

3次元直接操作インタフェースの実現

— ビームカーソルによる物体選択方法と視点・光源機能の表現方式 —

中村 康浩、吉村 哲也、杉浦 雅貴
松下電器産業(株) 情報通信東京研究所

3次元グラフィックスシステムにおいて、直観的な操作を可能にする新しい3次元直接操作手法について述べる。本研究では、①従来の3次元カーソルを改良したビームカーソル手法、及び②環境や空間要素をも通常の物体と同様に取り扱う統合化直接操作環境を考案し、試作システムを開発の上、その有効性を評価した。ビームカーソルに関しては、従来の3次元カーソルとの比較実験から、より高速かつ正確な物体選択が可能であることを確認した。また、統合化直接操作環境に関しては、視点・光源の視覚化機能を中心とした実験による評価から、物体と同じ方法で容易にこれら環境要素が操作できることを確認した。

DEVELOPMENT OF
A 3-D DIRECT MANIPULATION INTERFACE
A Beam Cursor Pointing Technique and Integrated Direct Manipulation Environment

Yasuhiro Nakamura Tetsuya Yoshimura Masataka Sugiura
TOKYO INFORMATION AND COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY
MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD
3-10-1, Higashimita, Tama-Ku, Kawasaki 214, Japan

In this paper, we discuss a new method of 3-D Direct Manipulation in which user is able to intuitively manipulate objects in the environment. In this research, we have created two new developments:

- (1) Improvement of the existing cursor in the form of a beam cursor
- (2) An integrated direct manipulation environment (IDME) which is able to control visual perspective and light source in the same manner as manipulating objects.

We have developed a prototype system whose usability we have tested. Our results show a number of new advances. First, by using the beam cursor, ordinary object selection is made faster and more accurate. Second, by adding functions which control visual perspective and light source in this IDME, the user can easily manipulate these as if they were objects.

1 はじめに

近年、CAD/CG分野に於いて3次元情報を処理できるシステムが広く普及するようになり、容易に3次元形状を取り扱うことができるユーザ・インタフェースの重要性が増してきた[1]。

容易な操作性を実現するために、まず、入力デバイスの改善が図られ、マウスなどの2次元入力デバイスからデータグローブ(VPL社)やSPACE(POLHEMUS社)などの空間位置・方向を同時に入力できる3次元入力デバイスが開発されるようになった[2]。更に、このような入力デバイスの採用に伴い、3次元仮想空間中を自由に動くことができる種々の形状の3次元カーソルが考案され、ユーザは仮想空間中の物体を直観的に操作できるようになった[3][4]。

しかし、この3次元カーソルによるインタフェース(以後、I/Fと記す)では、以下の問題があった。

(1) 奥行き方向の位置決めの問題

通常のCRTのような2次元表示デバイスでは、奥行き方向の情報が表示されていないので、3次元カーソルと物体との空間的な位置関係を視覚的に捉えがたい。このため、3次元カーソルと離れた所に存在する物体を捕捉・選択することが困難である。

(2) 環境操作の問題

また、こうしたカーソルによる操作の対象は物体のみに限られており、それ以外の空間を規定する座標系や視点・光源など環境要素の操作は、メニュー等による間接的手段を必要とし、また画面上でのこれら要素の表示も操作にとって不十分である。

そこで、我々はこれら問題点を、仮想空間上での直接操作機能の面、及びそのための視覚化機能の面から検討を行い、ビームカーソルと名付けた新しい3次元カーソル、及び3次元座標系や視点・光源なども物体と同じ操作対象として取り扱う新しい統合化直接操作環境を導入することによって解決した。

これらを用いて、室内インテリアレイア

ウトを具体例とした物体の移動・配置タスクを支援するシステムを試作し、各手法の有効性を評価した。この結果、3次元仮想空間上で、優れた直接操作性を提供できることを確認した。

以下、本稿では、

(1) 3次元直接操作I/F試作システムの概要

(2) ビームカーソルによる直接操作手法

(3) 統合化直接操作環境

について述べる。

2 3次元直接操作I/F試作システム

本章では、3次元直接操作I/Fを実現するために試作したシステムの概要について述べる。

2.1 システムの目的と設計方針

このシステムは、ユーザが実世界と同じような感覚で、3次元仮想空間中の物体やそれを取り巻く視点・光源という環境機能などを直接、選択・移動して、物体の配置状態やその雰囲気直観的に確認できる直接操作インタフェースを実現することを目的としている。

我々は、このシステム設計にあたり、ユーザが計算機を意識することなく対象物の操作に専念できる良好な直接操作I/Fを提供できるように次の方針をとった。

(1) 操作の核となる直接操作機能の実現

- ・ユーザの手振り動作だけで仮想空間中の対象物を操作できること
- ・2次元表示デバイス上でも、操作対象の空間的位置関係が理解でき、容易に選択できること
- ・ユーザの操作結果を高速にフィードバックできること

(2) 統合直接操作環境の実現

- ・通常の操作対象である物体に限らず、視点や光源等の環境要素、及び3次元座標系等の空間要素をも直接操作できること
- ・また、全ての対象に対する操作は、同一であること

2.2 システム設計

上記の設計指針に基づきシステム設計を行った。

(1) 操作の核となる直接操作機能の実現手段

ユーザの手の動きで仮想空間上の対象物を直接操作できるように、3次元の位置・方向を同時に入力できる3次元入力デバイスを用いた。

2次元表示画面上で3次元の対象物を容易に選択・移動できるように、ビームカーソル手法を考案した。この手法についての詳細は、3章で述べる。

更に、ユーザの操作結果の即時表示を可能とするために、高速グラフィックス・ワークステーションの利用とアルゴリズム(ソフトウェア)面での高速化を図った。

(2) 統合化直接操作環境の実現

図1に示すように、可視化の対象を、①通常の対象である物体だけでなく、②空間を規定するための3次元座標系などの空間要素、及び、③空間の表示条件を決定する視点や光源などの環境要素にまで拡張し、直接操作機能を介して、操作できるようにした。この視覚化方法や操作方法は、3種類の対象に対して同一となるようにし、ユーザに統一的操作環境を提供した。この方法についての詳細は、4章で述べる。

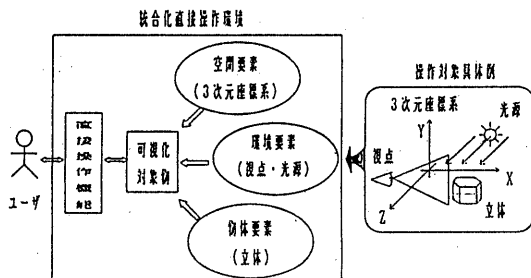


図1 統合化直接操作環境の概念図

2.3 ハードウェア構成

以上の手段を構築するプラットフォームと

して、図2に示すようなグラフィックス・ワークステーション(シリコングラフィックス社製IRIS 4D)に、ペン型の入力部を有する磁気式の3次元入力デバイス(POLHEMUS社製3SPACE)をRS-232Cで接続したハードウェアを用いた。

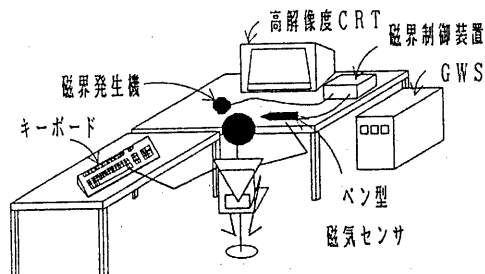


図2 ハードウェア構成

3 ビームカーソルによる直接操作手法

本章では、3次元直接操作I/Fの基本操作となるビームカーソル手法とその評価について述べる。

3.1 ビームカーソル手法

ビームカーソル手法は、従来の3次元カーソルの持つ自由な物体移動という優れた空間操作性を継承し、問題となっていた奥行き方向に存在する物体や遠くの物体の選択のしにくさを解決するための手法として考案された。この選択の問題は、仮想空間中の奥行き方向の位置関係の分かりにくい目標物をカーソル上の1点で指示しようとする、また指示している目標物が選択できるかどうかは、ユーザが選択要求を出すまで分からないことから生じる。

そこで、3次元カーソルの前方に無限長の直線(ビーム)を置き、この直線と物体とが接触すると物体表面で直線が止まり、物体が選択可能であることをユーザに視覚的に提示する方法をとった。これにより、ユーザは、奥行き方向の位置関係が分からない物体でも、カーソルを目標物方向に向けてビームを前後・左右に振りさえすれば、ビームと目標物との接触状態から視覚的に目標物を選択するこ

とが可能となる。また、カーソルを遠くの目標物まで移動させなくても、カーソルをその場で回転すれば、ビームを目標物へ照射できるため、素早い選択が可能となる。このビームを有する3次元カーソルをビームカーソルと呼び、このカーソルによる一連の空間操作方法（目標物の選択・移動・配置）をビームカーソル手法と呼ぶ。この手法は、3次元直接操作インタフェースの基本操作とした。

具体的な操作手順を図3に示す。

① 目標物の捕捉：

まず、選択したい目標物方向にビームを向け、ビームと目標物が接触するようにビームカーソルを操作する。

② 目標物の確認：

ビームと目標物が接触すると、目標物表面でビームが途切れ、目標物が選択可能であることを提示する。

③ 目標物の選択：

この状態で、選択指示を出すと、目標物はビームによって選択される。

④ 目標物の移動：

目標物が選択されると、ビームカーソルと目標物との位置関係を保持した状態（串差し状態）で、自由に空間中を移動できる。

⑤ 目標物の配置：

希望の位置で、選択解除指示を出すと、目標物とビームカーソルは分離され、目標物はその位置で固定される。

サーフェス表示：CRT上、一辺2cm)の1つを、基準位置から各カーソルで指示する作業をしてもらった。

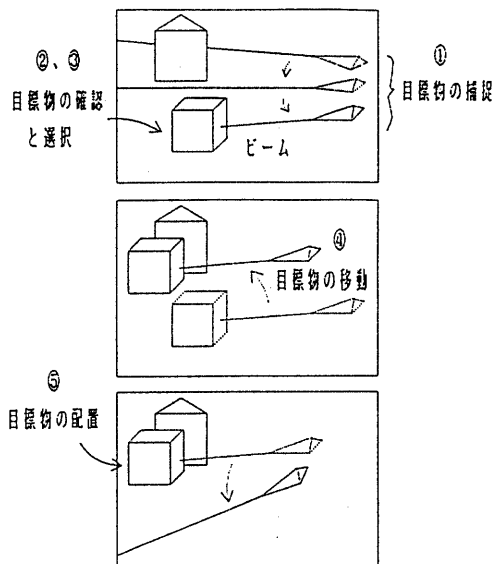


図3 ビームカーソルによる物体選択

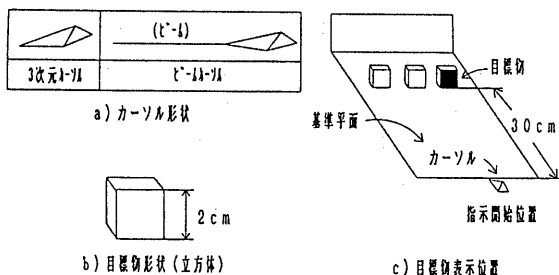


図4 各カーソル形状と目標物の配置状態

3.2 ビームカーソルの有効性評価

ビームカーソルの有効性を評価するため、従来の3次元カーソルとの選択性能の比較実験を行った。

(1) 実験方法

実験装置としては、前述したシステムに、比較実験用のプログラムを追加したものを用いた。比較対象として、図4のa)に示す形状の3次元カーソルとビームカーソルを用意した。被験者には、3次元空間中の基準平面上の固定位置に置かれた3つの立方体図形（

以下に、実験手順を示す。

- (1) 被験者は、カーソルを指示開始位置へ移動する。
- (2) 準備ができたところで、指示開始を示すスイッチを押す。
- (3) スイッチが押されると、疑似乱数により3つの立方体の1つの色が変わられ、目標物が決定される。被験者は、色が変わった目標物をカーソルで指示する。
- (4) 指示の完了は計算機が判断し、指示が成功した場合に1回の指示動作が完了する。各指示毎にスタートスイッチを押してから

指示が完了するまでの時間とこの間の指示誤り回数を計算機で計測した。実験は、各々のカーソルを用いて、それぞれ5名の被験者に対して50回ずつの指示作業について行った。なお、実験に先立って3次元入力デバイスの操作に習熟するまで練習をもらった。

(2) 実験結果と考察

実験結果として、表1に各カーソル別の指示時間の平均、指示誤り率、指示時間の標準偏差を示し、図5に代表的な被験者の指示回数と指示時間のデータを示す。

表1 カーソル別平均指示時間と指示誤り率

カーソル種別	平均指示時間(秒)	指示誤り率(%)	指示時間の標準偏差(秒)
3次元カーソル	4.3	19.4	1.6
ビームカーソル	1.6	2.0	0.7

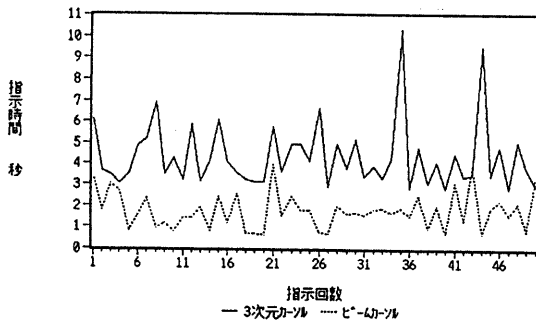


図5 指示回数と指示時間の代表例

これによると、ビームカーソルは、3次元カーソルより

- (1)平均指示時間、指示誤り率ともに少ない。
- (2)また、指示に要する時間のばらつきも小さい。

ということを確認した。

この理由として、ビームカーソルの場合、

- (1)3次元カーソルのように目標物まで移動させる必要がないため早く指示ができること。
- (2)目標物の選択可能性は、ビームと目標物との接触状態を視覚的に把握できるために、

指示誤りが少ないこと。

- (3)3次元入力デバイスの手元操作だけでビームカーソルを制御できるので、指示時間が安定していること。
- などが考えられる。

4 統合化直接操作環境

総合化直接操作環境では、通常の物体に限らず、環境要素、及び空間要素も同一の操作で取り扱えることを前述した。

ここでは、視点・光源という環境要素の操作を統合化直接操作環境下で行う方法について述べる。

4.1 視点・光源の視覚化機能と操作

従来、視点や光源は、その効果のみが画面に表示されていた。このため、ユーザは仮想空間上で、これら要素の存在場所を明確に把握することができず、通常の物体のようにカーソルで直接、選択・移動することが困難であった。

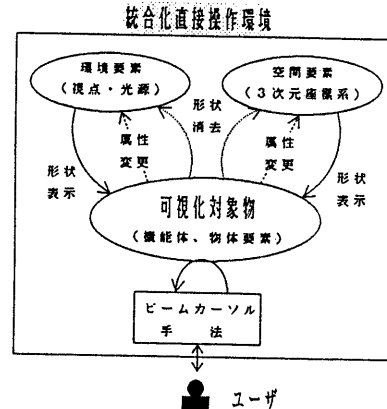


図6 空間・環境要素の視覚化機能と操作

これらを解決するため、図6に示すように、視点や光源などの環境要素をその機能を継承した物体(機能体)として視覚化し、操作対象として扱えるようにした。

形状を与えられ視覚化された視点や光源は、物体と同じ可視化対象物として、ビームカーソルにより直接、選択・移動する。移動中のこれら機能体は、空間中での形状の位置・方

向から機能のパラメータ（属性値）を変更し、その効果を変える。また、いつでも、その形状を消去し、機能だけを有する基の環境要素へ戻せる。機能体としての表現は、通常の操作対象である物体と同じサーフェス表示とし、空間中での各環境要素の位置・方向が容易に理解できる形状とする。

このような枠組みに基づく、視点・光源の直接操作手法により、

- (1) 仮想空間内での視点や光源の位置・方向を視覚的に把握できる容易な位置決め
- (2) 及び、操作対象の切り替え指定無しに、いつでも物体と同じ方法で選択・移動できる簡易で一貫した操作

が可能となる。

次に、具体的な表現方法を述べる。

[視点の表現方法]

図7に示すように、視点としてシステムに記録されている各機能パラメータを参照して、視点の位置をカメラで、視野領域の方向及び有効範囲を半透明の立体で表現し、この半透明の立体中の景觀をファンダーウィンドウと呼ぶサブウィンドウ中に表示した。

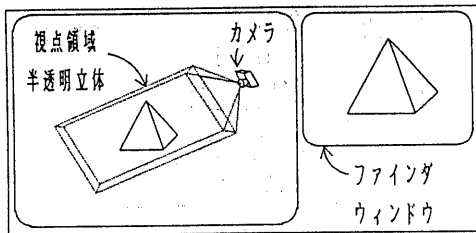


図7 視点の表現

[光源の表現方法]

光源としては、平行光源、点光源、スポット光源の3種類を用意した。図8に示すように、平行光源は方向性のある無限遠点の光という特徴からその方向を矢印で示した長方形平面で表現した。点光源は、特定の位置から等方的な光を発する光源であることから立方体で表現した。また、スポット光源は、特定

の位置から指向性のある光を発する光源であるためスポットライトをイメージした形状で表現した。

光源形状の場合もサーフェス表示とするが、これらは発光体で自ら光源特性を受けないため、光源形状は立体感のないフラットな物体として表示されてしまう。そこで、形状の視認性を上げるために、各形状の輪郭線とその光源色の補色を用いて重ね描いた。

光源効果は、各形状の位置・方向に合わせて計算をし、画面中に直接表示した。

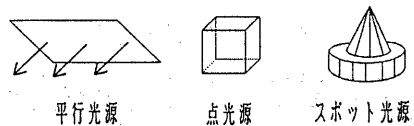


図8 各種光源の表現

以上の表現方法に基づく表示画面例を図9に示す。この例での光源は、スポット光源を示している。

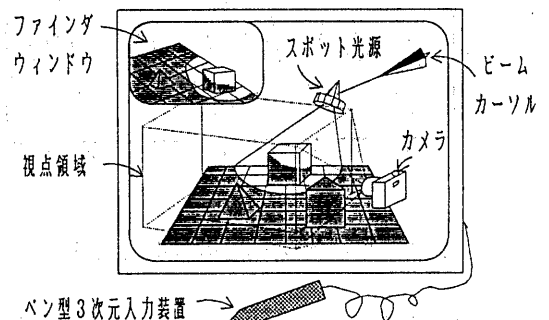


図9 視点・光源の表示画面例

4. 2 視覚化による操作性の評価実験

統合化直接操作環境に於ける視点・光源の視覚化機能の有効性を、従来の視覚化しないものと比較評価した。

(1) 実験の方法

実験装置は、前述のビームカーソルの場合と同様に、試作システムに本実験用のプログ

ラムを追加したものをを用いた。実験は、視点と光源のそれぞれの環境要素について行った。どちらの場合も、被験者に作成すべき画像シーンを写真と図で教示し、作成目標シーンを理解したところで、その作成作業を行なってもらった。この写真と図は、実験中、常に被験者が確認できるようにした。

被験者が、作成すべき画像シーンを図10と図11に示す。図10は、視点を操作して作成するシーンで、机の右真横・斜め上方向へ視点を移動して見たシーンをファインダーウィンドウ中に表示するものである。図11は、光源を操作して作成するシーンで、視点の場合と同様に、机の右真横・斜め上方向からスポット光源を照らしたものである。

シーン作成に対する満足度は、各被験者により異なるため、提示シーンの視点や光源の位置・方向を基準点とした許容誤差範囲を設けて、この中に被験者の操作する各環境要素が位置しなかった場合は、シーン作成ミスとした。この範囲は、基準から±1cm以内、±10度以内とした。

今回の実験では、操作性の評価を移動に絞っているため、各環境要素はスイッチにより3次元カーソル先端前方に自動的に接続されるようにした。

以下に、実験手順を示す。

- (1)環境要素の接続された3次元カーソルを開始基準位置へ移動する。
- (2)準備が終了した時点で、スタートを示すスイッチを押す。
- (3)環境要素を操作して、提示シーンの作成をする。被験者は、提示シーンどおりに作成できたと思った時に終了を示すスイッチを押す。
- (4)許容誤差範囲内に環境要素が位置したシーンを作れた場合に、1回のシーン作成作業は終了する。

実験は、5名の被験者に対して、視点と光源について視覚化された場合とされない場合の計4パターンで、各提示シーンの作成作業を25回ずつ行った。

計測は、スタートスイッチを押してから、被験者が許容誤差内のシーンを作成するまでの時間とシーン作成のミス回数及び提示シーンに対する各環境要素の位置・方向の誤差を計算機により求めた。

なお、被験者には、実験に先立って上記4パターンの環境要素の操作を習熟するまで練習をしてもらった。

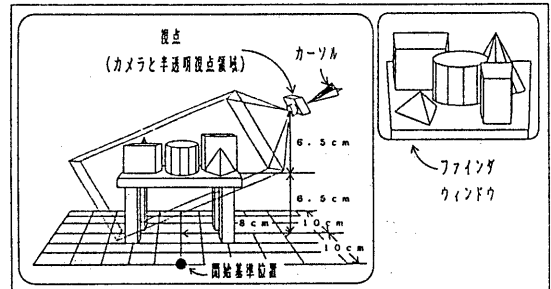


図10 視点操作での提示シーン

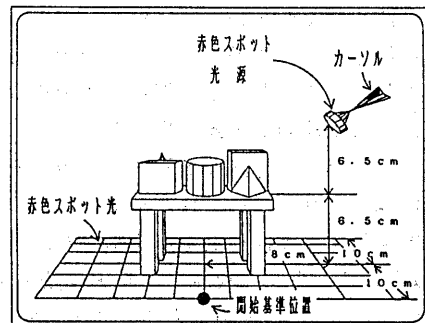


図11 光源操作での提示シーン

(2) 実験結果と考察

実験結果を表2に示す。これによると、

- (1)視点も光源も視覚化形状を有するものは、無いものより、画像作成時間が短く、シーン作成の誤りも少ない。また、作成に要する時間もばらつきが少ない。
- (2)作成シーンと提示シーンの間の各環境要素の配置誤差は、
 - ①距離に関して、視点・光源とも視覚化の有効性はみられない。
 - ②角度に関して、光源の視覚化の有効性がみられない。

という結果が得られた。

操作要素の 形状の有無	平均作成時間 (秒)	平均作成 ミス回数	平均誤差距離 (cm)	平均誤差 角度(度)	作成時間 標準偏差
視点 有り	10.7	0.1	0.8	3.2	5.6
視点 無し	21.3	0.5	0.9	5.0	17.8
光源 有り	13.2	0.3	0.8	5.5	8.0
光源 無し	16.3	0.5	0.9	5.7	12.0

表2 提示シーン作成時間と操作誤差

上記の結果から、以下のことが考察できる。

- (1) 視点や光源を視覚化した場合、ユーザはこれら要素の位置・方向の属性値を画像イメージとして理解するため、ユーザの頭の中の画像シーンを直観的に作成できる。しかし、視覚化しない場合、ユーザは、これら属性値を数値化して操作しようとするため、直観的な操作が妨げられる。
- (2) 奥行き方向の位置をユーザに提示する表現が欠如していたため、視点や光源を視覚化しても距離的な誤差が生じた。
- (3) 光源の場合、方向性を明確に表現する視点領域のような形状を与えなかったため、角度に対する操作精度が低くなった。

以上のことより、視点・光源を視覚化する場合には、これら環境要素の位置・方向・有効範囲をユーザに提示する必要があり、特に位置に関しては、奥行きの提示が重要であることがわかった。

5 おわりに

今回、従来の3次元グラフィックスシステムの操作性を向上する目的で、物体や視点・光源等を直接的かつ直観的に操作できる3次元直接操作I/Fシステムを試作した。このシステムに於いて、物体を容易に選択するためのビームカーソル手法を開発し、その物体選択性能について評価した。この結果、ビームカーソルは、従来の3次元カーソルより高速かつ正確に物体を指示できることを確認し

た。また、このビームカーソル手法を用いて視点や光源などの環境要素をも直接操作するための統合化直接操作環境を開発し、その視覚化機能による有効性を評価した。その結果、従来の視覚化機能を有さないものより、高速かつ正確に視点・光源という環境要素を移動・配置できることを確認した。また、これらの要素を視覚化する場合、3次元仮想空間中の位置・方向・有効範囲を示す形状で表現する必要があることが分かった。特に、位置に関しては、ユーザに奥行き方向を明示することが重要であることが分かった。

今後は、評価で明確になった問題点を基にシステムの改良を行い、形状の加工変形や正確な配置が行える直接操作インタフェースシステムを研究開発する予定である。

[謝辞]

本稿作成にあたり、多大な御指導を頂いた山崎正人氏(本研究所部長)、三輪道雄氏(プロジェクトリダ)及び、快く被験者を引き受けて下さった当研究室諸氏に深く感謝致します。

[参考文献]

- [1] 目黒秀明, "CG技術の活用に関する研究 - 三次元図形データの入力技術 -", 長野県技術情報試験場研究報告, No. 5, 1989.
- [2] 大野邦夫, "ポインティングデバイスの最新動向", pixel (No.43), pp75-81, 1986.
- [3] 関根弘隆, 栗島廣克, "平面カーソルを用いた対話的形状モデリング", 情報処理学会グラフィックスとCAD研究会報告, 28-1, 1987.
- [4] Emanuel Sachs, Andrew Roberts & David Stoops, "3DRAW: A Tool For The Conceptual Design of Three Dimensional Shape", CHI'90 Formal Video Program, 1990.