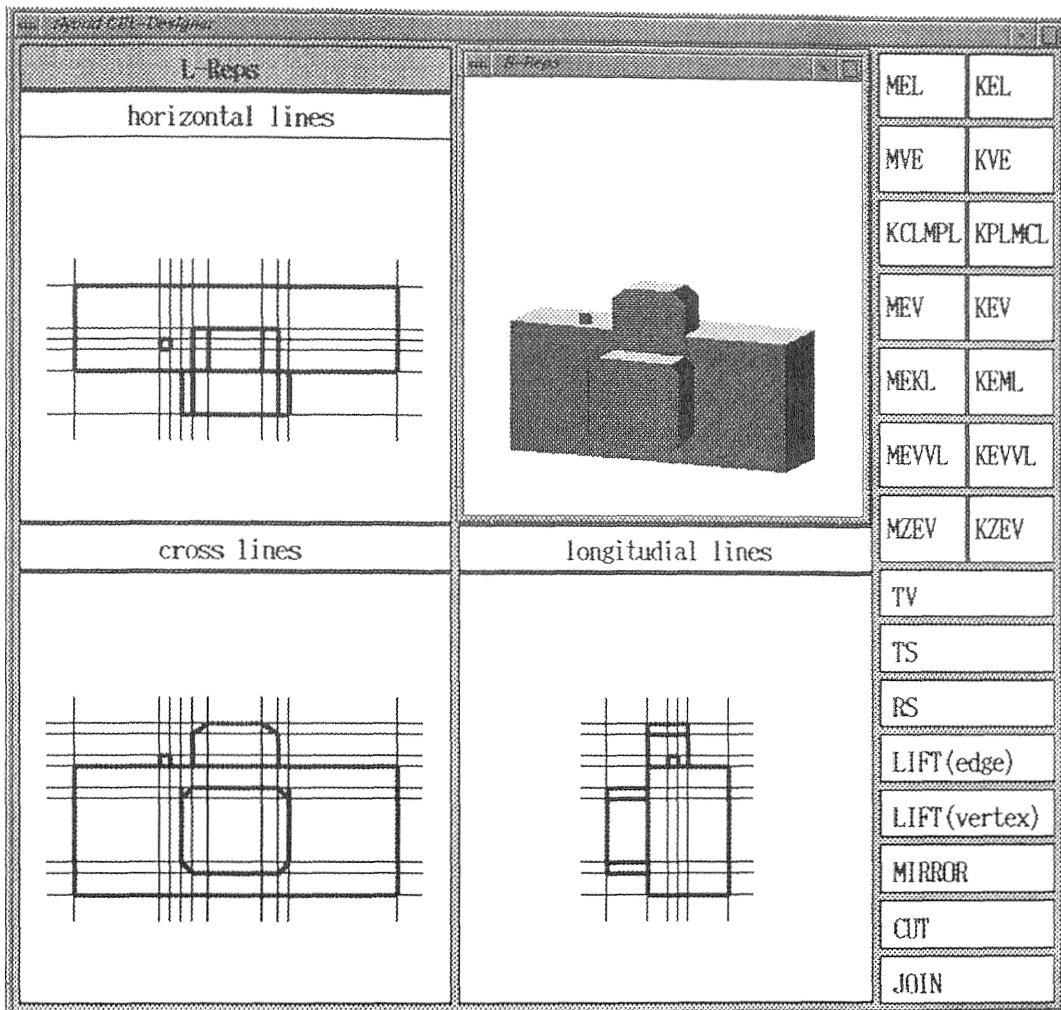
設計の全工程をすべて自動化しようとする試みがなされた時代もあった [沖野 82] が、人間の設計活動はきわめて複雑な知識の融合によって実現されるものであり、計算機によって設計を支援





(a) 詳細設計のための設計画面

図 6.1: 試作システムによる 3D 機械形状設計の具体例: カメラのシャッターの位置決め



(b)(a) からシャッターの位置をやや外側に変更したところ

図 6.1(続き): 試作システムによる 3D 機械形状設計例: カメラのシャッターの位置決め  
L-reps 表示上でシャッターの位置を動かすと, B-reps に基づく鳥瞰図で外観が確認できる.

することはできても、完全には自動化できないことが最近ではわかっている [吉川ほか 89]。CAD というアクロニムのうち A が aided (“支援による”) であるのは、このことをあらわしていることは、よく知られたところである。別の言い方をすれば、計算機と人間の双方の力を合わせて設計を進展させていくのが現状の CAD システムのあり方であるが、その場合、どこまでを計算機が支援し、どこを人間が行うのかということが問題となる。

上で述べた表示の問題において、あまりに少ないデータ表示では作業者の負担が問題となるが、かといって常に全データを表示することは視覚的な複雑度だけでなく、情報過多を招く危険性もあり、適切とは言えない。さらに、実際の設計工程では、工程によって必要な情報は異なり、常に全データが必要なわけではない。

真に L-reps を評価する試作システムとするためには、L-reps の全データが存在するときに、それを状況に応じて適宜選択して呈示するための種々のコマンドの実装が待たれる。これに関しては現在検討を押し進め、開発中である。以下、開発中のコマンドの概要を述べるが、いくつかのコマンドの技巧は、既存の CAD システム、および紙面上の設計において伝統的に使われてきたものである。そのようなものに関しては、L-reps においても適用可能であることを示すものである。

なお、全データからの表示データの選択は、5.2.2 項でスキーマを定義したデータベースに対して質問 (query) を発することによって実現する。すなわち、データベース管理システムの機能を CAD システムの機能実現のために有効利用する。CAD データをデータベース化する効果は、ここにも見ることができる。

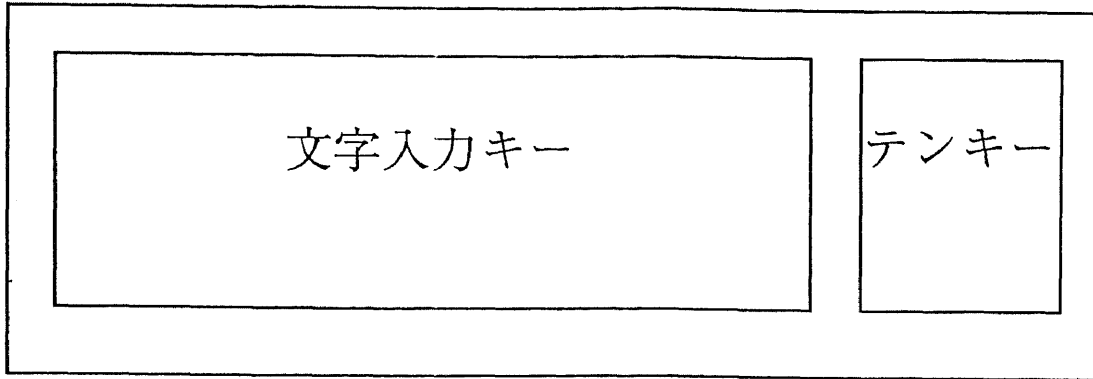
また、コマンドによって表示対象から除外されたデータに関しては、まったく表示しないことも一つの方法であるが、色情報の有効利用を考え、背景色に近い色で目立たないように表示することも有効である。現在、興味の対象となっている部分を操作する際に補助的な役割を果たしたり、全体像を見失わないために貢献する可能性があるからである。

### 6.3.1 優先度制御コマンド

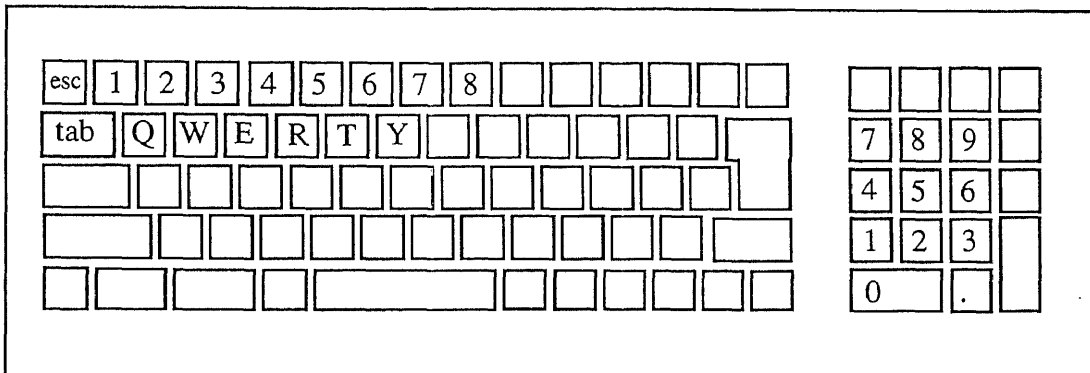
たとえば、計算機の外装を設計する場合、概念設計の段階ではキーボード上の各キーの寸法を正確に設計する必要はなく、図 6.2(a) のようにすべてのキーをまとめて、あるいは文字キーとテンキーごとにまとめて長方形で表現しておけば十分である。しかし、詳細設計のフェーズにおいては、キーごとに寸法を正確に設計する必要があり、概念設計の段階とは異なる詳細度が要求される。このように、設計のフェーズによって、同一の設計対象に対して様々な詳細度で表現することを要求される状況が設計途上ではおこる (図 6.2(b))。そこで L-reps では個々のデータに関して優先度 (priority) を定義する。

優先度制御コマンドでは、ある優先度をしきい値 (threshold) として与え、それよりも優先度が高い要素のみを表示する、という手法をとる。

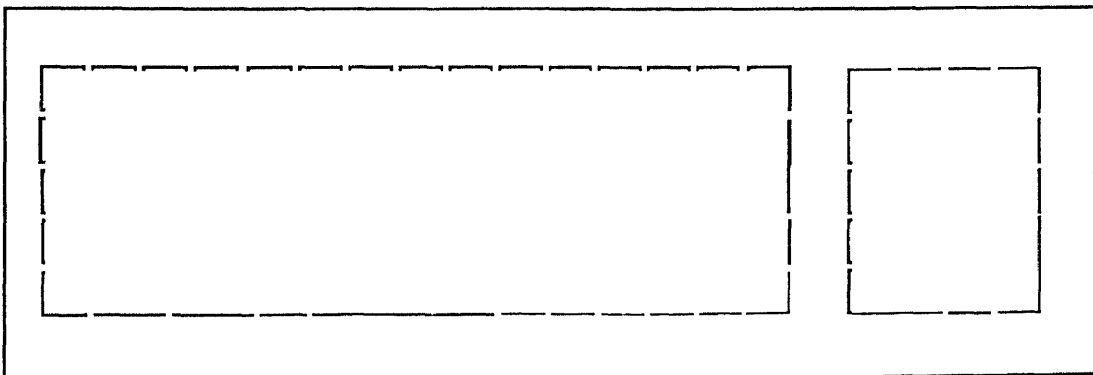
優先度制御コマンドは、詳細設計から概念設計へ、といった設計の下流工程から上流工程への



- (a) 概念設計段階のキーボード  
 入力キー，テンキーごとにまとめられ，長方形で表現されている



- (b) 詳細設計段階のキーボード  
 各キーの大きさが1つ1つ正確に設計されている



- (c) フィードバックして概念設計段階に戻ったキーボード  
 優先度制御により，疑似的に長方形が再現されている

図 6.2: 優先度制御を用いた設計例

フィードバックが生じた場合に有効である。一般に設計は徐々に詳細度が増すので、極端に詳述化した対象を上流工程に戻って操作する場合には、詳細度を鈍化させて設計する必要が生じ得るからである。

このとき、図 6.2(c)に見られるように、位相的にイレギュラー (irregular) な状態も出現し得るが、対象形状の全容は設計者の頭の中にあるので、自身が操作を加える部分をあやまって省略しない限り、実用上問題は生じない。

### 6.3.2 部分表示コマンド

ある製品の一部分だけを設計を押し進める、という状況が設計途上には存在する。製図分野ではこのような状況には、部分投影図 (partial view)、部分断面図 (local sectional view)、局部投影図 (local view) などによって対応してきた [福永ほか 86]。部分投影図や部分断面図は、興味の対象部分を中心に表示するもので、他の部分との境界は破断線で仕切られる。局部投影図は、興味の対象部分だけに焦点をあてて表示するものである。

L-reps の部分表示コマンドでは、一度全形状を表示した後、描画範囲をマウスカーソルで囲んで指定する。

### 6.3.3 局所拡大コマンド

ある部分だけ、他よりも厳密な精度で設計したい、あるいは、細かい形状設計が必要である、という状況も設計途上には存在する。製図分野ではこのような状況には、部分拡大図 (elements on larger scale) によって対応してきた [福永ほか 86]。部分拡大図は、興味の対象となる部分だけ、縮尺を変えて拡大して表示するものである。

L-reps の局所拡大コマンドは、設計者がコマンドを選択した後、描画範囲をマウスカーソルで囲んで指定すると、システム側が基本操作の拡大を利用して局所拡大が実現される。

### 6.3.4 部分的断面表示コマンド

ボリュームビジュアライゼーション (volume visualization) (たとえば [藤代 92]) で使われる技巧に、部分的断面表示というのがある。これは、3D の形状を把握するために、連続的に奥行きを変化させながら断面を表示するものである。6.3.2 項に述べた製図分野の部分断面図が、断面形状を対称性などを考慮した省略の規則を適用して部分的に表示するのに対して、部分的断面表示は、基本的には断面形状をすべて表示する。言い替えれば、奥行き方向を部分に分けることに主眼が置かれている。6.3.2 項の部分表示に趣旨は近いが、特に奥行き方向に分割するという点で L-reps の特徴と親和性がよいので、分類上、分離しておく。

L-reps の部分的断面表示コマンドは、コマンド選択の後、まず、コマンドを適用する要素線図を選択する。そして表示する奥行き範囲を指定することによって実現される。奥行きの指定方

法は検討段階であるが、ボリュームビジュアライゼーションの場合と同様、ウィジェット (widget) のスライダー (slider) の利用が効果的と考えられる。

以上で、図面分野での技巧を基にしたいくつかのコマンドを述べてきたが、図面が紙面を媒体とする場合と CAD システムの場合とで決定的に異なる点を一点確認しておく。すなわち、紙面上の設計ではそれぞれの特異図面を別個に作成する必要があったが、CAD システムでは、全体表示の図面から必要に応じていつでも作成可能である。そして、操作はあくまで内部データに適用されるので、単一の内部データを基にする複数の特異図面が存在する場合にも、修正の波及について設計者はいっさい考慮する必要がない。

# Chapter 7

## 結論

前章までに述べてきたことは、以下の5点に集約される。

1. 3D ピンポイント操作が必要な幾何形状設計のための環境は、3D 幾何形状モデル、ディスプレイ、変換系の3つから構成されると定義し、そしてそれがビューボリューム単位で3D ピンポイント可能であるための条件を規定した。
2. 従来の3D ピンポイント法で問題である「誤った点を指示しやすいこと」、「手続きが煩雑であること」を緩和するために、変換系よりも幾何情報を損失させない幾何変換モデルの概念を提案した。
3. 旧来から使われている図面のひとつである線図に、対象形状を多面体に限定した上で4項目の拡張を加えて、2D 指向の幾何変換モデル L-reps を提案した。
4. L-reps と従来の表現との総合比較をおこない、L-reps の長短所と適性を評価した。
5. L-reps を幾何変換モデルとして用いる3D 機械形状設計環境の実現方法を提案し、試作システム上でその有用性の検証をおこなった。

現段階で得られている L-reps の評価を以下にまとめる。

長所としては以下の7項目が挙げられる。

- (1) 単一の要素線図上で形状修正の意味を一意に確定させられること。
- (2)(1) により、要素線図間の波及を自動化できること。
- (3)(2) により、図面に頻出するエラーの一つである、要素線図間の不整合を抑制できること。
- (4)(2) により、従来の設計図面の主流であり、L-reps と表現方法が類似する三面図と比べて、形状操作時に対象形状を考える負担が緩和されること。
- (5) 3D ピンポイント法が、従来法の問題点である「誤った点を指定しやすいこと」、「手続きが煩雑であること」の双方を緩和されたものであること。
- (6) 寸法、中心線等の付加情報を表示しやすいこと。

(7) 三面図を利用してきたプロの設計者に浸透しやすいこと.

また、短所としては以下の3項目が挙げられる.

(1) 面情報が完全には表現できないこと.

(2)(1)により、L-reps を用いて形状入力をおこなうことはできないこと.

(3) 対象形状の外観を把握することが容易であるとはいえないこと.

表現としての役割については、以下のようにまとめられる.

(1) 3D ピンポイント操作を伴う幾何形状設計環境を構築する場合に、3D 幾何形状モデルとして B-reps, ディスプレイとして 2D ディスプレイを固定した上で、幾何変換モデルとして適合する.

(2) 3D 幾何形状モデルとしては、L-reps に適合性はなく、従来法の通り B-reps を採用することが望ましい.

(3) 初期形状入力のための幾何変換モデルとしては、L-reps に適合性はなく、従来法の通り CSG を採用することが望ましい.

以上から得られる本論文の結論は、以下の通りである.

- 3D ピンポイント操作を伴う幾何形状設計環境を構築する場合には、従来法の通り、3D 幾何形状モデルとして B-reps, ディスプレイとして 2D ディスプレイを採用することは望ましいことであるが、それらを固定した上で、変換系として採用している投影変換とともに、変換系よりも幾何情報の表現能力を拡充した幾何変換モデルとして L-reps を採用して、両者を併用することが望ましい.

1960年代はじめに Sutherland によって SKETCHPAD システム [Sutherland 63] が提案されてから 30 年以上も経過しながら、コンピュータグラフィクスにおける問題点が尽きないのと同様に、2D ディスプレイ以外のディスプレイを用いるバーチャルリアリティなどの技術を用いた環境も、将来的に 3D ピンポイントに最も適した環境を提供可能になるという保証はない<sup>1</sup>. L-reps は、新たにハードウェアを用意する必要がなく、ディスプレイとして現在最も普及している 2D ディスプレイ上で即実現可能であることでも有用である.

本研究の今後の展望としては、以下の7項目を考えている.

- ディスプレイ画面上での複雑度を緩和する L-reps コマンド群まで含めたパイロットシステムの実装の完成.
- RS(Rotate a Solid), TV(Translate a Vertex) 操作のための、視点切り替えアルゴリズムの開発.
- 基本操作の極小性に関する検討.

---

<sup>1</sup>筑波大学電子・情報工学系西原清一教授('94-11-8)の助言による



- L-reps へのハッチング, スマッピング [大西 91] の導入.
- L-reps を用いた形状の概略理解.
- L-reps 表示と鳥瞰図の並置化 (juxtaposition) [Zabusky, *et al.* 93].
- L-reps の曲面への拡張.

# 謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官として常にあたたかい目で見守り下さり、大局的な観点から進むべき方向を的確にご指示下さったり、研究上必要な費用を援助下さるばかりでなく、研究以外にも研究室の合宿等を通じて、研究生を送る上での心構えまでもお教え下さるなど、さまざまな面でお世話になりました筑波大学電子・情報工学系の池辺八洲彦教授に衷心から感謝いたします。池辺先生には本学位論文の主査としても、数々の有益なコメントをいただきました。本研究の細部にわたり、直接の discussion のほか、電子メール、電話、手紙、FAX などを通じてばかりでなく、赴任先のニューヨーク州立大学においても綿密なご指導を賜るとともに、研究上必要な費用も援助下さいました。お茶の水女子大学理学部情報科学科助教授、ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校コンピュータサイエンス学科客員教授の藤代一成先生に、深く心より感謝いたします。本研究の円滑な進行のためにニューヨーク行きを薦めて下さったばかりでなく、研究上必要な費用を援助下さったり、実装に関してさまざまなコメントをいただきました筑波大学電子・情報工学系の蔡東生講師に心より感謝いたします。

本学位論文の副査として、図面関係を中心に貴重なコメントを賜りました筑波大学電子・情報工学系の西原清一教授、インタフェース関係を中心に貴重なコメントを賜りました筑波大学電子・情報工学系の板橋秀一教授、CAD 関係を中心に貴重なコメントを賜りました筑波大学電子・情報工学系の大保信夫助教授に感謝の意を表します。特に西原先生におかれましては、本研究の初期段階から、研究構想にコメントをいただいたばかりでなく、三面図を用いた図面理解に関して何度も discussion におつき合い下さり、本論文中でも根幹をなしている数々の有用なコメントをいただきました。深く感謝いたします。

本研究のきっかけとなった線図について、設計計画論の授業、および private communication を通じて、基礎的な知識、および文献等をお教え頂いた筑波大学構造工学系の郷田国夫教授に感謝いたします。藤代先生との discussion のためにお茶の水女子大学に伺うことを承諾いただいたばかりか、文献の入手など、さまざまな面でお世話になりましたお茶の水女子大学理学部情報科学科の佐藤浩史教授に心より感謝します。B-reps に関して細かい質問にお答えいただき、研究室の見学会も企画して下さいました慶応大学環境情報学部の千代倉宏明助教授に感謝いたします。米国滞在中に生活面で非常にお世話になるばかりでなく、有意義な discussion もして下さいましたニューヨーク州立大学ストーニーブルック校コンピュータサイエンス学科の茅暁陽博士に謝意を表します。レン

ジデータとソリッドモデルの関わりに関して文献を紹介下さるとともに、さまざまな質問にもお答えいただきました筑波大学電子・情報工学系の大田友一教授に感謝いたします。インダストリアルCTに関して文献等を紹介いただくとともに、基礎的な知識を賜りました筑波大学物理工学系の井上多門教授に感謝いたします。本研究の初期段階に研究内容に関してさまざまなコメントをいただきました筑波大学社会工学系教授の穂鷹良介先生、図書館情報大学図書館情報学部教授の増永良文先生、筑波大学電子・情報工学系助教授の清木康先生に感謝いたします。増永先生にはその他、メーリングリストのdb-japanにお誘いいただくなど、さまざまな面でお世話になりました。参考論文の一つである、国際会議ICECGDGでの論文発表後に有益なコメントをいただきました東京大学工学部精密機械工学科の木村文彦教授、鈴木宏正助教授に感謝します。データベースに関する文献をご送付いただいたお茶の水女子大学理学部情報科学科の市川哲彦助手に感謝いたします。お茶の水女子大学に出入りの際や米国渡航の際などにさまざまな面でお世話になりましたお茶の水女子大学理学部情報科学科の川田亜矢子助手に謝意を表します。SNAKEに関して質問にお答えいただきました東京大学理学部情報科学科の品川嘉久講師に感謝いたします。L-repsの実装のために、商用ソリッドモデラーDESIGNBASEを快くお貸しいただいた、株式会社リコーソフトウェア事業部長の國井秀子博士に感謝いたします。また、DESIGNBASEに関し、電子メールにてさまざまな解説をいただきました株式会社リコーソフトウェア事業部の鳥谷浩志氏に感謝いたします。L-repsの実装を手伝ってくれた筑波大学理工学研究科の伊藤光昌氏に謝意を表します。ソリッドモデルに関する文献を送付いただいたお茶の水女子大学大学院理学研究科の丸山知子氏に感謝します。

最後となってしまいました。同時期に研究室を分かちあい、有意義な研究室生活を送った筑波大学電子・情報工学系池辺研究室の皆さんに感謝します。

# Bibliography

- [安居院ほか 87] 安居院猛, 中嶋正之, 羽生田千春: “等角投影法を用いた立体形状入力システム”, 情報処理学会論文誌, 28(1)(1987), 20-28.
- [石川 94] 石川博: “特集: 「データエンジニアリングの最近の動向」: 2. アクティブデータベース”, 情報処理学会月刊誌情報処理, 35(2)(1994), 120-129.
- [磯田ほか 86] 磯田浩, 鈴木賢次郎: “図学入門”, 東京大学出版会 (1986).
- [大西 91] 大西清: “JIS にもとづく機械設計製図便覧第 7 版”, 理工学社 (1991).
- [沖野 82] 沖野教郎: “自動設計の方法論”, 養賢堂 (1982).
- [金 92] 金 昌憲: “対話的三面図解釈による形状モデリングに関する研究”, 筑波大学工学研究科博士論文, (1992).
- [酒井 87] 酒井博敬: “情報資源管理の技法”, オーム社 (1987).
- [佐藤ほか 90] 佐藤敏明, 高村禎二, 鳥谷浩志, 千代倉弘明: “多種類の曲面を持つ立体に対する集合演算”, 情報処理学会グラフィクスと CAD シンポジウム論文集, (1990), 111-120.
- [柴田ほか 79] 柴田清, 元綱数道, 熊倉靖ほか: “商船設計の基礎”, 造船テキスト研究会, 成山堂書店 (1979).
- [高山 92] 高山毅: “平面リンク機構の適応的運動シミュレーションのためのプロダクトデータベースモデリング”, 筑波大学大学院修士課程理工学研究科修士論文 (1992).
- [高山ほか 94] 高山毅, 藤代一成, 蔡東生, 池辺八洲彦: “L-reps: 2次元ディスプレイ上で3次元ピンポイントを可能にする2次元指向幾何変換モデル”, 日本図学会誌図学研究採録決定済み第 67 号掲載予定, (1995).
- [西原 93] 西原清一: “図面理解による3次元形状モデリング”, *Computer Today* 7月号, (1993), 19-29.
- [日経 CG 94a] “レポート: トレンド: 検証 DXF データ交換”, 日経 CG 3月号, (90)(1994), 52-66.

- [日経 CG 94b] “レポート: ユーザーズ・アイ: Pro/Engineer で光造形, NC データまで一貫設計”, 日経 CG3 月号, (90)(1994), 109-113.
- [日経 CG 94c] “新製品レポート: パソコンでパラメトリック設計を実現した AutoCAD Designer”, 日経 CG5 月号, (92)(1994), 52-53.
- [橋本ほか 92] 橋本進, 師岡洋一, 軍司吉樹ほか: “船体関係図面の見方 改訂第二版”, 成山堂書店 (1992).
- [PIXEL 94] “CG/CAD ビジネス最前線: 手軽な 3 次元 CAD でビジネスチャンスを拡大”, *PIXEL*5 月号, (140)(1994), 150-152.
- [廣瀬 93] 廣瀬通孝: “バーチャル・リアリティ”, 産業図書 (1993).
- [福永ほか 86] 福永太郎ほか: “エンジニアリングライブラリ基礎機械工学 7 機械製図”, サイエンス社 (1986).
- [藤代 90] 藤代一成: “CAD/CAM”, 丸善 (1990).
- [藤代 92] 藤代一成: “ボリュームビジュアライゼーション概論”, *PIXEL*5 月号 (116)(1992), 146-157.
- [穂鷹 88] 穂鷹良介: “データベース入門”, オーム社 (1988).
- [増永 91] 増永良文: “リレーショナルデータベース入門”, サイエンス社 (1991).
- [吉川ほか 89] 吉川弘之, 富山哲男: “ハイテクシリーズ: インテリジェント CAD(上)”, 朝倉書店 (1989).
- [Chiyokura 88] H. Chiyokura: “*Solid Modelling with DESIGNBASE: Theory and Implementations*”, Addison-Wesley(1988).
- [Clifton, et al. 93] T. E. Clifton III, and F. L. Wefer: “Direct Volume Display Devices”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **13**(4)(1993), 57-65.
- [Codd 70] E. F. Codd: “A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks,” *CACM*, **13**(6)(1970), 377-387.
- [Foley, et al. 90] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, and J. H. Hughes: “*Computer Graphics Principles and Practice (2nd ed.)*”, Addison-Wesley(1990).
- [ISO 92] ISO TC184/SC 4/N 152: “*Product Data Representation and exchange - Part 203 Application Protocol: Configuration Controlled Design*” (1992).

- [Kim 90a] W. Kim: “*Introduction to Object-Oriented Databases*”, The MIT Press(1990).
- [Kim 90b] W. Kim: “Object-Oriented Databases: Definition and Research Directions”, *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering* , **2**(3)(1990), 327-341.
- [Mäntylä 88] M. Mäntylä: “*An Introduction to Solid Modeling*”, Computer Science Press, Maryland(1988).
- [Mäntylä,*et al.* 82] M. Mäntylä, and R. Sulonen: “*GWB: A Solid Modeler with Euler Operators*”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **2**(7)(1982), 17-31.
- [Naylor 94] B. Naylor: “Computational Representations of Geometry”, *SIGGRAPH '94 Course 23: Computational Representations of Geometry* , (1994), 1-11.
- [Requicha 80] A. A. G. Requicha: “Representation for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems,” *ACM Computing Surveys* , **12**(4)(1980), 437-464.
- [SIGGRAPH 94] SIGGRAPH'94 Panel Session:“Why is 3D Interaction So Hard, and What can we Really Do About It?”, Chair: J. E. Gomez, Panelists: R. Carey, T. Fields, A. van Dam, D. Venolia, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series* , (1994), 492-493.
- [Sutherland 63] I. E. Sutherland: “A Man-machine Graphical Communication System,” *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference, Spartan Books, Baltimore*, (1963).
- [Takayama,*et al.* 94] T. Takayama, I. Fujishiro, Y. Ikebe, and D. S. Cai: “L-Reps: A Drafting -Oriented Approach to Unambiguous and Precise Design of 3D Mechanical Products,” in *Proceedings of 6th International Conference on Engineering Computer Graphics and Descriptive Geometry*, (1994), 177-181.
- [Toriya,*et al.* 86] H. Toriya, T. Satoh, K. Ueda, and H. Chiyokura: “Undo and Redo Operations for Solid Modeling,” *IEEE Computer Graphics and Applications* , **6**(4)(1986), 35-42.
- [van Dam 93] A. van Dam: “VR as a Forcing Function: Software Implications of a New Paradigm,” in *Proc. IEEE 1993 Symposium on Research Frontier in Virtual Reality*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, (1993), 4-8.
- [Yamaguchi,*et al.* 82] K. Yamaguchi, T. L. Kunii: “PICCOLO: Logic for a Picture Database Computer and its Implementation,” *IEEE Trans. Computers*, **c-31**(10)(1982), 983-996.
- [Zabusky,*et al.* 93] N. J. Zabusky, D. Silver, R. Pelz and Vizgroup: “Visiometrics, Juxtaposition and Modeling,” *Physics Today* , **46**(3)(1993), 24-31.