

NAIST-IS-MT9551027

## 修士論文

# 手描きスケッチを利用したインタフェースを持つ 3次元建築CADシステム

岸川 晋久

1997年2月14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。

岸川 晋久

指導教官： 横矢 直和 教授  
千原 國宏 教授  
竹村 治雄 助教授

# 手描きスケッチを利用したインタフェースを持つ 3次元建築CADシステム\*

岸川 晋久

## 内容梗概

建築設計の分野において設計工程の初期段階におけるデザイン推敲の手段として、コンピュータによる設計支援 (CAD) システムへの期待が高まってきている。ところが既存の CAD システムの多くはデザイン決定後の図面の清書やデータ化等が主な用途のため、建築家自身が自ら操作してデザインの検討を行うことが困難になっている。本研究では、3次元 CAD システムの操作インタフェースに建築家が描くスケッチを利用することで簡便で直観的な操作インタフェースを実現し、建築家自身がデザイン案を検討するために利用可能な CAD システムを提案した。

また、提案手法を実装したシステムを使用してインタフェースの評価実験を行い、望ましいインタフェースの方向性を検討するとともに、本研究の妥当性について検証した。その結果、提案手法による3次元モデルの生成作業は、建築家のデザイン検討工程において十分に利用価値があるという結論を得た。

## キーワード

建築 CAD, 手描きスケッチ, 3次元モデリング, インタフェース

---

\*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-MT9551027, 1997年2月14日.

# A 3-D Architecture CAD-System with Interfaces Using Hand-drawing Sketches\*

Nobuhisa Kisikawa

## Abstract

CAD systems for prototype-designs are required at a scene of architecture design. Existing drafting-CAD-systems are too complex for an architect to operate in such early design processes. In this research, a new CAD system with simple and intuitive interfaces is proposed which enables a user to create simple 3D-models in computer for better inspection of prototype designs. These interfaces are achieved by using hand-drawing sketches drawn by a user.

The design policies of user interfaces and the fairness of the proposed 3D CAD system are evaluated based on the results of experiments on the implemented systems. The conclusion is that the proposed 3D CAD system has sufficient potentiality to evolve early design processes of architects

## Keywords:

Architecture CAD-system, Hand-drawing Sketch, 3-D modeling, Interface

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9551027, February 14, 1997.

# 目次

1. はじめに	1
2. 研究方針：デザインプロセスの尊重	3
2.1 建築家のデザインプロセス	3
2.2 CAD システムを利用したデザイン検討	4
2.3 既存システムの利用に関する問題点	4
2.4 手描きプロセスの導入	5
3. 手描きスケッチを利用した形状モデリング	6
3.1 手描きプロセス利用に関する従来の研究	6
3.2 テクスチャマッピングによる手描きスケッチの利用	6
3.3 提案手法による形状モデリングの作業工程	7
3.4 提案手法における問題点とその解決法	9
4. 手描きスケッチを導入した建築CAD システムの実装	11
4.1 スケッチ画像利用インタフェース	11
4.1.1 ボリューム調整機能	12
4.1.2 プリミティブの回転と拘束点指定	12
4.1.3 パースペクティブの不一致微調整画面	13
4.1.4 プリミティブ表示パラメータ決定の半自動化機能	14
4.2 モデリング機能	19
4.2.1 ワールド座標系とデータの表現	19
4.2.2 プリミティブの操作とモデリング作業	22
5. 評価実験	26
5.1 インタフェース比較実験	26
5.1.1 実験の概要	26
5.1.2 インタフェース使用感の主観的評価実験	27
5.1.3 タスク達成時間による作業性の定量的評価実験	30

5.1.4	考察 . . . . .	32
5.2	建築家による評価実験 . . . . .	33
5.2.1	システム全体の主観的評価実験 . . . . .	33
5.2.2	実験結果と考察 . . . . .	36
6.	まとめ	40
	謝辞	41
	参考文献	42

## 目 次

1.1	建築設計の工程	2
3.1	手描きスケッチを利用したモデリングの作業工程	8
3.2	不自然なテクスチャマッピングの例	10
4.1	ボリューム調整用スライダー	13
4.2	拘束点を中心としたプリミティブの回転	13
4.3	パースペクティブの不一致微調整画面	14
4.4	水平線の補正と焦点距離	15
4.5	見かけの長さと実際の長さの関係	17
4.6	アスペクト比確認画面	17
4.7	ワールド系	20
4.8	主軸と向き	20
4.9	主軸まわりの回転による姿勢の変化	21
4.10	操作コマンドの構成	22
4.11	手描きスケッチの重ね合わせ作業中の画面	23
4.12	モデリング作業中の画面	24
5.1	サンプルのスケッチ画像	27
5.2	立方体の画像	31
5.3	システム構成	34

## 表目次

4.1	インタフェースのバリエーション	12
5.1	順位評価の回答結果 (のべ人数)	28
5.2	項目別の評価 (5 点満点)	29
5.3	項目別評価の系別集計 (5 点満点)	29
5.4	平均タスク達成時間と各方式間の母平均統計量	31
5.5	アンケート回答用紙の内容	35
5.6	アンケートの回答結果 (5 点満点)	36



## 1. はじめに

近年，建築設計の分野においてコンピュータによる設計支援 (CAD) システムが盛んに用いられるようになってきた．しかし，現状の CAD の主な利用用途はデザイン決定後の設計図作成段階における図面の清書 (Drafting) やデータ化であり，必ずしも建築家の「建築物を設計する」という行為そのものを補助するものではない．

建築設計の作業工程を見直してみると，建築家が行う作業は図面の作成だけではないことが分かる．一般に建築家の担当する仕事の範囲は，基本的なデザインを決定する「コンセプト決定」から，施工段階で必要となる詳細な情報を含んだ図面を作成する「実施設計」まで多岐に渡っている (図 1.1) [1]．

建築設計とは最終的には 3 次元空間をデザインするものであるため，設計の初期段階において 3 次元空間に対する立体的感覚を確認したいという要求が強く存在する．一般にデザインの検討はスケッチや試行図面の描画によって行われるが，これらは平面であるため立体的な要素を確認する手段としては限界がある．従来はボリューム模型と呼ばれる簡単な模型を作成することで立体的な要素を検討してきたが，近年のパーソナルコンピュータ等の普及を受けて，3 次元空間に対する立体的感覚を手軽に検討するための手段として 3 次元 CAD システムへの期待が高まってきている．

以上の背景を踏まえて，本研究では，建築家が自らコンピュータを用いて従来の設計工程で行うボリューム模型の作成に相当する作業を行うことができるシステムの構築を目的とする．このシステムを用いることにより，設計の初期段階において，建築家が手元で容易に自分のデザインを推敲できる．

建築家がデザインの推敲を行いながら自分で操作できる 3 次元 CAD システムを実現するためには，建築家のデザインプロセスを尊重した，簡便で直感的な操作性を実現しなければならない [2]．本研究では，建築家自身が描くスケッチを操作インタフェースに利用することにより，直感的で簡便な操作によるモデリング環境を実現した．この際，ユーザにとって望ましいインタフェースのあり方をさぐるため，スケッチ利用時の操作インタフェースについて複数のプロトタイプシステムを実装し，実験による比較検討を行った．さらに，システム全体の使用感

について、実際に建築設計業務に従事する人を対象に調査実験を行い、研究の妥当性を考察した。

以下、2章では基本方針について、3章では提案手法について、4章では実装システムについて説明する。また、5章では、実装システムを使用して行ったインタフェース評価実験と使用感に関する建築家による主観評価実験の内容および結果について述べる。

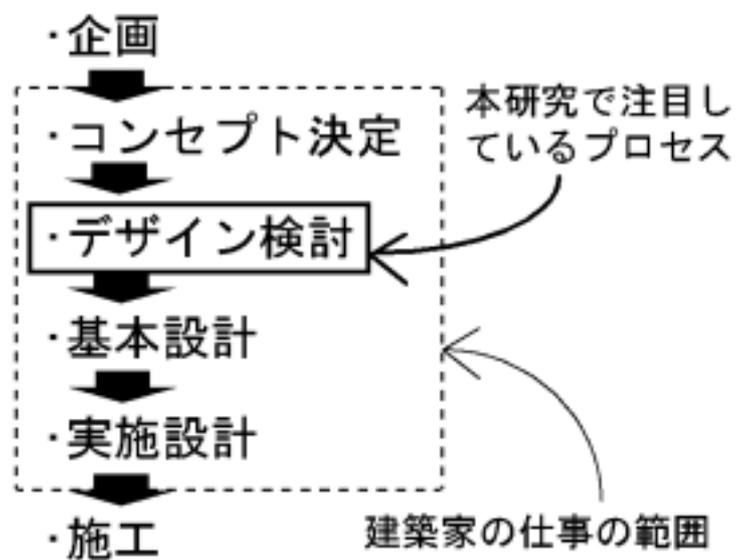


図 1.1 建築設計の工程

## 2. 研究方針：デザインプロセスの尊重

### 2.1 建築家のデザインプロセス

まず，建築設計の工程で行われるデザイン検討の作業工程について簡単に説明する．一般的な建築設計のデザイン検討の作業工程は以下のような手順で行われる．

1. コンセプトに基づいて草案を作成する．
2. 草案に基づき，スケッチを描きながら外観，平面構成等の検討を重ねる．
3. ボリューム模型や敷地模型を作成して空間構成を検討する．
4. 完成予想図（パース）を描き，周囲の環境との調和を見る．
5. プロセス(2)～(4)を繰り返し，最終的なデザインの決定に至る．

これらの作業工程のうち，建築家が実際に手を下して作業を行い，自分のデザインに対する思考を反映させることで自分自身の思考にフィードバックをかける行為の全体を「建築家のデザインプロセス」と言う．具体的には，建築家が抱いている漠然としたデザイン案を紙の上にスケッチし，これを眺めたり，新しい線を追加したり，一部分を消したりすることで新たな発想を得，再び頭の中でデザインを推敲し始める，といった一連の行為がデザインプロセスであると言える [5]．

ところで，上述した作業工程のうち，作業(3)「模型の作成」と(4)「パースの描画」は業務量や時間的な制約のため，実際には建築家自身が作業を行わず，専門の業者に別発注されたり，状況によっては省略される場合もある．

通常，デザインプロセスの中心はスケッチを描く行為であるが，この，作業(3)「模型の作成」や(4)「パースの描画」も，建築家自身によって行われる（または，建築家の思考を直ちに反映できるように操作ができる）場合は，これらの行為もデザインプロセスの範囲に含まれる．

そこで，既に述べたように，これらの作業も建築家自身が行うことで，デザインの推敲段階における建築家のデザインプロセスを充実させることができると考えられる．

## 2.2 CAD システムを利用したデザイン検討

本研究ではまず、コンピュータの利用によって、2.1節で説明した「模型の作成」や「パースの描画」の作業を建築家自身が手軽に手元で行える手法について検討する。そして、これらの作業を、従来のボリューム模型と同程度の検討用モデルをコンピュータ内部で生成し、対話的な操作を可能にすることで仮想的に再現できると考えている。

検討用モデルを生成すること自体は既存の3次元モデリングツールやCADシステムを利用することで可能である。しかしながら、建築家自身がデザインを推敲するための道具としてこれら既存のシステムを考えた場合、問題点が多い。次節では、建築家が設計の初期段階においてこれらの既存のシステムを利用する上での問題点について述べる。

## 2.3 既存システムの利用に関する問題点

既存の3次元モデリングツールやCADシステム [3] は、もともと最終的に図面や完成予想図 (パース) などを出力として得ることを目的としており、その目的に合致した複雑な機能が実装されている。そのため、操作方法が複雑であったり、直観的な操作性が実現されていないことが多い。

また、このようなシステム上で作業を行う場合は、あらかじめ寸法や形状の定義に関する数値パラメータが分かっていることが前提である。そのため、寸法などの決定していない、漠然としたデザイン案を取り扱う場合は、暫定的な寸法を与えて作業を進めることとなり、デザインの修正を行う度に寸法数値の再入力が必要になるなど、操作が冗長となる。

これらのシステムを用いて、建築家がデザインの推敲作業を行った場合、システムの操作そのものを意識してしまい、デザインに対する思考が中断される恐れがある。

以上の理由から、既存の3次元モデリングツールやCADシステムは、建築家の漠然としたデザイン案を3次元モデルとして取り扱うためのツールとしては不向きである。

## 2.4 手描きプロセスの導入

以上で述べた現状を踏まえ，本研究ではデザインプロセスに3次元CADシステムを導入するためには，建築家のデザインに対する思考を妨げない，直観的で簡便な操作インターフェースを用意する必要があると考える [2] ．

既に述べた建築家のデザインプロセスを再検討してみると，デザインの推敲を行いながら同時に建築家が行っている作業はスケッチを描く行為であることが分かる ．

建築家に限らず，デザインを決定する作業一般に従事する人間にとって，スケッチを描く行為は最も基本的かつ直感的な動作の一つであり，デザインに対する思考を妨げずに行える作業の一つである [6] [9] ．そこで本研究では，スケッチを描くという建築家の行為に注目することとし，3次元CADシステムの操作インターフェースに手描きのプロセスを利用することで，直観的で簡便な操作インターフェースを実現できると考える ．

次章では，簡便で直観的なインターフェースを実現するための，手描きプロセス導入の方法について述べる ．

### 3. 手描きスケッチを利用した形状モデリング

2章においても述べた通り，本研究の方針は，3次元CADにおいて簡便で直観的な操作インタフェースを実現することである．本章では，手描きプロセスを導入することで，簡便で直観的な操作インタフェースを実現する手法について，具体的な作業工程の例を交えながら説明する．

#### 3.1 手描きプロセス利用に関する従来の研究

従来の手描きプロセスの利用に関する研究は，通常の2次元画像を入力する手段として利用するもの [11] や，手書き動作のジェスチャを利用し，操作インタフェースとして活用するもの [9] [11] などが挙げられる．

本研究では3次元モデルを簡単に生成する手段として，手描きプロセスの利用を考えているが，類似した研究としてタブレットを利用してコンピュータに入力した手描き描線を，直接3次元の物体形状に変換する手法がある [7][10][12]．このアプローチにおいては，

- ユーザが，特別なデバイス(タブレット)による入力を意識するため，自由な手描き作業を行えない
- 手描きスケッチの特徴である，曖昧で冗長な情報を残したままモデリング作業を進めることができない

といった問題点がある．

#### 3.2 テクスチャマッピングによる手描きスケッチの利用

本研究では，タブレット入力による違和感を避け，自由なデザイン検討を可能にするため，手描きプロセスは従来と同じく紙の上で行うこととし，その出力であるスケッチをイメージスキャナでコンピュータ内部に取り込んで利用するというアプローチを採用する．スケッチは単なる成果物の図面とは異なり，デザイン決定に必要な曖昧な情報を容易に含ませることができるといった利点も持っている．

コンピュータ内部に取り込んだスケッチの画像を3次元モデル作成の際に目安として画面上に表示する．この結果，作るべき形の概略があらかじめ見えている

ことによる安心感をユーザに与えられると考える。さらに、このスケッチ画像を利用し、スケッチ画像に描かれている形状に近いとユーザが判断する直方体や三角柱等の基本立体図形(プリミティブ) に対してテクスチャマッピング処理を施すことで、表面に手描きスケッチの情報を持つ、簡易な3次元モデルを生成する。

テクスチャマッピング処理によって生成された簡易モデルのみでも、従来の簡易なボリューム模型程度の検討モデルとして利用できるが、より実際のボリューム模型に近い立体感を得るために3次元形状をモデリングする必要がある。すなわち、上記のプロセスで得られた簡易モデルに対して、別の直方体や三角柱などのプリミティブを付加し、元のスケッチで描かれていたものに近い3次元のモデルを作成する [13] [14]。このモデリング作業の位置決めの際に、簡易モデルの表面にテクスチャマッピング処理されたスケッチ画像を目安にすることで、具体的な数値入力を行うことなくモデリング作業を進めることが可能となり、直感的な操作によって3次元モデルが生成できる。

次節では、図 3.1を参照しながら、モデルを生成する作業工程について具体的に説明する。

### 3.3 提案手法による形状モデリングの作業工程

提案手法では、前節で述べた処理の実現のために、以下に示す5段階の処理によってスケッチ画像から3次元モデルを作成する。

1. 作業画面上にイメージスキャナで取り込んだスケッチ画像が表示される。この上にユーザが選択した直方体のプリミティブがワイヤースケッチモデルとして重ねて表示される(図 3.1: 段階 1)。
2. ユーザは、初期プリミティブの稜線が、スケッチ画像の外郭線と判断される部分に一致するように、その表示の角度、位置、パースペクティブ、ボリュームなどの各パラメータを調整する(図 3.1: 段階 2)。

段階 1 : ワイヤフレームモデルを重ねて表示



段階 2 : 見かけ上 , 重なった状態



段階 3 : スケッチ画像を展開した状態



段階 4 : テクスチャマッピングを施した状態



段階 5 : モデリング作業中の画面

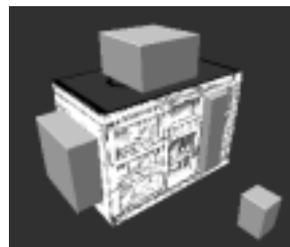


図 3.1 手描きスケッチを利用したモデリングの作業工程

3. スケッチに描かれている物体と初期プリミティブとの対応付けが完了した状態で，両者の稜線が見かけ上重なっていることを利用し，プリミティブの面に対応するスケッチ画像の部分を切り出す．この切り出された画像に対して伸縮変形処理を施すことにより，展開した状態の画像を得ることができる (図 3.1：段階 3) ．
4. このようにして得られた展開画像を使用して初期プリミティブの表面にテクスチャマッピング処理を施すことで，表面に手描きスケッチの情報を持つ簡易な 3 次元モデルを生成することができる (図 3.1：段階 4) ．
5. 作成された簡易モデルの表面に施されたテクスチャマッピングのスケッチ画像を目安に，別の直方体や三角柱などのプリミティブを付加し，元のスケッチで描かれていたものに近い 3 次元のモデルを生成する (図 3.1：段階 5) ．

### 3.4 提案手法における問題点とその解決法

上述した通り，提案手法では，画像中に描かれている物体に 3 次元データで表現されるプリミティブを“見かけ上”合致するように重ね合わせる作業を行う．

入力画像が実写画像であれば，撮影時のカメラパラメータを再現 (あるいは推測) することで，理論上，画像中の物体とプリミティブのパースペクティブを一致させることができる [4][13] [14][15] ．ところが，本研究が対象としている手描きスケッチでは，描かれている物体のパースペクティブは一般に正確ではない．このため，単純な重ね合わせの処理だけでプリミティブの表示とスケッチ画像を完全に一致させることは非常に困難である．しかしながら，完全に一致しない状態でテクスチャマッピング処理を行うと，見かけ上不自然なモデルを生成することとなる (図 3.2) ．

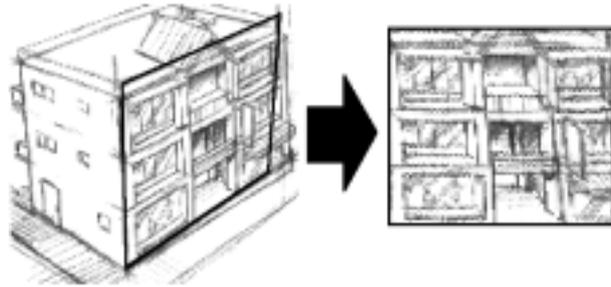


図 3.2 不自然なテクスチャマッピングの例

そこで、プリミティブとスケッチ画像が完全に一致しない状態に対して、テクスチャマッピング処理を行う前に、ユーザが面であると判断したスケッチの領域が、プリミティブの面に正しく対応するように、スケッチ画像を伸縮変型して補正するなどの処理を施す必要がある。この点に関する具体的な対策手法については4章で詳述する。

## 4. 手描きスケッチを導入した建築CADシステムの実装

本章では、3章で提案した操作インタフェースを計算機上に実装した3次元建築CADシステムのプロトタイプについて述べる。システムの実装環境は、ハードウェアとしてIBM-PC-AT互換機のパーソナルコンピュータを使用し、OSはMicrosoft社のWindows95とした。これは、提案システムが一般的な建築設計の現場に持ち込んで使用されることを想定しており、できるだけ特殊な環境を利用しない実装が望ましいと判断したためである。3次元プリミティブの描画に関して特別なハードウェアは一切追加していないが、画面表示を行うソフトウェアモジュールにIntel社のグラフィックライブラリである3DR[21]を使用することで高速化を図っている。システム全体のプログラミング環境としてBorland社のDelphi [22]を使用した。操作に使用するデバイス入力は一般的なマウスによる入力とした。ただし、ドラッグなどの直感的な操作によって入力できるコマンド数を増やすため、3ボタン型マウスの使用を前提としてコマンド構成を設計した。

以下、4.1節ではスケッチ画像を利用する際の操作インタフェースについて、4.2節ではプリミティブを利用した3次元形状のモデリング機能について説明する。

### 4.1 スケッチ画像利用インタフェース

本節では、スケッチ画像を利用する際の操作インタフェースに関して、実装した複数のシステムについて説明する。まず、3章で提案した手法を計算機上に実装する場合、ユーザはスケッチ画像とプリミティブの重ね合わせ作業において、以下のパラメータを、画面操作を通じて対話的に決定する。

1. プリミティブのX, Y, Z方向のボリューム
2. プリミティブの水平/垂直方向の回転角度
3. プリミティブのスクリーン上での位置
4. 透視投影変換時の焦点距離

これらのパラメータのうち、スケッチとプリミティブの重ね合わせ作業を行う際に、最も頻繁に調整が繰り返されるのは(1)のボリューム調整と(2)の回転角度

調整である。そこで、項目(1)、(2)について複数の操作方法を提案し、これらを比較検討することでユーザにとって使い易い操作インタフェースの方向性を探ることとした(比較実験については5章で詳しく述べる)。

また、これらのパラメータをコンピュータによって推測し、自動決定する機能を盛り込んでユーザの負担を軽減する方法も検討した。しかし、不正確な手描きスケッチに対して全てのパラメータを完全に自動で推定することは極めて困難であるため、パラメータ決定の一部に選択の幅を持たせた半自動化機能とした。

以上により、今回実装したインタフェースは全部で5種類となった(表4.1)。以下、5つのインタフェースについて機能面から説明する。

表 4.1 インタフェースのバリエーション

名前 \ 操作項目	ボリューム調整	回転方式	備考
A-01	スライドバー	重心中心	微調整画面
A-02	マウストラッグ	重心中心	微調整画面
B-01	スライドバー	重心 / 拘束点中心	微調整画面
B-02	マウストラッグ	重心 / 拘束点中心	微調整画面
C-01	自動	自動	アスペクト比確認画面

#### 4.1.1 ボリューム調整機能

A-01、B-01(-01系)とA-02、B-02(-02系)の違いは、プリミティブのボリューム調整方法である。01系では画面に用意されたスライドバー(図4.1)を使用してプリミティブのボリュームを調整する。02系では、画面に表示されたプリミティブの面を直接マウスカーソルで指定し、ドラッグすることによって、その面を法線方向に移動させてボリュームを調整することができる。

#### 4.1.2 プリミティブの回転と拘束点指定

インタフェースA-01、A-02(A系)およびB-01、B-02(B系)は、プリミティブを回転させてスケッチ画像中に描かれている物体と重ね合わせる。A系では、プ

リミティブは常に重心を中心にして回転させることができる。B-系は基本的にはA-系と同じであるが、拘束点を指定することによってプリミティブの任意の頂点を、見かけ上移動しないようにすることができる(図 4.2)。これにより、プリミティブを重心または拘束点を中心にして回転させることができる。なお、ボリュームの変更時にも指定された拘束点は移動しない。



図 4.1 ボリューム調整用スライダー

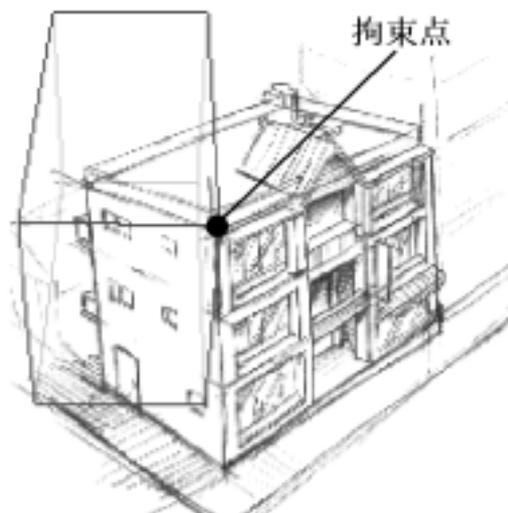


図 4.2 拘束点を中心としたプリミティブの回転

#### 4.1.3 パースペクティブの不一致微調整画面

3.4節でも述べたが、上述したA-系、B-系のインタフェースは直方体を透視投影変換した図形とスケッチ画像中の物体の外郭線を重ね合わせる作業を行うため、物体のパースペクティブが不正確に描かれているスケッチ画像を対象とした場合、全ての稜線を同時に重ね合わせることは不可能である。

そこで、実装したシステムでは、重ね合わせ画面とは独立した別の画面で不一致部分の補正作業を行う。この画面のことを「パースペクティブの不一致微調整画面」と呼ぶ(図 4.3)。



図 4.3 パースペクティブの不一致微調整画面

ここではスケッチ画像を2倍に拡大した画面が用意される。ユーザは、初期値として与えられる切り出し候補領域(プリミティブの面を透視投影変換して表現される領域)の頂点をマウスでドラッグして自由に再配置することができる。再配置された座標は平面座標としてコンピュータ内部に保存され、スケッチ画像からテクスチャマッピング用の画像を切り出す際に参照される(プリミティブそのものを変型しているわけではない)。

#### 4.1.4 プリミティブ表示パラメータ決定の半自動化機能

インタフェース C-01 では、以上で述べてきた「プリミティブをスケッチに重ね合わせる」方式ではなく、ユーザがスケッチに描かれている物体の稜線を直接指定してコンピュータに入力する方式をとっている。コンピュータはユーザによって入力された稜線の情報から、計算によって近似的にプリミティブの表示に必要なパラメータを求める。プリミティブの表示に必要なパラメータとは、プリミティ

ブの  $X, Y, Z$  方向のボリューム, プリミティブの上下左右の回転角度, パースペクティブを決定するための焦点距離である。

しかし, 一般に画像中に描かれている物体の回転角度を求めるためには, 少なくとも物体の形状を定義する情報が必要であり [16], 逆に物体の形状を求めるためには, 焦点距離や視点中心座標などのカメラパラメータが必要となる。

本手法では, スケッチ画像に対して, カメラパラメータの値をヒューリスティックに与えることで近似的にプリミティブの表示に必要なパラメータを求めることとする。以下では, 図 4.4 に従って必要なパラメータを求める手順を説明する。

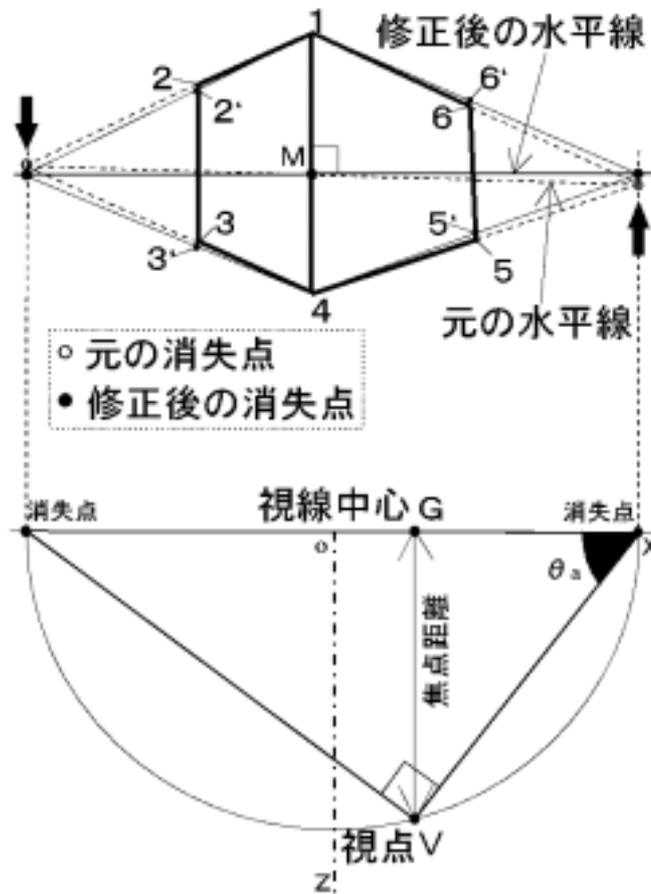


図 4.4 水平線の補正と焦点距離

1. ユーザがスクリーン上の四角形 1-2-3-4 , 1-4-5-6 をマウスで指定する . 2 点透視図の要領で 2 つの消失点を求め , これらを結んで , 仮の水平線とする ( 図 4.4 上 ) .
2. 見かけ上 , 最も手前に見える物体の稜線 1-4 を延長した線と , (1) で求めた仮の水平線が交点 M において 90 度で交わるように , この仮の水平線が修正され , これに付随して左右の消失点の位置が平行移動される .
3. 新しい四角形 1-2'-3'-4 , 1-4-5'-6' が決定される . この 2 つの四角形を結合した 6 角形 1-2'-3'-4-5'-6' の重心を求め , これを画面に対する視線中心 G とする .
4. 視線中心 G と 2 つの消失点の座標  $(x_1 \ y_1)$   $(x_2 \ y_2)$  から ,  $f = \sqrt{-x_1x_2 - y_1y_2}$  よりこのワールド系における焦点距離  $f$  が分かる [17] . 図中の物体の稜線 1-4 を構成する左右の 2 つの面が 90 度で接続されていると仮定すると , 2 つの消失点間の距離と焦点距離から直角三角形を構成することができる ( 図 4.4 下 ) . これにより , このワールド系における視点 V が決まる .
5. 視点 V が決定すると , この消失点を持つ物体の回転角度  $\theta_a$  が算出できる ( 図 4.4 下 ) . これにより , 図 4.5 における平行投影時の直方体の見かけの長さ V1 は  $L1 \times \sin\theta_a$  , V2 は  $L2 \times \cos\theta_a$  と表現できる .
6. 透視投影の投影面が X-Y 平面と同じ位置に存在するとみなすと , 極端に焦点距離が短い場合を除いて , 透視投影時の見かけの長さ V1' , V2' は平行投影時の見かけの長さ V1 , V2 と大きく変わらないと考えられる .

以上より , V1 , V2 を V1' , V2' で近似的に代用することにより , プリミティブのボリューム L1 , L2 が求められる . しかし , ここで説明した手法はあくまで近似的にパラメータを求めるものであるため , 復元したプリミティブの形状が , ユーザが考えていた形と一致しない場合も多いと考えられる . そこで本研究では , インタフェース C-01 においても , テクスチャマッピング処理に入る前に , プリミティブの形状を確認するプロセスを用意した . このプロセスを行なう画面を図 4.6 に示す . この画面を「アスペクト比確認画面」と呼ぶこととする .

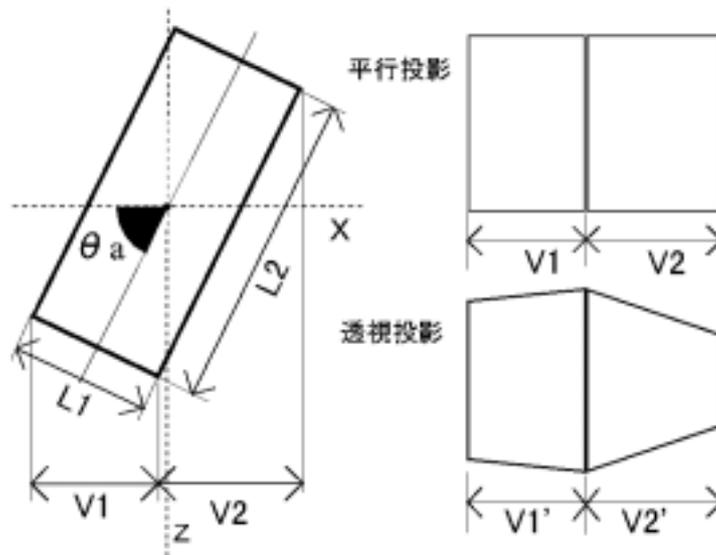


図 4.5 見かけの長さを実際の長さの関係

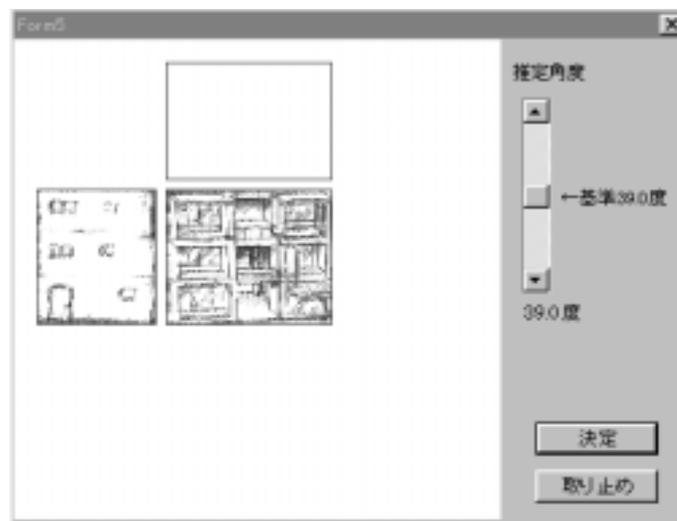


図 4.6 アスペクト比確認画面

ユーザはこの画面でテクスチャマッピングに使用される画像の切り出し状態と、推定されたプリミティブのアスペクト比を確認することができる。また、画面中にはスライダーが用意され、計算によって求められた $\theta_a$ を $\pm 10$ 度の幅で調整することができる。プリミティブのボリュームは上述の(5)の段階で述べているように $\theta_a$ の値に依存しているので、 $\theta_a$ を調整することにより直方体の幅と奥行き方向のボリュームを連動して変更することができ、結果として、この直方体のアスペクト比を変更することができる。

## 4.2 モデリング機能

本節では、4.1節で説明した操作インタフェースにモデリング機能を付加したシステムについて説明する。ここでは、モデリング機能を位置や大きさを自由に変更できる複数のプリミティブを組み合わせて任意の形状モデルを作成できる機能と定義する。

以下に、モデリング機能におけるデータ表現と、実装したシステムの具体的な操作方法について説明する。

### 4.2.1 ワールド座標系とデータの表現

プリミティブを配置し、モデリング作業を行う空間は、 $X, Y, Z$  の直交する 3 軸を座標軸とする 3 次元空間座標系とし、座標値の基本単位は、表示画面を構成する 1 画素の大きさと同じとした。これを「ワールド座標系」と呼ぶこととする。この座標系に対して、いわゆる建築設計図面における縮尺(スケール)の概念は設定していない。

透視投影変換に用いる視線ベクトルは常に原点を向いており、作業対象物を回転させて表示する場合は、実際にはこの視点が原点を中心とした半径  $r$  (=焦点距離) の球面上を移動することで、ワールド系全体が回転する形で表現される [19]。各プリミティブはワールド系に対して必ず正対する位置に置かれる。透視投影変換における投影面は  $400 \times 300$ (画素) の大きさの平面で、面の中心が原点に固定され、原点と視点を結ぶ直線が常にこの面と直交する (図 4.7)。

モデリングに使用できるプリミティブは直方体、三角柱、円柱の三種類である。円柱は曲面を 12 面で近似した 14 面体で表現される。三角柱と円柱に関して、主軸の向きを  $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸方向のいずれかに平行になるように変更できる (図 4.8)。さらに、三角柱は主軸まわりに 90 度単位で 4 姿勢を取ることができる (図 4.9)。



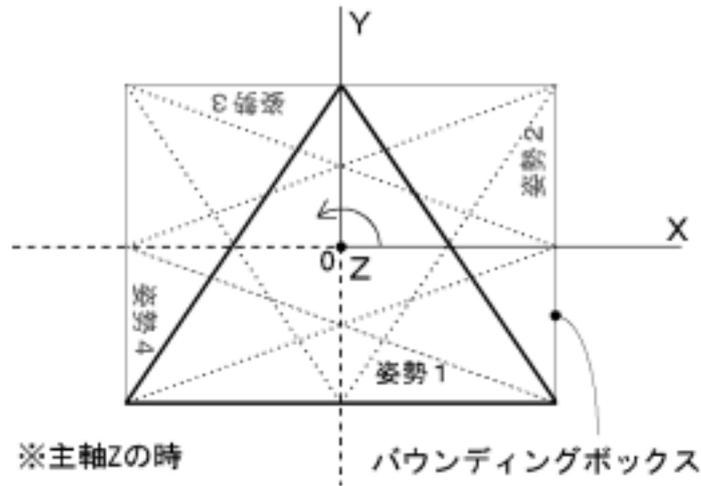


図 4.9 主軸まわりの回転による姿勢の変化

プリミティブのデータは，システム内部ではX,Y,Z 各方向のボリュームと，空間に対するプリミティブ中心の座標 (オフセット座標) で保持される．三角柱と円柱のボリュームおよびオフセット座標は，それが内接する直方体 (バウンディングボックス) のボリュームとオフセット座標によって保持される．すなわち，プリミティブの種類に拘らず，データの内部表現は全て「直方体のX,Y,Z 方向のボリューム+オフセット座標 (X,Y,Z)」という形式で保持される．プリミティブの描画はB-Rep(Boundary Representation：境界表現) [20] で行われる．

3次元モデルは，複数のプリミティブの和演算による集合として表現される．また，表示にかかる計算負荷をできるだけ少なくするため，プリミティブが空間的に重なった場合の衝突判定や面の交錯線計算は行っていない．

プリミティブ自体に対するボリューム変更や平行移動などの操作は，一度に1つのプリミティブに対してのみ行なえる．そこで，ユーザが選択しているプリミティブにバウンディングボックスを示すワイヤースケルトを赤で合成表示し，操作対象となっているプリミティブを明示的に表現している．以後，操作対象として選択された状態にあるプリミティブを「フォーカスのあるプリミティブ」と呼ぶこととする．

#### 4.2.2 プリミティブの操作とモデリング作業

本節で説明するシステムは、実装環境の OS であるパーソナルコンピュータ用 GUI の構成を模して、ウインドウ画面の上部にメニュー項目を並置した画面構成となっている。

本システムは、重ね合わせ作業を行うモード (以後、“重ね合わせモード” と呼ぶ) と、モデリング作業を行なうモード (以後、“モデリングモード” と呼ぶ) の 2 つのモードで構成されている。操作コマンドとしては、

- 両方のモードで共通な操作のもの
- 両方のモードで操作が異なるもの
- コマンドそのものが片方にしか存在しないもの

の 3 種類が存在する。

まず、操作コマンドの構成を模式的に表現したものを図 4.10 に示す。

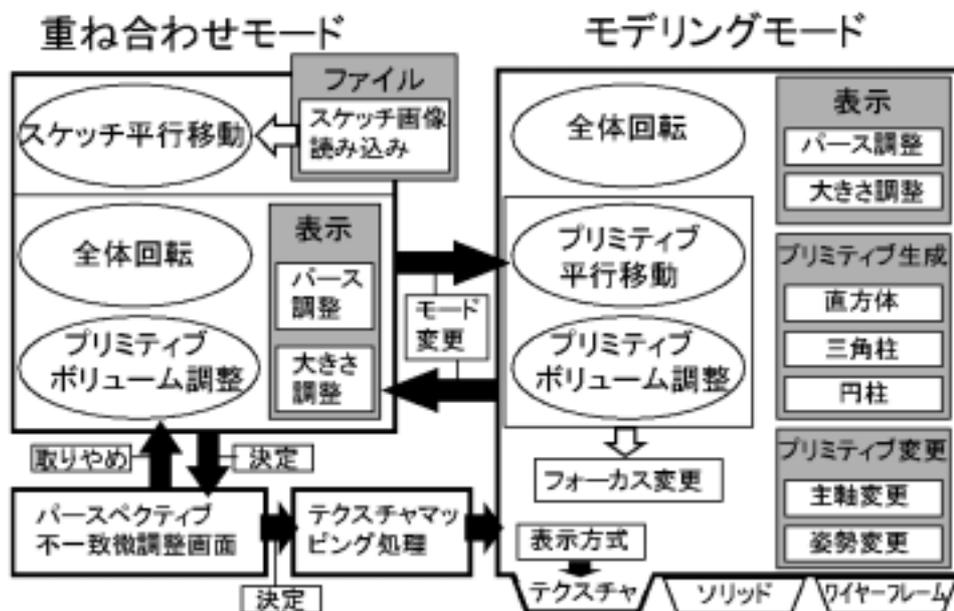


図 4.10 操作コマンドの構成

図 4.10において，丸で囲まれたコマンドは，作業画面上でマウスをドラッグする操作を示す．グレーの四角形上に配置されたコマンドは，システムの画面上部に表示されているメニューから選択する操作を示す．それ以外の四角形で囲まれたコマンドは，GUI の部品による操作を示す．

以下，実際に 3 次元モデルを生成する作業を例として，操作方法を作業工程の順に説明する．まず，重ね合わせモードで，手描きスケッチのテクスチャマッピング処理を可能にするための重ね合わせ作業について説明する．重ね合わせ作業中の画面の例を図 4.11に示す．

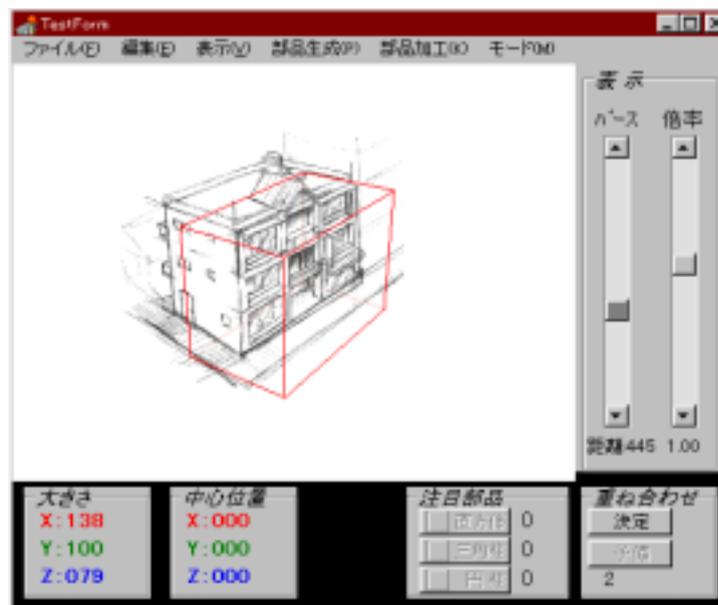


図 4.11 手描きスケッチの重ね合わせ作業中の画面

#### [手描きスケッチの重ね合わせ手順]

1. あらかじめスキャナでスケッチ画像を読み込み，200 × 200 画素の画像ファイルにしておく．画像はグレースケールでもカラーでも構わない．
2. 手描きスケッチを「ファイル」メニューから読み込み，作業画面に表示する．

3. ワイヤフレーム表示の初期プリミティブのボリューム，回転角，表示上のパースペクティブを調整し，スケッチ画像中の対象物と重ね合わせる．
4. 重ね合わせがほぼ完了したところで「決定」ボタンを押すと「パースペクティブ不一致微調整画面」(以下，微調整画面)での操作に移る．
5. 「微調整画面」において，4.1節で述べた切り出し領域変更作業により，ずれている部分を一致させる．
6. 「微調整画面」で「決定」ボタンを押すと「微調整画面」での作業を終了し，内部処理によりテクスチャマッピング用のデータが生成される．

以上の作業により，テクスチャマッピングを施した簡易モデルを表示する準備が整う．

次に，テクスチャ情報を利用してモデリング作業を行う．モデリング作業中の画面の例を図 4.12 に示す．

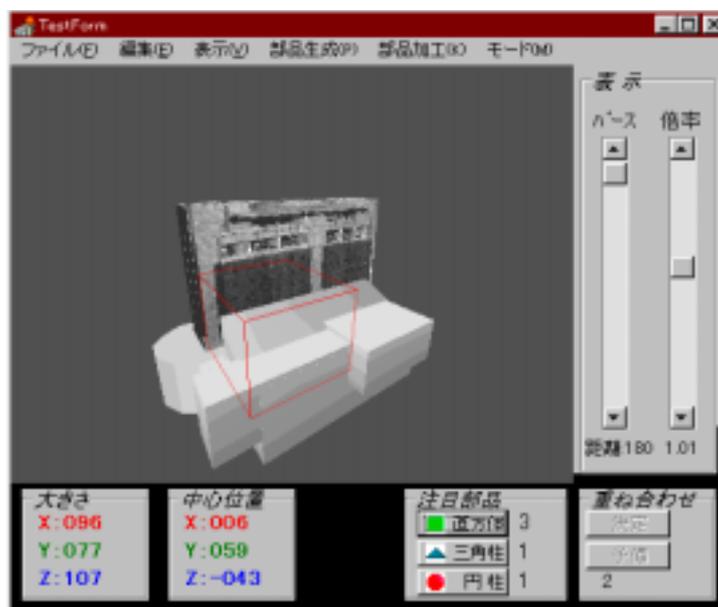


図 4.12 モデリング作業中の画面

#### [テクスチャマッピングを施した簡易モデルの作成手順]

1. 上述の重ね合わせ作業が完了した後「モード」メニューから「モデリング」を選択する。すると、「複数のプリミティブが扱える”モデリングモード”」に移行する。
2. 「表示」メニューから「テクスチャ」を選択すると、「初期プリミティブがテクスチャマッピング表示となる」。
3. 「プリミティブ生成」メニューから「直方体」「三角柱」「円柱」のいずれかを選択することで、そのプリミティブが作業画面内に追加される。
4. プリミティブのボリューム変更や平行移動を行う場合は、目的のプリミティブにフォーカスを移してから操作を行う。フォーカスは「フォーカス変更」ボタンを押すことで変更される。
5. 三角柱と円柱の場合は「プリミティブ変更」メニューの「主軸変更」を選択することで、主軸の向きを X, Y, Z 軸方向のいずれかに平行なものに変更できる。
6. 三角柱の場合はさらに「プリミティブ変更」メニューの「姿勢変更」を選択することで、主軸周りに 90 度単位で回転させることができる。
7. 各プリミティブの接合時にテクスチャとして表現されているスケッチ画像を参照することで、容易に位置決めを行うことができる。

以上で述べた作業ステップ 3~7 を繰り返し、最終的に所望の形状のモデルが完成する。

以上、4.1 節ではスケッチ画像を取り扱う為の操作インタフェースについて、4.2 節ではモデリング機能を付加したデザイン検討用の 3 次元 CAD システムについて説明した。次章では、これらのシステムを用いて行なった評価実験の内容とその結果について述べる。

## 5. 評価実験

本研究で提案するシステムの有効性と問題点を明らかにするため，4章で述べた実装システムを使用し，2種類の実験を行った．

1つは，本研究の特徴であるスケッチ利用インタフェースに注目し，スケッチとプリミティブの重ね合わせ作業を行う操作インタフェースについて既に述べた複数の方式を比較検討することで，ユーザにとって使いやすい操作インタフェースの方向性を明らかにする実験である．

もう1つは，モデリング機能を含めたシステム全体を，本システムが対象としている建築家（建築設計を日常業務としている人）に使用してもらうことで，本研究で提案する手法の妥当性を検証する実験である．

以下，5.1節で，操作インタフェースの比較実験について，5.2節で建築家による全体的な評価実験について詳述する．

### 5.1 インタフェース比較実験

本研究では「直観的」かつ「簡便」な操作インタフェースの実現を目標としている．しかし実際には，あるインタフェースの「直観性」や「簡便さ」といった要素を客観的に計測し，評価を行うことは困難である．そこで，本節では，4章で述べた5つのインタフェースを用いて比較実験を行い，この結果を手掛かりに，インタフェースの「直観性」や「簡便さ」の評価を試みることにする．

以下，5つのインタフェースを用いて行った評価実験と，この実験の結果について述べる．そして，この結果に対する考察から，手描きスケッチとプリミティブを重ね合わせる作業の操作インタフェースについて，ユーザの立場から見た，使いやすいインタフェースの方向性を探ることとする．

#### 5.1.1 実験の概要

インタフェース比較実験は2種類ある．1つは，5つのインタフェースの使用感をアンケート調査する主観的評価実験であり，もう1つは，各インタフェースにおけるタスク実行時間を計測する定量的評価実験である．被験者は本学の学生

10名とし、最初に主観的評価実験を行い、次に客観的評価実験を行った。全ての被験者は実験で使用するシステムに関して未知であるため、最初の実験では使用方法について説明しながら実験を行った。また、タスク実行時間の計測時に、実行順序によって現れる「慣れ」の影響を小さくするため、最初の実験の段階でシステムに十分に慣れさせることにした。

### 5.1.2 インタフェース使用感の主観的評価実験

最初に、インタフェースの使用感をアンケート調査する主観的評価実験を行った。被験者が行う実験タスクは、図 5.1 に示すサンプルのスケッチ画像に、直方体のプリミティブを重ね合わせる作業とした。A-01, A-02, B-01, B-02(表 4.1) の各インタフェースについては微調整画面での作業を含み、C-01 についてはアスペクト比確認画面での作業を含んでいる。

このタスクを被験者に行わせ、各インタフェース上でタスクを実行したときの使用感について、アンケート調査とインタビューによる意見収集を行った。アンケート調査の内容は 5 種類のインタフェースに対する総合的な評価での順位づけと「使い易さ」「分かり易さ」「正確さ」の 3 項目に対する 5 段階評価の 2 つである。まず、順位づけ評価の回答結果を表 5.1 に示す。

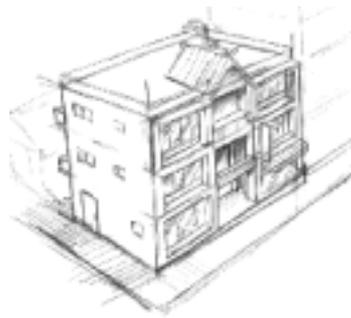


図 5.1 サンプルのスケッチ画像

表 5.1 順位評価の回答結果 (のべ人数)

順位 \ 方式	A-01	A-02	B-01	B-02	C-01
1 位	0	1	0	3	6
2 位	0	2	1	6	2
3 位	1	3	5	0	1
4 位	2	4	2	1	0
5 位	7	0	2	0	1

表 5.1 より、60 % の被験者が C-01 を一番使い易いと回答していることが分かる。また、B-02 が一番使い易いと答えた被験者も 30 % いる。

全体的な傾向としては、スライドバーでボリュームを変更する方式 (-01 系) の順位よりも、面を直接マウスでドラッグしてボリュームを変更する方式 (-02 系) の順位を高く評価した被験者が 90 % であった。また、プリミティブの回転方式については、重心を中心にのみ回転させることができる方式 (A-系) の順位よりも、拘束点も指定できる方式 (B-系) の順位を高く評価した被験者は 80 % であった。

次に、各インタフェース別の「使い易さ」、「分かり易さ」、「正確さ」の 3 項目に対する 5 段階評価 (5 点満点) の回答結果を表 5.2 に、また、方式 (系) 別に集計した結果を表 5.3 に示す。項目別の評価では、いずれの項目でも C-01 が最も得点が高い。C-01 以外については、「使い易さ」の項目で、-01 系と -02 系グループの間 (ボリューム調整方法の違い) に差のつく傾向が見られるが、「分かり易さ」の項目では、4 方式の間であまり明確な差は見られない (表 5.3)。「正確さ」の項目では C-01 の点数が 3 点台と、他の C-01 の項目に比べて低くなる一方で、B-02 がその他の 3 方式 (A-01, A-02, B-01) と差をつけて、C-01 に近い評価を得ている。3 項目の評価の平均点では、やはり C-01 が一番得点が高く、続いて B-02, A-02, B-01, A-01 の順となっている。

表 5.2 項目別の評価 (5 点満点)

項目 \ 方式	A-01	A-02	B-01	B-02	C-01
使い易さ	2.50	3.70	3.00	3.70	<b>4.60</b>
分かり易さ	3.30	3.40	3.20	3.50	<b>4.60</b>
正確さ	2.60	2.90	2.80	<b>3.60</b>	<b>3.90</b>
3 項目平均	2.80	3.33	3.00	3.60	<b>4.37</b>

表 5.3 項目別評価の系別集計 (5 点満点)

項目 \ 方式(系)	01 系	02 系	A 系	B 系
使い易さ	<b>2.75</b>	<b>3.70</b>	3.10	3.35
分かり易さ	3.25	3.45	3.35	3.35
正確さ	2.70	3.25	2.75	3.20
3 項目平均	<b>2.90</b>	<b>3.45</b>	3.05	3.30

次に、各被験者に対する個別インタビューの結果を述べる。まず、ボリューム調整については、

- スライドバー方式 (-01 系) よりもマウスで直接ドラッグする方式 (-02 系) の方が明らかに良い。

とする意見が多かった。回転方式について、

- 重心中心のみの方式 (A-系) よりも、拘束点が使える方式 (B-系) のほうが良い。

とする意見が多かったが、同時に、

- 操作する項目が増えて煩わしい。
- 効果的な機能の使い方が分かりにくい。

という意見も多く聞かれた。見た目の分かり易さについて、

- ボリュームが操作量で表示されるスライダー方式の方が分かり易い。

という意見もあった。

操作方法が全く異なる C-01 については、全体的に

- 簡単に使える

という意見が多かったが、

- 自分の思った通りにプリミティブが決定されない。
- どのようなプリミティブの形状を正解とするか、事前に考えておくことが難しい。
- 決定されたプリミティブに対して納得が行かない。

などの、結果に対する意見が多く出された。

### 5.1.3 タスク達成時間による作業性の定量的評価実験

次に、タスク達成時間を計測することによる各インタフェースの作業効率の定量的評価実験を行った。実験タスクは、図 5.2 に示すサンプル人工画像に、直方体のプリミティブを重ね合わせる作業とした。

ターゲットに人工画像を使用する理由は、タスク達成時間の計測結果に、主観的判断の差の影響が混入することを防ぐためである。これは、ターゲットにスケッチ画像を使用した場合、プリミティブを完全に一致させることが困難であり、タスクの完了条件が被験者個人の判断基準に依存するためである。

本実験では A-01 ~ B-02 の各インタフェースにおけるパースペクティブの不一致微調整画面での作業は計測対象から外している。これは、どのインタフェースにおいてもパースペクティブの不一致微調整画面で行う作業内容は同じであるためである。

本実験では被験者のタスク実行時間を計測し、これを  $t$  検定 [18] を用いて有意水準 5 % で母平均の差を検定することで、各インタフェースにおけるタスク達成時間に有意な差が存在するかどうかを確認し、各インタフェースにおける作業性を考察する手がかりとした。平均タスク達成時間と  $t$  検定で用いた統計量についてまとめたものを表 5.4 に示す。

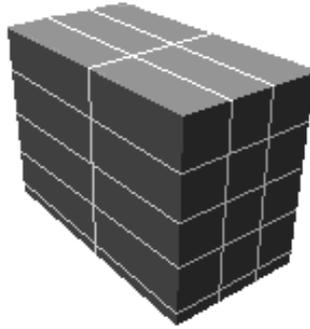


図 5.2 立方体の画像

表 5.4 平均タスク達成時間と各方式間の母平均統計量

	A-01	A-02	B-01	B-02	C-01
平均時間 (秒)	144.5	112.5	161.5	134.2	52.0
A-01	- -	1.423	0.310	0.609	<b>4.852</b>
A-02		- -	0.192	0.840	<b>3.833</b>
B-01			- -	0.485	2.090
B-02				- -	<b>4.581</b>
C-01					- -

棄却域： $t(10, 0.025)=2.228$  以上

検定の結果，有意な差が得られた組合せは，C-01 に対する A-01，A-02，B-02 の3方式であった．上記以外の組合せでは，ボリューム調整方式の違い(-01，-02系)や，回転方式の違い(A系，B系)によるグループ間での差異に関して有意な結果は得られなかった．このことから，タスク達成時間に関してC-01インタフェースの優位性は証明されるが，A-01～B-02の各インタフェース間では，どの方式でもそれほど違いはないと考えられる．

#### 5.1.4 考察

主観的評価と定量的評価の両方の結果から，ユーザの操作に対する負荷が最も小さいインタフェースは C-01 であることが分かった．しかし，主観的評価の結果において，自動復元の結果に対して積極的に評価する意見が少なかったことや，項目別評価「正確さ」の点数が，他の 2 項目に比べて低かったことなどから判断すると，C-01 の処理結果に対する評価はそれほど高くないと考えられる．

C-01 以外の A-01 ~ B-02 のグループに関しては，ボリューム調整の方式，および回転方式の違いによるタスク実行時間の差異は証明されなかった．しかし，主観的評価の項目別評価において，-01 系より-02 系の点数が高い傾向が見られることから，ボリューム変更のマウสดラッグ化は使用感の向上に対して効果があると考えられる．また，回転時の拘束点使用も，順位評価において A 系より B 系の方の順位が高く評価されていることから，使用感の向上にある程度寄与していると考えられる．しかし，項目別評価における A 系と B 系の点数の差が-01 系と-02 系の差ほどははっきりとは認められないことから，現段階では実現方法について検討の余地があると考えられる．

以上より，ユーザにとって使い易い操作インタフェースは C-01 方式を基本としたものであると考えられる．しかし，C-01 を汎用の操作インタフェースとして利用するには

- 現状では直方体のプリミティブしか扱えない．
- プリミティブの形状復元が，必ずしもユーザの考えた通りにならない．
- 画面表示が 2 点透視 (または 3 点透視) の形式を取る場合に利用が限られる．

などの問題がある．

そこで，C-01 方式を基本とし，対応できない状況では，利用範囲が広く，ユーザの意思を反映し易い-02 系方式を利用できる操作インタフェースが望ましい操作インタフェースの方向性であると考えられる．

## 5.2 建築家による評価実験

本研究の最終的な目標は、提案したシステムが、実際の建築設計の現場においてデザイン検討の手段として利用され、デザインプロセスの向上に寄与することである。

本節では、提案手法の妥当性と、今後のシステムの改良、発展に関する方向性を検証するため、実際に建築家(建築設計を日常業務としている人)を対象とし、4章で述べた実装システム(モデリング機能を含む)を用いて行った実験について述べる。

実験方式は、被験者である建築家に自由にシステムを使用させ、その使用感に対してアンケート調査および意見の聞き取り調査を行う主観的評価実験である。被験者は日常的に建築設計を業務としている20代～30代の男女4名である。全ての被験者は、日常業務においてパーソナルコンピュータの使用経験(ワードプロセッサや従来型の図面作成用CADシステム)を有するが、本実験で使用するシステムについては未経験である。以下に、システム全体に対する主観的評価実験と、その結果について詳しく述べる。

### 5.2.1 システム全体の主観的評価実験

まず、実験で使用したシステムを図5.3に示す。システムのハードウェアは、IBM-PC-AT互換のノート型パーソナルコンピュータ1台と、スケッチの読み取りに使用するページスキャナ1台、および一般的なポインティング作業用の3ボタン型マウスから構成されている。3次元CADシステム本体は、4.1節で述べたA-02インタフェースに4.2節で述べたモデリング機能を組み合わせたものである。重ね合わせインタフェースについては、(1)半自動方式のC-01は実験中の予想外の使われ方に対応できなくなる可能性が高いこと、(2)B系インタフェースは実現方法に再検討の余地が残されていること、などの理由から、A系インタフェースを採用することとし、ボリューム調整方式で実績のあった02系を選択した。



図 5.3 システム構成

被験者である建築家は全員，本システムについては何も知らないので，実験の前段階として，システムのコンセプトと具体的な操作方法について 10 分程度の説明を行った．その後，実験担当者との自由な会話を許して，建築家が自分自身で自由に操作する機会を与えた．建築家一人当りの使用時間は 30～40 分程度であった．使用したスケッチ画像は，あらかじめ用意しておいた，サンプルの小規模マンション（図 5.1）の他に，実際の建物のパース図や，建築家がある場で描いたスケッチなどである．システム使用終了後，建築家に表 5.5 に示すアンケート用紙を渡し，自由な質問を許して回答させた．アンケート調査で使った回答用紙を表 5.5 に示す．ここでは，大きくまとめて

- システム全体についての評価
- デザインプロセスに対する提案システム導入の是非
- 手描きスケッチの利用に対する効果

の 3 項目について質問している．

表 5.5 アンケート回答用紙の内容

———— 使用感調査アンケート (建築家向け) ————

今回はお忙しい中、実験にご参加頂きまして有り難うございました。  
このシステムを使用した感想について、以下の質問にお答え下さい。

1.) あなたはどのような方ですか？選択肢に をおつけください。

性別 ----- >( 男 ・ 女 )  
年齢 ----- >( 20 代 ・ 30 代 ・ 40 代 ・ 50 代 ・ それ以上 )  
分野 ----- >( 計画 ・ 基本設計 ・ 実施設計 ・ 施工 ・ 電設 ・ 空衛 ・ 法規 )

2.) 今回使用したシステムについて「使い易さ」「分かり易さ」「正確さ」  
の 3 項目と全体的な使用感について 5 段階評価で採点して下さい。

・各項目別  
使い易さ: 使い易い < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 使い難い  
分かり易さ: 分かり易い < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 分かり難い  
正確さ: 思いどおり < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 思いどおりでない

・全体的な使用感  
使用感: よい < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 悪い

3.) システムの全体的な方向性についてお伺いします

・デザイン検討の段階で CAD を利用することについて  
意味がある < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 意味がない

・従来のポリウム模型などに比べてどうでしょうか？  
3 次元 CG の方がよい < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 従来の模型の方がよい

・既存の CAD との関係はどうでしょうか？  
データのやりとりをしたい < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 独立して使いたい

4.) モデルの作成を行う際に、スケッチ画像を利用することについてお伺いします

・スケッチ画像を参照しますか？  
よく参照する < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > あまり参照しない

・スケッチ画像を利用することによって、モデリング作業はどのようになりますか？  
容易になる < 5 - 4 - 3 - 2 - 1 > 困難になる

5.) その他、意見などがございましたらご自由にお書き下さい

### 5.2.2 実験結果と考察

アンケートの回答結果についてまとめたものを項目別に表 5.6に示す。

表 5.6 アンケートの回答結果 (5 点満点)

項目番号	項目内容	評価の平均
2-1	使い易さ	4.50
2-2	分かり易さ	4.25
2-3	正確さ (思いどおり)	2.75
2-4	全体的な使用感	3.00
3-1	(デザイン検討の段階で CAD を利用することは) 意味がある	5.00
3-2	(従来のボリューム模型などに比べて)3 次元 CG の方がよい	3.25
3-3	(既存の CAD と) データのやりとりをしたい	4.50
4-1	(モデル作成時, スケッチ画像を) よく参照する	3.50
4-2	(スケッチ画像の利用によりモデル作成は) 容易になる	3.75

まず, システム全体に対する評価について結果と考察をまとめる。システム全体に対する評価として, インタビューでは

- 表示が高速で気持ち良い
- レスポンスが良い
- 使い易い
- 分かり易い
- 興味を持てる
- 業務で使いたい
- 個人的に所有したい

などの意見が得られた。これと, アンケート調査の項目 3 の結果から, 本システムに対する建築家の評価はかなり高いと考えられる。特にアンケート調査の項目

3-1 が全員 5.0 点満点をつけたことから，本研究の基本方針の 1 つである「デザイン検討段階における CAD 利用」が妥当であったと判断できる．また，アンケート調査の項目 3-2 の結果が 3.25 点と中立的な結果であったことから，建築家にとっての本システムの位置づけは従来のボリューム模型作成のプロセスを単純に置き換えるものではないと判断できる．さらに特徴的な評価として，アンケート調査の項目 3-3 の結果から，従来の清書 (Drafting) 用 CAD との連携使用に対する要求が強いことが挙げられる．ここで言う連携使用とは，最終的な成果物である設計図面と，デザイン検討用の 3 次元モデルを統合的に扱う，というのではなく，建築家が，検討案からある程度正確な図面を起こす際に，デザイン検討で作成した 3 次元モデルの平面投影図や立面投影図を清書図面作成のテンプレートとして利用したい，ということである．

次に，スケッチ画像の利用も含めた，モデリング機能全体に対する評価について結果と考察をまとめる．

モデリング機能全般に対する評価として，インタビューでは

- プリミティブの種類を増やして欲しい
- プリミティブ単位の自由な回転機能が欲しい
- プリミティブに対する掘り込み / 削り機能が欲しい
- 操作が簡単なままであるなら自由曲線 (曲面) も扱いたい．
- プリミティブのコピーなど，編集機能を使いたい．
- 座標やボリュームの指定に数値入力も使いたい．

などの意見が得られた．

モデリング機能一般に対する意見の全体的な傾向としては，モデリング機能の充実を望む意見が多いことが挙げられる．これは，実験に使用したシステムが必要最小限のモデリング機能しか備えていなかったことと，被験者である建築家が，今回の実験で初めてシステムを使用したにも拘らず，それなりに使いこなすことができたため，本格的に 3 次元モデルの形状を作り込もうとした際に機能不足の印象を受けたことが原因であると考えられる．これは，アンケート調査の項目 2-3 の評価が，他の項目に比べて低くなっていることから推測できる．つまり，思い通りにモデリングできない場面があったと考えられる．

最後に、本研究の特徴である手描きスケッチを利用することの評価について、結果と考察をまとめる。

まず、スケッチ画像の利用に関して、インタビューでは

- 雰囲気が出て良い。
- 重ね合わせるアイデアは分かるが、操作は難しい。
- 最初のプリミティブ以外にも、テクスチャを貼りたい。
- 1つのプリミティブの裏にも、テクスチャを貼りたい。
- 平面図、立面図などもテクスチャとして活用したい。
- 任意の1面のテクスチャを取り出して、スケッチの描き込み、消去などの編集を行いたい。
- 複数のプリミティブに対して一度に重ね合わせ処理を行いたい。
- モデリング中にもスケッチ画像をオーバーレイ表示して欲しい。

などの意見が得られた。

また、手描きスケッチの利用そのものに関しては

- スケッチから3次元モデルを作るのではなく、透視図(の下書き)を作成する手段として3次元モデルを利用できる。
- スケッチを描かなくても、直接プリミティブを組み合わせる作業からデザイン検討を行える。

などの意見が得られた。

アンケート調査の項目 4-1 および 4-2 の結果から、建築家はモデリング時にスケッチの情報をある程度積極的に参照していると判断できるものの、モデリング作業を左右する程ではないと考えられる。

また「モデリング機能のみでもデザインの検討は行える」という意見があるが、これは「手描きスケッチが不要である」という意図ではなく、「手描きスケッチ利用機能を常に使用するわけではない」という意味で、建築家の主体的なシステムの利用方法の1つを示しているものである。

ただし、建築家が重視する、操作の「直観性」や「簡便性」は、主に操作方法とシステムのレスポンスに関する部分を対象にしていることが今回の実験で明らかになった。

今回の実験時に建築家が持ち込んで試用したサンプルは全て手描きであった。また、3次元モデルにテクスチャマッピングを施すことで、モデルとしての雰囲気良くなる、といった意見が出されている。また、モデリングを行いながら、プリミティブの面に直接スケッチを行いたいというユニークな意見も出された。

以上の結果から、手描きスケッチの利用は十分有効であると考えられるが、利用方法の幅を広げる方向で利用方法を再検討することが今後の課題であると考えられる。

以上、アンケートとインタビュー調査の結果から本実験のまとめを述べると、本システムに対する建築家の反応は非常に良好であり、建築設計の現場におけるデザイン検討用の手段として有用であると判断することができる。また、スケッチ画像の利用方法についてさらに検討が必要であり、テクスチャマッピング用画像の編集機能や、モデリング機能の充実などが今後の課題であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、建築家が自分で操作し、手元で簡単に初期段階のデザインを推敲できるシステムとして、検討用の3次元モデルを生成する3次元CADシステムを提案した。

提案システムは、建築家が描くスケッチの画像をプリミティブの表面にテクスチャマッピングすることで簡易なモデルを作成し、この簡易モデルの表面のスケッチ画像をガイドラインとして作業を行うことで、直観的な操作のみで検討用の3次元モデルを生成するものである。

さらに、提案システムを実装し、スケッチ利用の操作インタフェースに関する評価実験と、モデリング機能まで含めたシステム全体に対する評価実験の2種類の実験を行った。

操作インタフェースの評価実験では、実装した複数のインタフェースを比較検討することで、ユーザーにとって使い易いインタフェースの方向性を検証した。その結果、コンピュータによるプリミティブ形状の自動復元機能は、ユーザの操作に対する負荷の軽減に対して有効であるとの結論を得た。ただし、自動復元機能は現状では汎用インタフェースとして用いるためには問題点があり、手動方式との併用が適当であるとの結論を得た。手動重ね合わせインタフェースにおいては、プリミティブのボリューム調整について、作業画面をマウスで直接ドラッグする方法がユーザの使用感の向上に有効であるとの結論を得た。

システム全体に対する評価実験では、実際に建築家を対象としてモデリング機能まで含めたシステム全体の評価実験を行った。その結果、スケッチ画像の利用による操作性の向上を確認した。そして、建築家のデザインプロセスにおいて、本研究で提案するシステムは有用なものであるとの結論を得た。また、モデリング機能の強化や、テクスチャ画像の利用方法の拡大などの建築家の要求を確認した。

今後の課題としては、建築家による評価実験の結果を踏まえて、モデリング機能の拡充、テクスチャの利用方法の拡張、従来の清書 (Drafting) 用 CAD との連携方法の検討などが挙げられる。また、操作インタフェースについても、モデリング機能まで対象を広げて、さらに直観性と簡便性を向上させることが必要であると考えている。

## 謝辞

本研究の全過程を通して，直接懇切なる御指導，御鞭撻を賜ったソフトウェア基礎講座 横矢 直和教授 に衷心より感謝の意を表します．

本研究の遂行にあたり，終始有益な御助言と御鞭撻を頂いた像情報処理学講座 千原 國宏教授 に厚く御礼申し上げます．

本研究の全過程を通して，直接，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．

そして本研究を通じて，終始有益な御助言を頂いたソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦助手，並びに山澤 一誠助手 に厚く感謝します．

また，物心両面において常に温かい御助言を頂き，本研究の評価実験においてもこころよく御協力を頂いたソフトウェア基礎講座の諸氏，ならびに，ソフトウェア基礎講座事務補佐員 村上 和代嬢に深く感謝します．

最後に，本研究の建築設計現場における評価実験において特別の御配慮，御協力を頂いた建築家諸氏，ならびに設計現場の皆様方に心より御礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] 田村 誠邦: [建築コストシリーズ 4] 建築企画のフロンティア, (財) 建設物価調査会, (1993).
- [2] 渡辺, 木崎: “特集・CAD ユーザー満足度調査 [第2部・建築, 土木分野]”, 日経 CG, pp. 76-87 (1993-10).
- [3] 日経 CG 別冊 CAD 製品ガイドブック'96, 日経 BP 社, (1995).
- [4] (株) 富士通静岡エンジニアリング: “RealModeler Home Page”, <http://www.wbs.or.jp/bt/sel/skv/>.
- [5] Francis D.K.Ching, 太田 邦夫: “建築ドローイングの技法”, (株) 彰国社, (1994).
- [6] Renate Eisentraut: “Imagery and the Design Process. Suggestions for the Development of CAD-System”, *Symbiosis of Human and Artifact*, Elsevier Science B.V. , pp. 781-786 (1995).
- [7] S.Sugisita , K.Kondo , H.Sato , S.Shimada , and F.Kimura: “Interactive Freehand Sketch Interpreter for Geometric Modelling”, *Symbiosis of Human and Artifact*, Elsevier Science B.V. , pp. 561-566 (1995).
- [8] John Lansdown: “Visualising Design Ideas”, *Wiley Professional Computing , Interacting with Virtual Environment* , JOHN WILLEY & SONS. , pp. 61-77 (1994).
- [9] Stephen A.R.Scrivener and Sean M.Clark: “Sketching in Collaborative Design ”, *Wiley Professional Computing , Interacting with Virtual Environment* , JOHN WILLEY & SONS . pp. 95-117 (1994).
- [10] 松田 浩一, 杉下 悟, 除 崚, 近藤 邦男, 佐藤 尚, 島田 静男: “対話型スケッチシステムのためのユーザーインタフェース”, SICE 第 11 回 HI シンポ論文集, pp. 69-76 (1995-10).
- [11] 風間 信也, 加藤 直樹, 中川 正樹: “文房具メタファを用いた手書き作図システム”, 情処論, Vol.35-No7, pp. 1457-1467 (1994-07).
- [12] 堀越 力, 鈴木 智, 中根 一成: “手書きスケッチ操作による三次元モデルの入力と立体形状探索への応用”, 情処論, Vol.35-No9, pp. 1750-1758 (1994-09).

- [13] 宮澤 秀毅, 生田 幹雄, 澤田 喜正: “PC による変電所三次元シミュレーションシステムの開発”, 1996 信学春季全大, A-414 , pp. 415 (1996).
- [14] 生田 幹雄, 宮澤 秀毅, 澤田 喜正: “変電所シミュレーション用三次元モデリングシステム”, 1996 信学秋季全大, D-438 , pp. 441 (1996).
- [15] 近藤 邦雄, 木村 文彦, 田嶋 太郎: “手描き透視図の視点推定とその応用”, 情処論, Vol.29-No7, pp. 686-693 (1988-7).
- [16] 尺長 健: “既知構造の単眼視姿勢推定における基本問題”, 情処論, Vol.35-No11, pp. 2308-2391 (1994-11).
- [17] 金谷 健一: 画像理解 -3 次元認識の数理-, 森北出版 (株), (1990).
- [18] 芝 祐順, 渡部 洋: 統計的方法 II -推測-, (株) 新曜社, (1976).
- [19] 芹沢 正三: CG によるパソコン入門, (株) サイエンス社, (1991).
- [20] Cristoph M.Hoffmann , and Jaroslaw R.Rossignac: “A Road Map To Solid Modeling”, *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Vol.2, No.1, pp. 3-10 (1996-March).
- [21] Intel Corporation: “Intel 3DR Rasterizing Engine”, *Programming Manual* 633801-005, (1995).
- [22] Borland International: “Delphi 2.0 ユーザーズガイド”, ボーランド (株), (1996).