



Title	画像認識による3次元情報入力装置の開発と評価
Author(s)	飯尾, 淳
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/83
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

学位論文

画像認識による 3 次元情報入力装置の 開発と評価

飯尾 淳

博士（工学）論文提出先

大阪大学大学院基礎工学研究科
システム創成専攻 システム科学領域

平成 20 年 9 月

論文要旨

近年、3次元情報の表現は非常に身近なものとなった。その一方で3次元情報の入力や理解、伝送、圧縮といった各種の3次元情報処理技術はまだ未整備の部分が多い。またカメラ等による画像入力装置が一般化し、画像情報処理もセキュリティ分野だけでなくITSやユーザインタフェースなど様々な分野で活用が進んでいる。そこで本研究では、画像認識を応用した3次元情報入力装置の開発とそのユーザビリティ評価を実施した。

本研究では、まずシステムの画面に相対したユーザの頭部位置を実時間計測し、3次元情報入力に応用するシステムについて検討する。具体的には、仮想空間上で透視投影変換を行う際のカメラ視点制御を実空間上におけるユーザ視点位置の計測結果を用いて行うことにより、より直感的に3次元オブジェクトを描画するシステムを開発した。ユーザの頭部位置計測はステレオカメラによる視差情報を利用して実施する。

開発したプロトタイプシステムは、実際の利用を想定してユーザによる主観的および客観的評価を実施した。主観的評価はSD法を活用し、因子分析による要因の推定と現在汎用的に利用されているポインティングデバイスであるマウス等による既存手法との比較を実施、提案手法の有用性に関する分析を行った。その結果、提案手法は親しみやすさに優れている一方で安定性や慣れといった観点で改良の余地があることが判明した。

続いて、レーザポインタとカメラを用いた3次元情報入力装置の開発と評価を行った。開発した情報入力装置は、レーザポインタから照射されるレーザビームを分岐させるアタッチメントと、平面に照射されるパターンを認識するカメラから構成される。平面に映し出された四角形パターンから、レーザポインタの先端に装着したアタッチメントを頂点とし各レーザ光が各辺を構成する四角錐の位置と向きを推定することができる。その結果、レーザポインタ先端の位置および向きを計測することができ、その結果を仮想空間上における3次元オブジェクトの描画に反映させることで、直感的な操作を可能とする。

レーザポインタによる3次元情報入力装置についても、頭部位置計測によるものと同様の客観的評価および主観的評価を実施した。その結果、頭部位置計測によるものと同様、3次元情報入力装置として直感的な操作を実現し、かつ、高い親しみやすさを持つことが示された。またレーザポインタを利用した3次元情報入力装置の開発においては、合わせ鏡によるもの、四角錐型のプリズムを使用するもの、回折格子を利用するものを検討し、その優劣について検討した。

さらに、これら提案したシステムのユーザビリティを主観的に評価する手法として用いたSD法について、その評価尺度である形容詞対の選択についての妥当性を検討した。SD法はユーザビリティ評価にしばしば利用されるが、その評価尺度の選択に関して系統立てた分析は行われてこなかった。そこで本研究では類似の研究事例から形容詞対を収集し、ユーザビリティ評価に利用できる形容詞対尺度の再構成を行うための実験を実施した。その結果、段階的な評価指標として利用できる13個の形容詞対を抽出することができた。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	3次元情報入力手段の概要	2
1.2.1	3次元仮想空間におけるオブジェクト操作	3
1.2.2	従来型情報入力機器による操作	4
1.2.3	3次元情報入力機器	7
1.3	画像認識を用いた3次元情報入力に関する従来研究	10
1.3.1	ステレオ画像計測を用いた手法に対する関連研究	10
1.3.2	ビジョンベース3次元情報入力デバイスに関する関連研究	11
1.4	SD法を用いたユーザインタフェースの主観的評価	12
1.4.1	SD法による評価尺度の考え方	13
1.4.2	既存の類似研究例	16
1.4.3	既存研究における形容詞対選択のパターン	17
1.5	本論文における研究方針	18
1.6	本論文の構成	18
第2章	頭部位置計測による3次元モデル表示系	21
2.1	3次元情報入力手段としてのユーザ認識	21
2.1.1	3次元ユーザインタフェースの課題	21
2.1.2	システム概要	22
2.1.3	システム実現上の課題と解決策	22
2.1.4	システム構成	24
2.2	頭部位置のトラッキング	25
2.2.1	本手法の概要	25
2.2.2	視差マップによる背景分離	25
2.2.3	実空間上における視点位置の抽出	26
2.2.4	実空間上における頭部位置の推定	27
2.3	ユーザビリティ評価実験	28
2.3.1	評価アプリケーション	28
2.3.2	SD法による評価実験の手順	29
2.3.3	情報検索実験の手順	31
2.4	実験の結果と考察	31
2.4.1	評価尺度の妥当性に関する検討	32
2.4.2	両システムの操作性に関する評価	34

2.4.3	情報検索効率の評価	34
2.4.4	インタフェースの特性に関する留意点	34
2.5	まとめ	35
第3章	レーザポインタによる3次元情報入力装置	37
3.1	レーザポインタによる3次元情報入力装置の概要	37
3.1.1	既存課題の解決	37
3.1.2	システム概要	39
3.1.3	マルチスポット・レーザポインタ	40
3.2	3次元情報の推定	41
3.2.1	本手法の概要	41
3.2.2	スポット位置の推定	42
3.2.3	レーザポインタ先端位置の推定	42
3.2.4	認識可能領域の範囲	45
3.3	ユーザビリティの評価	47
3.3.1	評価アプリケーション	47
3.3.2	評価実験の手順	47
3.3.3	SD法による主観的評価	48
3.3.4	利用効率，操作感に対する客観的評価	50
3.4	実験の結果と考察	50
3.4.1	評価尺度を構成する因子の解釈	50
3.4.2	両システムの操作性に関する主観評価	52
3.4.3	同時操作の自由度を増やした場合の評価	53
3.4.4	利用効率，操作性に関する客観評価	55
3.4.5	提案手法の課題と応用分野	56
3.5	まとめ	56
第4章	3次元情報入力装置の改良	59
4.1	既存提案手法の課題と解決策	59
4.1.1	直接操作の実現	59
4.1.2	レーザポインタアタッチメントの改良	60
4.2	改良手法による3次元位置推定	63
4.2.1	レーザパターンの認識	63
4.2.2	レーザポインタ先端位置の推定	67
4.3	回折格子の利用による改良	67
4.3.1	回折格子を利用したレーザの分岐	68
4.3.2	改良版レーザポインタアタッチメント	68
4.4	3次元CGアプリケーションへの適用	71
4.5	まとめ	72

第 5 章	SD 法によるユーザビリティ評価尺度の選択に関する妥当性の検討	73
5.1	適切な形容詞対の選択に向けた実験	73
5.1.1	形容詞対の収集	73
5.1.2	形容詞対選択の手順	74
5.2	実験結果の整理と分析	75
5.2.1	形容詞対の選択	75
5.2.2	選択された形容詞対の評価	79
5.3	3次元情報入力装置の評価実験で利用した形容詞対との比較	81
5.4	まとめ	82
第 6 章	結論	85
6.1	本論文のまとめ	85
6.2	今後の課題	86
	謝辞	89
	参考文献	91
	研究業績	99

目 次

1.1	3次元情報の入力と出力	3
1.2	3次元モデルの透視投影変換によるレンダリング	3
1.3	従来型デバイスによる操作を前提としたアプリケーション	6
1.4	シリアルリンク (左), パラレルリンク (中), パラレルワイヤ (右) の例	8
1.5	Osgood の 76 形容詞対における主要 3 因子	15
1.6	評価グリッド法の評価用語分類	15
1.7	棟近による評価用語分類	15
2.1	本提案手法によるアプリケーションの概要	23
2.2	システム構成とデータの流れ	24
2.3	トラッキング範囲の自動調整	27
2.4	マウスによる従来型の 3 次元モデル操作	29
2.5	バーチャル地球儀に記載された都市名	31
2.6	両システムのプロフィール	33
3.1	システムの操作イメージ	38
3.2	アプリケーション例	38
3.3	複数スポットの認識	39
3.4	システム構成	40
3.5	レーザ光の分岐	41
3.6	レーザポインタ先端位置の推定	44
3.7	レーザポインタ先端までの距離と方向	44
3.8	認識可能領域の範囲 (XZ 平面上)	46
3.9	対象範囲の計測結果	46
3.10	既存手法	48
3.11	評価実験のタスク	48
3.12	両システムのプロフィール	52
3.13	提案システムおよび改良を加えたシステムのプロフィール	54
4.1	既提案手法の利用イメージ	60
4.2	直接操作の実現	61
4.3	プリズム (左) と実装 (右)	62
4.4	プリズムによるレーザ光の分岐	62
4.5	レーザパターンの認識	64
4.6	四角形頂点の推定	65

4.7	四角形頂点画素の選択	66
4.8	四角形頂点のトラッキング	66
4.9	レーザ光の回折	69
4.10	回折格子によるレーザスポットの拡散	69
4.11	分光シート (左) と実装 (右)	70
4.12	回折格子とフィルタを組み合わせたレーザの分岐	70
4.13	アプリケーションへの適用例	71
5.1	アンケートのシート (抜粋)	76
5.2	ユーザビリティ評価の模式図	81
5.3	形容詞対の対応	82

表 目 次

1.1	3次元情報入力装置の分類例	8
2.1	質問紙に記載した評価尺度 (1)	30
2.2	因子分析の結果	32
2.3	7段階の評価値に関する平均と標準偏差	33
2.4	情報検索に要した時間の平均と標準偏差	34
3.1	質問紙に記載した評価尺度 (2)	49
3.2	因子分析の結果 (因子数3の場合)	51
3.3	因子分析の結果	51
3.4	7段階の評価値に関する平均と標準偏差	53
3.5	7段階の評価値に関する平均と標準偏差 (改良前後)	54
3.6	タスク遂行に要した時間の平均と標準偏差	55
3.7	操作感評価に要した時間の平均と標準偏差	55
3.8	被験者による代表的なコメント	56
5.1	既存の類似研究から収集した形容詞対	77
5.2	アンケートにより抽出された形容詞対	78
5.3	類似形容詞対の抽出	78
5.4	最終的に抽出された形容詞対	78
5.5	因子分析の結果	79
5.6	ユーザビリティを評価する汎用的な評価尺度	80

第1章 序論

コンピュータグラフィックスやモデリング技術の進化により，3次元情報のレンダリングは非常に身近な技術となった．現在の日常生活において，3次元処理による表現はごく自然なものとして認識されている．一方で，3次元情報の入力や理解，伝送，圧縮といった各種の3次元情報処理技術は未解決の問題も多い．

本章では，本研究の序論として研究の背景と目的を述べ，3次元情報入力手段の概要を整理する．またSD法による主観的評価の概要についても簡単に紹介する．さらに従来より実施されて来た関連研究を紹介し，本論文における研究方針と本論文の構成について述べる．

なお本論文において3次元情報という用語は，3次元空間における位置と姿勢の6自由度のことを意味するものとする．

1.1 研究の背景と目的

実用レベルでのコンピュータのユーザインタフェースとしては，キーボードとマウス（あるいはタッチパッドなどその他のポインティングデバイス）を併用した入力インタフェースとGUI (Graphical User Interface) の組合せが，古くから現在まで主流となっている．この組合せを基本として幾多の新しい方式が提案されているが，未だキーボードとマウスを置き換えるまでには至っていない．

一方で，よりユーザフレンドリなインタフェースの実用化を目指して，様々な方式によるPUI (Perceptual User Interface) に関する研究が行なわれている．PUIは，現在コンピュータとのインタフェースとして日常的に利用されているGUIよりも「自然なインタフェース」として位置付けられる次世代のユーザインタフェースである．コンピュータへの入力手段としてジェスチャーや音声など人間同士のコミュニケーションに用いられる意思伝達手段が利用され，また出力には映像や音声，触覚といった，より感覚的な情報提供を活用するため，既存のUIと比べてより「知覚的 (perceptual)」なインタフェースであると考えられている．

とくに入力インタフェースに関しては，画像入力デバイスとしてカメラおよびコンピュータの画像入力インタフェース自身が安価で身近なものとなった今日，ユーザの挙動を撮影した画像をリアルタイムに解析することで入力インタフェースとして利用するPUI関連研究も多い[1, 2]．本論文で述べる方式に類似の頭部位置を利用したPUI研究の例もある[3]．

またコンピュータのユーザインタフェースだけではなく，広義の意味でシステムとのインタラクションを想定すると，ロボットとのコミュニケーションも大きなテーマの1つである．ロボットとのインタラクションを考慮した場合，そもそもキーボードやマウスの使

用は前提となり得ない．エンターテインメント機器の操作に関しても同様である．このようにロボットやエンターテインメント機器等における利用場面で情報のやりとりが求められる状況では，本研究で提案する手法のようなPUIが効果的である．

ところで，3次元CGやCADによる設計支援等，コンピュータによって3次元空間を直接扱う作業はいまや日常的なものとなった．しかし，3次元情報，すなわち3次元空間における位置および姿勢（回転）に関する情報の「入力」に関しては，先に述べたようにコンピュータのユーザインタフェースとして通常利用されているマウスやタッチパッドといった既存のポインティングデバイスを利用した手法が，現在のところいまだ主流である．これらのデバイスの多くは縦横2自由度しか持たず，3次元位置制御に関する自由度を同時に満たすことができない．そのためこれらのデバイスには，直感的な操作性を提供できないという課題が存在する．

直感的な3次元情報入力を実現するためのデバイスに関する研究は多く，既に市販されているPHANTOM [4] 等，その一部は実用化されている．また加速度センサを利用した3次元情報入力手段が家庭用ゲーム機のコントローラとして採用されるなど，この分野に対する注目度も高い．

本論文では，3次元上における位置と向き of 6自由度を直感的に操作でき，また低コストかつ高精度な3次元情報入力手段の実現を目的として，画像認識を応用した3次元情報の入力方法を提案する．さらに各手法を装備したプロトタイプのアプリケーションを構築し，そのユーザビリティを評価する．またユーザビリティの評価手法に関して，効果的な評価手法の構築を検討する．

1.2 3次元情報入力手段の概要

3次元情報処理において，その表示系に関する技術はCGやCADで既に一般化し，また家庭用ゲーム機や3Dアニメーション，公共施設での展示で利用されているように，コンシューマレベルの技術としてひろく認知される段階に至っている．また3次元仮想空間における3次元モデルを2次元平面に投影して表示するだけでなく，各種の3次元表示装置（3Dディスプレイ）や裸眼立体視装置を介してそのまま表示する技術も普及する兆候を見せはじめている [5] ．

その一方で3次元情報の入力に目を向けると，前節で述べたようにごく一部で実用化されている製品がみられるものの，その用途が特別なアプリケーションに限定されていたり，入力される情報がおおまかな動作に限られるという精度面での課題が残されていたりという問題点がある（図1.1）．

現在コンピュータに対する標準的なユーザインタフェースであるGUIにおいては，2次元のポインティングデバイスとして「マウス」がデファクトスタンダードの位置を得ている．しかし3次元のポインティングデバイスとして標準的な手法は未だに確立されていない．3次元情報入力装置の実現には，センサ技術の向上や，人間の空間認知能力を上手に活用する知見，3次元情報を扱うアプリケーションのインタフェースに対するニーズと制約の整理，といった研究の余地がまだ残されている．2次元の情報入力と比較すると，3次元情報入力に関してはこれらの課題のそれぞれがより複雑になるため，現在のところまだ汎用の3次元情報入力装置の実現と普及には至っていない．

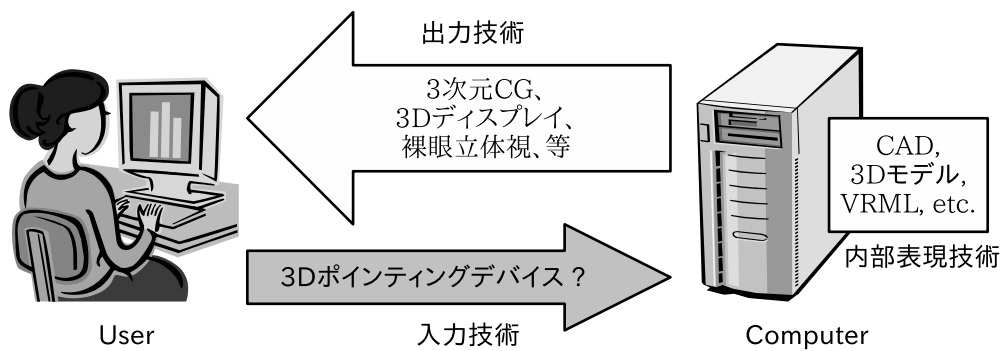


図 1.1: 3次元情報の入力と出力

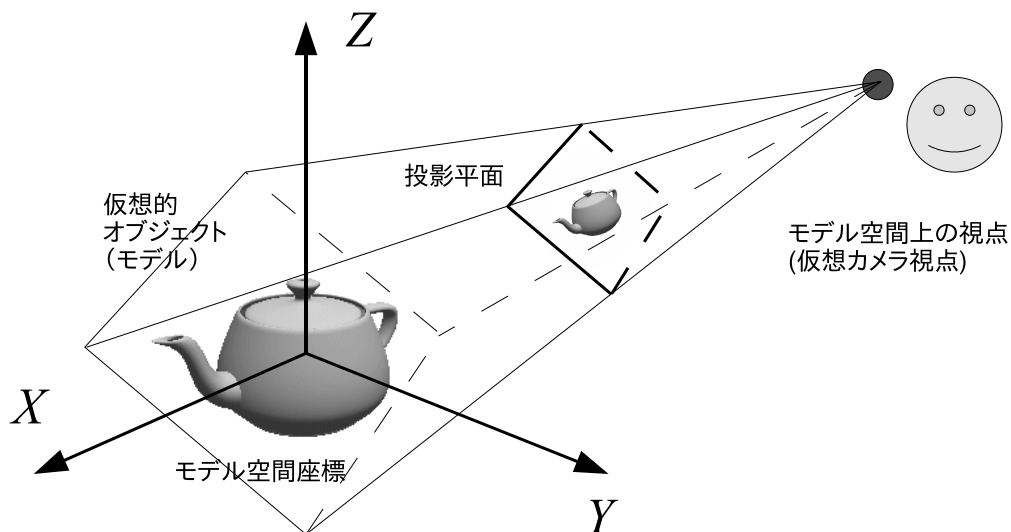


図 1.2: 3次元モデルの透視投影変換によるレンダリング

3次元情報入力への活用は様々なものが想定されているが、本論文では、3次元における位置情報のリアルタイム入力を効果的に利用するアプリケーションとして仮想空間における3次元モデルの描画を想定する。表示技術については現在主流の技術として一般的な2次元表示装置を用いるものとするが、同様の議論は3次元表示装置へ拡張して論じることができる。

1.2.1 3次元仮想空間におけるオブジェクト操作

まずはじめに、仮想空間における3次元モデルを一般的な2次元平面に投影してその形状を描画する状況を考える。

図 1.2 は、仮想空間に配置された3次元モデルと2次元に投影するカメラ視点の位置関係と、透視投影変換によって定まる2次元平面上の像を示すものである。

3次元空間における位置情報は、一般的に縦横高さ、すなわち XYZ 各軸方向の移動と、ロール (X 軸回りの回転)、ピッチ (Y 軸回りの回転)、ヨー (Z 軸回りの回転) の6つの自由度を持つ。一方、透視投影変換による像を描画する立場から、カメラとオブジェクトの位置関係でこれを表現すると、パン (水平方向の回転)、チルト (垂直方向の回転)、ローテーション (投影平面の中心とカメラを結ぶ軸に対する回転)、投影平面における上下左右2方向へのオブジェクトの移動、ズーム (カメラとオブジェクト間の距離) の6自由度ということになる。

仮想空間上の世界座標における絶対値を考慮せず、操作の対象とするオブジェクトが1つであれば、カメラの操作とオブジェクトの操作は、相対的な関係にある。以降では、カメラの位置および向きに関する操作とオブジェクトの操作を区別しないものとする。

なお投影変換の手法には透視投影変換の他に平行投影変換がある。平行投影変換の場合はカメラとオブジェクト間における距離の変化はレンダリングされる像に影響を与えず、したがってユーザが操作できる自由度の数は5つとなるが、平行投影変換は透視投影変換におけるカメラとオブジェクト間距離を無限にとった場合と考えることができるので、本論文においては平行投影変換は考えず、全て透視投影変換により3次元モデルを2次元上のスクリーンに投影するとして論じる。

一般の、いわゆる WIMP¹ による GUI においては、操作対象がデスクトップのメタファとして2次元平面で表現されており、縦横2自由度を持つマウス² やトラックボール、タッチパッドなどのポインティングデバイスをそのまま適用して直感的な操作を提供することが可能であった。しかし、前述のとおり3次元仮想空間におけるオブジェクト操作においては6自由度の操作が求められ、従来の2自由度しか持たないポインティングデバイスをそのまま適用したのでは不十分であるという大きな課題がある。

1.2.2 従来型情報入力機器による操作

3次元仮想空間におけるオブジェクトの操作には従来のポインティングデバイスが持つ操作の自由度が不足しているという課題に対する解決にはこれまでふたつのアプローチが取られてきた。1つは既存の入力装置を組み合わせたりソフトウェア側で工夫したりすることによって対応するアプローチと、3次元ポインティングデバイスを新たに開発するアプローチである。本研究は後者の立場を取るが、ここではまず既存のポインティングデバイスを利用する代表的な手法について述べる。

ポインティングデバイスが備える少ない自由度を利用して3次元空間上における位置と姿勢 (向き) の6自由度を制御するために、既存のアプリケーションでは以下の方法により操作対象とする軸を切り替えている。

- マウスボタンやキーボードとの併用
- GUI による操作モードの明示的な変更
- 仮想的なインタフェースの提示

¹ Window, Icon, Menu, Pointing device を活用したインタフェースを、その頭文字から WIMP と呼ぶ。

² 最近のマウスは中指で操作するホイールが内蔵されており、自然なやり方で自由度を増やしている。ただし本質的にはマウスの持つ操作の自由度は2個であるといえる。

マウスボタンやキーボードとの併用

多くのポインティングデバイスでは、位置を制御するデバイスの周囲に付随的なボタンやスイッチが備えられている。例えばマウスであれば、把持したときに指が置かれる位置に、それぞれの指で押し下げることができるように複数のマウスボタンが設置されている。通常の GUI においては、これらのボタンを併用することによってドラッグ・アンド・ドロップやコンテキストメニューのポップアップなど、各種操作の切り替えを実現する。

3次元モデルを操作する多くのアプリケーションでは、GUI における操作の自然な拡張として、ボタン押下を併用することによって操作対象とする制御の軸を切り替えることにより、空間上の6自由度に対する選択的な操作を実現する。またポインティングデバイスに付随するボタンやスイッチだけでなく、キーボードを併用し、いずれかのキーを押しながらポインティングデバイスを操作することで操作対象とする軸を切り替える場合もある。

なおマウスボタンを併用したマウス操作による3次元モデルの位置姿勢制御に関してその具体的な例は、第2章および第3章において比較対象とした従来型アプリケーションの操作方法としてそれぞれの章において説明する。

GUIによる操作モードの明示的な変更

また操作対象の軸を限定するモードを定義し、それらをGUIによって切り替える方法もしばしば利用される。具体的には、オブジェクトの平行移動、各軸を中心とする回転移動、ズームイン・ズームアウトをそれぞれのモードとして定義し、それらのモードにおいては縦横2自由度の操作を各モードにおける操作にマップすることで選択的な操作を実現する手法である。

通常、操作モードの切り替えにはメニューやボタンの提示が利用される。この方法には、モードの切り替えに毎回GUI操作が求められるという制約があり、慣れたユーザには負担になる場合がある。この問題を解消するためにキー操作によってモードの切り替えを実現することができるようにしているアプリケーションも多い。

仮想的なインタフェースの提示

操作対象とする軸を明示的に切り替えるために、仮想的な操作インタフェースをGUIで提示する例もある。スライダやボリュームコントロールのつまみを模したインタフェースを用意し、それらを通常のポインティングデバイスで制御することによって、縦横の操作をそれぞれの操作に変換する手法である。例えば、回転操作を表現するインタフェースを利用することで、2次元ポインティングデバイスによる縦横方向の操作を回転操作に自然に変換して操作することができる。

図1.3は、マウスやトラックボールなど既存の汎用ポインティングデバイスの利用を前提とした3次元モデルビューアの例である。図1.3上にGeomview [6]の操作ウィンドウと描画ウィンドウ、図1.3下にOpen Inventor³ [7]のウィンドウのスクリーンショットを示す。

³ Open Inventor は、3次元操作に特化した3次元マウスを利用することも可能であるが、3次元マウスを持たないユーザが簡単に利用できるように既存のポインティングデバイスによる操作が主となっている。

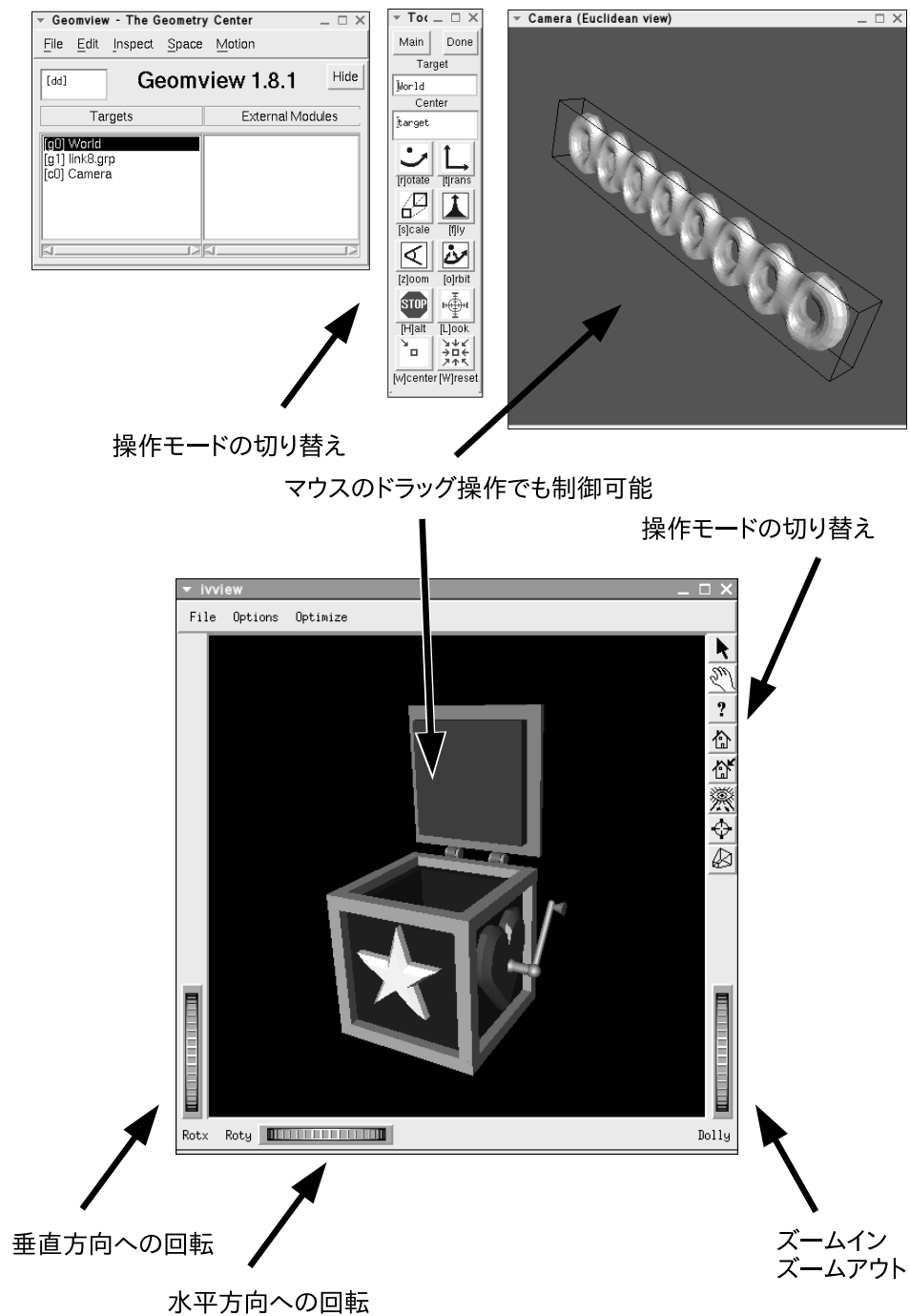


図 1.3: 従来型デバイスによる操作を前提としたアプリケーション

Geomview においては，中央のウィンドウ上に操作モードを切り替えるボタンが並べられるウィンドウが存在する．基本的には右側の描画ウィンドウ上でドラッグ操作を行うことでオブジェクトの位置と姿勢を操作することができるが，その操作と描画結果は選択されたモードに依存する．

Open Inventor でも同様に，ウィンドウの右側に操作モードを切り替えるボタンが並べられている．またウィンドウの左上に備えられたメニューから操作モードを切り替えることも可能である．さらに Open Inventor のウィンドウ下部には上下左右に対する回転やズームを制御する特別な GUI 部品が用意されており，それらを使用した自然なインタフェースの提供という工夫が加えられている．

以上，これまでのアプリケーションにおける既存のポインティングデバイスの効果的な利用方法と，3次元仮想空間でオブジェクトを操作する手法に関する様々な解について述べた．ただし，これらの手法は全て各自由度を選択的に操作することが大前提となっている．またいずれも平面での操作を3次元空間における操作にマップしているため操作が直感的ではなく，汎用的な手法が確立していないという問題も残されている．

1.2.3 3次元情報入力機器

汎用のポインティングデバイスを援用して3次元モデルを操作する各種の方法が開発されてきた一方で，新たに3次元情報入力に特化した専用のデバイスを開発する試みも古くから行われてきた．

Subramanian らは [8] において，既存の3次元ポインティングデバイス研究の分類を試みている．分類にあたり，自由度の数，操作空間と知覚空間の関係，操作範囲，操作種別といった基準を定義して各手法を整理している．

操作空間と知覚空間の関係について，ほとんどの手法では操作と知覚(表示)系は分離しているが，一部の手法では知覚空間内部で直接操作できるものもある．また操作の範囲については，人間の動作範囲を基準として端末サイズ (Tablet-size)，机上サイズ (Tabletop-size)，室内サイズ (Room-size) に大きく分類される．操作の種別は，オブジェクトを選択するのか (Selection)，オブジェクトの位置を操作するのか (Positioning)，オブジェクトを変形させるのか (Deforming) の区別⁴として定義される．

Subramanian らによる各手法の整理を表 1.1 に示す．なお本研究で実現した装置のうちとくにレーザポインタによる3次元情報入力装置は，自由度が6，操作空間と知覚空間は分離，操作範囲はパラメータの調整により端末から室内まで対応可能，操作種別は選択と位置操作に利用可能という情報入力装置として位置付けられる．

ところで本研究の目的は，画像認識を利用した3次元情報入力装置を開発し，より直感的な3次元ユーザインタフェースを提供することである．したがって，本論文では既存の3次元情報入力方式の整理にあたっては，どのようなセンシング技術を利用してユーザの操作に関する情報を獲得しているかに着目して代表的な手法を説明したい．以下では，3次元情報入力を実現するための技術的な観点から3次元ポインティングデバイスの実現法について述べる．なお画像認識による方式は関連研究として，次節において節を改めて述べることとする．

⁴ 表 1.1 においてはそれぞれ動作範囲を Tb/Tt/Rs，操作種別を S/P/D と略記した．

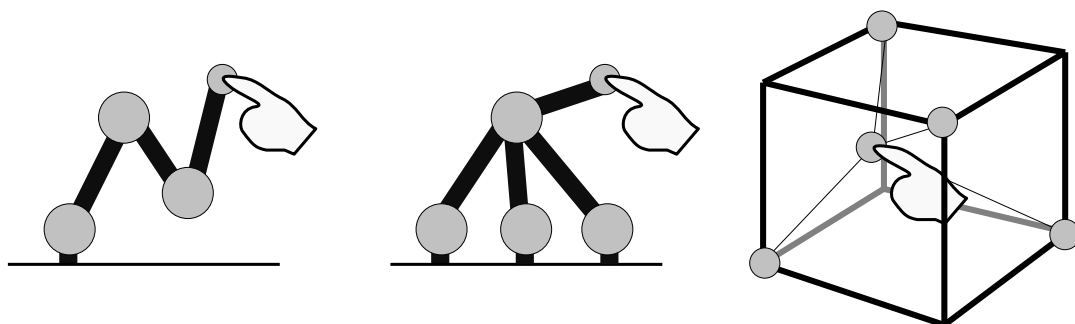


図 1.4: シリアルリンク (左), パラレルリンク (中), パラレルワイヤ (右) の例

表 1.1: 3次元情報入力装置の分類例

手法	自由度	操作-知覚	操作範囲	操作種別
Phantom [4]	6	分離	Tb, Tt	S, P
Bat [9, 10]	6	分離	Tb	S, P
Laser Pointer Pro	2	分離	Rs	S, P
JDCAD [11]	6	分離	Tb	S, P
Rockin' Mouse [12]	4	分離	Tb	S, P
3-Draw [13]	6 + 6	分離	Tb	S, P
Shape Deformer [14]	6	分離	Tb	D
Frog [15]	6	分離	Tb, Tt	S, P
Image Plane Intersection [16]	4 (最小)	統合	Tt, Rs	S, P, D
Passive Interface Prop [16]	4 (切断) / 2 (選択)	分離	Tb	S, P
Cubic Mouse [17]	6	分離	Tb, Tt	P
Chameleon [18]	6	分離	Tb, Tt, Rs	S, P
PIP [19]	6	統合	Tb, Tt	S, P
凡例			Tb - 端末サイズ Tt - 机上サイズ Rs - 室内サイズ	S - 選択 P - 位置 D - 変形

出典: Subramanian, S. and Jsselsteijn, W.I. [8]

メカニカルセンサによる3次元情報入力

メカニカルセンサを利用した3次元情報入力装置は古くから研究が進められており、既に実用化して製品として市販されているものも多い。これらの装置ではリンク機構やワイヤを利用し、各リンクの角度やワイヤの変位をを計測することによって先端の3次元位置を計測する(図1.4)。先に述べた PHANToM は、シリアルリンク機構を採用したデバイスであり、3次元情報入力装置としては代表的な位置をしめている。

また、装置の軽量化や高剛性化を狙いとして、パラレルリンク機構を採用したデバイスも提案され、こちらも現在は、Novint Technologies 社の Novint Falcon や Force Dimension 社の Omega X など、市販されているものが複数存在する。パラレルリンク機構による3次元情報入力装置の代表的なものとして、岩田らによる Haptic Master [20] がある。

リンクをワイヤに置き換えることで軽量化をさらに進めたものとして、パラレルワイヤ機構によるデバイスがある。この方法による装置は透明性が高いという特徴もあり、作業領域に映像を投影することで操作系と知覚系の統合を容易に実現できるという利点もある。パラレルワイヤ機構による3次元情報入力装置の代表的なものとしては、佐藤らによる SPIDAR [21] がある。

これらの装置に共通した特徴として、位置情報の入力だけでなくユーザに力を返すことにより情報を提示することができる力覚提示装置(Haptic Device)としても利用できる点がある。これはメカニカルセンサを利用していることから可能になる特徴である。3次元空間において複数自由度の情報を入力しようとする場合、空間での操作はユーザに不安定感を与える可能性がある。これらの力覚提示装置を用いることによりその不安感を払拭することができる。またあたかも仮想物体を直接操作しているような感覚を与えることができるという利点もある。

ただしこれらのデバイスは、端末サイズもしくは机上サイズで実装される傾向にある。Big SPIDAR [22] のように室内サイズへ拡大した試みもあるが、その原理から実現にはかなり大がかりな機構が必要となり、導入の難易度は高くなる。

非接触センサ等による3次元情報入力

VR や AR, MR での利用を想定する場合は、室内サイズの3次元ポインティングデバイスが必要になる。このようなケースでは、磁気センサ、赤外線センサ、超音波センサといった非接触センサが利用されることが多い。

磁気を利用した3次元ポインティングデバイスの代表的なものとして、Polhemus 社の Fastrak や Ascension 社の Flock of Birds がある。これらのシステムは、磁界発生源を利用環境に設置し、磁場が発生している内部で磁力センサを内蔵したセンサユニットを操作することでその3次元情報を入力するというものである。

また赤外線センサや超音波センサを利用した3次元ポインティングデバイスでは、複数のセンサと赤外線や超音波の発信器を組み合わせ、到達時間の差を利用して空間上の位置を測定する。この方式による3次元位置情報入力装置の例としては、InterSense 社の IS シリーズがある。この方式も利用環境に複数のセンサを設置しなければならず、そのコストが高いという問題がある。

また姿勢のセンシングにはジャイロセンサがしばしば利用される．加速度センサ，ジャイロセンサのように機器の内部に組み込まれたセンサからの情報を積算して3次元位置を求める方法もある．しかし一般のジャイロセンサにはドリフトにより徐々に姿勢がずれてしまうという問題がある．また加速度センサ(重力センサ)を利用した位置情報の取得は手軽である反面，装置それ自信の運動による加速度の影響を受けるため精度を上げることが難しいという課題もある．そのため，これらのセンサを利用する際には前述した非接触センサと組み合わせて1つの3次元位置情報入力装置を実現することが一般的である．

2次元情報入力機器の拡張による3次元情報入力

もっとも手軽かつ自然な実装としては，既存の2次元情報入力機器を拡張して3次元ポインティングデバイスを実現するものがある．ジョイスティックに近い機構を持ち，縦横の2方向に加えて上下方向にも変位センサを加え，さらに各軸を中心とする回転操作も可能とすることにより操作可能な自由度を増やすもの(3Dconnectoin社製 SpaceNavigator)や，単純に2自由度のポインティングデバイスを立方体上に組み合わせて自由度の数を増やすもの(Cubic Mouse [17])，通常のマウスを改造し内蔵のボールを2個とすることで縦横の平行移動操作に加えて鉛直線を軸とする回転も可能としたもの(Two-Ball Mouse [23])など，様々な製品や研究例がある．

現在のマウスでは，中指で前後に操作するホイールが備えられているものも多い．このホイールによる操作の追加はそれまで2自由度しか持たなかったマウスに新しく操作可能な1自由度を加えたという点で画期的であり，またその自然な操作感がユーザにひろく受け入れられ，普及が進んでいる．3次元仮想空間の中でオブジェクトを操作するソフトウェアではこのホイールの操作をズームイン・ズームアウトに割り当てているものがあり，この拡張は，オブジェクトの操作を平行移動(または回転移動)とズーム操作に限るという制約が与えられた場合には非常に自然な3次元情報入力の手段となっている．

1.3 画像認識を用いた3次元情報入力に関する従来研究

従来より画像認識をユーザインタフェースに応用する研究は非常に数多くの研究が行われており，その中で，3次元情報入力に画像認識を利用する研究も多くの従来研究が存在する．

本節では，本論文で議論するステレオ画像計測を用いた3次元情報入力手法に関する関連研究と，ビジョンベースの3次元情報入力装置に関する関連研究について整理する．とくに後者においては，本研究と関連の深い，レーザポインタの軌跡をユーザインタフェースに応用する関連研究を中心に，従来研究について述べる．

1.3.1 ステレオ画像計測を用いた手法に対する関連研究

ステレオ画像計測を用いたユーザ頭部位置の3次元位置計測方法は，様々な方法が提案されている．本節ではまず今回評価の対象としたシステムに類似の研究を挙げる．

テンプレートマッチを用いたステレオ顔画像トラッキングとして、松本ら [24] が、実際にかかなり高い精度で動作する優れたプロトタイプシステムを提示している。このシステムでは大まかな顔のテンプレートで探索範囲を限定し、その後、目鼻口などの細かな部品のテンプレートを用いて顔の正確な向きを特定する。

また Gorondnichy らによる Stereo Tracker [25] も、顔位置情報の実時間計測をユーザインタフェースに応用した類似のシステムの研究である。Stereo Tracker は市販の安価な USB カメラ 2 個を用いてステレオカメラを構成し、比較的ロバストな 3 次元視点位置認識を実現する。またその結果を 3 次元モデル表示に実時間で反映するシステムを提案しており、筆者らが提案するインタフェースに似たアプリケーションを示している。

米元ら [27, 28] の研究も、ユーザの動作を仮想カメラ視点制御に反映させるという点で本研究と類似した研究例である。この研究においては複数のカメラにおいて肌色領域を検出し、その対応関係から 3 次元空間上の位置推定を行ったうえで、仮想空間上のカメラ視点制御を行っている。

また竹村ら [29] は、頭部位置と向きを計測した結果を複数のコンピュータに対する操作対象の切り替えへ応用している。ただしこの研究では、ブラインドタッチができないユーザはディスプレイを注視しないために提案手法を利用することができないという欠点が指摘されている。

頭部位置計測を応用したユーザインタフェースに関するユーザビリティ評価の方法としては、北島ら [30] の研究ではいくつかのタスクを想定してその処理にかかる時間を計測することで各方式の評価を行なっている。ユーザインタフェースそのもののユーザビリティを評価する場合、客観的評価もさることながら主観評価も重要な意味を持つ。視線を入力に用いたインタフェースの評価に関する研究例では、Lyons �ら [31] が ISO9241-9 [32] によるタスクを適用して客観的評価および主観的評価を実施している。ただし同標準は現在の平面ポインティングデバイスを想定した評価指標を述べており、今回のシステムに対する評価にそのまま適用することはできない。

これらの状況を鑑みると、頭部位置計測を利用したユーザインタフェースは要素技術の提案段階から実システムの実現段階へと移りつつあり、まさにユーザビリティ評価とその結果による実用化研究が求められている時期にあるといえる。

1.3.2 ビジョンベース 3 次元情報入力デバイスに関する関連研究

レーザポインタとカメラを用いた 3 次元情報入力装置の研究としては、本提案手法と類似の手法として和田ら [33] によるものがある。和田らが提案しているシステムは、2 組のレーザ発光装置を用い、一方のレーザ光を円柱鏡面に反射させ、もう一方のレーザ光を中心とする円錐状のレーザ光を投影する。この手法には、投影像が円に近いときに誤差が生じやすいという問題点がある。この問題は、実際の利用状況においては上方から鉛直に近い方向で操作することが多いことを考慮すると、操作性を阻害する大きな要因になる可能性がある。

方法は異なるがレーザポインタと画像認識による 3 次元ポインティングデバイスの一例として、Schroering ら [34] による研究がある。彼らのアプローチは、半透過型の板とレーザポインタを両手に持ち、板の位置とその上に乗るレーザスポット位置の認識を同時に行

うことにより3次元的な位置を推定するという方式である．この方式には，半透過型の板とレーザポインタをそれぞれの手で持たなければならないため片手で操作できないという課題がある．

また，レーザポインタと画像認識を組み合わせることで2次元上の位置制御を目的とした一般的なポインティングデバイスとして利用する試みに関しては，LumiPoint [35]，Smarter Presentations [36]，CollabPointer [37]，Remote Pointer [38, 39] 等，非常に多くの研究が行われている．

LumiPoint [35] は，大画面に対して複数のユーザが個々のレーザポインタをペンデバイスとして利用する手法である．Cheng ら [40] は赤外光レーザポインタを利用して，また Remote Pointer [39] はレーザスポットの軌跡を解釈することで，スクリーン上に存在する2次元オブジェクトを操作するインタフェースを提供する．また Olsen ら [41] は，レーザポインタとカメラによるインタフェースにおける数値やテキスト入力の手法を提案している．

Smarter Presentations [36] は，とくにプレゼンテーションを実施する際に効果的な，レーザポインタによる操作機能を提供する．

また CollabPointer [37] は，無線通信機能を内蔵した特殊なレーザポインタを用い，遠隔ポインティングデバイスとして活用しつつ複数のユーザによるコミュニケーション支援を目指すものである．

なおレーザポインタを用いたインタラクションは精度が不足しがちであることが指摘されており，Myers ら [42] によってそのパフォーマンスに関して他のデバイスとの比較実験が行われている．また机上という特別な状況に限定したケースではあるが，Parker ら [43] もレーザポインタによるポインティングデバイスとペンデバイスとの比較を行っており，近くに存在する小さなオブジェクトを指し示す場合はペンデバイスのほうが有効という結論を示している．

そのような状況を鑑み，Ahlborn ら [44] は，ロバストかつ効率的なレーザスポット検出手法を提案している．また Kuo ら [45] はレーザスポットの検出精度を向上させる工夫として，回折フィルタを利用した方法を提案している．この方法は，回折フィルタを適用することで背景の画像をぼかし，一方でレーザのスポットが特定のパターンに変化するという特性を利用している．

その他，ビジョンベースの3次元ポインティングデバイス開発の試みとしては，Hinckley らによる VideoMouse [46] がある．VideoMouse は，通常のマウスの底部にカメラを備え，特殊なパターンを記したマウスパッド上でマウスを操作する．3次元上の位置は，カメラが認識したパターン間の距離から推定する．

1.4 SD法を用いたユーザインタフェースの主観的評価

次に，開発した手法の評価に関する基本的な概念と関連研究について述べる．

ユーザインタフェースの使いやすさ，ユーザビリティを評価する手法には様々なものがある．本研究においては，提案する新たなユーザインタフェースの効果を客観的に評価するためにタスク遂行にかかる時間を評価するとともに，ユーザの感覚を尊重して「使いやすさ」という主観を多次元的かつ主観的に評価する方法を検討した．

多次元的な評価尺度を構成する主観的評価手法としてよく利用される測定法の 1 つに SD 法 (semantic differential method)[47] がある。SD 法とは、ユーザの抱いた印象をあらかじめ用意しておいた形容詞対⁵ の組で表現することで主観を定量的に測定するための手法である。

第 2 章および第 3 章で提案する手法に対する主観評価において評価指標として利用した形容詞対は、既存研究での利用例やプロトタイプを実際に利用した経験者からの意見に基づいて得られた形容詞を用いて決定した。第 5 章では、それらの実験において用意した評価指標の検討が不十分であったとの反省から、より適切な評価指標の利用を検討すべく実施した実験について報告する。本節では、SD 法における評価尺度の根本的な考え方について解説するとともに、SD 法を用いて分析を実施している類似の既存研究でどのように質問紙を構成しているかについて述べる。

1.4.1 SD 法による評価尺度の考え方

まず、SD 法で評価尺度として用いる各形容詞対の解釈方法を整理しておきたい。ここで整理した結果は、第 5 章で新たに検討を加えた情報機器のユーザビリティ評価セットの検討に際して参考になるだけでなく、SD 法による主観評価手法を包括的に振り返るための基礎的な考え方を提示するものである。

形容詞対選択に関する 3 つの分類

井上ら [48] は、日本における SD 法を利用した研究例において形容詞対尺度構成がどのように構成されているかの概要についてまとめている。それを踏まえ、本節ではまず、SD 法を利用する際の形容詞対の選び方を示す事例⁶ を便宜的に以下の 3 つに分類する。なおこの分類においては、形容詞の選び方に関してある程度の客観性を持つその理由に着目した。

1. Osgood の提唱した 76 形容詞対を利用
2. 形容詞に関する何らかの抽出プロセスにより収集したものを利用
3. 形容詞の評価構造に基づいて収集したものを利用

以下、各項目を簡単に説明する。

Osgood を参照 SD 法創始者の Osgood による 76 形容詞対 [47] から対象ドメインに合わせたものを選択するというケースである。なお、この Osgood による 76 形容詞対は 8 つの因子に分解され、そのうちの 3 因子の寄与が大きいことが確認されている。その 3 因子とは Evaluation (評価性)、Potency (力量性)、Activity (活動性) である。例えば、Evaluation として「明るい — 暗い」が、Potency として「男性的 — 女性的」が、Activity として「激しい — 穏やかな」が該当する (図 1.5)。

⁵ 厳密には形容詞だけでなく形容動詞や名詞で表現される場合もあるが、便宜上、以降の議論ではすべて「形容詞」もしくは「形容詞対」と表現する。

⁶ 次節で述べるように、SD 法を利用して何らかの評価を行う既存の研究では主観的に評価尺度を決めていたり、類似の研究例から引用する場合が多い。

抽出プロセスを利用 形容詞対を抽出するためのプロセスを明確に定義し、そのプロセスに従って 形容詞対を選定するケースである。形容詞対抽出の手段は、辞書などを用いて収集する、専門家に意見を求めて収集する、予備実験を実施する、過去の事例より引用する、などさまざまな方法が利用されている。

形容詞の評価構造を想定 このケースは2の発展系と考えることもできる。本ケースでは、形容詞を選定する際に目標となる一定の評価構造を想定した上で形容詞対セットを導出する。本ケースの代表的な手法としては、評価グリッド法[49]、棟近らのガイドライン[50]などが該当する。

評価グリッド法は多属性効用理論⁷に基づく評価構造を想定したうえで形容詞対セットを構成する(図1.6)。また棟近らのガイドラインにおいては、認知・知覚モデルと対応した階層モデルが想定される(図1.7)。これらはそれぞれ、心理学の分野での研究を踏まえたうえで建築環境学および感性工学の見地から導出されたモデルである。

評価構造を想定した形容詞対取舍選択の例

評価グリッド法ではまず、ある評価項目に対してラダーリングと呼ぶ作業を実施する。ラダーリングの過程では、その評価項目に対する上位、下位の評価項目を抽出する。その結果としてより上位の統合的判断と、より下位の要素的判断の集計を行う。評価グリッド法においてはこの作業の結果として、線形回帰型、もしくはネットワーク型の認知構造に対応する評価指標の集合が作成されることが想定されている。すなわちこの情報に基づきSD法に用いる形容詞対が選択されることになる。

一方、棟近らのガイドラインは、図1.7に示しているように「単感覚/複合感覚/心理的要因/嗜好」の4分類に適切な割合で形容詞対を含めるために用意されたものである。本ガイドラインは、人間の感覚が各形容詞によって表されるという考えをベースとしており、各形容詞対を適切に配置することによって単感覚から嗜好までの総合的な階層構造に対応した評価が可能になるという考え方である。

なお棟近らのガイドラインにおける単感覚から嗜好までの各分類はそれぞれ、人間の単一の感覚器官で識別できる刺激、複数の感覚器官で知覚する特性、心理的反応は複数の複合感覚の総合評価、評価対象への総合評価として位置付けられ、階層的な評価モデルを構成する。さらにこの階層モデルは「知覚→認知→記憶との照合・情緒的反応→行動」という図式で表される人間の認知・知覚モデルとも対応付けられる。

いずれにしても、形容詞対の集合をいくつかのサブセットに分割し、それらのサブセットから形容詞対を不偏的に選んで評価尺度を構成すべきであるという指摘が重要である。評価指標として用いる形容詞対の妥当性を判断する際には、このような一定の評価構造を想定したうえで各形容詞対を各分類に当てはめて評価尺度を構成することが必要であると考えられる。

⁷ 着目する行為をいくつかの選択肢から選択した結果として表現するという理論である。

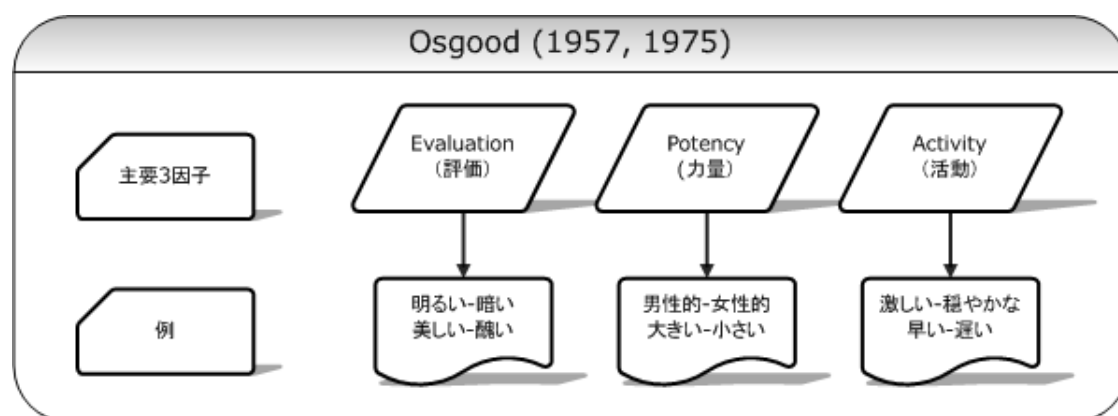


図 1.5: Osgood の 76 形容詞対における主要 3 因子

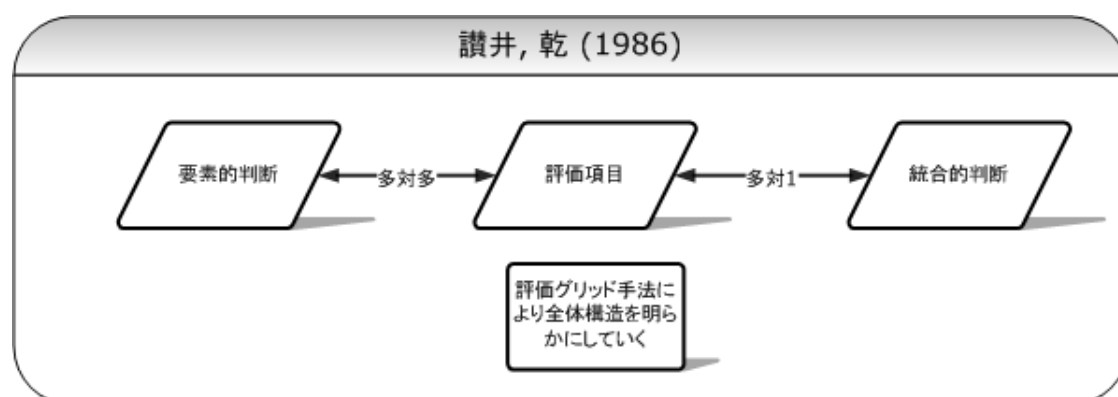


図 1.6: 評価グリッド法の評価用語分類

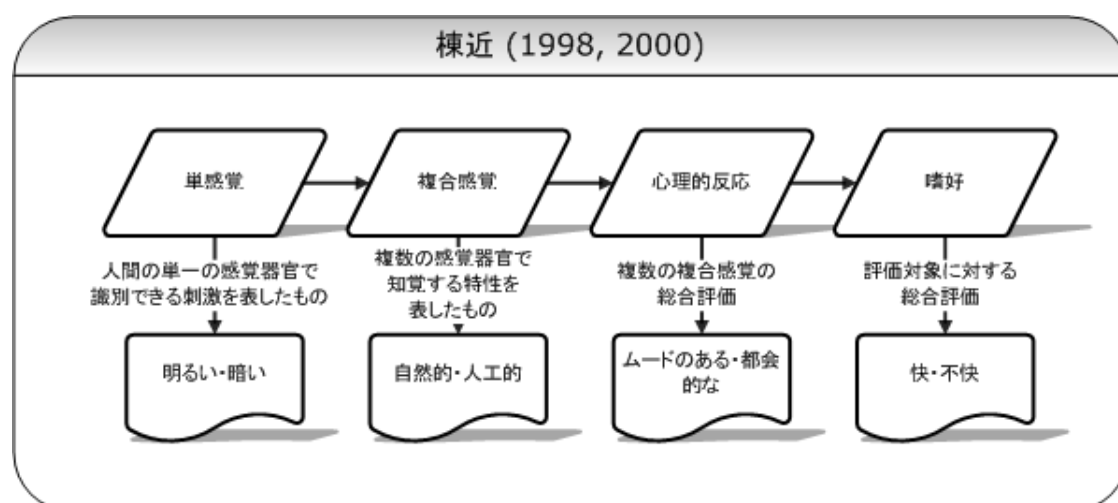


図 1.7: 棟近による評価用語分類

1.4.2 既存の類似研究例

ユーザインタフェース，コミュニケーション，通信，印象・イメージ・感覚⁸といった研究分野において，SD法による評価を実施した研究における形容詞対の選び方には，以下のような例がある．

恩田ら [51] は不可視なオブジェクトを可視化させることにより人に触覚的な質感を感じさせる表現を試みた．その表現が人の心理にどのような影響を与えるのかを評価している．形容詞対の選択に関しては，CGによる不可視なオブジェクトに対しての触覚評価の既存研究がないため明確な選定基準はないとしたうえで，木材や布などの分野の触覚評価に用いられる語句を参照し，鑑賞者のイメージを広くカバーできるように選定した．

山岸ら [52] は，サービスの豊かさを測る尺度を明確にするため様々な品質で提供される映像コミュニケーションサービスから受ける印象を分析した．290の形容詞対から7名の専門家によって45対が選ばれ，それらに対するアンケート分析により38個に絞りこんだ．山岸らは各種感性に対して形容詞対を均等に配分，特定の心理要因に偏らない抽出の実現に配慮している．

山本ら [53] は音声・ビデオ伝送において複数のコンテンツに対するユーザレベルのQoSを評価した．その評価にあたっては過去の様々な文献から多数の形容詞対を収集し，通信品質に関係するものとしらないものを音声とビデオに対して5組ずつ選定した．また河原ら [54] は音質に関する印象評価のモデル化を行った．その際に用いた形容詞対は予備的に実施したアンケートで決定した．

阿部 [55] は，スギ圧縮材のもつ感覚特性について，感触のみによる感触実験と視覚と触覚とあわせた感覚実験を行いその特性を明らかにした．ここで利用した形容詞対は，木工および家具工作に従事している，あるいは従事した経験のある専門家8名に対し，木材を評価する歳によく用いられる用語または木材をイメージする用語についてのアンケート調査実施により選ばれた．その際，触覚について8種類，視覚について9種類，両方に関する評価語を1種類として質問紙を構成した．

佐藤 [56] は生活空間に関連するプロダクトの色彩イメージの違いをSD法で評価した．利用した形容詞対は，従来の研究を参考に，色彩イメージを評価するうえで使用頻度が高く，評価性，活動性，力量性の因子に関係すると考えられるものをバランスよく含むように20個を選定した．

大石ら [57] は森林環境が人に与えるイメージと気分を比較した．既存の研究を参考に予備調査を行い，快適性を反映すると思われる評価尺度を主体に構成した．また，恒松ら [58] は街並みの「ゆらぎ」がどのような心理的特徴を持っているかを「構成要素の変化」について着目し明らかにすることを試みた．恒松らは既存の研究から91の形容詞対を収集し，3回の予備実験を行っている．評定尺度は似たような意味を持つ言葉の中に「ゆらぎ」が存在すると考え，「意味の近い尺度を並べる，また意味の違いを意識してもらうために似た意味の尺度を左右同じ側に置く」などの検討を行っている．

谷口ら [59] は，どのような庭園景に癒しを感じるかを明らかにする目的で国内外の庭園景の写真40枚を刺激としたイメージ調査を実施した．形容詞対の作成には，被験者に写真

⁸ 第5章においては実験対象としてTV電話に対する印象を測定したため，ここでは関連分野として通信やコミュニケーション分野まで幅を広げた．

を提示しそのイメージや感想を書いてもらった中から抽出した形容詞句を利用した．この手順で集められた57の形容詞句から類似の意味を持つ語句をまとめ、最終的には筆者の主観で適当と考えられるものを20個選定した．

小林ら[60]は、脳血管障害後遺症として摂食・嚥下障害を持つ患者と日常的に接している病棟に勤務する看護師とその他の病棟に勤務する看護師に対し、摂食・嚥下訓練に対するイメージを調査した．その際に利用された質問紙は、専門病棟の看護師の自由記述から形容詞を収集して作成した．

前堂[61]は、カウンセリングに関する自主的体験プログラムにおける学習体験が、学生が持っているカウンセリングに対するイメージにどのような影響を与えるかを調査した．利用した形容詞対は、学生3名に「カウンセリング」と聞いたときに思い浮かぶ形容詞を50個ずつ挙げてもらった中から3者の意見が一致したものと、筆者と中堅臨床心理士とで典型的なイメージと判断したものを採用した．

1.4.3 既存研究における形容詞対選択のパターン

形容詞選択に関わる一般的な判断の指針には、全ての被験者が理解できる表現を選ぶ、実験の目的がすぐに分かる内容のものは避ける、形容詞対を構成する際には適切な反意語を選び「～ではない」という表現は原則として使用しない、可能な限り感覚的・直感的なものを用いる、ほとんど同義語のような形容詞は1つで代表させる、といった基準がある．有効な評価を実現するためには、それらを踏まえたうえで、前節で述べたような評価構造を意識した形容詞選択が必要となる．

ここで挙げた研究例をみると、形容詞の選択方法には以下の3つのパターンが存在することが分かる．

1. 先行研究を参照
2. アンケートやヒアリング、予備実験等を実施
3. 質問紙設計者の主観で判断

第2章および第3章で報告する提案手法のSD法による評価実験においても、先行研究を参考にして形容詞対を選定し、質問紙を設計した．

山本ら[53]、佐藤[56]、大石ら[57]が実施したように、複数の先行事例から引用した上で取捨選択して質問紙を設計することもしばしば行われる．一方で、恩田ら[51]が主張するように、新規性の非常に高い分野においては参考にできる先行事例が存在せず、このような場合には別の基準で質問紙を設計しなければならない．

アンケートもしくはヒアリングによって形容詞対を抽出する場合も多い．山岸ら[52]、河原ら[54]、阿部[55]による研究ではアンケートによる形容詞の絞り込みを行っている．また、谷口ら[59]、小林ら[60]、および前堂[61]は、自由記述テキストに含まれる形容詞もしくは被験者から自由に列挙してもらった形容詞を利用して質問紙を構成している．本研究でも、先行研究を参考にしたうえで、プロトタイプを試用した利用者からのコメントに含まれる形容詞も検討の対象とした．

また、これらの手法は組み合わせても利用される．既存研究から形容詞対を収集したうえでアンケートもしくはヒアリングにより取捨選択を行う方法である．また評価項目を反映すると思われる形容詞を中心に最後は主観的な判断が下される場合も多い．

1.5 本論文における研究方針

本章では、画像認識を用いた3次元情報入力に関する過去の研究事例を示した．これまで3次元情報入力の手法は様々な手法が提案されてきており、実際の現場で利用できるユーザインタフェース機器も提供されてはいるが、従来の手法の多くは特殊な機器を利用していたり、また提供されている機器も非常に高価であることが多い．直感的な3次元情報入力装置の普及に関しては、これまで特殊な機器が必要とされた点も課題の1つである．

このような状況を踏まえ、さらに実用化の可能性や普及への期待を鑑み、本研究では低コストで実現できることも重視する．本論文では、一般に入手できる機器および部品を活用して3次元情報入力装置を作成することを基本とする．

また提案する手法についてそのユーザビリティの評価を、タスク遂行時間などの客観的な評価とSD法による主観的な評価の両面で実施することで、より実際の利用者の立場に近付けた観点から行う．また主観評価の評価指標については、別途、独立した章を設けて議論する．

1.6 本論文の構成

本論文は6章で構成される．以下に本論文の概要をまとめる．

第1章では、本研究の背景と目的を述べた．3次元情報の入力に関して、直感的な情報入力が求められていることを示し、ユーザインタフェースに画像処理を応用して3次元情報入力を実現する研究の動向を紹介した．また画像処理による3次元情報入力装置の実現に関して、本研究で取り扱う課題と研究方針を述べた．

第2章では、頭部位置計測による3次元モデル表示系の実装と評価について述べる．ステレオカメラを利用して実空間におけるユーザの頭部位置を実時間で計測する手法を提案し、その応用として、提案手法を3次元モデルの表示系におけるユーザインタフェースとして利用するアプリケーションを例示する．また提案手法と既存手法を実装したそれぞれのアプリケーションを実際に被験者に使用させ、両者を比較することでそのユーザビリティを評価する実験を行うことで提案手法の有用性を示す．

第3章では、第2章で報告する実験から得られた知見に基づき、3次元情報を直感的に入力するユーザインタフェースとしてより可用性の高い方法について議論する．具体的には、レーザポインタの先端にレーザビーム分岐装置を装着することにより複数のレーザスポットを平面に照射し、そのパターンを画像認識により獲得、レーザスポットの位置関係からレーザポインタ先端の実空間上における位置と向きを計算する手法を応用した3次元情報入力手法を提案する．また第2章での評価と同様、第3章で提案する3次元情報入力手法を3次元モデル表示系に適用し、既存手法を備えたアプリケーションとの比較実験を行うことでその可能性を評価する．

第4章では、第3章で議論する3次元情報入力手法の改良について述べる。鏡の組合せによるレーザ光分岐方式の欠点を補い精度を向上させる方法として、プリズムを利用したレーザ光の分岐方法を提案し、またその結果得られるレーザパターンの認識方法と3次元位置推定への応用方法を示す。またもう1つの改善方法として、回折格子を利用したレーザ光の分岐と、その応用による装置の実装について述べる。

第5章では、第2章および第3章で議論するユーザインタフェースの主観的評価手法で利用するSD法における形容詞対の選択について述べる。類似の研究例から形容詞対を収集し、新しい情報機器の利用方法を評価する実験を通じて形容詞の取捨選択について論じる。その結果を用いて、新しいユーザインタフェースをSD法によって評価する場合に使用する形容詞対の選択はどうあるべきかを示す。

第6章で、論文全体のまとめとして、本研究で得られた知見を整理する。

第2章 頭部位置計測による3次元モデル表示系

本章では，ユーザの頭部位置を実時間で計測し，その結果を3次元モデル表示系の仮想カメラ視点制御に反映する手法について議論する．なお本章で示す手法の応用例として3次元モデル表示系へのユーザインタフェース適用を示したが，頭部位置計測による3次元情報入力にはロボットの操作へ応用することも可能である．

本提案の背景には，ユーザインタフェース分野における画像認識応用技術の研究開発を重視し，これまで，筆者らが別途開発を進めてきた動画像処理ライブラリ“MALib”[62]の応用研究として，ステレオカメラによりユーザの頭部位置を実時間で検出し，3次元位置情報入力装置として利用するシステムを開発してきた[63, 64, 65]という経緯がある．また，本インタフェースを応用する分野の1つとして考えられるロボットに関する研究についても，ヒューマノイドロボットと人間の協調動作[66]や，ヒューマノイドロボットが人間に与える心理的影響の評価に関する研究[67, 68]，画像認識を応用した新しいユーザインタフェースの提案[69]などを行ってきた．

本章では，CADやCGで多く利用されているようなオブジェクトモデルを3次元表示するシステムに対して筆者らが提案している操作系を適用したプロトタイプシステムを用意し，従来のマウス操作による操作系と比較することで，そのユーザビリティを評価する実験を実施した結果を報告する．

実験では，大阪大学大学院基礎工学研究科新井研究室の学生を中心として32名の被験者を集め，質問紙を用いた主観的評価実験を行なった．またより自然な操作を実現できていることを確認するため10名の被験者に情報検索のタスクを与え，その検索にかかる時間を測定した．

第2.1節および第2.2節において頭部位置計測による3次元モデル表示システムの概要を示し，第2.3節および第2.4節でそのユーザビリティ評価について報告する．

2.1 3次元情報入力手段としてのユーザ認識

まず提案している3次元モデル表示システムの概要を紹介する．

2.1.1 3次元ユーザインタフェースの課題

前章で述べたように，一般に，3次元空間における視点情報は位置と視線方向の6自由度を持つ．それに対してマウスなど通常のポインティングデバイスでは原則として平面上の制御となるため同時に操作できる自由度はたかだか2である．

多くの3次元モデルを扱う既存のソフトウェアにおいては、ボタンの併用やメニュー操作を用いて操作モードを切替えるなどの工夫により自由度の不足を補っているが、その操作は直感的ではなく操作しづらいという問題を抱えている。

2.1.2 システム概要

上記の課題を解決することを目的として、筆者らは実際のユーザがスクリーンをみる視線情報を直接利用することに着目し、実空間上におけるユーザの頭部位置をモデル空間における投影変換用カメラ位置に実時間で対応づけるアプローチによる3次元情報入力手法を実現した(図2.1)。この方法により、ユーザは3次元モデルの直感的な操作を体験することができる。

構築したプロトタイプシステムでは、3次元モデルの表示システムにおいて、実時間で検出したユーザの頭部位置情報をモデル空間における投影変換に関するカメラ位置制御に適用することにより、自然な3次元モデル表示の操作を実現する。

なお図2.1では投影変換で使用するカメラ位置を「視点」、ユーザの頭部位置を「観測点」と表現している。以降の文章においても、用語の使い方は図2.1に準じて記述する。

本提案によるユーザインタフェースを備えたシステムは、後述の実験結果からも明らかに示されるようにエンターテインメント性が高い。3次元情報を操作するシステムは、多くの場合に複雑な操作を要求するため操作の習得がシステム利用への敷居になりがちな傾向にある。本提案を採用することにより、3次元モデルを操作するソフトウェアが持つ操作の難しさを軽減することが期待できる。

また直感的な操作方法の提供により誤操作の可能性を低減することができ、作業効率の向上も期待できる。作業効率の向上に関しては、モデルを表示する視点操作から両手が開放されるため、マウスやキーボードによる操作を別の操作に割り当てることにより新たな操作手法を提示することも可能である。

2.1.3 システム実現上の課題と解決策

Gorondnichy らの Stereo Tracker [25] では実空間上の観測点座標とモデル空間上の視点位置をアフィン変換で線形に対応させる手法を提案している。筆者らのシステムも当初はその方法を採用していたが、モデル空間に配置する仮想的なモデルオブジェクトと視点の位置関係によってはモデルの背面が見られないなどの問題が生じるという課題を抱えていた。

また実際の操作では角度を変えて観察しようとした結果としてモデルとの距離が変化し、表示されるモデルの大きさが意図せず変わってしまうという扱いづらさが生じる場合がある。そこでこれらの問題を解決するため筆者らが以前から提案 [63] しているプロトタイプシステム(「バーチャル地球儀」)では基準となる位置からの移動量をモデルを中心とする極座標における角度の変化量に比例させるといった工夫を加え、より自然な操作を実現した。

さらに「バーチャル地球儀」の試作機が抱える問題点としては、システムが常にユーザを計測しているため逆にシステムがユーザに不要な制約を与えてしまい、ユーザに緊張を強いるという点が上げられた。

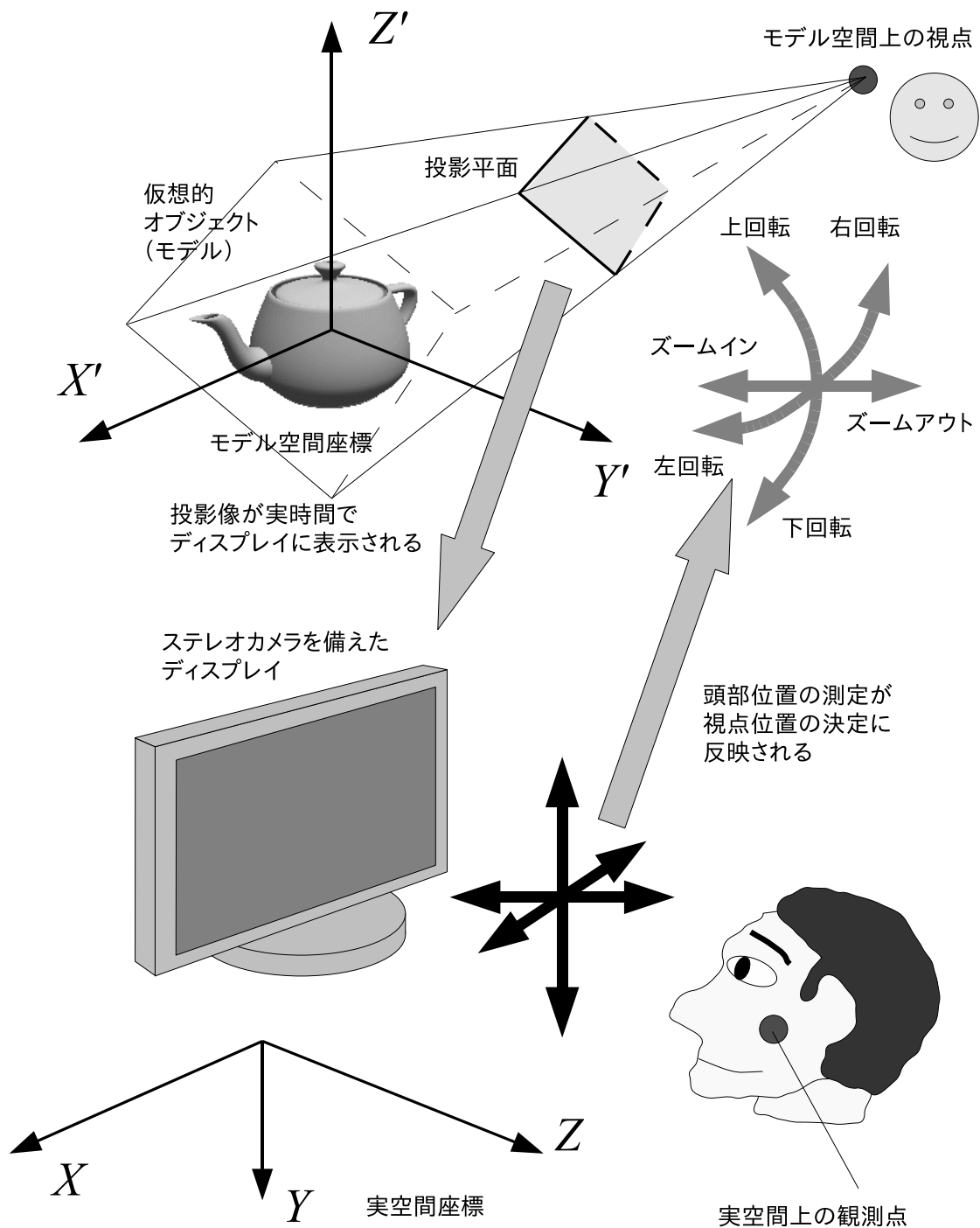


図 2.1: 本提案手法によるアプリケーションの概要

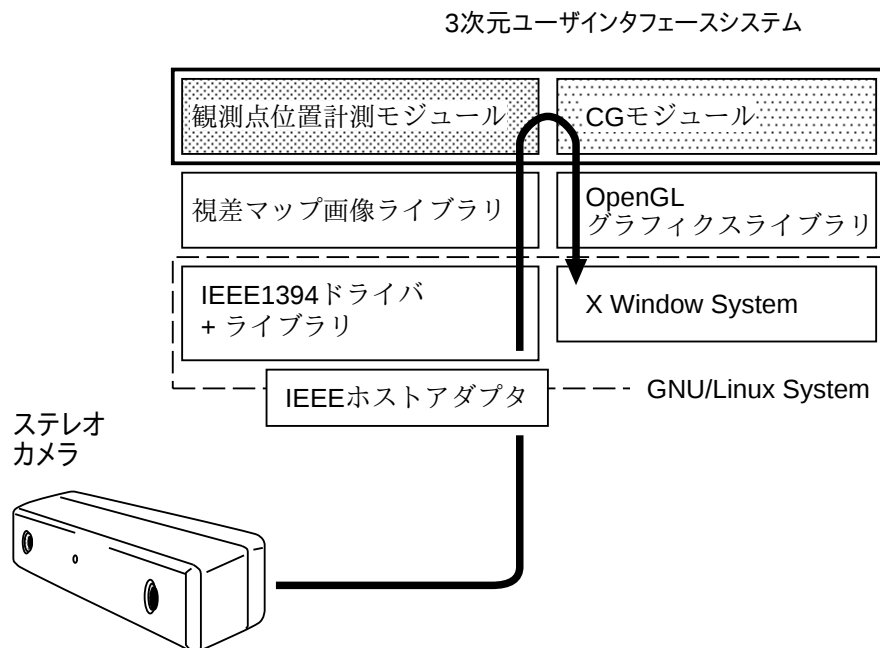


図 2.2: システム構成とデータの流れ

そこで本システムでは、ユーザ位置のホームポジションを仮定し、ホームポジションからユーザ頭部位置の大きな変化があったときのみ入力モードとなるようにした。別の見方をすれば、ホームポジションの「あそび」を大きめにしておくことにより、非入力モードでの安定性を実現したともいえる。

2.1.4 システム構成

システムのソフトウェア構成を図 2.2 に示す。本システムは、観測点を実時間で追跡するユーザ視点計測モジュールと3次元モデルを都度描画するCGモジュールから構成されている。

図 2.2 はまた、ステレオカメラで撮影した画像からCGモデル生成までのデータフローの概念も示す。図中の矢印の順序で進む処理を連続的に処理することでユーザインタフェースを実現する。

なお 1.8GHz の Pentium 4 PC による本プロトタイプシステムでは、VRML モデルの表示部を含めて 10 ~ 12fps 程度の処理速度を得ている。この動作性能であればユーザが利用上のストレスを感じることはほとんどない。その結果は実験の結果としても示された。また CPU 稼働率としてはこのユーザインタフェースの処理以外にアプリケーション特有の計算負荷をかける余地も残されており、ユーザインタフェースへの適用に関して十分な速度である。

2.2 頭部位置のトラッキング

本節では、今回の実験で評価したユーザの頭部位置トラッキング手法のアルゴリズムについて述べる。

2.2.1 本手法の概要

本提案手法ではユーザインタフェースへ適用することを考慮して、次の要素技術を組み合わせた実時間顔位置認識を実現する。

- 実時間で生成される視差画像を利用したユーザ画像と背景画像の分離
- 着目領域で切り出されたユーザ画像を構成する画素の加重平均による顔領域の逐次トラッキング

比較的単純なアルゴリズムで実現しているため、本手法は個々のユーザに固有の条件や環境の変化に強い点が特長である。例えば頭部画像を構成する目鼻口等の個々の部品を認識して頭部位置を検出する手法では、より確実に認識を実現するために事前に学習を必要としたり、あるいは眼鏡や眼帯をしたユーザを正しく認識し難いという問題がある。また皮膚の色情報を用いる方式では、照明の変化といった環境の変化に不安定であるという課題を持つ。しかし本手法は既存の手法に大して比較的ロバストな認識性能を有し、実システムに組み込み設置するための制約条件も少ない。また計算量も少なく実時間システムとして実現でき、ユーザインタフェースへの応用に適している。実際に入力から表示までの遅延を感じることは全くなく、ユーザに対してストレスを与えない入力システムを提供できている。

2.2.2 視差マップによる背景分離

システムの原理に関する説明として、まずステレオカメラを用いた観測点位置の実時間検出手法について述べる。

本システムではステレオカメラとして PointGrey 社の Bumblebee を利用した。このカメラは2眼のレンズを内蔵しており、あらかじめ校正済みのカメラ情報を用いて視差を計算することができる。

ここで、カメラはスクリーン上部に設置されておりユーザはカメラおよびスクリーンに正対して座る、との仮定を置く。システムの設置状態と使用状況を考慮すると、この条件は妥当なものである。この仮定のもとで、視差マップを用いて入力画像 I から背景 I_b を分離し、ユーザ画像 I_u を抽出する操作を行なう。

視差 (Disparity) 値はステレオ画像の画素の相関に関連した値である。その画素の対象が遠い距離にあるほど両画像における対象は同じ位置にあるため視差の値は0に近づく。実際、次項で挙げる式 (2.4) に示されるように点 $X = (X, Y)$ における視差の値 $D(X, Y)$ は距離に反比例した値を取る。

先に述べた仮定から，ユーザはカメラから一定の距離の範囲内に存在するとして取扱ってよい．そこで各画素 X について以下の式を適用することにより，背景画像 I_b とユーザ画像 I_u を分離する．ここで， δ_D は視差の値 $D(X, Y)$ に関する閾値である．

$$X \in \begin{cases} I_u, & \text{if } D(X, Y) > \delta_D \\ I_b, & \text{if } D(X, Y) \leq \delta_D \end{cases} \quad (2.1)$$

なお δ_D は，カメラから背景までの距離が定められれば，後述する式 (2.4) からレンズの焦点距離と2眼レンズ間のベースライン長さをを用いて決定することができる．カメラからどれだけ離れたら背景とみなすかについては，実際のシステムの使用状況に応じて調整する余地が残る．

2.2.3 実空間上における視点位置の抽出

次に，分離されたユーザ画像から視点の位置を認識する．

ユーザインタフェースに適用する場合は処理の遅延が操作性の良し悪しに直接結び付く．そこで本提案手法では実時間性を損なわぬよう高速に処理できることを最優先し，ユーザ視点を次の近似で求める．

1. ユーザはシステムの正面に単独で座っているという仮定から，画像の中心付近にユーザの頭部が存在し，またユーザの顔領域は背景から分離されたユーザ画像の最上部に位置することが導かれる．
2. 実際の頭部位置の追跡においては，顔のトラッキングを行なう領域を設定する．この領域を「トラッキング領域」とする．トラッキング領域を式 (2.2) により逐次更新し，ユーザの頭部を追跡する．
3. ユーザの観測点は，トラッキング領域に含まれる I_u の重心で近似する．

実際にはトラッキング領域内部に含まれる両目の位置を認識することにより認識精度の向上を期待できるが，認識精度と処理速度のトレードオフを考慮すると，本近似で十分であると考えられる．

さて時刻 t におけるユーザ画像中における観測点位置 $\bar{X}_t$ は，時刻 $t+1$ において次式で $\bar{X}_{t+1}$ に更新される．

$$\bar{X}_{t+1} = \sum_{p \in \mathcal{F}(\bar{X}_t)} w(p) p \Bigg/ \sum_{p \in \mathcal{F}(\bar{X}_t)} w(p) \quad (2.2)$$

$\mathcal{F}(\bar{X}_t)$ は， $\bar{X}_t$ を中心とする領域と時刻 t における I_u の積集合領域である．式 (2.2) における変数 p は，領域 $\mathcal{F}(\bar{X}_t)$ の範囲を動く．また $w(p)$ は平均を計算する際の重みである．この更新を逐次繰り返すことによりユーザ顔領域のトラッキングが行なわれる．なお重み $w(p)$ は，画像全体の高さを H として，以下の式で与える．なお p_y は p の y 座標である．画面上の座標は左上を原点とする．

$$w(p) = H - p_y \quad (2.3)$$

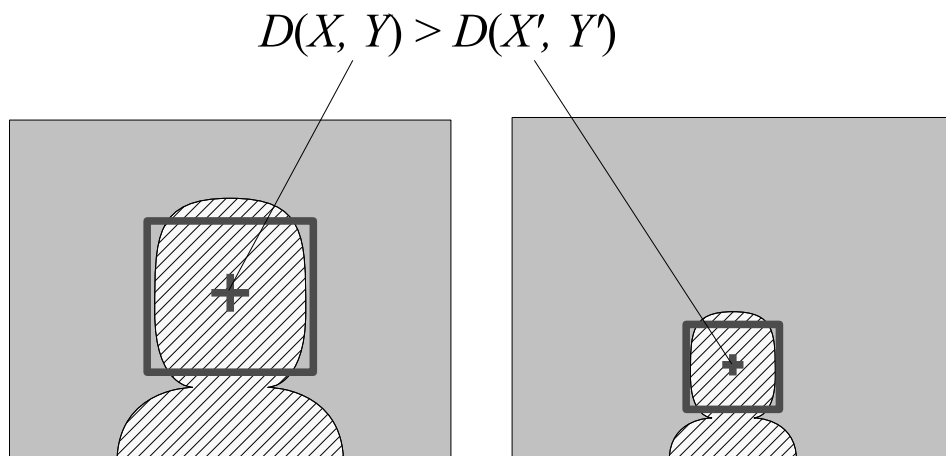


図 2.3: トラッキング範囲の自動調整

式 (2.2) は一定領域内に含まれるユーザ像候補の重み付き平均で観測点位置を更新することに相当する．この平均を計算する際に，画像の上方向に重みを強く与えておくことにより，トラッキング領域は上部に移動する．ユーザの顔領域がユーザ像の最上部に位置することから，ユーザの顔領域の自然な追跡が実現可能となっている．

なおトラッキング領域中心位置の初期値 $\bar{X}_0$ は，ユーザの顔が画像の中心付近に存在するとの仮定から撮影画像の中央に置く．さらにユーザ不在の状態や，トラッキングに失敗した場合など何らかの異常事態を検知したときなどは初期値に戻るよう設定した．

またトラッキングに用いる矩形領域は $\bar{X}_t$ における視差を参照してユーザが遠くに位置するときには小さく，また近くに位置するときには大きく設定するようにしている．具体的には標準的な顔の大きさから計算される比例定数を用いてカメラからの距離に反比例する大きさを計算し，ほぼ顔の大きさに等しい範囲を覆うよう自動的に調整される．

2.2.4 実空間上における頭部位置の推定

ユーザの観測点位置の実空間上における位置は，次の手順で求められる．

撮影された画像平面を $\{X, Y\}$ ，実空間を $\{x, y, z\}$ とすると， XY 平面に描画された観測点位置 $X' = (X', Y')$ に対応する実空間中の観測点座標 $x' = (x', y', z')$ は以下の式で計算される．

$$z' = bf/D(X', Y') \quad (2.4)$$

$$x' = X'z'/f, \quad y' = Y'z'/f \quad (2.5)$$

ここで b および f は2眼レンズ間のベースライン長さとレンズの焦点距離である．

2.3 ユーザビリティ評価実験

前述の頭部位置計測アルゴリズムに基づき実時間で測定された結果を，モデル空間における投影視点位置に逐次反映させることにより3次元モデルを直感的に操作するシステムを実現した．そのシステムのユーザビリティを評価するために行なった実験の内容を述べる．

なお一般に，使いやすさやユーザビリティの概念は一元的に評価できるものでもない．今回，ユーザビリティの主観的評価として，SD法 (semantic differential method) を用いた本ユーザインタフェースの評価実験を行なった．

また本提案のPUIとしての有用性を示すために，情報検索への応用を例題にして作業効率への影響を検証する実験も実施した．

2.3.1 評価アプリケーション

まず評価実験に使用したアプリケーションの内容を説明する．

ユーザビリティ評価の対象として，仮想空間上に配置するオブジェクトとして地球のモデルを設定した「バーチャル地球儀」のアプリケーションを用意した．

本アプリケーションは，3次元モデル空間上に配置した地球儀のモデルを，視点を動かすことにより好みの位置から自由に表示することを可能にするアプリケーションである．近年，衛星により撮影された画像情報を地図情報と組み合わせて有効に活用するアプリケーションが注目されている．本アプリケーションは，地球規模の情報取得に関してエンタテイメント性を高めたインタフェースのプロトタイプと考えることも可能である．

評価アプリケーションにおける本方式の適用方法

「バーチャル地球儀」においては，仮想的なモデルが地球儀であることの特性を考慮して以下の2点の制約を加えている．

1. 上下左右方向に関しては，観測点の実空間上における移動量を，仮想空間上におけるモデルを中心とした極座標上での角度の変化量に対応させる．
2. 上下方向の変化量に関する係数は小さくとり，さらに上下方向には逆さまにならないよう変化量の制限を加える．

具体的には，実空間における中心位置からの上下左右方向の変位量¹ ($\Delta x, \Delta y$) を，モデルを中心とした極座標における角度の変位量 (θ, ϕ) に係数 α および β を用いて対応させている．ここで， T は上下方向の回転角に関する閾値である．

$$\theta = \alpha \Delta x \quad (2.6)$$

$$\phi = \begin{cases} -T, & (\beta \Delta y \leq -T) \\ \beta \Delta y, & (-T < \beta \Delta y < T) \\ T, & (T \leq \beta \Delta y) \end{cases} \quad (2.7)$$

¹ 実際には，この ($\Delta x, \Delta y$) を導出する際にノイズに対して敏感に反応しないように「あそび」の処理を入れていることから，厳密には中心位置からの変位量と必ずしも一致はしない．式 (2.6) と式 (2.7) はこの処理を省き簡略化した説明であることに注意されたい．

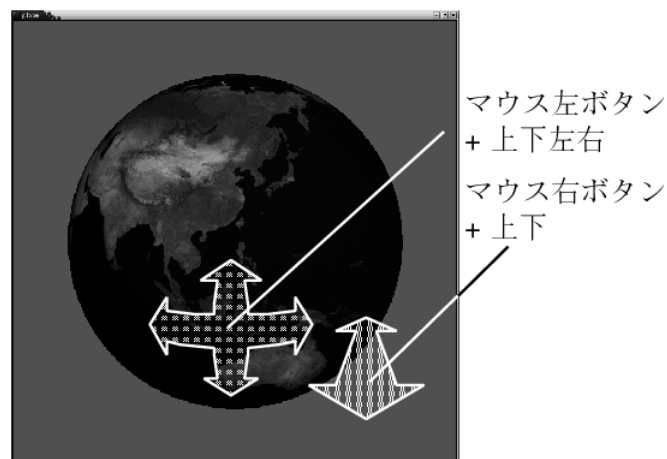


図 2.4: マウスによる従来型の 3 次元モデル操作

なおこの係数 α および β の値はユーザからの使用感に関する意見を聞きつつ微調整することで決定した。またユーザの頭部位置とディスプレイの距離に相当する前後方向の変位量 Δz は、そのまま地球儀モデルを表示する際のズームイン、ズームアウトに対応させた。

比較対象のアプリケーション

提案手法の効果を比較する対象として、地球儀の表示は同じとし、3次元情報の入力手段として既存のデバイスを利用したものを用意した。すなわち、現在もっとも汎用的に利用されているポインティングデバイスであるマウスもしくはタッチパッドなどのマウスに準じるポインティングデバイス操作によって投影視点を操作する従来型のアプリケーションを比較対象として設定した。

比較対象となる従来型のアプリケーションでは、マウスの左ボタンを押しながらマウス自身を操作することで、視点を上下左右方向へ、地球儀のモデルを中心として回転移動させることができる。またズームイン、ズームアウトはマウス操作と右ボタン押下を併用する(図 2.4)。

なお注意すべき点として、本提案手法による視点操作は絶対的な視点を与えるものである一方で、マウスによるコントロールでは、マウスの持ち上げ動作を併用した相対的な視点操作が可能であるという差があることを指摘しておく。キーボード操作や、ジェスチャ認識等を併用したモード切り替えの導入によって提案手法によるユーザインタフェースでも相対的な操作を実現することは可能であるが、今回の比較評価の対象にはしていない。

2.3.2 SD 法による評価実験の手順

質問紙による主観的評価実験の手順は次の通りである。

1. 本システムおよび、一般的なマウスで操作するものに置き換えた 3D モデル表示システムを個別に用意する。被験者は両方のシステムを体験する。

2. 被験者はそれぞれのシステムについて、質問紙にその操作感を記入する。
3. 両システムについてプロフィールを比較する。さらに評価尺度に関する因子分析を行ない尺度の妥当性を評価する。

被験者にはそれぞれ約3分間の時間を与え、実際の地球儀を操作するようなつもりで「バーチャル地球儀」を操作させた。そのうえで、地球の3Dモデルを操作して好きな場所の地図を表示してみることによってそれぞれのシステムを体験し、使いやすさを評価するというタスクを与えた。

また全ての被験者が両システムを体験したが、その体験順序については被験者毎に変えるよう留意した。すなわち半数の被験者はマウスによるシステムを先に体験し、残りの被験者は本手法によるシステムを先に体験した。

用意した質問紙には、表2.1に示す評価尺度を用意した。それぞれの方向への「よくあてはまる」「あてはまる」「すこしあてはまる」の3段階に「どちらともいえない」を加え、合計7段階での評価を被験者に求めた。なお本実験の評価尺度として利用した感性評価用語は、関連研究[70]で挙げられていた形容詞対や、本評価実験の実施以前に本プロトタイプを展示した際に聞かれた意見に多く含まれていた表現から、ユーザインタフェースの評価尺度として有効と考えられる形容詞対を選択した。

本実験には、男性30名女性2名の計32名が参加した。参加者の年齢は20代から50代までと幅広いが、過半数を20代が占めており、被験者の平均年齢は28.3歳である。なお被験者の情報リテラシはほぼ高く、マウスによる3次元モデル操作を日常的に行なっている者も含まれている。

表 2.1: 質問紙に記載した評価尺度 (1)

質問番号	評価尺度	
1	単純な	複雑な
2	安定な	不安定な
3	難しい	分かりやすい
4	ありがちな	新鮮な
5	保守的な	革新的な
6	不親切な	親切な
7	おもしろい	つまらない
8	不便な	便利な
9	一般的な	特殊な
10	重い	軽い
11	速い	遅い
12	不正確な	正確な
13	身近な	なじみのない
14	落ち着いた	落ち着かない
15	直感的な	論理的な

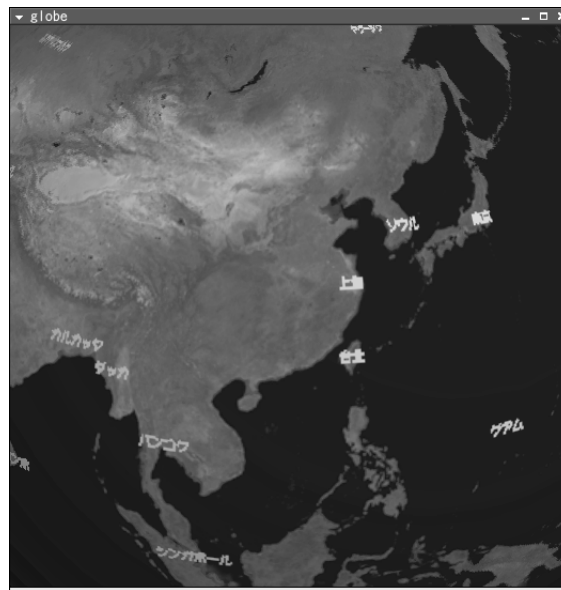


図 2.5: バーチャル地球儀に記載された都市名

2.3.3 情報検索実験の手順

評価対象のアプリケーションとして用意した「バーチャル地球儀」には、61箇所に都市名が記載されている(図 2.5)。情報検索実験では、この都市名を探す時間を測定し、提案するユーザインタフェースの有用性を検索効率の比較から示すことを試みた。

情報検索実験の具体的な手順は次の通りである。

1. 「バーチャル地球儀」に書いてある都市名「ハラレ」「アゾレス」「アピア」等、被験者になじみのない地名を選択する。これらの都市名はいずれも初期状態では表示されない位置に存在する。なお被験者には、あらかじめいずれの都市の位置を未知であることを確認した。
2. 上記の都市名から検索対象のものを1つ選び、本プロトタイプを用いて探す時間と、マウスで操作して探す時間を計測した。場所の差と個人差を可能なかぎり排除するために、用いた都市名の選択とどちらのシステムを利用するかは、独立して無作為に選択した。

本実験には、20代から40代までの男性7名、女性3名の10名が参加した。提案手法を実装したプロトタイプによる試行を10回、マウスを用いた従来手法による試行を14回ずつ行ない、合計24回の試行を実施した。

2.4 実験の結果と考察

まず、今回の評価尺度が適切であったかどうかの評価を行なうために、因子分析を行ない評価尺度の適切さを検討した。

なお質問紙への記載時には、類似の形容詞が重ならないための配慮からあえて逆の方向で並べたものがある。具体的には、表 2.1 に示した質問番号 3, 6, 8, 10, 12 の項目について、以下の分析では反転させて記載することに注意されたい。例えば質問番号 3 は、質問紙上では「難しい – 分かりやすい」と表記されているが以下の分析では「分かりやすい – 難しい」として取り扱うものとする。

2.4.1 評価尺度の妥当性に関する検討

評価尺度の妥当性に関する検討のために、15 個の質問項目について因子分析を行なった。因子の抽出は最尤法を用い、因子数は、固有値 1 以上の基準を設けたうえで因子の解釈の可能性を考慮して 3 因子とした。なお「軽い – 重い」「速い – 遅い」といった評価尺度はいずれも因子負荷量が 0.4 に満たなかったため、それらを削除して、再度、因子分析を行なった。削除後の固有値は順に 5.464, 3.227, 1.011, 0.756 であり、因子数に変化はない。

バリマックス回転を行なった結果の因子負荷を表 2.2 に示す。

回転の結果、それぞれの形容詞対について因子負荷量の高いものをまとめると、表 2.2 に示す 3 つのグループに分類することができる。

まず第 1 因子が高かったグループは、安定性や正確さ、落ち着きといった概念を示す形容詞対を含むグループとなった。これより、第 1 因子はシステム利用の際の「安心感」に関係する因子と解釈することができる。また、第 2 因子の高いグループは簡潔さやユーザの興味を示す形容詞を含む。そのため第 2 因子は「親しみやすさ」に関する因子と解釈する。さらに第 3 因子が高いグループは保守性や一般性、ユーザの経験に関する形容詞対を含み、したがって第 3 因子は「慣れ」に関連する因子と解釈することができる。

表 2.2: 因子分析の結果

項目	因子 1	因子 2	因子 3
安定な – 不安定な	0.840	-0.001	0.256
正確な – 不正確な	0.833	0.093	0.401
落ち着いた – 落ち着かない	0.752	0.169	0.400
単純な – 複雑な	0.109	0.608	-0.014
分かりやすい – 難しい	0.132	0.680	-0.078
親切的な – 不親切的な	-0.120	0.808	-0.013
おもしろい – つまらない	-0.365	0.574	-0.389
便利な – 不便な	0.123	0.670	0.285
直感的な – 論理的な	-0.421	0.623	-0.347
ありがちな – 新鮮な	0.422	-0.254	0.749
保守的な – 革新的な	0.483	-0.311	0.712
一般的 – 特殊な	0.417	-0.041	0.746
身近な – なじみのない	0.169	0.298	0.577

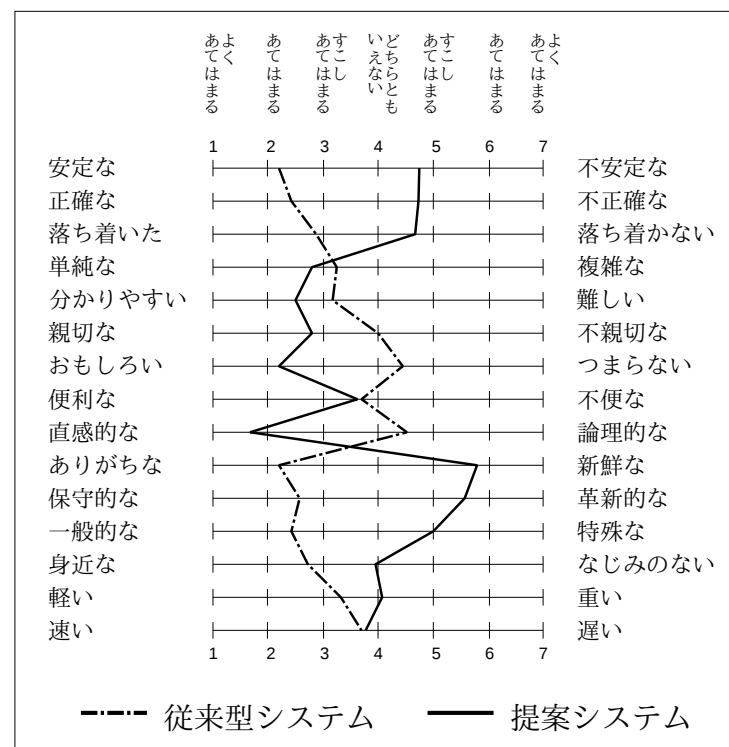


図 2.6: 両システムのプロフィール

表 2.3: 7 段階の評価値に関する平均と標準偏差

項目	提案法	従来法
安定な – 不安定な	4.75 (1.32)	2.25 (1.28)
正確な – 不正確な	4.72 (1.33)	2.44 (1.27)
落ち着いた – 落ち着かない	4.69 (1.16)	2.88 (1.22)
単純な – 複雑な	2.81 (1.53)	3.25 (1.52)
分かりやすい – 難しい	2.47 (1.48)	3.16 (1.44)
親切的な – 不親切的な	2.81 (1.33)	4.00 (1.44)
おもしろい – つまらない	2.28 (1.21)	4.41 (1.17)
便利な – 不便な	3.66 (1.38)	3.69 (1.36)
直感的な – 論理的な	1.69 (0.73)	4.47 (1.66)
ありがちな – 新鮮な	5.81 (1.04)	2.22 (1.43)
保守的な – 革新的な	5.63 (0.70)	2.56 (1.30)
一般的な – 特殊な	5.00 (1.35)	2.41 (1.30)
身近な – なじみのない	3.97 (1.90)	2.72 (1.35)
軽い – 重い	4.16 (1.23)	3.31 (1.16)
速い – 遅い	3.66 (1.45)	3.63 (1.24)

2.4.2 両システムの操作性に関する評価

因子分析の検討結果に基づき、各評価尺度の並べ替えを行なったうえで両システムのプロフィールを求めた(図2.6)。また各評価値に関する平均と標準偏差を表2.3に示した。

因子分析で求めた3つの因子に関して、両システムについての有意な差異を図2.6から見て取ることができる。

「安心感」については、提案するユーザインタフェースはやや正確性に欠け、不安定で落ち着かない傾向にある。一方で「親しみやすさ」の面では提案システムが優れている。とくに提案システムのほうを直感的と感じているユーザが非常に多く、また面白いと感じているユーザが多いことが分かる。

マウスによる操作は既に生活の一部となっているためか、システム操作の「慣れ」についても両システムで大きく結果が分離した。提案のインタフェースにはこれまで接したことがないユーザが被験者の大多数を占めたため、そのインタフェースは目新しく新しいものとして捉えられている。

2.4.3 情報検索効率の評価

続いて、バーチャル地球儀上の都市の検索をタスクとした情報検索効率に関する評価実験の結果を表2.4に示す。

場所の差および個人差により大きなばらつきはみられたものの、平均すると本提案手法による所要時間の平均値が24秒0であるのに対し、従来手法による所要時間は36秒6と、本提案手法によるシステムでは、従来手法と比較して約1.5倍の効率で対象を発見することができた。

マウスを用いた操作による従来法では、都市の大まかな位置を確認するために視点位置を移動させるマウス操作と、都市名を確認するためのズーム操作に関するマウス操作を切り替える際に誤操作を伴うことが多く観察された。一方、提案法では視点位置の移動操作とズーム操作がスムーズに実現されており、その点が検索効率の向上に寄与したと考えられる。

表 2.4: 情報検索に要した時間の平均と標準偏差

対象	平均 (標準偏差)
提案法	24"0 (29"0)
従来法 (マウスを用いた操作)	36"6 (25"7)

2.4.4 インタフェースの特性に関する留意点

マウスによる操作は、状態の切替えを自然に含む操作である。マウスに限らず一般的なポインティングデバイスでは上下左右方向へ操作を加えたときのみ情報をシステムに伝える。そのため、2.3.1節で述べたような相対的な操作が可能となる。

一方、提案のユーザインタフェースでは操作状態と待機状態を区別する手段が用意されていない。すなわち常に位置情報をシステムに入力し続けている操作状態にある。頭部位置認識を3次元ユーザインタフェースとして活用する際にはこの特性に十分留意する必要がある。この点に関して、今回の評価実験の範囲では「長時間続けていると疲れやすい」というコメントがあったものの、全般には、操作性についての大きな問題にはならなかった。

またユーザの感想からは、本システムでは非常に直感的な操作が実現できているが、従来型のシステムについては、ボタンの組み合わせが直感的ではなく操作方法を頭で理解しなければならない点が問題であるとの指摘が散見された。マウス操作による3次元情報入力が抱える課題を再確認することとなった。

さらに、本インタフェースでは両手を使用していないという特徴があるため、手を使用する既存のデバイスと同時に利用できる利点がある。本インタフェースによって直感的な3次元情報の入力を実現し、さらに同時に既存デバイスで別の操作を加えることで、作業の効率化の実現が期待できる。例えば3次元CADにおいて、表示する視点を変えつつモデルを操作する等である。

なお今回のプロトタイプシステムでは、モデル操作の安定性を実現するために一定量の「あそび」を用意した。計測誤差から頭部位置の推定結果として数cm程度のゆれが生じていたため、その範囲を越えてはじめてユーザの意図した操作とみなす処理を加えている。

このことは一般にはユーザの操作に対するシステムの即応性を悪くすることにつながる。しかし本プロトタイプの例ではホームポジションを中心とする周囲の情報は画面にあらかじめ表示されており微調整する操作が求められないため、ホームポジションの周囲に関する細かな操作は不必要であった。そのため「あそび」の導入による即応性の低下は、本アプリケーションのように細かな操作を不要とする条件においては、システムの操作性に悪影響を与えなかった。

2.5 まとめ

ユーザ頭部位置の実時間計測を応用した3次元モデル操作系を提案し、既存のマウス操作によるシステムと本提案システムについて、両システムのユーザビリティに関する主観評価実験および操作効率に関する評価実験を行なった。

ユーザビリティ評価実験は7段階15尺度の質問紙を用いたSD法により実施し、そのうち13個の評価尺度から、システム操作における「安心感」「親しみやすさ」「慣れ」に関する3個の因子を抽出した。操作効率については、平均して1.5倍程度、効率を向上させることを示した。

また認知心理学の手法による統計的な分析に加え、システム改善に有意義な意見や指摘を被験者から多く得ることができた。被験者の多くがロボット関連の研究を進めている研究者・学生であり、3次元的なインタフェースに関する様々な着眼点からのコメントを得ることができた。

今回実施した評価実験の結果、提案システムにはある程度の慣れが必要なもののエンタテイメント要素を含むことが明らかになった。エデュテイメントシステムや情報弱者に対するユーザインタフェースの提供を考えたときに、インタフェースの楽しさは重要な要素である。

また「慣れ」の要素はシステムの使用経験により変化するものである．今後の課題としては，本インタフェースの継続使用により操作性の評価がどのように変化するかを研究する必要がある．提案システムや，類似のユーザインタフェースが一般化した時点で本因子に対する評価がどう遷移するかについては，興味深い問題として残されている．

また今回は，筋電位，心電図，脈拍，動悸，発汗といった生理指標による評価は実施していない．ユーザインタフェースの良し悪しを評価する客観的評価方法として生理指標による評価は近年とくに着目されるようになってきており，ユーザインタフェースを評価する際に検討すべき項目として位置付けられている．またそのインタフェースを使用することによる疲労度の大小ユーザの評価に大きな影響を与えられ，生理指標による疲労度の評価は，今後ますます重要視される項目の1つである．

第3章 レーザポインタによる3次元情報入力装置

ところで、ここ数年、コンピュータの周辺装置としてデジタルカメラが一般化し、画像入力がきわめて手軽な情報入力装置となった。そこで筆者らは簡単に入手できるデジタルカメラとレーザポインタを利用し、低コストで構築できる3次元ポインティングデバイスの開発を進めてきた[71]。本提案では、上記[71]で提案したものに更なる改良を加え、3次元空間での位置関係を決定する6自由度全てを操作可能な3次元ポインティングデバイスを実現する。

さらに提案するポインティングデバイスの実効性を評価することを目的として、CADやCGで多く利用される3次元モデル表示システムに対して筆者らの提案手法による操作系を適用したプロトタイプシステムを用意し、従来のマウス操作による操作系を備えたシステムとの比較を行った。

比較実験においては、質問紙を用いた主観的評価と、指定した操作にかかる時間を測定した客観的評価を行い、提案手法のユーザビリティを評価した。

主観的評価実験は35名の被験者を集めて実施し、またその中の22名については同時に客観的評価実験も行った。評価実験に関して与えたタスクは、提案手法および従来の手法による視点操作を備えた3次元モデル表示システムを用いて対象としたCGモデルを操作するというものである。

本章では、まず第3.1節および第3.2節においてレーザポインタを用いた3次元情報入力装置の概要とその実現方式について述べる。続く第3.3節および第3.4節において、ユーザビリティ評価実験を行った結果について報告し、最後の節で本章のまとめについて述べる。

3.1 レーザポインタによる3次元情報入力装置の概要

本節では、開発した3次元情報入力装置の概要について述べる。

3.1.1 既存課題の解決

筆者らが直感的な3次元情報操作の実現を目指して開発した頭部位置計測による3次元モデル操作システム[65, 72]は、既存のシステムに対して直感的な操作性を提示することができた。しかしステレオカメラを用いてユーザの姿勢を逐次観測し、その結果をシステムに常時フィードバックすることから、操作状態と待機状態の区別がつかないという問題点を抱えていた。

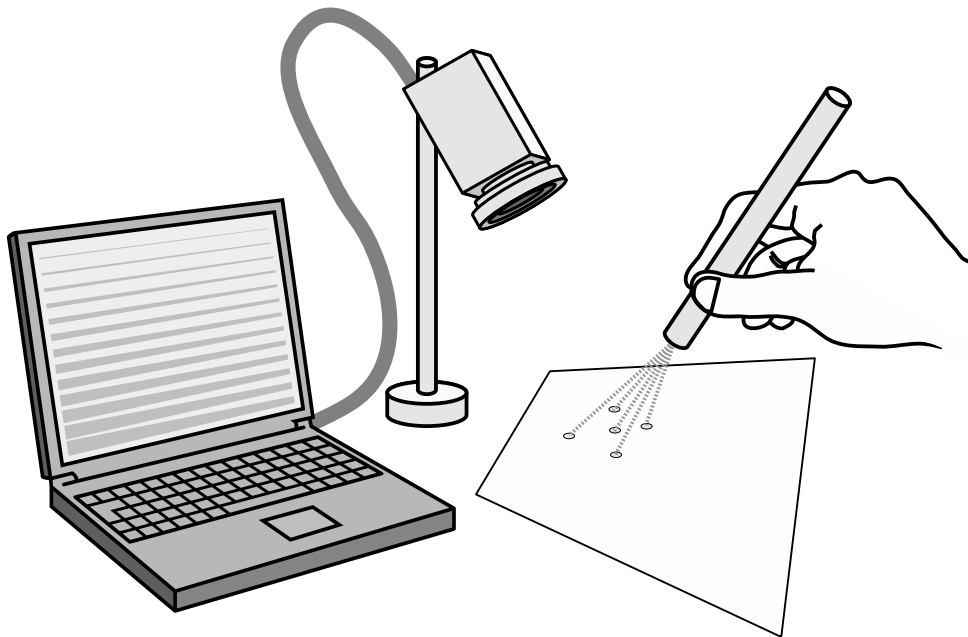


図 3.1: システムの操作イメージ

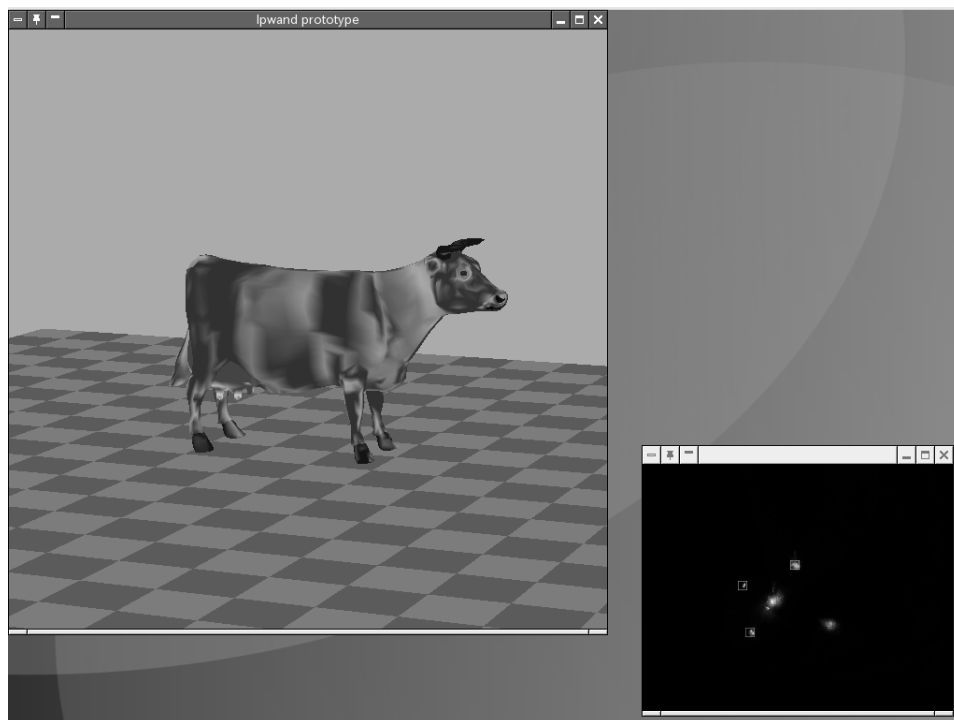


図 3.2: アプリケーション例

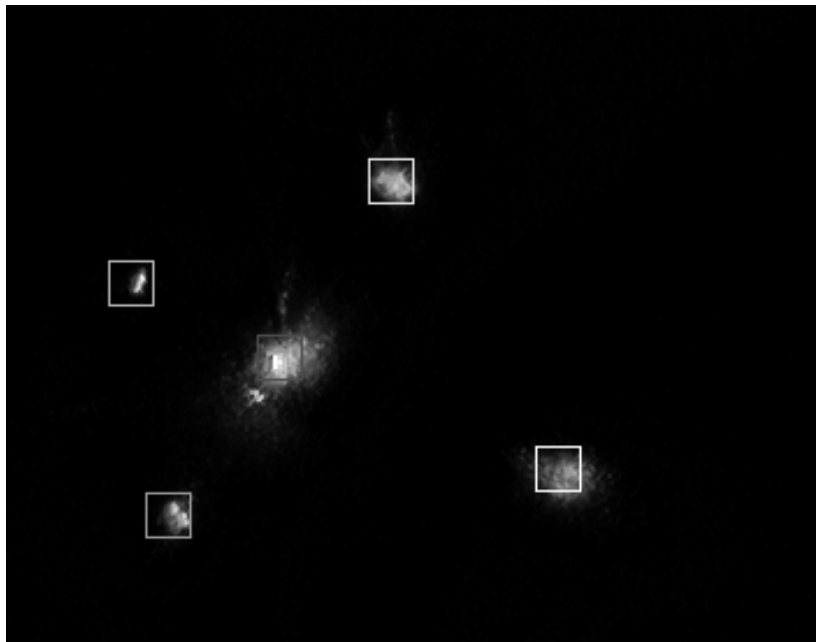


図 3.3: 複数スポットの認識

この問題は、「長時間続けていると疲れる」、「他の作業ができない」といった点で操作性を阻害する要因となっていた．またできるだけ容易に入手し得る部品を利用して装置を構成するという目標に対して，システムの実現には比較的高価なステレオカメラが必要になるという問題も残されていた．

そこで，今回提案する方法としては，操作状態と待機状態を明確に区別できるポインティングデバイスを構成することに留意した．具体的には，レーザポインタのスイッチを援用し，レーザ光が照射されているときのみを操作状態とすることとした．また IEEE1394 で PC と接続する安価な単眼カメラおよび既製品のレーザポインタを利用して 3 次元情報入力装置を構成するようにした [73] ．

3.1.2 システム概要

本提案手法を用いたシステムの操作イメージを図 3.1 に示す．ユーザは，後述するアダプタを付加したレーザポインタを操作して 3 次元情報を入力する．分割されたレーザ光は，机上に複数のスポットを描く．ただし操作は画角に入る範囲に限られる．図 3.1 の右下の四角形はカメラの撮影する範囲を示している．

図 3.2 は提案手法を 3 次元情報操作に用いたアプリケーション実行画面のスナップショットである．構築したプロトタイプシステムでは，3 次元モデルの表示システム (図 3.2 左) において，モデル空間における投影変換に関するカメラ位置を提案手法による操作で制御する．また図 3.2 右下には，複数のレーザスポットの位置を認識している様子が描かれている．図 3.3 はその拡大図である．四角で囲われた点が，それぞれ認識されたスポットの位置を示している．

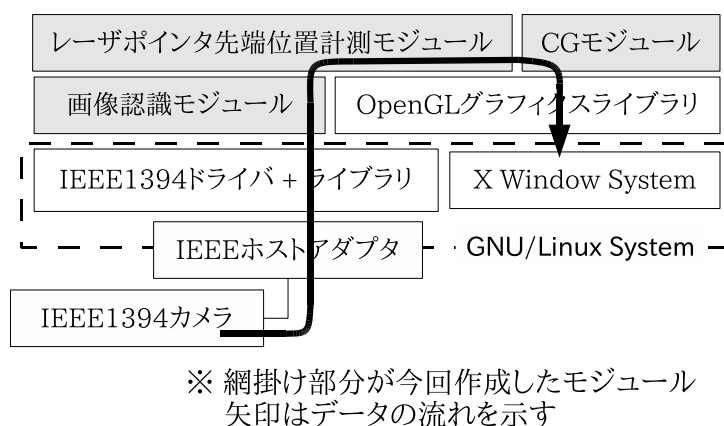


図 3.4: システム構成

後述するように、提案手法ではレーザポインタ先端の位置に関する縦横高さ、およびレーザポインタの向き（2方向）と光軸を中心とした回転角度の計6自由度を同時に入力することが可能である。ただし本プロトタイプの評価に際し、マウスを用いた従来手法との比較においては、レーザポインタ先端位置の縦横高さのみを利用した。この3自由度の情報を実時間で入力し、3次元モデル表示に関する上下左右2方向の回転と前後ズームの計3方向に関する同時操作を実現する。

プロトタイプシステムは、1.5GHzのPentium PC上で動作するLinux (Fedora Core) で実装した。システムのソフトウェア構成を図3.4に示す。本プロトタイプシステムで、VRML表示部の処理を合わせて処理速度は10fps前後である。

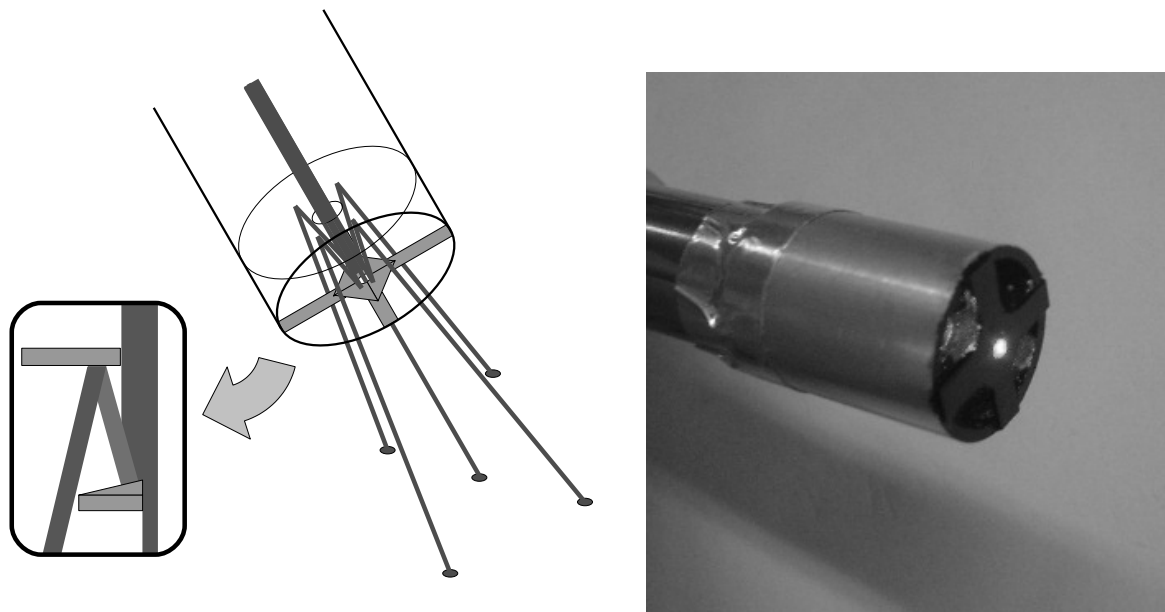
3.1.3 マルチスポット・レーザポインタ

ここで、提案手法の重要な要素であるマルチスポット・レーザポインタの実現について説明する。

提案手法で用いているレーザポインタは、市販のレーザポインタであり何ら特殊なものではない。このレーザポインタを利用して3次元情報入力装置として使用するために、レーザポインタの先端に図3.5右に示すアタッチメントを装着する。

本アタッチメントは、中心となるレーザビームを4方向に分割する。通常、レーザポインタが発する光線は極小のスポットを描くよう、十分に絞られたレーザ光となっているが、それでもある程度の太さが存在する。したがって、中心に穴が空いた4組の合わせ鏡を使用してレーザビームの一部を4方向に分割することができる。さらに鏡には傾きが与えられており、一定の角度でレーザビームが4方向に放射される（図3.5左）。その結果として、本来のスポットを中心として5つの点が照射されることになる。本来、次で述べるアルゴリズムによる3次元情報の計測に中心のスポットは不要であるが、指している位置を明示するために中心のスポットも与えている。

なおこのアタッチメントは、レーザポインタの太さに適合したアルミ製パイプの先端に十時に切り出した鏡面を組み合わせ、今回、新規に制作したものである。またレーザポイ



※ 左下の囲み部分は4方向の1部を切り出したもの、2枚の合わせ鏡を利用して4方向にレーザー光を分岐させている。なお中心部には穴が開いており、分岐しないレーザー光はそのまま直進する。そのためレーザーのスポットは5つの輝点を描く。

図 3.5: レーザ光の分岐

ンタ先端にはその鏡面と合わせ鏡になるように鏡が取り付けられている。今回このアタッチメントを制作するにあたり、鏡面の角度は手作業で調整を繰り返した。そのため、精度向上の点で課題が残されている。ただし構造は非常に単純であり、精密加工機器を用いれば低コストで製造可能であると考える。

3.2 3次元情報の推定

前述したマルチスポット・レーザーポインタを用いて、レーザーポインタ先端位置およびレーザーポインタの向きおよび回転角に関する3次元情報の推定方法について説明する。

3.2.1 本手法の概要

提案する手法の骨子は、まずカメラで撮影したレーザースポットを認識し、その位置情報からレーザーポインタ先端の3次元情報を推定するというものである。

3次元情報の推定は、複数のスポットに関する位置推定と、それらの位置関係からレーザーポインタ先端の3次元空間における位置および向きの推定から構成される。この手続きを逐次実行することによりリアルタイムでの継続的な位置認識を行い、その情報をユーザインタフェースとして活用する。

3.2.2 スポット位置の推定

まず複数のレーザスポットは画像中における輝度の高い部分を中心として認識される。画像認識の処理に関しては、輝度の高い部分を抽出した後で膨張・収縮によるノイズ削減処理を行い、さらにラベリング処理を行って大きな領域から順番に5つの領域を抽出することで5点のレーザスポット位置を求めた。

次に認識された各スポットに関して、3次元空間中における実際の位置を求めるためには、認識したカメラ画像上の座標を世界座標における平面上の座標に変換しなければならない。

世界座標における平面(便宜上、平面 $z = 0$ とする)の点と、それをカメラで撮影した画像上の点を $p = (p_x, p_y)$ および $q = (q_x, q_y)$ とすると、それぞれの関係は 3×3 の平面射影行列 $H = \{h_{ij}\} (i, j = 0, 1, 2)$ を用いて次式の関係が成り立つ。なお ω はカメラの焦点距離に関するパラメータである。

$$\begin{pmatrix} p_x \omega \\ p_y \omega \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

一方、 p は透視投影変換後の点であることから、式(3.1)を用いて次のように表現することができる。

$$p_x = \frac{h_{00}q_x + h_{01}q_y + h_{02}}{h_{20}q_x + h_{21}q_y + h_{22}} \quad (3.2)$$

$$p_y = \frac{h_{10}q_x + h_{11}q_y + h_{12}}{h_{20}q_x + h_{21}q_y + h_{22}} \quad (3.3)$$

ここで、 h_{22} は倍率に影響を与えるだけであり $h_{22} = 1$ と置いてよい。この条件のもとで、直線上に並ばないような p_i および q_i ($i = 0 \dots 3$) の4点の組みを用意すれば、式(3.4)に示す h_{00} から h_{21} までの8変数に関する一次方程式を解くことができ H を定めることができる。

$$\begin{pmatrix} q_{0x} & q_{0y} & 1 & 0 & 0 & 0 & -p_{0x}q_{0x} & -p_{0x}q_{0y} \\ 0 & 0 & 0 & q_{0x} & q_{0y} & 1 & -p_{0y}q_{0x} & -p_{0y}q_{0y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{3x} & q_{3y} & 1 & 0 & 0 & 0 & -p_{3x}q_{3x} & -p_{3x}q_{3y} \\ 0 & 0 & 0 & q_{3x} & q_{3y} & 1 & -p_{3y}q_{3x} & -p_{3y}q_{3y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{00} \\ h_{01} \\ \vdots \\ h_{20} \\ h_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{0x} \\ p_{0y} \\ \vdots \\ p_{3x} \\ p_{3y} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

実際には、 H を定めるために事前のキャリブレーションが必要になる。具体的にはカメラの撮影する範囲を計測し、その周囲4点の位置と画像中の4隅の関係をj用いて式(3.4)から H を求めておけばよい。 H が既知であれば、実際の処理時には式(3.2)と式(3.3)から、世界座標における実際のスポット位置を直接求めることができる。

3.2.3 レーザポインタ先端位置の推定

次に、スポットの位置関係からレーザポインタ先端の3次元位置を推定する方法を説明する。

前述した手続きによって認識された5つのスポットは、中心のスポットを対角に挟む2組に分類する．すなわち、図3.6における点 A, B の組みと、点 C, D の組みに分割する．この分類は、各スポットが乗る平面上の X 軸に平行で中心 O を通るベクトルと、中心 O から各点に向かうベクトルの成す角度を計算することで実現できる．

この組合せに基づき、各点および点 O 、点 P を含む平面上で、レーザポインタ先端までの向き θ と距離 l を求める (図3.7)．

分岐アダプタを着けたレーザポインタから照射される複数のレーザ光のうち、中心のレーザ光および周囲の各レーザ光が見込む角度を ψ とする．また点 A と点 O の距離を L_0 、点 B と点 O の距離を L_1 とする．

直角三角形 $PA'A$ および直角三角形 $PB'B$ から、次の2式を得る．

$$\tan \psi = L_0 \cos \theta / (l + L_0 \sin \theta) \quad (3.5)$$

$$\tan \psi = L_1 \cos \theta / (l - L_1 \sin \theta) \quad (3.6)$$

両式から $\tan \psi / \cos \theta$ を消すと、

$$(l + L_0 \sin \theta) / L_0 = (l - L_1 \sin \theta) / L_1 \quad (3.7)$$

が導かれる．さらに $\sin \theta$ について解くと、

$$\sin \theta = l(L_0 - L_1) / 2L_0L_1 \quad (3.8)$$

となる．一方、式 (3.5) から、

$$l = \frac{L_0 \cos \theta}{\tan \psi} - L_0 \sin \theta \quad (3.9)$$

なので、式 (3.8) および式 (3.9) から l を消去してまとめると、次式を得る．

$$\frac{1}{\tan \psi} (L_0 - L_1) \cos \theta = (L_0 + L_1) \sin \theta \quad (3.10)$$

ここで θ に関して整理すると、

$$\tan \theta = \frac{L_0 - L_1}{\tan \psi \cdot (L_0 + L_1)} \quad (3.11)$$

となる．

$\tan \psi$ および L_0, L_1 は既知であるため、式 (3.11) から θ が求まる．また式 (3.9) からレーザポインタ先端までの距離 l を求めることができる．

l が求まれば線分 OS の長さは $l \sin \theta$ として定まる (図3.7) ので、点 S の位置が決まる．同様の計算で点 T の位置も求めることができる．

レーザポインタの先端 P から各スポットが乗る平面上に降ろした垂線と平面の交点 R は、点 S を通り直線 AB に直行する直線と点 T を通り直線 CD に直行する直線の交点として定められる．したがって辺 OR の長さが求められる．さらに直角三角形 ORP に着目すると、既に計算されている辺 OR および辺 OP の長さから、 P の高さを計算することができる．

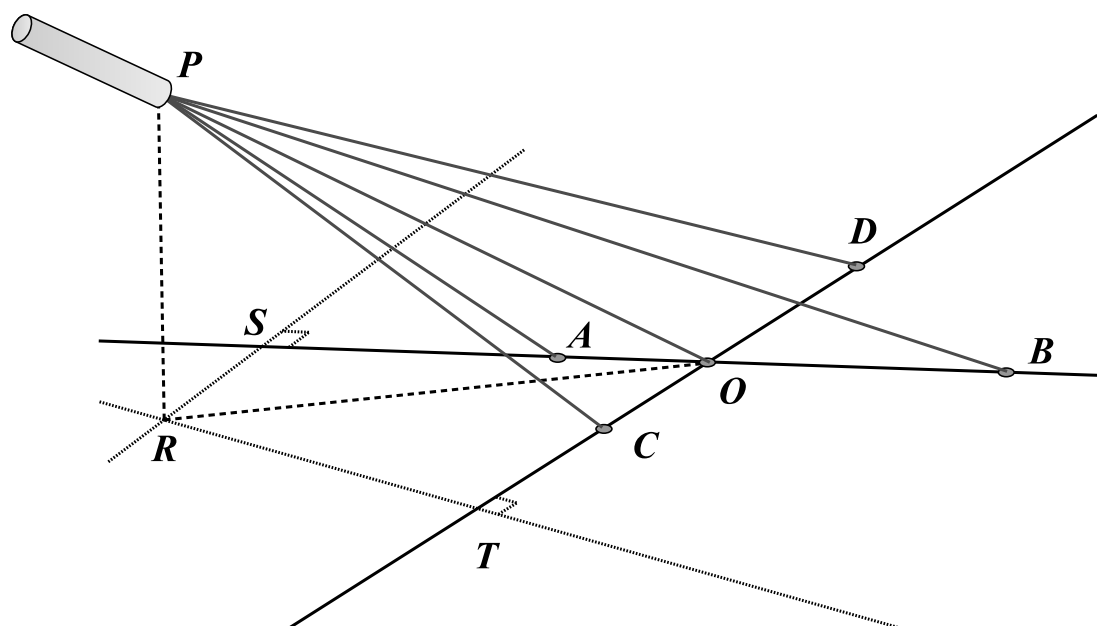


図 3.6: レーザポインタ先端位置の推定

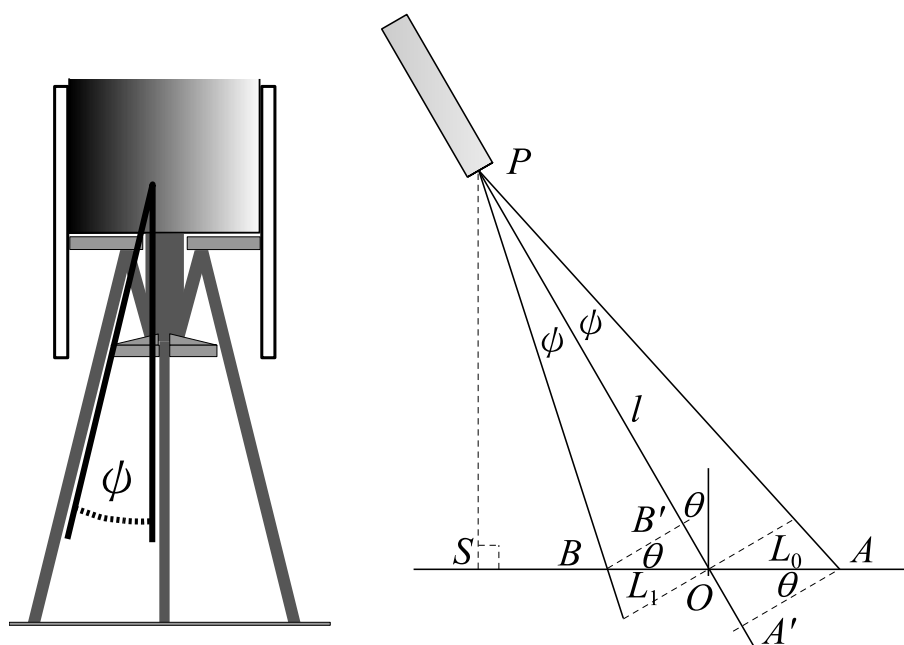


図 3.7: レーザポインタ先端までの距離と方向

以上で、レーザポインタ先端の位置と2種類の方向に関する向きが求められた。最後にレーザポインタの軸方向に関する回転の角度が求めれば6自由度の全てを求めることができる。なお今回作成したプロトタイプのように周囲の4点が全て同じ条件となる構成では、1回の認識では各スポットを区別することができない¹ため、この回転角度に関しては絶対的な値を求めることはできない。ただし今回の構成においても複数のフレームを利用して位置の差分を考慮することにより、連続的な認識処理の開始時からの相対的な回転角度を求めることは可能である。

なおレーザスポットの認識は、VGAサイズの認識画面において20ピクセル平方の範囲で位置を詳細化しており、 L_0, L_1 の値に直すと最大でも $\pm 3.6\text{mm}$ 程度の誤差となる。ただし後述する操作性評価実験の結果によれば、実際の操作では精度よりも認識領域の範囲が操作性に大きな影響を与えることが判明した。

3.2.4 認識可能領域の範囲

カメラで認識可能な領域は、レンズの歪みによる影響により台形が多少歪んだ形になる。今回は認識可能な範囲を測定するために、台形の中央部を通り台形が乗る平面(机上)に垂直な平面上(世界座標における XZ 平面上)で、認識できる範囲を実際に計測した(図3.8)。図3.8における網掛けの部分は、理論上認識可能な領域を示すものである。

今回用意したシステムでは、カメラで認識可能な領域の大きさは上底、下底、高さがそれぞれ15.5cm、24.5cm、17.2cmの台形となった。またレーザポインタから分岐するレーザ光の分岐角度 ψ に関して $\tan \psi = 0.34$ であり、対角線上にあるレーザ光の2点が XZ 平面上に乗るようにした場合、鉛直方向に25.0cmまで離すことができる。この条件で17.2cmの弧を描く円を計算すると、高さ11.0cmを中心とする半径14.0cmの円内が理論上の認識可能な範囲となる。

前述の平面付近でレーザポインタを手動で走査し、推定した3次元位置に関する x, z 座標を測定した。

計測した結果を図3.9に示す。今回のシステムにおいては、高さ方向に20cm程度、前後方向に中心から $+7 \sim -12\text{cm}$ 程度の空間が実用的な範囲となった。X軸のプラス方向で認識可能な領域が狭くなっているのは、 XZ 平面上に設置されているカメラとの位置関係で生じるオクルージョンの影響である(図3.8)。

また理論上計測可能な領域の境界付近までは測定できていない。その理由として、工作精度の不足によるレーザ光の拡散を指摘できる。今回のプロトタイプではレーザを分岐させる精度が劣るため分岐した側のレーザ光が拡散してしまう。そのため遠くから照射した場合はレーザスポットがぼやけ、うまく認識できないという問題によるものである。さらに、 XY 平面付近では4点が隣接するためうまく認識できず、その影響で、机上付近すなわち Z 座標の値が小さい範囲は計測できていない。

¹ 4点のうちいずれかの1点を区別できるようにすれば、レーザポインタの軸を中心とした回転方向の絶対値を求めることも可能である。次章で述べる精度向上策を利用すれば、4点にさらに1点新しく追加することで実現可能と考える。

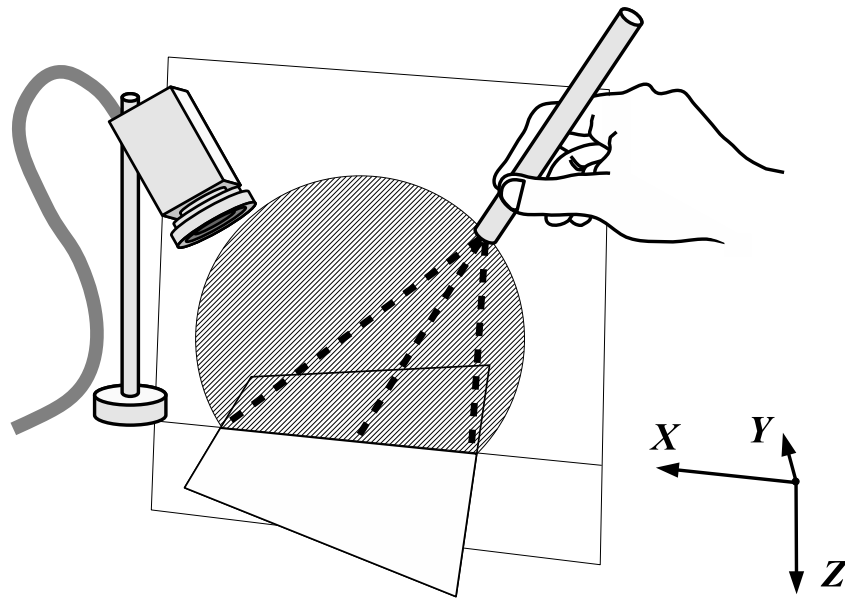


図 3.8: 認識可能領域の範囲 (XZ 平面上)

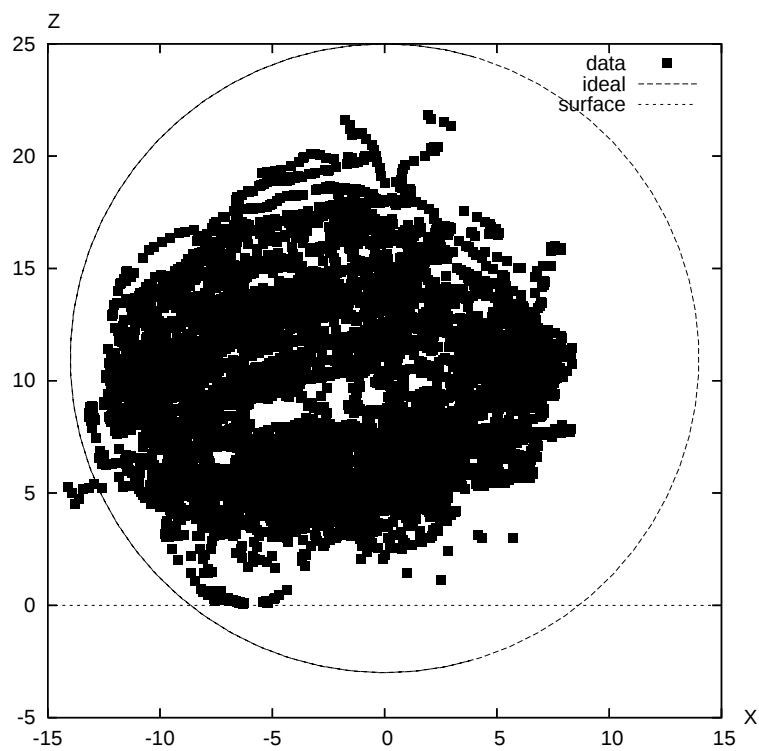


図 3.9: 対象範囲の計測結果

3.3 ユーザビリティの評価

提案する3次元情報入力方法の操作性を評価するために、モデル空間における透視視点位置を本方式に基づいて制御することで3次元モデルの位置姿勢を直感的に操作するアプリケーションを構築した。本節では、評価用アプリケーションを用いたユーザビリティ評価の実験について述べる。

評価はSD法 (semantic differential method) による主観的評価と、作業に要した時間の測定による効率性・魅力性の検証の2種類の側面から実施した。

3.3.1 評価アプリケーション

今回、ユーザビリティの評価に用いたアプリケーションは、仮想空間上に配置したオブジェクトをユーザの望む位置から表示させることを実現するアプリケーションである。このアプリケーションでは、対象とするオブジェクトを中心として上下左右2方向に対する回転と、視点からオブジェクト方向への拡大縮小の3自由度を同時に制御することができる。

今回の実験において最初に用意したアプリケーションでは、レーザポインタ先端位置の縦横高さを視点の位置に反映させることで3次元の操作を実現した。すなわち、オブジェクトそのものは仮想空間の中央に固定したものとし、レーザポインタの先端位置で仮想空間上のカメラ位置を操作、透視投影変換により表示する像を作成するという操作方法である。また比較のために、オブジェクトの操作は同じとし、マウス等、既存のポインティングデバイス操作により投影視点を操作する従来型アプリケーションも用意した。

既存手法によるアプリケーションでは、ボタン押下等を併用して自由度の不足をカバーする。すなわち左ボタン押下との併用で視点の上下左右方向への移動を実現し、右ボタン押下との併用でズームイン、ズームアウトを実現する (図 3.10)。

3.3.2 評価実験の手順

前述した評価用アプリケーションを用いて、主観的評価および作業時間の計測による客観的評価を同時に行った。実験においては、「初期状態として非常に小さく表示されているモデルを操作して別途指示する姿勢の表示に変化させる」というタスクを被験者に与えた。

図 3.11 は、本タスクで評価するアプリケーションの初期画面とタスク達成時の画面を示したものである。

評価用アプリケーションを起動すると、図 3.11 左に示すように、3次元CGで表示するモデルが画面中央に非常に小さく右向きで表示される (拡大図参照)。そこで被験者に対して、「視点の位置を操作し、図 3.11 右に示すとおり、画面いっぱい、左向き、かつやや斜め上方から俯瞰した姿でモデルが表示されるように操作すること」という指示を与えた。

この指示する過程においては、被験者が操作を試みる前に、実験を説明する実験実施者がそれぞれの評価用アプリケーションを操作してみせて、タスクを説明した。また事前に、操作が完了したら報告することという指示を与えておく。そのうえで、被験者自身が「指示された姿勢に近い表示になるまで操作できた」と認識し、実験実施者にそれを口頭で告げた時点でタスクのゴールを設定した。この達成条件には解釈の幅が含まれるものではあ

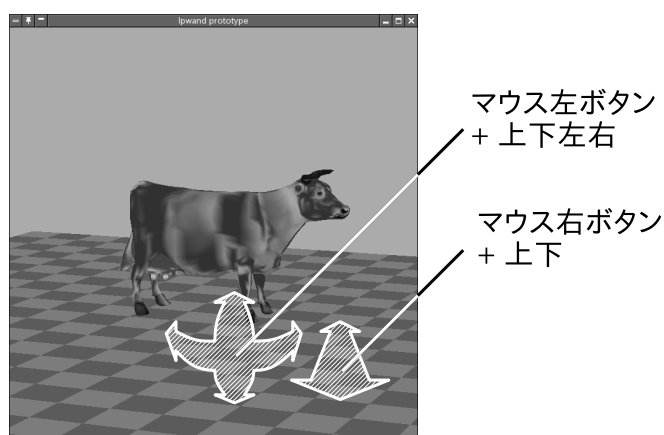


図 3.10: 既存手法

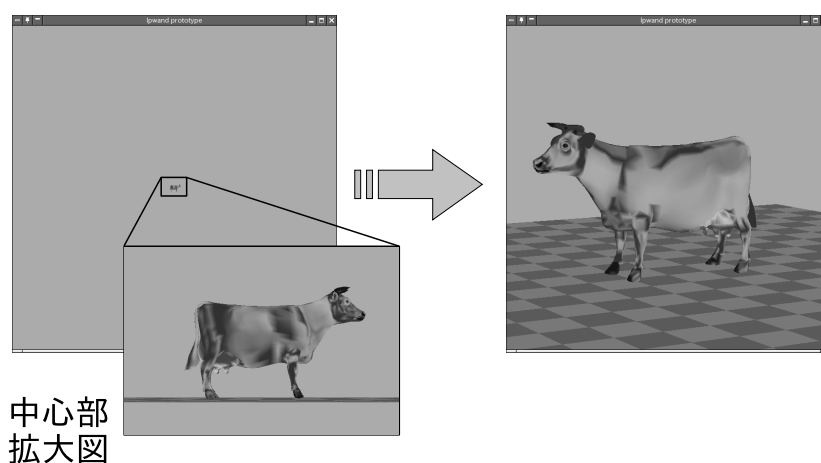


図 3.11: 評価実験のタスク

たが、比較的簡単なタスクであったため、被験者全員がゴールを逸脱することなく本タスクを達成できた。なおタスク遂行時間は、被験者が操作を開始してからタスク達成までの時間を計測した。

本実験には、男性 27 名、女性 8 名の計 35 名が参加した。参加者の年齢は 20 代から 40 代であり、被験者の平均年齢は 29.7 歳である。被験者は情報系の大学に在籍する学生、教員および、同じく企業における情報系関連部署に勤務する社員が中心であり、被験者の情報リテラシは総じて高い。

3.3.3 SD 法による主観的評価

質問紙による主観的評価実験は、以下の手順で実施した。

1. 本提案手法および既存手法による視点位置制御を備えた 3D モデル表示アプリケー

ションを個別に用意する．被験者は両方のシステムを体験し，与えられたタスクを遂行する．

2. 被験者はそれぞれのシステムについて，用意した質問紙にその操作感の印象を記入する．
3. 両システムについてプロフィールを比較する．また評価尺度に関する因子分析により評価尺度の妥当性を評価する．

主観評価実験においては，全ての被験者が両方のシステムを体験し，双方の操作感を評価した．その際，各システムを体験する順序は被験者毎に変えるように留意した．すなわち，半数の被験者は本提案手法によるシステムを先に体験し，残りの被験者は既存手法によるシステムを先に体験するように配慮した．

用意した質問紙には，表 3.1 に示した形容詞対² を記載した．各形容詞対に対し，それぞれの方向へ「よくあてはまる」「あてはまる」「すこしあてはまる」の 3 段階を設定し，さらに「どちらともいえない」を加えた 7 段階の評価を被験者に求めた．また質問紙には自由記述欄を設け，各手法に対する意見の記入も求めた．

結果を比較できるように，本質問紙は前章で述べた実験において利用した質問紙と同じもの³ を用いた．したがって，評価尺度として利用した感性評価用語は同実験の基準に準じて選択されたものである．

表 3.1: 質問紙に記載した評価尺度 (2)

質問番号	評価尺度	
1	単純な	複雑な
2	安定な	不安定な
3	難しい	分かりやすい
4	ありがちな	新鮮な
5	保守的な	革新的な
6	不親切な	親切な
7	おもしろい	つまらない
8	不便な	便利な
9	一般的な	特殊な
10	不正確な	正確な
11	身近な	なじみのない
12	落ち着いた	落ち着かない
13	直感的な	論理的な

² 被験者に 3 名の外国人が含まれていたため，外国人に対しては英語による質問紙を用意した．

³ 質問紙には，前章の実験結果において不適切と検証された形容詞対も記載されていたが，今回の分析ではそれらの形容詞対は使用しなかった．

なお質問紙への記載に関して、類似した形容詞の重複を避けるために形容詞対の並べ方を反転させた項目がある。具体的には表2.1に示す質問番号3, 6, 8, 10がそれにあたる。以下の分析においては逆になっていることに留意されたい。

3.3.4 利用効率，操作感に対する客観的評価

SD法による主観的評価と同時に、一部の被験者(22名)については、与えられたタスクを遂行する時間を測定することによる効率性の客観的な検証も実施した。また本評価においては、被験者に対して「質問紙に記入して操作感を評価するために、必要なだけ様々な操作を行ってみてほしい」との指示も与えた。すなわち、タスクを完遂するまでの時間を測定するとともに、タスク終了後にもどれだけシステムを触っていたかの時間も測定した。後者の時間計測はシステムに対する興味の度合いを分析することが目的である。

3.4 実験の結果と考察

提案手法についてのユーザビリティの主観的評価に関しては、まず評価尺度の妥当性を評価するために、因子分析を行った。因子分析によっていくつかの評価因子を抽出し、提案手法の特性を明らかにするとともに応用について検討した。

また客観的評価ではタスクの遂行にかかった時間とその後の操作時間の計測を分析した。本節では、それぞれの結果とそれに基づく考察について述べる。

3.4.1 評価尺度を構成する因子の解釈

まず評価尺度の妥当性検証のために因子分析を実施した。なお因子の抽出には最尤法を用いた。前章で提案したシステムに関するユーザビリティ評価では固有値1以上の基準を設けたうえで因子解釈の可能性を考慮して因子数を3として設定していたため、今回の分析においてもまず因子数を3として因子分析を試みた。なお前述の検討では、3つの因子を「安心感」「親しみやすさ」「慣れ」と解釈している。

因子数を3に設定し、バリマックス回転を行った結果の因子負荷を表3.2に示す。

表3.2において、太字として表記されている値は、各因子負荷量を大きい順番に並べたときにそれぞれの評価尺度に対して主因子を決定できる値に閾値を設定した場合の主因子を示している。すなわちこの場合は「身近な－なじみのない」といった形容詞対において因子1と因子2が拮抗しており、そのため閾値を0.574から0.638の間に設定することになる。その結果として抽出された値が太字で示された値である。

因子数3で因子分析を実施した場合、全体の傾向は、前章で述べた分析における分析結果と同様であった。しかし、表3.2に示すようにいくつかの形容詞対に関しては主因子を特定することが困難な結果となった。そこで、因子数を増やした分析を試みた。結果を表3.3に示す。

因子数を4とすることで、各因子を明確に抽出することができた。表3.3には、それぞれ因子負荷量が高い因子に着目して分類した4つのグループが示されている。

表 3.2: 因子分析の結果 (因子数 3 の場合)

項目	因子 1	因子 2	因子 3
単純な – 複雑な	0.091	0.697	0.235
安定な – 不安定な	0.466	0.364	0.756
分かりやすい – 難しい	0.090	0.811	-0.034
ありがちな – 新鮮な	0.910	0.195	0.211
保守的な – 革新的な	0.904	0.077	0.185
親切的な – 不親切的な	-0.267	0.393	-0.189
おもしろい – つまらない	-0.726	0.084	-0.387
便利な – 不便な	0.108	0.768	0.099
一般的な – 特殊な	0.828	0.223	0.279
正確な – 不正確な	0.362	0.493	0.486
身近な – なじみのない	0.638	0.574	0.150
落ち着いた – 落ち着かない	0.463	0.548	0.452
直感的な – 論理的な	-0.349	0.185	-0.362

表 3.3: 因子分析の結果

項目	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
ありがちな – 新鮮な	0.895	0.325	0.085	-0.158
保守的な – 革新的な	0.844	0.222	0.067	-0.272
一般的な – 特殊な	0.791	0.272	0.228	-0.262
身近な – なじみのない	0.648	0.370	0.446	0.059
安定な – 不安定な	0.392	0.640	0.371	-0.385
正確な – 不正確な	0.302	0.710	0.297	-0.072
落ち着いた – 落ち着かない	0.417	0.736	0.308	-0.010
単純な – 複雑な	0.107	0.186	0.878	0.009
分かりやすい – 難しい	0.170	0.266	0.626	0.396
便利な – 不便な	0.163	0.389	0.560	0.310
親切的な – 不親切的な	-0.168	0.064	0.210	0.477
おもしろい – つまらない	-0.631	-0.174	-0.086	0.550
直感的な – 論理的な	-0.226	-0.232	0.079	0.458

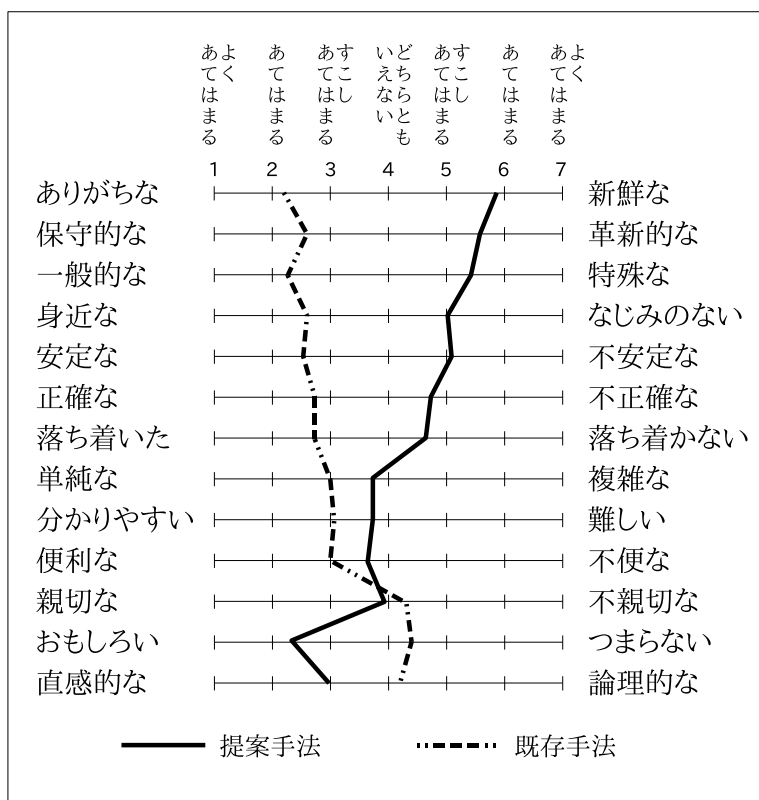


図 3.12: 両システムのプロフィール

因子1は前章で報告した分析において「慣れ」として規定された因子であり、また因子2は同じく「安心感」に関係する因子として解釈されている。さらに、前章において分析された3つの因子のうち残りの「親しみやすさ」に関する因子が、今回の実験結果では因子3および因子4に分割された。したがって因子3については、「親しみやすさ」のうち「簡潔さ」に関する因子が分離されたものと捉えれば、今回は4つの因子をそれぞれ「慣れ」「安心感」「簡潔さ」「親しみやすさ」の因子として解釈することができる。

3.4.2 両システムの操作性に関する主観評価

前述の因子分析検討結果に基づいて、各因子について評価尺度のグルーピングを行い、両システムのプロフィールを求めた(図 3.12)。それぞれの平均値および標準偏差は表 3.4 に示すとおりである。

「慣れ」および「安心感」の因子に関しては、従来手法と提案手法のそれぞれのシステムについて大きな乖離が見られた。提案手法に関しては、とくに「慣れ」の因子に関して、「新鮮かつ革新的、特殊、なじみがない」という評価が得られている。これは一方で「親しみやすさ」の因子において「おもしろい」という評価項目が、提案手法について高い評価を得ている点の裏返しになっていると考えることができる。

「安心感」についての不安定さ・不正確さに関しては、提案システムにまだ改善の余地が

あるといえる．ただし「慣れ」の因子についても同様な指摘ができるが，提案手法はユーザにとって目新しいものであり，日常的に慣れている既存手法との比較において，提案手法の操作が慣れていないためにうまく操作できないことから操作の安定性に不安を抱えている可能性は否めない．この点については，提案手法についてトレーニングを経たユーザによる主観的評価を実施して分析する余地が残されている．

3.4.3 同時操作の自由度を増やした場合の評価

先の実験では，操作入力を3自由度に限定し，マウスによる操作があまり複雑にならない状況においても，提案手法の簡単さ，わかりやすさ，直感性といった観点での優位点を評価することができた．

本提案手法は6自由度同時に入力可能とできることも大きな特長であるため，さらに，光軸の角度情報による操作を追加し，視点位置の制御をモデルに対する回転・拡大方向の移動だけでなく並行移動も同時に操作できるように改良した．具体的には，光軸の角度変化をオブジェクトを中心とする視点の回転操作に，また光軸方向の前後操作を拡大縮小に対応付け操作可能とした．また光軸の角度を固定してレーザーポイントの位置のみ並行移動させる動作を，モデル空間内での視点の並行移動に対応付けた．

この改良したシステムについて，先に利用した質問紙を用いた主観評価を試みた．評価実験の被験者は，前述の実験に参加した者のうち，追加実験への参加協力を得ることができた男性14名および女性1名の計15名である．平均年齢36.4歳で，先に述べたとおり，情報リテラシは比較的高い層である．

表 3.4: 7段階の評価値に関する平均と標準偏差

項目	提案法	従来法
ありがちな – 新鮮な	5.89 (0.67)	2.26 (1.08)
保守的な – 革新的な	5.60 (0.64)	2.63 (1.17)
一般的な – 特殊な	5.46 (0.91)	2.29 (0.91)
身近な – なじみのない	5.06 (1.39)	2.63 (1.31)
安定な – 不安定な	5.11 (1.26)	2.57 (1.42)
正確な – 不正確な	4.77 (1.24)	2.74 (1.54)
落ち着いた – 落ち着かない	4.71 (1.11)	2.74 (1.23)
単純な – 複雑な	3.74 (1.66)	3.00 (1.45)
分かりやすい – 難しい	3.74 (1.59)	3.09 (1.38)
便利な – 不便な	3.69 (1.28)	3.00 (1.12)
親切的な – 不親切的な	3.94 (1.07)	4.34 (1.14)
おもしろい – つまらない	2.34 (1.07)	4.37 (1.40)
直感的な – 論理的な	3.00 (1.33)	4.20 (1.55)

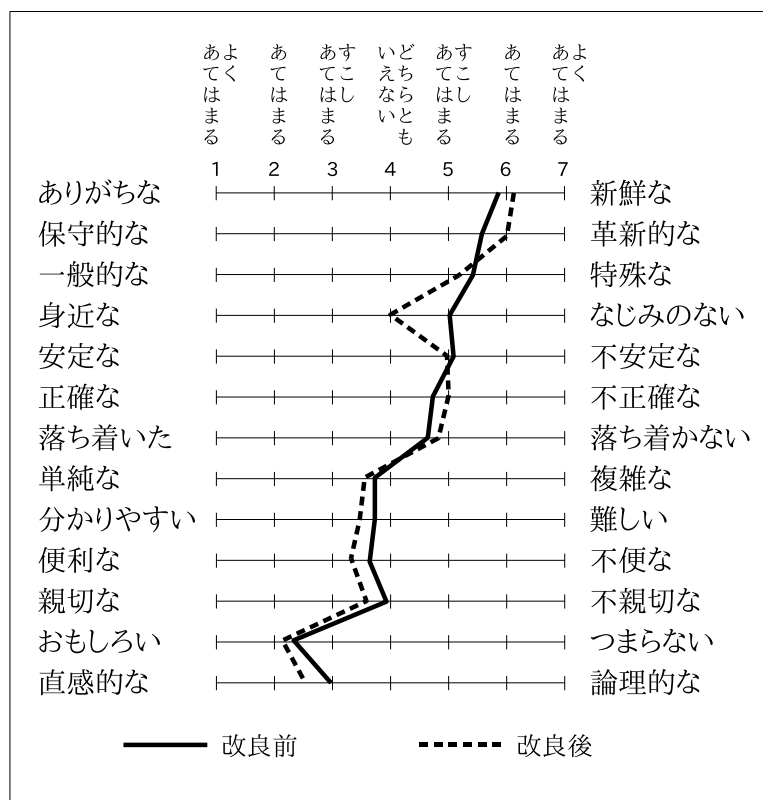


図 3.13: 提案システムおよび改良を加えたシステムのプロフィール

表 3.5: 7段階の評価値に関する平均と標準偏差 (改良前後)

項目	改良前	改良後
ありがちな – 新鮮な	5.89 (0.67)	6.07 (0.57)
保守的な – 革新的な	5.60 (0.64)	6.00 (0.57)
一般的な – 特殊な	5.46 (0.91)	5.13 (1.26)
身近な – なじみのない	5.06 (1.39)	4.00 (1.83)
安定な – 不安定な	5.11 (1.26)	5.00 (1.21)
正確な – 不正確な	4.77 (1.24)	5.00 (0.73)
落ち着いた – 落ち着かない	4.71 (1.11)	4.87 (0.88)
単純な – 複雑な	3.74 (1.66)	3.60 (1.62)
分かりやすい – 難しい	3.74 (1.59)	3.54 (1.41)
便利な – 不便な	3.69 (1.28)	3.33 (0.87)
親切的な – 不親切的な	3.94 (1.07)	3.67 (1.01)
おもしろい – つまらない	2.34 (1.07)	2.13 (0.96)
直感的な – 論理的な	3.00 (1.33)	2.60 (1.78)

改良した提案手法に関するプロフィールを表 3.5 および図 3.13 に示す．なお表 3.5 には，比較のために，表 3.4 に記載した改良前の提案手法に対する評価値の平均と標準偏差を並べて表記した．

この結果をみると，改良前後の両システムでほぼ類似のプロフィールを描くことがわかる．被験者の一部からは「同時に操作できる自由度を増やすと操作が複雑になる」という意見もあったが，実際に試してみたところ，同時操作可能な自由度を増加させた場合でも，本提案手法のインタフェースであればとくに複雑な操作という印象が増すことはないことが示された．

3.4.4 利用効率，操作性に関する客観評価

続いて，利用効率（与えられたタスクを遂行するための平均的な時間の計測）と操作性に関する客観的評価実験の結果を表 3.6 および表 3.7 に示す．

表 3.6: タスク遂行に要した時間の平均と標準偏差

対象	平均 (標準偏差)
提案法	24" 8 (10" 3)
従来法 (マウスを用いた操作)	28" 5 (12" 2)

表 3.7: 操作感評価に要した時間の平均と標準偏差

対象	平均 (標準偏差)
提案法	64" 8 (52" 6)
従来法 (マウスを用いた操作)	45" 1 (26" 2)

前者の利用効率評価については，既存手法と提案手法で有意な差は見られなかった．ただし主観評価実験の分析結果から，ほとんどの被験者が提案する新しいインタフェースに不慣れであり，対して既存手法に関しては日頃から慣れ親しんでいたことを考慮すると，既存手法に代わる直感的な 3 次元情報入力装置としてはほぼ遜色ないと考えられる．

一方「操作性を的確に評価できるように」という名目で各被験者が満足するまでシステムを自由に操作させたことに要した時間に関しては，表 3.7 に示すように大きな差が出ており， t 検定の結果，有意な差が示された ($t = 2.21$, $df = 21$, $p = 0.039 < .05$) ．

この結果は，提案手法が目新しいものであるために被験者がより時間をかけて理解しようとしたことに加え，多くの被験者が提案手法を面白いと感じており⁴，新しい 3 次元情報入力装置として興味を惹いたことを裏付ける結果となった．

これらの結果は，主観的評価実験における「慣れ」および「親しみやすさ」の観点が客観的に表わされたものとも考えることができる．

⁴ 表 3.8 に，主観評価実験を実施した際に得られた被験者からの代表的なコメントを列挙する．

3.4.5 提案手法の課題と応用分野

提案手法の原理から，レーザポインタ先端の位置を推定するために利用する4点のレーザ光スポットの全てが必ず認識されていなければならない．そのためカメラの画角から外れないようにレーザポインタを操作する必要がある．しかし画面を見ながらの操作と，レーザポインタが現在どこを指しているかの確認を同時に行うことが困難であり，操作しているうちに画角から外れてしまう状況がしばしば生じた．

今回のプロトタイプシステムでは認識中の画像を確認用の画面として表示させていたが，この画面は本来必要なものではなく，またこの画面を有効に活用できた被験者も多くはなかった．また実際に被験者からの意見でも，この問題が提案手法の大きな課題として指摘された．

1つの解決策としては，提案手法によるユーザインタフェースを今回のような机上で利用する3次元ポインティングデバイスとしてではなく，より大きなシステムで利用することで画像認識の対象とする領域を大きくとるという方策が考えられる．例えば大型スクリーン上に表示したVRを対象として，特定オブジェクトに関する3次元位置の操作に用いるといった利用例であれば，今回のような問題は回避可能である．なお認識可能な空間領域を拡大するには，分岐したレーザ光が減衰しないようアタッチメント作成の工作精度を高めるか，別途，レーザ光を分岐する方式の改良が必要になる．

またユーザビリティの主観的評価実験で得られたコメントの中に，若干ストレスを感じる旨の意見もあった．この点に関してはシステム実装上の問題と考えられる．すなわちハードウェアそのものの処理能力向上や認識処理のハードウェア化等による改善の余地がまだ残されている状況といえる．

3.5 まとめ

レーザポインタから照射されるレーザ光を複数のレーザ光に分岐させるアダプタを用い，かつそれら複数のレーザ光によって生成されるレーザスポットの位置を画像認識によって実時間計測することからレーザポインタ先端の位置と向きを推定する．この結果を3次元情報入力装置として応用した3次元モデル操作系を提案し，本提案と既存手法によるシステムについて，ユーザビリティに関する主観評価実験および操作効率や操作の理解に関する評価実験を行った．

表 3.8: 被験者による代表的なコメント

対象	コメント
提案法	提案手法のほうが楽しかった． 最初は困難だったが慣れると楽しい． 操作範囲がはみ出ると操作できなくなる点は改善が必要である．
従来法	制御が確実で，明確な操作となっている． 慣れているため分かりやすかった．

ユーザビリティの主観的評価実験は7段階13尺度の質問紙を用いたSD法により実施した。35名の被験者から得られた結果に対する因子分析の結果、システムの操作における「慣れ」「安心感」「簡潔さ」「親しみやすさ」の4個の因子を抽出した。

また操作の自由度を変えて評価を行う実験を行うことにより、同時操作可能な自由度を増やしても複雑さを増すことなくより自然な操作感を与えることを明らかにした。さらに、操作効率に関しては、既存手法と同等の操作性を提示するとともに、提案手法に対する被験者の興味の強さを示した。なお前章で述べた手法の評価と同様、習熟度による評価の変化や疲労性に関する生理的評価は今後の課題として残されている。

今回の評価実験で特筆すべき点として、提案手法は高い「親しみやすさ」を備えている点が挙げられる。一般的にユーザは新しい技術の導入に抵抗を示すことが多いが、自発的な興味を示させることによりその抵抗を克服することが可能となる。ユーザビリティを考慮したインタフェースの提案にあたり、ユーザの満足度向上には操作の楽しさも大きく寄与する。とくに3次元の情報入力が必要とする場面において、直感的なインタフェースを低コストで簡単に実現できる本提案手法が有効であることが明らかになった。

第4章 3次元情報入力装置の改良

前々章および前章において、3次元CADやコンピュータグラフィクス(CG)用ソフトウェアにおいて3次元モデルを扱う際に、マウスやトラックボールなど既存のポインティングデバイスが持つ操作の自由度の数と、3次元空間内で透視投影変換を実施して3次元モデルのレンダリングを行う際に視点の位置と向きを決定するための自由度の数に関するミスマッチを指摘し、より直感的に操作できる3次元情報入力装置(3次元ポインティングデバイス)を提案してきた。

様々な装置の提案と評価を繰り返し、提案手法の操作性は向上してきたものの、まだ完全なユーザインタフェースを提供するレベルにまでは達していない。また筆者らが提案する手法は、特殊な装置を用いることなく、可能な限り一般的に入手できる部材を使用して低コストで実現できることを目指している点も特徴の1つである。

これまでの成果を改良し、プロジェクタで壁面に投影されたCG画面において、その画面中に表示されている3次元オブジェクトを直接操作する手法を考案した。本手法では、プロジェクタで投影される画面と操作に使用する領域を重ね合わせることで、画面上に表示されているオブジェクトを直接操作しているようにみせることができる。また、レーザポインタに装着するアタッチメントもごく簡単な構造をしており、画像認識に利用するカメラも一般的に入手可能な、いわゆるウェブカメラである。本手法は、直接的かつ直感的な操作方法を提供するだけでなく、市販のレーザポインタやウェブカメラを用いて簡単かつ安価に構築可能である点も大きな特長となっている。

第4.1節では、前章で述べた報告において改善すべき項目として挙げられていた課題を再掲する。続く第4.2節で改良したレーザスポット認識手法について説明し、第4.3節ではもう1つの改善方法について説明する。第4.4節で3次元CGアプリケーションへの適用例を示し、最後の節で本章のまとめについて述べる。

4.1 既存提案手法の課題と解決策

まず最初に、これまで筆者らが提案してきたマルチスポットレーザポインタによる3次元情報入力装置の概要と、そのプロトタイプシステムが抱えていた問題点を説明する。本論文で述べる手法はこの問題点を解決し、より直感的なインタフェースを実現する。

4.1.1 直接操作の実現

前章で提案した3次元ポインティングデバイスは、レーザポインタのレーザ光を分岐するアタッチメントをレーザポインタ先端に装着し、その結果、机上の特定領域に写し出さ

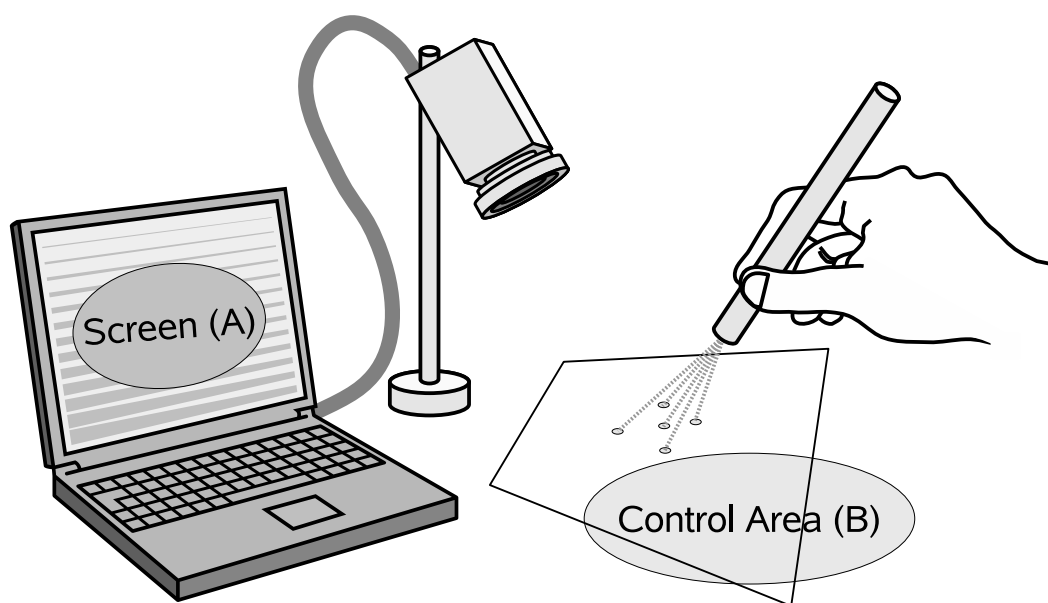


図 4.1: 既提案手法の利用イメージ

れるレーザスポットのパターンをカメラで計測することによりレーザポインタの3次元位置情報を推定するというものであった(図4.1)。

3次元位置推定の原理とアプリケーションに応用する基本的なコンセプトは、その改良版である本手法もほぼ同じである。ただし本手法では、レーザポインタ先端に装着するアタッチメントに改良を加えた。その結果、本節で述べる直接的な操作感を実現することが可能になった。

図4.1に示すとおり、前章で提案したプロトタイプシステムでは、ユーザが制御した結果を表示するスクリーン(図左、Screen (A))と、ユーザが位置を制御するために利用する領域(図右、Control Area (B))が分離していた。これは当初、マウスパッドを用いたマウス操作を意識してデザインしたものであったが、とくにカメラの画角から外れると操作不能になってしまうという問題点もあり、評価実験に参加したユーザからは、操作が直感的ではないというコメントが複数報じられた。また次節で述べる問題点から制御領域(B)を大きくとることができず、領域からはみださないように操作するためには画面と制御領域の両者を注視する必要があるという点が、使い勝手を阻害する大きな要因となっていた。

そこで本提案では、プロジェクタを利用して結果を提示する画像領域とレーザポインタのパターンを投影する領域を同じ壁面に重ね合わせることで、より直感的な操作方法を提示するようにした(図4.2)。

4.1.2 レーザポインタアタッチメントの改良

前述の直接操作を実現するためには、レーザ光を分岐させるアタッチメントの改良が必須であった。

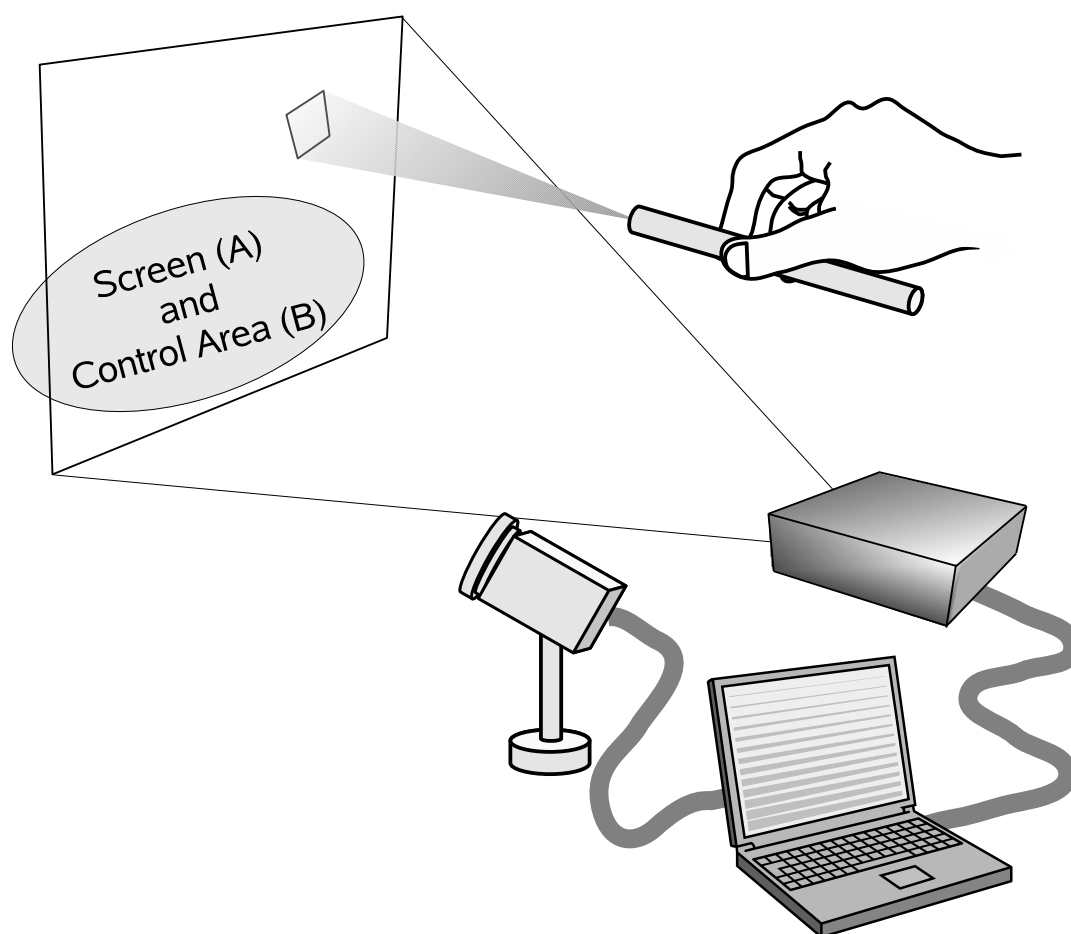


図 4.2: 直接操作の実現

前章で述べたアタッチメントでは，図 3.5 に示したように，合わせ鏡を利用してレーザー光を 5 つのビームに分岐させる方法を採用していた．

しかしこの方法では，工作精度の問題から，分岐したレーザービームが描く 4 つの点の輝度を十分に取ることができず，照射する平面（スクリーン）までの距離を確保することができないという問題が存在した．先に述べた領域（B）を大きくとることができないという課題は，この要因に依るものである．また同じ理由で，プロジェクタに投影した画面と重ね合わせたとしても輝度の差を得ることができず，画像認識でレーザースポットを認識することができないことから，図 4.2 に示すように表示領域（A）と制御領域（B）を重ねることが不可能であった．

そこで，輝度を落とさずにレーザー光のパターンを形成する方法を検討し，本提案ではプリズムを用いて特定のパターンを形成する手法を採用した．レーザー光の分岐に用いたプリズムおよびレーザーポインタ先端に装着するアタッチメントの実現例を図 4.3 に示す．図 4.3 左に示したプリズムは，僅かに傾斜のついた四角錐となっている．この中心部分を切り出し，アルミパイプにパテで固定することでアタッチメントを実装した（図 4.3 右）．

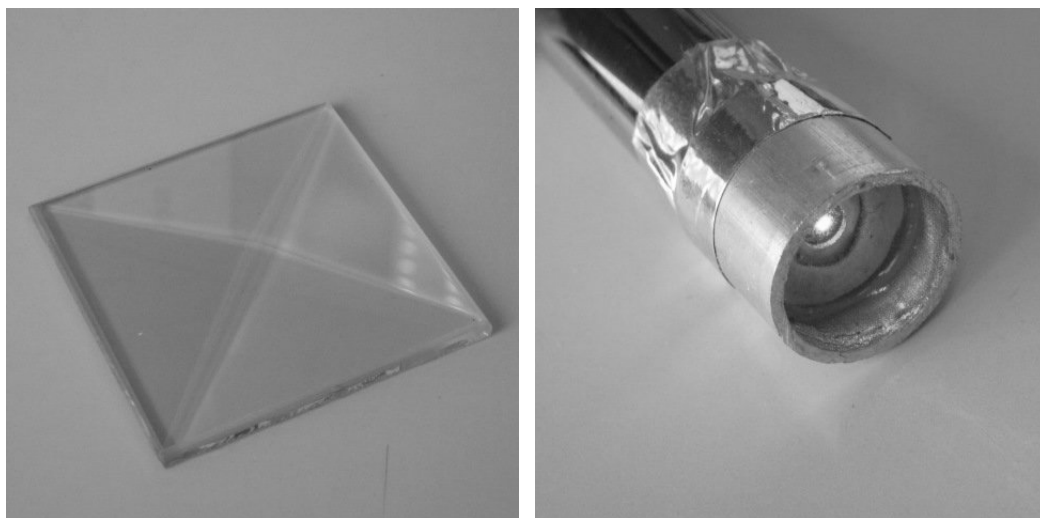


図 4.3: プリズム (左) と実装 (右)

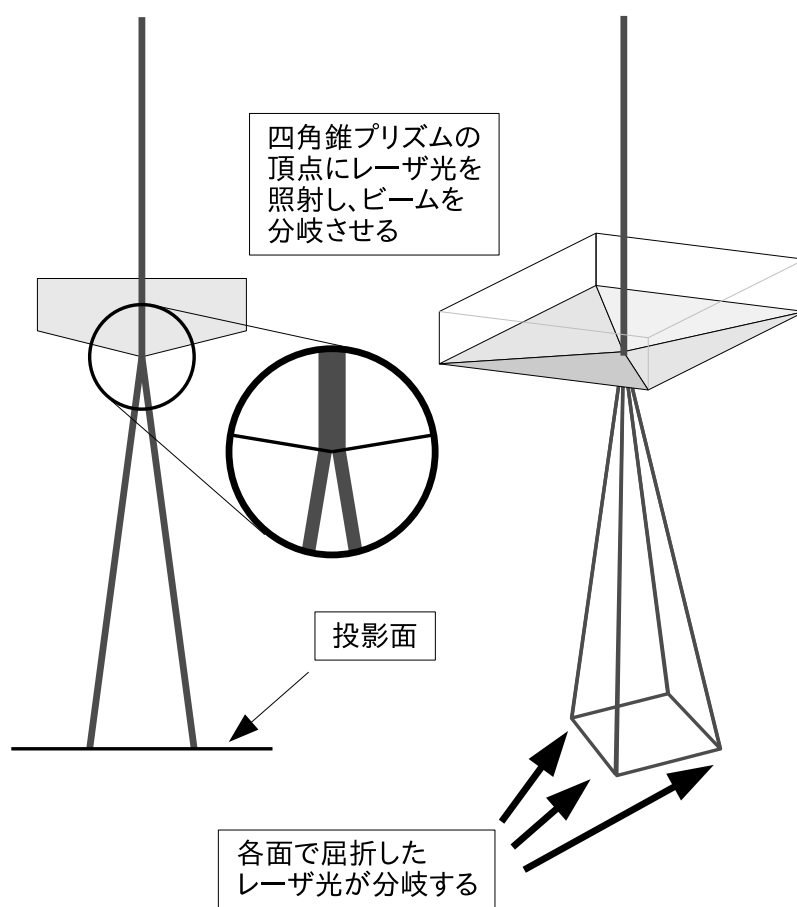


図 4.4: プリズムによるレーザー光の分岐

レーザポインタから出力されるレーザ光は、かなり絞られているとはいえ一定の幅を持つ。そこで、四角錐型のプリズムを利用し、その頂点へ照射することにより、レーザ光の一部が 4 面で屈折する。この現象を利用して、1 本のレーザビームを 4 本に分割することができる (図 4.4)。

なお四角錐型プリズムの面で分岐させる他、プリズム上の各面が接する辺でレーザ光が拡散するために、実際に投影されるパターンは四角形となる。したがって、本アタッチメントを装着することにより、レーザポインタから照射されるレーザ光は空間にレーザポインタの端点を先端とする四角錐を形成することとなる。

この方式によれば輝度低下のロスが少ないために、プロジェクタで投影した表示画面上にレーザ光によるパターンを描いても、表示される画面に対する輝度の差を確保することができる。したがって、表示領域 (A) と制御領域 (B) を重ね合わせることが可能となり、結果として直感的な操作を提供することができるようになる。

このアタッチメントの作成は手作業で行ったが、調整はプリズムの四角錐先端とレーザ光の中心部を合わせる必要があっただけであり、手作業で十分な精度を確保することができた。この点においても、既存の提案手法における機構よりも単純化した点が活かされている。

4.2 改良手法による 3 次元位置推定

スクリーンに投射されるレーザ光は、前述のアタッチメントを経由しているために、四角錐をスクリーンで切り取った断面としてスクリーン上で四角形のパターンを描く。そこで、カメラでそのパターンを計測し、平面投影変換の逆変換を行うことにより、四角形の各頂点について、世界座標での位置が求まる。なお上記計算に用いる平面投影変換行列は、あらかじめ事前のキャリブレーションにより求めておく。

これらの位置情報を利用して、四角錐の頂点を求める計算を行うことにより、レーザポインタ先端の 3 次元空間上における位置が求まる。また同時にレーザポインタが本来ポイントするスポットは、スクリーン上に描かれた四角形における対角線の交点として定まるため、その点とレーザポインタ先端を結ぶ直線はレーザポインタの軸と一致する。したがって、その 2 点の位置関係を考えることにより、レーザポインタの軸に直角な 2 方向の向きも求まる。本手法ではレーザポインタの軸を中心とした絶対的な回転角度を測定することはできないが、連続するフレーム間での対応関係を考慮することによって回転角度も推定することは可能である。

4.2.1 レーザパターンの認識

レーザポインタが照射する四角形のパターンは次の手順で解析され、四角形 4 頂点の位置が推定される。なお以下に述べる解析手順の前提として、カメラから取得された画像についてはノイズ除去などの前処理が済んでいるものとする。また下記アルゴリズムの前提として、解析対象の四角形パターンは完全なものでなくとも構わないが、対象とするパターン以外にノイズの影響による画素は含まれないものとし、とくに四角形の外側に存在する余分な領域は完全に除去されていることを条件とする。

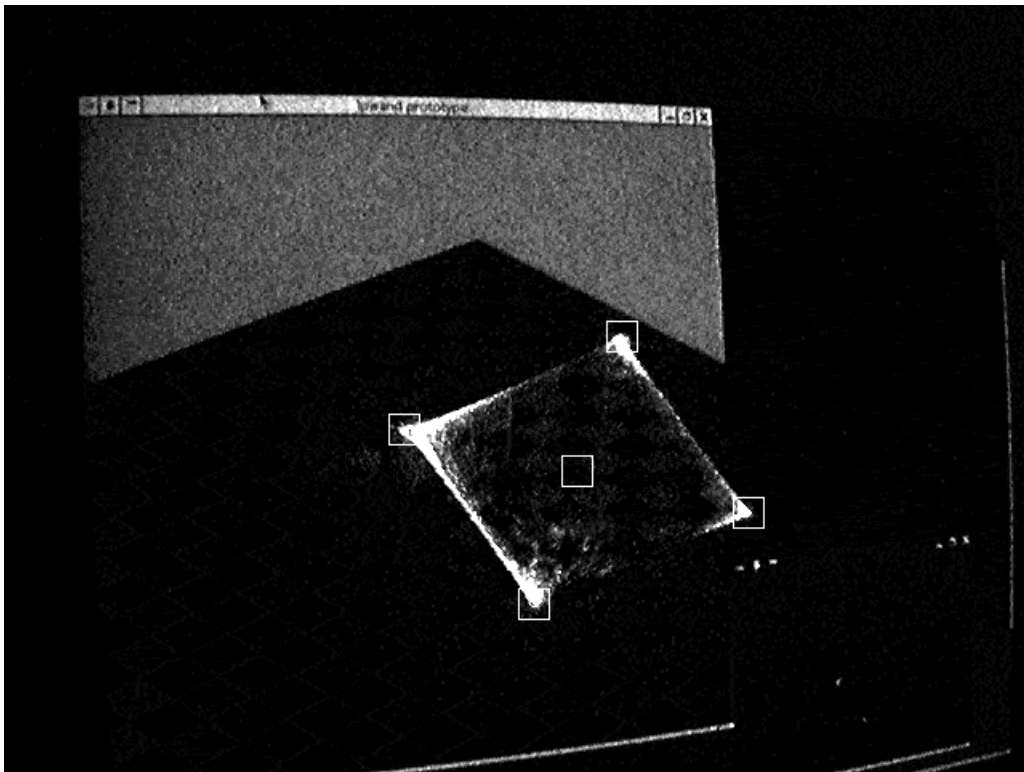


図 4.5: レーザパターンの認識

実際にアプリケーションの描画結果が映し出される画面を背景とするため、背景画面とレーザパターンの分離処理に背景差分等の技術を使うことができない。そこで、レーザパターンが高い輝度を持つことを利用し、カメラの入力ゲインを絞ることで背景画像に対する感度を抑制し、レーザパターンの分離を試みている。なおこのアプローチは [74, 75] 等でも利用されている方法である。

図 4.5 は入力画像から四角形パターンを抽出し、各頂点および対角線の交点を識別している状況である。レーザによる四角形のパターンについて、4 つの頂点と対角線の交点にマークが付いている様子を確認することができる。

四角形頂点候補の推定

入力されたパターンに対し、四角形頂点の初期値を以下の手順で推定する。図 4.6 は、ノイズ除去等の前処理が済んだ入力パターン (図 4.6 上) から四角形の頂点 A, B, C, D を求める概念 (図 4.6 下) を示す図である。

1. パターンを形成する全ての画素に関して、その重心 G を求める。
2. 同じくパターンを形成する全ての画素に関して、重心 G との距離を求め、各画素を距離の長さでソートする (図 4.7)。

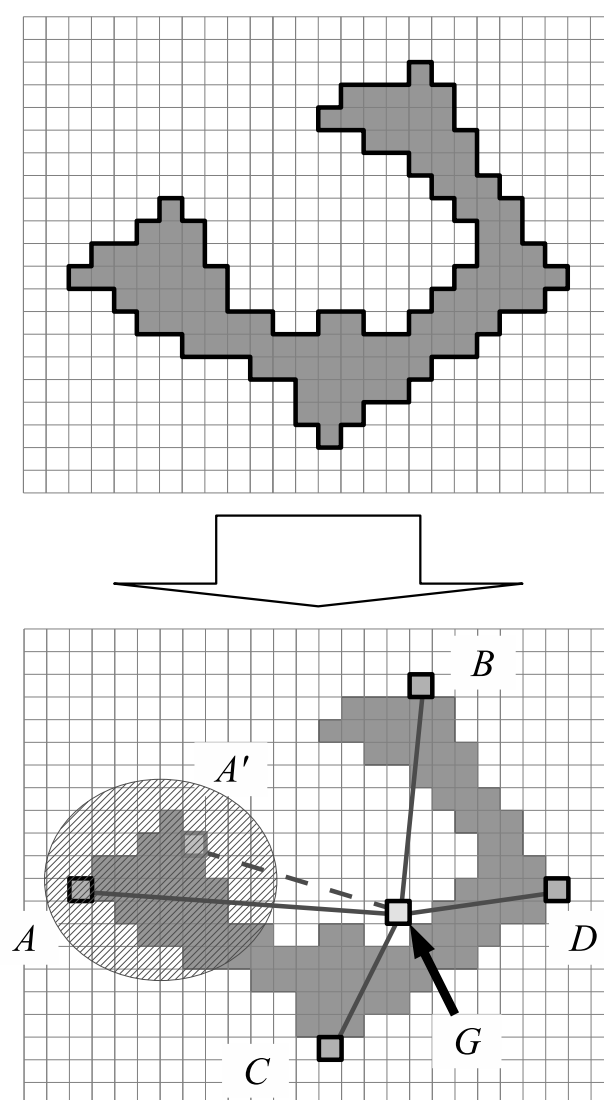


図 4.6: 四角形頂点の推定

3. 各画素は、暫定的に決定した頂点とその画素から重心 G を見込む角度の大きさによって 4 つのグループに分類する．例えば図 4.6 において，角度 AGA' が閾値を越えるまでは同じ領域に含まれるものとして扱う．
4. 図 4.7 に示すように，各領域に含まれる画素のうち，重心 G からの距離がもっとも大きいものを四角形の頂点とする．

なおこの手順で，入力される初期パターンによっては四角形の頂点を完全には求められない場合もある．しかしその場合でも，続く四角形頂点の追跡手順で補正され，最終的には各頂点を追跡することが可能になる．

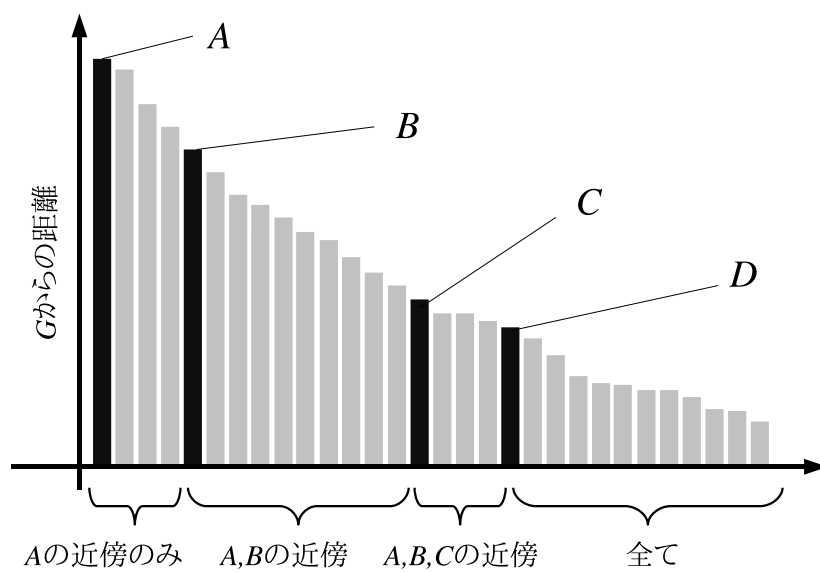


図 4.7: 四角形頂点画素の選択

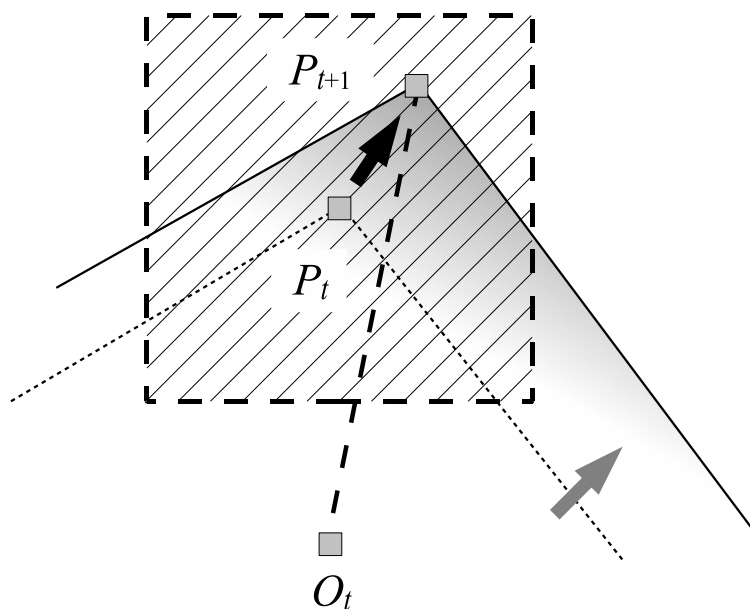


図 4.8: 四角形頂点のトラッキング

四角形頂点の追跡

本手法は、実時間画像処理をユーザインタフェースに応用する手法であり、計算量の削減は重要な課題の1つである。前項で述べた方法によりひとたび四角形頂点の初期値が求められれば、後は、動画フレームの連続性を利用して計算量を大幅に削減することができる。

四角形頂点のトラッキング手法について、図4.8によりその概念を説明する。

ユーザのレーザポインタ操作により、パターンの位置と形状は変化する。図4.8では、点線で示されるパターンが右上方向に移動した状況を示している(灰色の矢印)。時刻 t における頂点の1つを P_t 、対角線の中心を O_t とする。

時刻 $t+1$ において、新たな四角形の頂点は P_t を中心とする特定の範囲内で探索される。図4.8における網掛けの部分がその範囲を示す。この探索範囲のなかで、各画素について時刻 t における対角線の中心 O_t と各画素との距離を計算する。その結果、この範囲に含まれる画素で対角線の中心 O_t からもっとも遠い画素を、新たな四角形の頂点 P_{t+1} として定める。

本インタフェースでは、入力状態と待機状態を明示的に区別するためにレーザポインタが発光している間だけを制御状態としている。したがって、トラッキングの手順において探索範囲の中でパターンを形成する画素が発見できなかった場合には、待機状態に遷移したと判断してレーザポインタによる操作を中断する。

4.2.2 レーザポインタ先端位置の推定

レーザポインタが照射する四角形の各頂点が求まれば、先に述べたように各頂点の世界座標中における絶対位置が求まり、そこからレーザポインタ先端の3次元空間上における位置を求めることができる。

例として図4.6上の点 A, B, C, D を用いて説明する¹。対角線上の3点 A, O, D (O は対角線の交点)に着目し、各点とレーザポインタ先端 P を含む平面を考える。その平面上において、各点がレーザポインタ先端を見込む角度は一定である。したがって点 P は AO を弦とする円と OB を弦とする円の交点を作る軌跡上に存在する。

同様に、もう一方の対角線上の3点 B, O, C でも同様に点 P の候補が描く軌跡を得ることができる。両者の交点が、その点が3次元空間中のレーザポインタ先端位置の推定値である。

具体的な計算方法については前章の3.2.3「レーザポインタ先端位置の推定」を参照されたい。

4.3 回折格子の利用による改良

前節で提案した改良方式は、プリズムを利用して精度を向上することができるという点が特長であった。ただしこの方式においても、プリズムの加工精度に影響を受けるという

¹ 図4.6では、図4.7における説明の都合上、重心からの距離が長い順に A, B, C, D を並べているが、実際には、4つの頂点を、対角線を構成する二組の頂点对にまとめる処理を経ってから先端位置推定の計算を行う。

問題点が残されている．本節では，回折格子によるレーザ光の分岐と，レーザポインタアタッチメントを改良した3次元入力装置の試作について述べる．

4.3.1 回折格子を利用したレーザの分岐

図4.9は，回折格子による平行光の干渉縞が生成される原理を示すものである(図においては ± 2 次の干渉縞まで示している)．レーザ光を回折格子に照射し，右側のスクリーン上に干渉縞が生成されている様子を示している．なお1次元の回折スリットを利用すると干渉縞となるが，レーザ光を2次元の回折格子に照射すると，レーザ光を格子状に拡散させることができる．

レーザ光の波長を λ ，回折格子のスリット間隔を μ ，分割された0次および1次のレーザ光が見込む角度を θ とすると，

$$\mu \sin \theta = \lambda \quad (4.1)$$

の関係がある．また回折格子からスクリーンまでの距離を L とすると，角度 θ と干渉縞の間隔(スクリーン上に表示される格子点の間隔) l には，以下の関係がある．

$$\tan \theta = l/L \quad (4.2)$$

上記の2式から， θ の値が0に近いことを利用して近似的に以下の式を得る．

$$l = \frac{\lambda}{\mu} \cdot L \quad (4.3)$$

今回利用したレーザポインタの波長は532nm，回折格子のスリット間隔は5000nmである．したがってスクリーンに対して垂直にレーザ光を照射した場合，スクリーン上に表示される格子点の間隔 l は回折格子からスクリーンまでの距離 L から以下のように計算される．

$$l = 0.106L \quad (4.4)$$

図4.10は，回折格子フィルムをレーザポインタの先端に取り付け，レーザポインタから照射されるレーザ光が等間隔に拡散する状況を撮影した写真である．0次の格子点(最も明るく輝いている点)を中心として，干渉による格子点が等間隔で並んでいる様子を確認することができる．

4.3.2 改良版レーザポインタアタッチメント

回折格子を利用して，改良版のレーザポインタアタッチメントを作成した．利用した分光シートとレーザポインタ先端に装着するアタッチメント実装の例を図4.11に示す．この改良版アタッチメントでは，縦横1次の分光を利用して4点を構成する(図4.12)．

4点の認識方法は前章で利用した認識処理をそのまま流用することができる．また中心点として4点の交点を計算で求めることにより，3次元位置の推定も前章で述べたアルゴリズムをそのまま利用することが可能である．

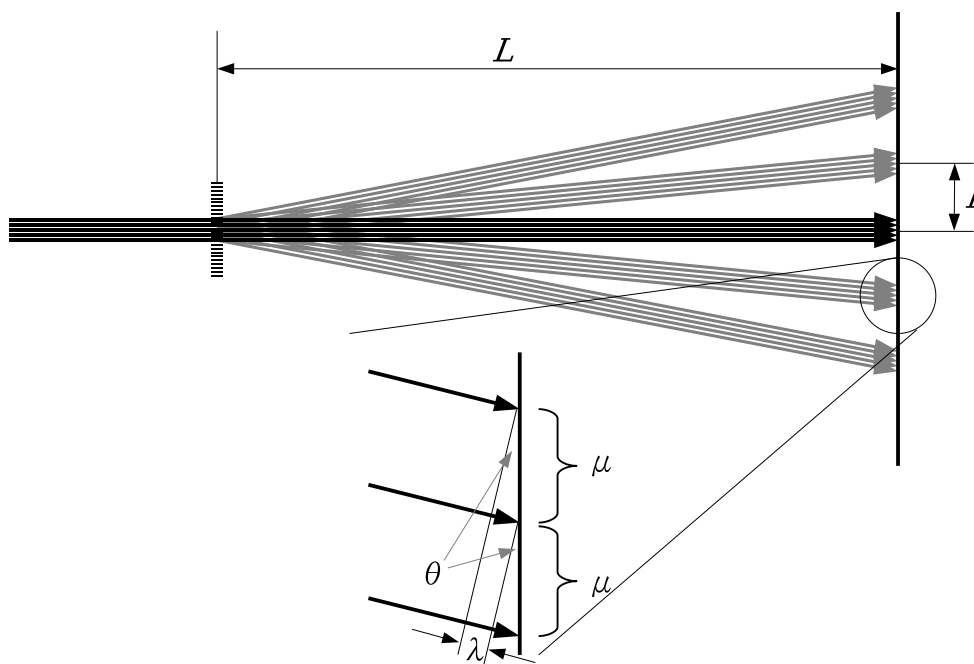


図 4.9: レーザ光の回折



図 4.10: 回折格子によるレーザスポットの拡散

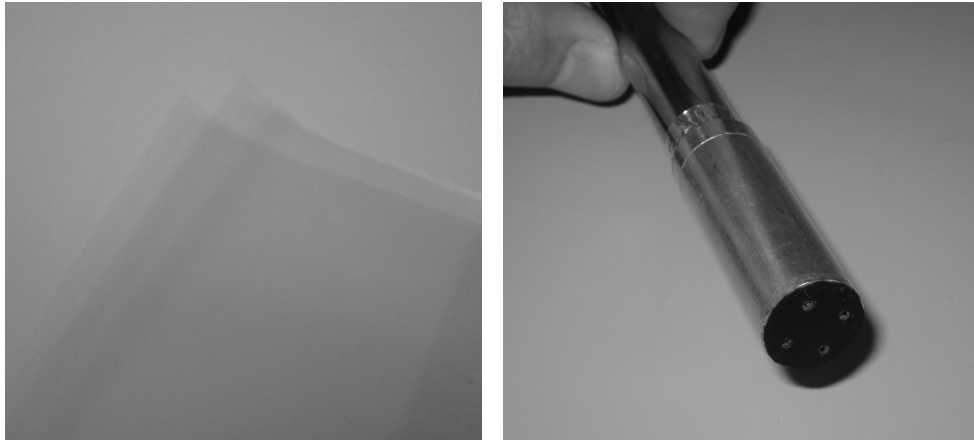


図 4.11: 分光シート (左) と実装 (右)

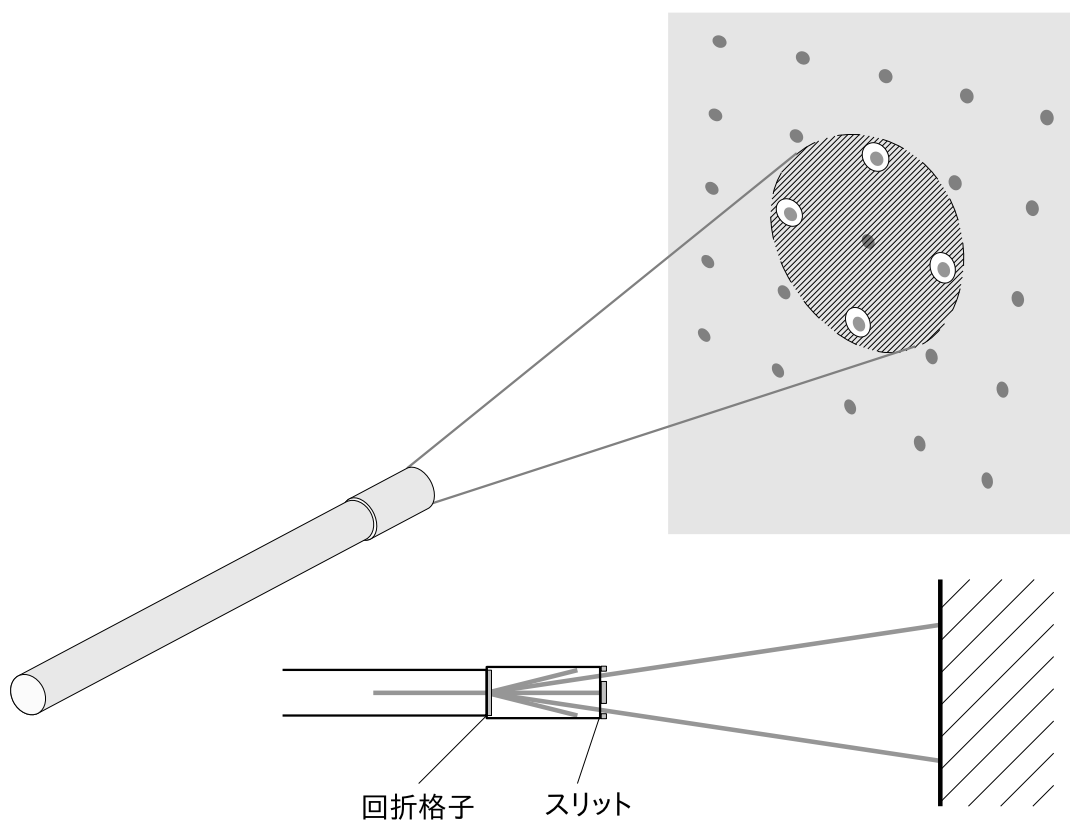


図 4.12: 回折格子とフィルタを組み合わせたレーザの分岐

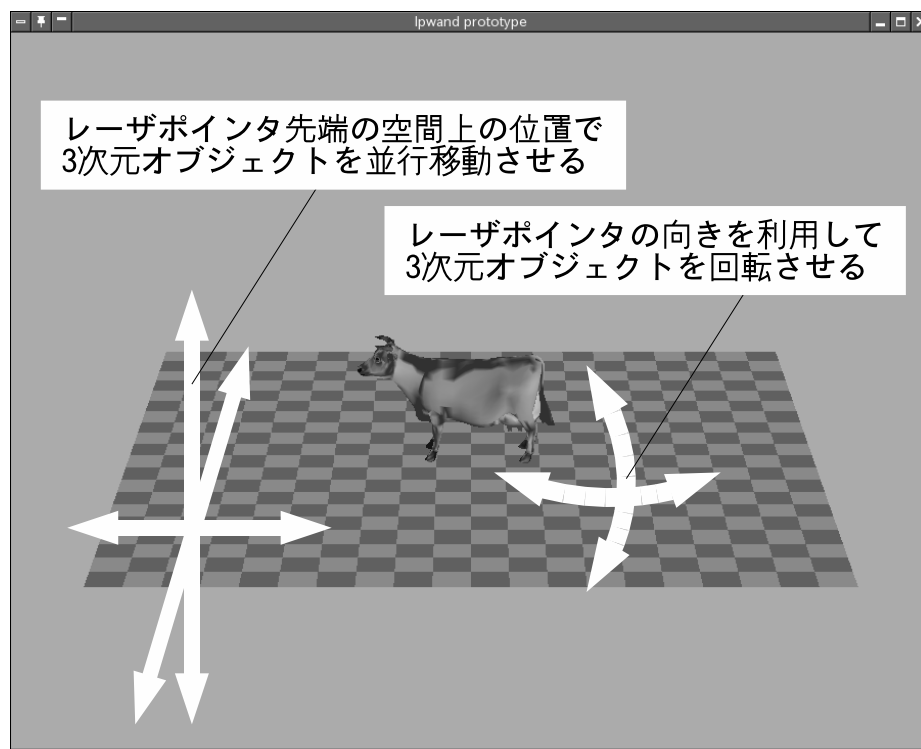


図 4.13: アプリケーションへの適用例

4.4 3次元CGアプリケーションへの適用

図 4.13 は、3 次元 CG アプリケーションへ本提案手法によるインタフェースを適用する例である。このアプリケーションでは、OpenGL による 3 次元オブジェクトとして牛のモデルが描画されており (図 4.13 中央)、ユーザはこのオブジェクトの位置と姿勢を操作することができる。

このアプリケーションでは、3 次元オブジェクトの位置と姿勢に関して 5 つの自由度を操作することができる。対比のためにマウスで操作できるようなアプリケーションを実装したところ、これら 5 つの自由度を 3 組みに分け、マウスが持つ 3 つのボタンを使い分けて操作する必要があった。具体的には左ボタンを押しながらの操作が、図 4.13 においてチェッカーパターンで表現されている平面上での並行移動に対応し、中ボタンを押しながらの操作がオブジェクトを 2 方向に回転させる操作、右ボタンを押しながらの操作が上下方向の並行移動に対応する操作とした。

一方で、本提案手法を適用した場合は、本手法で推定されたレーザポインタ先端の 3 次元空間上における位置をそのまま利用し、3 次元オブジェクトを直接操作することができる。また先端の位置とスクリーン上に照射されたレーザパターンの対角線交点を結ぶことで求められるレーザポインタの向きを利用して、3 次元オブジェクトの回転を操作することができる。マウスを利用したこれまでのアプリケーションと異なり、これらの操作は同時に実現することが可能である。

4.5 まとめ

本章では、レーザポインタに簡単なアタッチメントを装着し、3次元データを扱うソフトウェアにおいて3次元モデルを直感的に操作するためのインタフェースについて、精度を向上させて使い勝手を高めるための新しい手法を提案した。

まずはじめに既存手法の課題と解決策を示した。既存手法においては操作に用いる領域と表示領域が分離していることが操作性を阻害していた。また操作領域が狭いことも問題として指摘されていた。これらの問題を解決するためにレーザポインタに装着するアタッチメントを改良した。

改良したアタッチメントは、光の屈折を利用してレーザを分岐させる。このアタッチメントを利用した場合におけるレーザパターンの認識手法を検討した。この手法においては、スクリーン上に投影される四角形の各頂点を高速に認識することができる。認識した頂点の位置情報から、レーザポインタ先端の3次元位置を推定することが可能である。

さらに回折格子を利用してより精度の高いレーザ光の分岐を実現させ、レーザスポットの認識に関しては前章で示した方法をほとんど変更することなく前章で残されていた課題を解決することができることを示した。

提案手法の応用例としては前章で述べた応用例と同様、認識した位置と姿勢の情報を、3次元CGアプリケーションの3次元オブジェクト操作に適用した。一般的なマウスによるオペレーションでは、自由度の不足を補うためにボタンの押下を併用する必要がある。それに対して本手法を適用すれば、より直感的な操作で3次元情報を入力することが可能となる。また位置と姿勢を同時に操作することが可能になることを、実際の3次元CGアプリケーションに適用することで示した。

3次元オブジェクトの操作方法については、実際の3次元空間上におけるレーザポインタ先端の位置と姿勢をそのまま適用することで自然なインタフェースが提供できるとは限らない。直感的な操作感と使い易さは必ずしも直結しているとは限らず、3次元情報入力装置に関するより使い易いユーザインタフェースの検討が今後の課題である。

第5章 SD法によるユーザビリティ評価 尺度の選択に関する妥当性の検討

第2章および第3章で提案した3次元情報入力装置は、既存手法による操作手段を備えたアプリケーションと比較することで提案手法の効果を検討した。いずれもタスク遂行にかかる時間で評価される客観的な比較を行うとともに、そのユーザビリティをSD法による主観的評価を行うことで比較した。なおその際に使用した質問紙は、類似の既存研究で挙げられていた形容詞対やユーザからのフィードバックに基づいて選択した形容詞対を列挙することで構成した。

本章では、ユーザにとって目新しさを感じるシステムの主観的評価をSD法によって実施する場合に、用いるべき評価尺度はどうあるべきか、具体的な形容詞対の選択はどうしたらよいかについて検討した結果を述べる。

序論において、これまで議論されてきたSD法による評価尺度の考え方について述べ、さらにSD法を用いて主観評価を実施している既存研究ではどのように形容詞対を選択してきたかについて論じた。本章では、第5.1節および第5.2においてユーザビリティを評価するために最適な形容詞対の選択に関する実験とその結果について述べる。また第5.3節では第2章および第3章で結論付けた因子をここで改めて検討した枠組みにどう当てはめて解釈すべきかについて議論する。最後に第5.4節で、SD法によるユーザビリティ評価尺度の選択に関する妥当性についてまとめる。

5.1 適切な形容詞対の選択に向けた実験

SD法における評価尺度である形容詞対の選択に関し、ユーザインタフェースの評価、ユーザビリティ評価に利用できる形容詞対を適切に選ぶことを目的として、形容詞対の選択に関わる実験を実施した。

なおユーザビリティ評価に関わる形容詞対選定の実験を行うにあたり、新規性の高いシステムの評価に活用できる評価尺度の構築を考慮し、実験の対象としてTV電話によるコミュニケーションの評価を設定した。

5.1.1 形容詞対の収集

まず、今回の対象がTV電話システムという理由からコミュニケーションを評価する指標が重要であると考えた。そのうえで、ユーザビリティの評価に関する項目として、システムの見た目と使い勝手の評価に関する指標を検討する。関連分野においてSD法を用い

て評価を行っている既存研究から、今回の検討対象とする形容詞対を収集する。対象とした既存研究を以下に挙げる。

小峯ら [76] は、使いやすいデジタル放送受信機用のリモコンを開発するため、プロトタイプを試作しその使い勝手を評価した。提案するプロトタイプを既存のリモコンと比較し、番組選局とそれに関する受信機機能の操作を高齢者 24 名、若年者 26 名、計 50 名の被験者に対して評価させている。結果は SD 法によるアンケートとパフォーマンス尺度で評価し、SD 法では 22 形容詞対の 8 段階評価を行った。

広川、関口ら [77, 78] は、携帯電話機および MD プレイヤーを事例として、デザイン評価用語と形態要素の関係を調査データによってモデル化し、デザインプロセスへの応用を試みた。広川らは 12 の評価用語について 5 段階評価による SD 法で評価を行っている。

柳沢ら [79] は携帯電話を例とし、意匠の印象評価を個別に主成分分析して各個人の感性空間を作成した。さらに印象語による意匠設計の代替案の生成を行うシステムを提案した。柳沢らは、20 の印象語対について 7 段階評価による SD 法を用いて評価を実施した。

さらに、対人コミュニケーションの評価 [80]、対人関係の評価 [81]、話しかけ行動 [82]、知覚属性の SD 法による評価 [83]、音声対話の感情評価 [84] といった研究で利用されている形容詞を収集し、この中から通信システムのユーザビリティを評価するために利用できる適切な形容詞対セットの構築を試みた。なおこれら研究例の中には、形容詞対ではなく特定の形容詞で表現される評価指標に当てはまるか否かで評価を行っているものもある。その場合には集計時に反意語を設定し、形容詞対として取り扱うことで他の研究における評価指標との整合性を保つようにした。

5.1.2 形容詞対選択の手順

先に挙げた論文中で述べている全ての形容詞対を出発点とし、新規性の高い情報機器のユーザビリティを評価するために最適な主観評価指標の検討を、以下の手順で実施した。

1. 各論文で参照している形容詞対を整理する。重複を排除し、また、「音の高低変化が激しい」など、あまりに個別な事例に対応する形容詞対は排除した。具体的には「○。○が」というような、一単語として表現されていないものは適切ではないと判断し、除外した。
2. 各形容詞対に対し、「見た目の評価に適切か」「コミュニケーションの評価に適切か」「使い勝手の評価に適切か」について検討するアンケートを実施した。アンケート結果に基づき、アンケート参加者を対象としたグループインタビューを実施し結果を整理した。アンケートおよびグループインタビューは情報メディア系研究室に所属する 20～30 代の学生および研究者 8 名を対象として実施した。
3. アンケートの結果から抽出した形容詞対を列挙した質問紙を用い、実際に機器の利用状況を評価する実験を実施した。20 代～40 代の一般社会人 39 名を対象とし、機器の利用に対する SD 法による印象評価を求めた。
4. 上記の結果から、さらに適切と考えられる形容詞対を抽出した。具体的には、関連の高い形容詞対を 1 つにまとめる、「どちらともいえない」と評価された回答が多い形

容詞対は排除する，因子分析を行い共通性の低い項目は排除する，などの観点から形容詞対の絞り込みを行った．

これらの結果に基づき，ユーザビリティを評価するために利用すべき各形容詞対の適性を検討した．

5.2 実験結果の整理と分析

前節の手順で実施した形容詞対の抽出過程を整理し，その結果を分析する．

5.2.1 形容詞対の選択

まず，前述した作業手順の 1. において整理された形容詞対を表 5.1 に示す．9 つの研究例から重複を含む 194 個の形容詞を収集し，重複および特殊な形容詞対を排除する処理を経て 101 個の形容詞対を用意した．

続いて，アンケートおよびグループインタビューの実施により適切な形容詞の絞り込みを行った（作業手順 2.）．作業手順 2. において実施した予備アンケートに関するシートの例を図 5.1 に示す．アンケートでは「コミュニケーション¹」「見た目」「使い勝手」といった観点からの評価に利用できるか否かをそれぞれについて「1. 使える」「2. どちらともいえない」「3. 使えない」の 3 段階評価を求め，点数化した．

本アンケートの結果を集計し，閾値以上の得点を得た項目の形容詞対を抽出した．なおこの段階では，アンケート結果の絶対値だけで判断することは避け，グループインタビューにより各形容詞対に関する取舍選択の適切さを議論した結果も踏まえて形容詞対の抽出を実施した．この段階で抽出された 45 個の形容詞対を表 5.2 に示す．

さらに表 5.2 を用い「とてもあてはまる」「あてはまる」「少しあてはまる」「どちらともいえない」から逆方向に「とてもあてはまる」まで，7 段階の SD 法により機器の利用状況进行评估する実験を実施した．被験者は会議室に集合し，機器を利用している状況を観察することによりその状況を評価した．

39 名の評価結果を集計し，その相関行列を求めた．相関係数の絶対値が 0.75 以上のものを抽出すると，表 5.3 のとおり，いくつかの形容詞対が纏められる．この中から，幾通りにも評価できそうな曖昧性の高い形容詞を排除することに留意して，各グループを代表する形容詞対（表 5.3 において太字で記載したもの）を選択した．

また上記を纏めたものについて因子分析を行い，各因子に対する共通性が 0.66 以下のものを排除，さらに「どちらともいえない」をマークした参加者が 1/4 以上あったものについては，評価項目として適切ではないと判断して削除した．最終的に表 5.4 に示す 16 個の形容詞対が抽出された．

¹ 今回は，通信機器のユーザビリティ評価の観点から「コミュニケーションの質」に関する評価の観点を入れている．汎用的なユーザビリティ評価に利用するための形容詞対セットを作成するという目的を鑑みると，この点はやや内容に依存した判断基準と考えられる．このことに関しては後ほど議論する．

記入方法

左側の形容詞対それぞれについて、右側の「コミュニケーション」「みため」「使い勝手」を評価する形容詞として適切かどうかを判断してください。結果は、以下の基準に基づいて記入をお願いします。(半角数字)何か気が付いたことがあれば、備考欄に記入して下さい。

- 1:使用可能である。
- 2:どちらとも言えない。
- 3:使用可能ではない。

今回のアンケートにおいては、情報通信サービスを対象として考えています。このため、「みため」については情報通信に関わる機器やホームページを想定してください。「コミュニケーション」についても、情報通信サービスを想定し、コミュニケーション手段そのものに対する評価に使用できるかどうかをお答えください。コミュニケーションを行っている相手に対する評価ではありません。また、判断は直感で答えてください。

記入例

形容詞対	コミュニケーション	みため	使い勝手	備考
激しい 穏やかな	1	2	3	
大きい 小さい	3	1	3	
厳格な 柔軟な	1	3	1	

解答欄

形容詞対	コミュニケーション	みため	使い勝手	備考
美しい 醜い				
明るい 暗い				
陽気な 陰気な				
地味な 派手な				
かたい やわらかい				
感じのよい 感じのわるい				
暖かい 冷たい				
静かな うるさい				
緊張した 気楽な				
重い 軽い				
好きな きらいな				
動的な 静的な				
悪い 良い				
鈍い 鋭い				
おもしろい つまらない				
単純な 複雑な				
消極的な 積極的な				
親しみにくい 親しみやすい				
慎重な 軽率な				
かわいらしい にくらしい				
楽しい 楽しくない				
かっこいい かっこ悪い				
軽快な 重厚な				
社交的な 非社交的な				
上品な 安っぽい				
わかりやすい わかりにくい				
速い 遅い				
正式な くだけた				
感情的な 論理的な				
あわただしい 落ち着いた				
元気な 疲れた				
自由な 不自由な				
責任感ある 無責任な				
簡単な 難しい				
親切的な 不親切的な				
斬新な ありがちな				
目新しい 見慣れた				
ふまじめな まじめな				
気持ちよい 気持ちわるい				
活発な 不活発な				
強い 弱い				

図 5.1: アンケートのシート (抜粋)

表 5.1: 既存の類似研究から収集した形容詞対

美しい – 醜い	明るい – 暗い	陽気な – 陰気な
地味な – 派手な	かたい – やわらかい	感じのよい – 感じの悪い
暖かい – 冷たい	静かな – うるさい	緊張した – 気楽な
重い – 軽い	好きな – きらいな	動的な – 静的な
悪い – 良い	鈍い – 鋭い	おもしろい – つまらない
単純な – 複雑な	消極的な – 積極的な	親しみにくい – 親しみやすい
慎重な – 軽率な	かわいらしい – にくらしい	楽しい – 楽しくない
かっこいい – かっこ悪い	軽快な – 重厚な	社交的な – 非社交的な
上品な – 安っぽい	わかりやすい – わかりにくい	速い – 遅い
正式な – くだけた	感情的な – 論理的な	あわただしい – 落ち着いた
元気な – 疲れた	自由な – 不自由な	責任感ある – 無責任な
簡単な – 難しい	親切的な – 不親切的な	斬新な – ありがちな
目新しい – 見慣れた	ふまじめな – まじめな	気持ちよい – 気持ち悪い
活発な – 不活発な	強い – 弱い	きちんとした – だらしのない
幸福な – 不幸な	敏感な – 鈍感な	強気な – 弱気な
丸い – 四角い	思いやりのある – わがままな	のんびりした – こせこせした
勇敢な – 臆病な	清潔な – 不潔な	素直な – 強情な
優しい – 厳しい	外向的な – 内向的な	進歩的な – 保守的な
興奮した – 落ち着いた	見やすい – 見にくい	実用的な – 非実用的な
平らな – 起伏ある	張り詰めた – ゆったりした	開放的な – 閉鎖的な
選びやすい – 選びにくい	なじみやすい – なじみにくい	充実した – 空虚な
にぎやかな – さびしい	快適な – 不快な	整然とした – 散らかった
覚えやすい – 覚えにくい	有名な – 無名な	直線的な – 曲線的な
新しい – 古い	快活な – 寂しい	大胆な – 繊細な
個性的な – 画一的な	洗練された – 粗野な	男らしい – 女らしい
短気な – 気長な	うきうきした – 沈んだ	恥ずかしがりの – 恥しらずの
意欲的な – 無気力な	卑屈な – 堂々とした	無分別な – 分別ある
生意気な – 生意気でない	近づきがたい – 人なつこい	豊富な – 貧弱な
愉快的な – 不愉快的な	ばらばらな – まとまった	集中した – 散漫な
自然な – 不自然な	安定した – 不安定な	おしゃべりな – 無口な
話しやすい – 話しにくい	頼もしい – 頼りない	たくましい – 弱々しい
深い – 浅い	安心な – 不安な	対立的な – 友好的な
満足な – 不満足な	混乱した – 整然とした	ていねいな – ぞんざいな
明確な – あいまいな	なめらかな – ぎくしゃくした	

表 5.2: アンケートにより抽出された形容詞対

実用的な – 非実用的な	好きな – きらいな	なじみやすい – なじみにくい
満足な – 不満足な	快適な – 不快な	親しみにくい – 親しみやすい
悪い – 良い	単純な – 複雑な	気持ちよい – 気持ち悪い
愉快的な – 不愉快的な	自然な – 不自然な	安定した – 不安定な
新しい – 古い	頼もしい – 頼りない	進歩的な – 保守的な
個性的な – 画一的な	見やすい – 見にくい	近づきがたい – 人なつっこい
安心な – 不安な	楽しい – 楽しくない	洗練された – 粗野な
目新しい – 見慣れた	斬新な – ありがちな	きちんとした – だらしない
感じのよい – 感じの悪い	自由な – 不自由な	なめらかな – ぎくしゃくした
直線的な – 曲線的な	優しい – 厳しい	明確な – あいまいな
重い – 軽い	かたい – やわらかい	あわただしい – 落ち着いた
素直な – 強情な	混乱した – 整然とした	思いやりのある – わがままな
簡単な – 難しい	おもしろい – つまらない	親切的な – 不親切的な
暖かい – 冷たい	話しやすい – 話にくい	充実した – 空虚な
外向的な – 内向的な	緊張した – 気楽な	わかりやすい – わかりにくい

表 5.3: 類似形容詞対の抽出

形容詞対のグループ		
1	感じのよい – 感じの悪い 満足な – 不満足な	気持ちよい – 気持ち悪い
2	話しやすい – 話にくい 良い – 悪い	感じのよい – 感じの悪い 満足な – 不満足な
3	おもしろい – つまらない 快適な – 不快な 気持ちよい – 気持ち悪い	好きな – きらいな 楽しい – 楽しくない 満足な – 不満足な
4	目新しい – 見慣れた	新しい – 古い

表 5.4: 最終的に抽出された形容詞対

実用的な – 非実用的な	進歩的な – 保守的な	おもしろい – つまらない
簡単な – 難しい	明確な – あいまいな	親しみやすい – 親しみにくい
安心な – 不安な	安定した – 不安定な	なじみやすい – なじみにくい
自然な – 不自然な	話しやすい – 話にくい	近づきがたい – 人なつっこい
重い – 軽い	愉快的な – 不愉快的な	わかりやすい – わかりにくい
斬新な – ありがちな		

5.2.2 選択された形容詞対の評価

39名の被験者による印象評価データを用い，最終的に選択された16個の形容詞対のみを対象として，再度，因子分析を行った．なお因子の数は，相関行列の固有値が1.0以上となる条件から3個に設定した．バリマックス回転後の結果を表5.5に示す．

表 5.5: 因子分析の結果

項目	因子 1	因子 2	因子 3
安定した – 不安定な	0.779	0.194	0.284
簡単な – 難しい	0.627	0.200	0.122
自然な – 不自然な	0.690	0.153	0.470
話しやすい – 話にくい	0.722	0.425	0.271
重い – 軽い	-0.612	-0.293	-0.074
愉快的な – 不愉快的な	0.596	0.228	0.491
実用的な – 非実用的な	-0.025	0.701	0.441
なじみやすい – なじみにくい	0.463	0.732	0.175
親しみにくい – 親しみやすい	-0.450	-0.664	-0.112
近づきがたい – 人なつっこい	-0.466	-0.609	0.032
安心な – 不安な	0.424	0.599	0.124
おもしろい – つまらない	0.291	0.233	0.811
進歩的な – 保守的な	0.141	0.259	0.727
斬新な – ありがちな	0.139	-0.092	0.719
明確な – あいまいな	0.226	0.486	0.566
わかりやすい – わかりにくい	0.488	0.429	0.455

因子の解釈

因子負荷量の閾値を0.5にとると，「わかりやすい – わかりにくい」を除く15個の形容詞対が3つの因子でまとめられることが分かる．第2章および第3章でSD法により評価した際には，各因子を「慣れ」「安心感」「親しみやすさ」（「簡潔さ」）と解釈した．今回は形容詞対としてそもそも「安心」「親しみやすさ」というキーワードが含まれており，以前の解釈をそのまま当てはめることは難しい．

第1因子はユーザビリティ評価の本質的な部分を表現している．軽快で安定しており，簡単かつ自然な操作で愉しく利用できる情報機器をユーザが求めていると考えられ，第1因子はこれら进行评估する根本的な因子であると解釈することができる．ここでは「本質的な評価」と名付けることにする．

第2因子は「親近感」の因子と解釈できる．ある程度使ってみた後の印象に対する評価に大きく寄与する因子と考えることができる．

第3因子は「新規性」の因子と解釈することができる。第一印象の評価、目新しさと考えられることもできる。第2章および第3章では、これらの項目を裏側から解釈して「慣れ」と表現していた。第3因子が強く寄与している形容詞対を「つまらない」「保守的」「ありがち」「あいまい」といった側面からみると、これらの尺度は「慣れ」た結果の度合いを表しているともいえる。

汎用的なユーザビリティ評価に対する利用可能性

今回、コミュニケーション機器のユーザビリティ評価という設定で形容詞対による評価尺度セットを構成した。この具体的な事例に当てはめると、先の3因子は順に「コミュニケーション」(の質)に対する評価、「使い勝手」に対する評価、「見た目」に対する評価と考えることもできる。

第1因子が大きく寄与する尺度、すなわち本質的な評価に関わる形容詞対のグループについては、汎用的な利用は難しく、全てをそのまま利用することは不可能である。例えば「話しやすい－話しにくい」は、題材として設定したTV電話機器に特有の評価尺度と考えられる。したがって今回のTV電話機器に関していえば本質的かつ適切な評価尺度といえるが、その他の機器に関するユーザビリティ評価には必ずしも適切ではない。また同じく「重い－軽い」という形容詞対も第2章で述べた評価によればユーザインタフェースの評価には不適切であるという結果も出ており、「重厚な－軽快な」に言い替えたほうがよい可能性もある。

第2因子と第3因子が寄与する形容詞対尺度の組、すなわち「親近感」を評価する形容詞対と「新規性」を評価する形容詞対は、新規性の高いシステムの提案に対してそのユーザビリティの主観評価を実施する際にそのまま流用できる可能性が高い。これらの形容詞対による表現はシステムの種類に依存する部分が少なく、様々なユーザインタフェースを評価することができる。

以上から、新規性の高いシステムのユーザビリティをSD法によって評価する際に汎用的に利用可能と考えられる評価尺度セットを表5.6に示す。図5.2はこれらの形容詞対でユーザビリティのどのような側面が評価されるかを模式的に表したものである。

表 5.6: ユーザビリティを評価する汎用的な評価尺度

評価の観点	形容詞対	
「本質的な評価」	安定した－不安定な	簡単な－難しい
	自然な－不自然な	愉快的な－不愉快的な
	(＋評価対象とするユーザインタフェース特有の項目)	
「親近感」	実用的な－非実用的な	なじみやすい－なじみにくい
	親しみやすい－親しみにくい	人なつっこい－近づきがたい
	安心な－不安な	
「新規性」	おもしろい－つまらない	進歩的な－保守的な
	斬新な－ありがちな	明確な－あいまいな

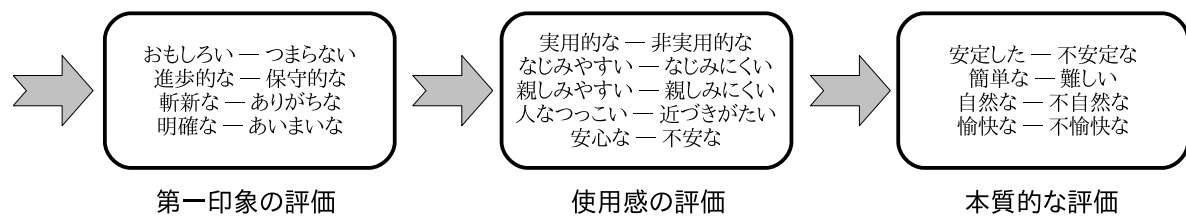


図 5.2: ユーザビリティ評価の模式図

今回の試行において抽出された形容詞対は因子分析の結果 3 グループに分類され、それらは時系列的な感覚を評価する構造が示唆された。この結果は、棟近のガイドラインで想定されている単純な感覚から総合的な心理評価に至る評価構造に準じたものととらえることができよう。すなわち棟近ガイドラインにおいては評価指標の感覚的な複雑さのレベルで階層を構成していたのに対し、本構造では表面的な印象評価に対応する形容詞対のグループから本質的な印象に対する評価を判断するグループに至る、認知の複雑さにおけるレベルで階層を構成するものと考えることができる。

ここで想定された評価構造の妥当性は、本評価尺度を用いた主観評価を何段階かに分けて実施し、システム操作の習熟とともにその評価結果がどのように変化するかを分析することで確認できると考えられる。この仮定が正しければ、対象とするシステム操作を習熟するにしたがって本質的な評価に分類される項目に対する評価の分散が少なくなるはずである。一方で、第一印象の評価に関する分散の変化はあまり大きくないと想定される。

前章までの実験で課題として挙げられていた「慣れ」の要素に関連する項目をどう評価するかとともに、時系列に従った主観評価実験を実施して本評価構造の妥当性に関する検証を実施することは、今後の重要な課題の 1 つである。

5.3 3次元情報入力装置の評価実験で利用した形容詞対との比較

最後に、第 2 章および第 3 章で実施した主観的評価実験に用いた形容詞対セットとの比較について述べる。

図 5.3 は、第 2 章および第 3 章で述べた新規に開発した 3 次元情報入力装置に対する主観的評価実験で用いた形容詞対と、本章の実験で求めた形容詞対² の対比を図式化したものである。ほとんど同じ形容詞で表現されている形容詞対に関しては黒い矢印で、また表現が一部異なるもののある程度の関連が認められる形容詞対の組に関しては灰色の点線による矢印で、対応関係を示した。またそれぞれについて各因子で説明されるグループを、空行により分割することで示している。

図 5.3 から明らかに読み取れるように、片方で同じグループに含まれる形容詞対の組であっても、他の分類では異なるグループに分類されている場合が多い。このことは、第 3

² 両者とも、因子負荷量がの比較を図式小さいことから除外した形容詞対は省いている。

新規手法の評価で使用した形容詞対セット

再検討の結果として選ばれた形容詞対セット

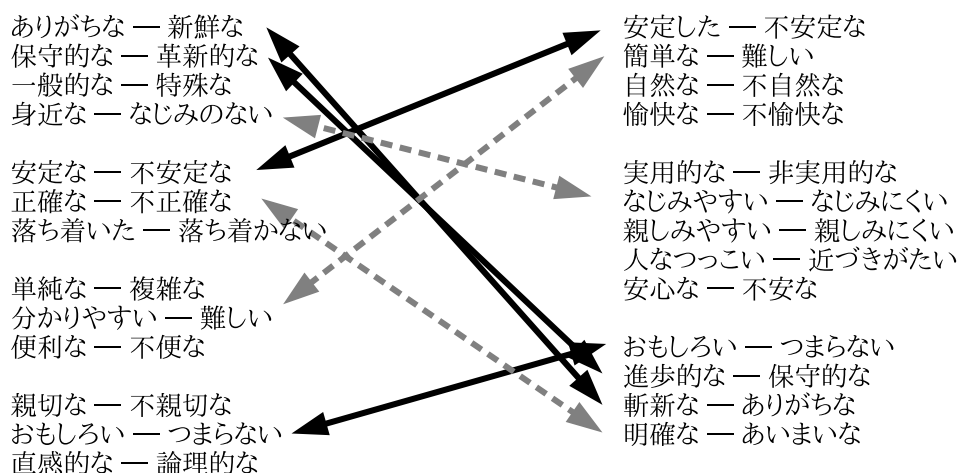


図 5.3: 形容詞対の対応

章の検討で得られた「慣れ」「安心感」「簡潔さ」「親しみやすさ」という因子構成と、本章の検討で得られた「新規性」「親近感」「本質的な評価」という因子構成が直接対応しないことを明示的に表している。

なおこの結果は各形容詞対セットの優劣を示すものではなく、それぞれの形容詞対セットを用いた際に評価者の主観がどう表現されるかの違いを表したものにすぎない点は注意が必要である。すなわち、主観評価結果として示される因子構造が形容詞対の選び方によって異なるのは、その形容詞対で評価する主観の根底に存在する評価構造をどの側面から着目して評価するかの相違によるものであることを十分に理解する必要がある。

実際には得られた因子で結果をどう説明するかが重要であり、その点においては、第2章および第3章におけるいずれの議論においても、提案手法について「親しみやすさ」の点で従来手法よりも優れた評価を得られたことを示すことができた点で、その際に用いた形容詞対セットを有効に利用できたといえる。

5.4 まとめ

本章では、システムのユーザビリティをSD法によって評価する際に使用する形容詞対尺度について、その妥当性に関する考察を行った。

SD法による評価尺度の基本的な考え方においては、ある一定の評価構造を想定した上で評価尺度を構成すべきであることが指摘されている。既存研究では、先行研究を参照、あるいは、アンケートや予備実験の実施により評価尺度を決定する事例が多い。また多くの場合、最終的には質問紙設計者の主観による判断が加えられている。

これらの状況を踏まえ、ユーザビリティを評価するために利用できる適切な形容詞対を検討する実験を実施した。類似の研究例から重複を排除して101個の形容詞を収集し、ア

ンケートおよびグループインタビューを実施した結果から 45 個に絞り込んだ．さらに，39 名の被験者を集め，TV 電話の利用に関する主観評価実験を実施した．具体的には 45 個の形容詞対による SD 法を実施し，その結果から最も適切と思われる 16 個の形容詞対を抽出した．これらの形容詞対はさらに 3 つの因子で説明できるグループに分類された．因子分析の結果，「本質的な評価」「親近感」「新規性」といった因子を抽出し，これらの因子を用いて 16 個の形容詞対を説明した．

今回実施した TV 電話利用の実験に固有と思われる評価尺度を排除し，最終的に，ユーザビリティを評価するための汎用的な評価尺度として適切な 13 個の形容詞対が抽出された．これらの評価尺度は，「第一印象の評価」「使用後の評価」「本質的な評価」といった評価構造を反映していることを模式的に示した．

本章における検討の結果，SD 法によりユーザビリティを主観的に評価するための汎用的な評価尺度が提案された．この評価尺度の背景として考えられた評価構造の妥当性を確認するとともに，この評価尺度セットを用いて様々なシステムを評価し，その結果の有効性を確認することが今後の重要な課題として残されている．

第6章 結論

本論文では、3次元情報を操作するための3次元情報入力装置について、画像認識を応用した手法の検討と評価を行った。さらにその評価手法についての検討を加えた。本章では最後に、本論文のまとめと今後の課題を整理する。

6.1 本論文のまとめ

まず、本論文のまとめとして本研究で得られた知見をまとめる。

本研究では、画像認識を応用した3次元情報入力装置の実現方法として、システムの画面に相対したユーザの頭部位置を実時間計測し3次元情報入力に応用するシステムと、レーザポインタとカメラを用いて3次元情報を入力するシステムの、2つの手法を検討した。

前者は、ステレオカメラによる視差情報を利用して計測したユーザ視点位置とユーザが相対するシステム画面の相対的な位置関係を仮想空間における物体の姿勢位置制御に反映させることで、直感的な3次元オブジェクトの表示を実現する。また後者はレーザポインタの先端にレーザ光を4つに分岐させるアタッチメントを装着し、照射されるパターンからレーザポインタ先端位置を推定することにより3次元情報を入力、仮想空間上でのオブジェクト姿勢位置制御に反映させるシステムである。

これらのシステムは、既存の一般的なポインティングデバイスを利用した3次元情報入力と比較すると、3自由度以上の空間情報を同時に操作することができるという利点を有している。そのため、既存手法よりも直感的な操作手段を提示することが可能となる。また、とくにレーザポインタを用いた3次元情報入力システムに関しては、低コスト、簡便性、ペン形状のため扱いやすいといった点でも優れている。

開発した両システムは、実際の利用を想定してユーザによる主観的評価および客観的評価を実施した。主観的評価はSD法による評価を実施し、因子分析による要因の推定と既存手法との比較による提案手法の有用性に関する分析を実施した。客観的評価から、タスクの遂行に関して既存手法に劣らず3次元情報を直感的に入力することが可能であることを示すことができた。また主観的評価の結果から、「親しみやすさ」に秀でたユーザインタフェースを提示できたことを確認した。

提案したシステムのユーザビリティは、SD法により主観的評価を行った。その際に評価尺度として利用した形容詞対は類似の先行研究およびシステムに対する事前のフィードバックから採用したが、改めて妥当な形容詞対の選択に関する検討を実施した。その結果、ユーザビリティを評価するために適切と考えられる13個の形容詞対を抽出し、「第一印象の評価」、「使用後の評価」、および「本質的な評価」といった評価構造を反映した評価尺度セットを構築した。

本研究により，特殊な装置を必要とした3次元情報入力を身近な機器で実現できるようになった．さらに，本研究において開発した情報機器の主観評価方法を再検討する必要性から，情報機器の評価に対する汎用的な評価指標を得たことも本研究の成果として着目すべき点である．

6.2 今後の課題

本研究では画像認識を応用した3次元情報入力装置の実現について様々な知見を得ることができたが，一方でまだ解決しなければならない課題もいくつか確認された．個々の課題については各章に示したが，本論文の最後に今後の課題として整理する．

(1) 「慣れ」に対する評価

本研究で提案した手法によるユーザインタフェースは，主観的評価において「慣れ」の因子に関しては既存の手法が優れているという結果が示された．しかし「慣れ」の要素はシステムの使用経験により変化するものである．

今後の課題として，本研究で提案したユーザインタフェースの継続使用により操作性の評価がどのように変化するかを研究する必要がある．提案システムや，類似のユーザインタフェースが一般化した時点で「慣れ」の因子に対する評価がどう遷移するかについては，今後研究を進めるべき課題として残されている．

(2) システムの安定性向上

開発した2つのプロトタイプシステムでは，認識中の画像を確認用の画面として表示させていた．しかしこの画面は本来必要なものではなく，またこの画面を有効に活用できた被験者も多くはなかった．また実際に被験者からの意見でも，この問題が提案手法における課題の1つとして指摘された．

またシステムの安定性に関する「安心感」の因子についても，既存のシステムと比較して必ずしも優れているとは言い難い評価であった．この点は，画像認識アルゴリズムにおけるノイズの影響をさらに排除する必要がある，また計測した3次元位置推定結果を仮想空間上のオブジェクト制御に利用する際にも更なる工夫が求められるという状況である．実際に誰もが使いやすいインタフェースとして現場で利用するには，システムの安定性をより向上する必要がある．

さらにユーザビリティの主観的評価実験で得られたコメントの中には，若干ストレスを感じる旨の意見もあった．この点に関してもシステム実装上の問題と考えられ，ハードウェアそのものの処理能力向上や認識処理のハードウェア化等による改善の余地がまだ残されている．

(3) 効果的に活用できるアプリケーションの検討

本研究においては、提案する3次元情報入力手法を応用したアプリケーションとして、いずれもコンピュータグラフィックスによる3次元モデル表示系におけるオブジェクトもしくはカメラの操作を想定した。実際にユーザビリティの評価はそれらのプロトタイプを対象とし、提案手法の有用性に関する検討を行った。

ただし今回のアプリケーションが必ずしも最適かどうかについては検討の余地が残されている。3次元情報の操作が必要になるアプリケーションは他にもいろいろと考えられる。本研究では中心に配置したオブジェクトの操作に本手法を適用したが、その他にも没入型3次元仮想空間における方向の指示や同環境中で使用し得るポインティングデバイスとしての利用も考えられる。

また他にも本手法の適用が有効と考えられるアプリケーション分野の1つとして、ロボットに対する方向指示等、ロボットとのインタラクションにおける3次元情報のやりとりが想定できる。これらの他分野における本提案手法の応用は興味深い課題の1つである。

(4) より使いやすいユーザインタフェースの検討

3次元オブジェクトの操作方法については、実際の3次元空間上における基準点(ユーザ視点やレーザポインタ先端など)の位置と姿勢を、仮想空間上におけるカメラ制御やオブジェクト制御にそのまま適用しても、自然なインタフェースが提供できるとは限らないということがシステムの評価を通じて判明した。

同様に、多自由度の同時操作を3次元空間におけるカメラやオブジェクトの操作にどのようにマップするかについての検討も必要であるということが判明した。例えば、レーザポインタによるインタフェースの場合、レーザポインタの傾きをそのままオブジェクトの傾きにマップするか、あるいはレーザポインタの傾きをカメラ向きの制御と見なしてオブジェクトの傾きにマップするかという違いである¹。今回の開発においてこれらの対応は試行錯誤を重ねつつ検討を加えたが、これらの相違に関しても本研究で検討した主観的および客観的な評価方法によりその優劣を比較すべきであろう。

また必ずしも同時に操作できる自由度が多いほど使いやすいとは限らないことも明らかになった。コントロールできる軸の自由度は1個または2個に制限したうえで自然に選択できるユーザインタフェースのほうが使いやすい可能性がある。このように直感的な操作感と使い易さは必ずしも直結しているとは限らず、3次元情報入力装置に関するより使いやすいユーザインタフェースの検討は、今後の課題である。

¹ 後者の場合、相対的な動作となるため前者とは逆向きの動きを示す。

謝辞

本論文は筆者が2002年より取り組んできた画像認識による3次元情報入力装置の開発とその評価に関する研究をまとめたものです。本研究は、たいへん多くの皆様によるご指導、ご協力のうえに成り立つものであり、ここに感謝の意を表します。

本研究をすすめるにあたり、研究内容に対する数々のご助言を下さり、また多忙な業務を言い訳にして遅々として進まなかった本論文の執筆に関して叱咤激励を下された大阪大学大学院基礎工学研究科の新井健生教授に深く感謝いたします。ここに厚く御礼を申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、大阪大大学院基礎工学研究科 佐藤宏介教授ならびに大阪大大学院基礎工学研究科 宮崎文夫教授、大阪大学大学院基礎工学研究科 前泰志准教授は、ご多忙ななかにもかかわらず審査をお引き受け下さいまして、貴重なご助言をいただきました。深く感謝いたします。

山形大学大学院理工学研究科 井上健司教授には、本研究を遂行する上で重要なアイデアを頂戴し、また研究の方向性に対する貴重なご助言や幾度とない議論の機会をいただきました。大阪大学大学院基礎工学研究科 田窪朋仁助教には、様々な意見交換を通じて丁寧なご指導を頂戴しました。また、梅谷智弘博士(甲南大学知能情報学部講師)、國松禎明博士(熊本大学機械システム工学科助教)、両先生方には論文の執筆に関するご助言や研究の遂行に関する意見交換等、大きな影響を受けました。

さらに土居良子事務補佐員、小林慶子事務補佐員、氏家麻衣事務補佐員、南奈緒事務補佐員には、さまざまな手続きや各種の事務処理等、多大なる協力をいただきました。また新井研究室に所属する学生の皆様は、筆者が社会人学生かつ東京在住という理由から年に数回しかお会いする機会が無かったにもかかわらず、積極的に実験に参加して下さいただけでなく、研究に関する議論に留まらない交流を深めることができ、たいへん励みになりました。

九州大学大学院システム情報科学研究院 谷口倫一郎教授ならびに九州産業大学知能情報学科 米元聡准教授には、本論文の前半部を構成する頭部位置計測による3次元情報入力装置に関する研究の前提となった共同研究において、ユーザの姿勢計測を3次元モデル表示に反映するシステムに対する議論を重ねる機会をいただきました。本研究は、その共同研究における議論から大きな影響を受けました。

独立行政法人科学技術振興機構 福地健太郎研究員にはレーザポインタをユーザインタフェースへ応用するアイデアについて大きなヒントをいただきました。また本論文後半部のレーザポインタによる3次元情報入力に関して議論の機会を頂戴し、本研究を進めるにあたり参考になるご助言を多数いただきました。

株式会社KDDI研究所の新井田統特別研究員には、情報システムのユーザビリティをSD法で評価する際に使用する評価尺度の検討に関して多くの示唆をいただきました。本研究

において，ユーザビリティ評価尺度の検討に関する部分は新井田特別研究員との議論に基づくものです．

本研究を始める機会を与えて下さり，また国内および国際会議での発表に関して様々な形でご支援を下さった株式会社三菱総合研究所の小林慎一監査役，株式会社三菱総合研究所情報技術研究センター 比屋根一雄センター長のお二方にも改めて深く御礼申し上げます．また筆者が新井先生のご指導を受けるきっかけを与えて下さいました株式会社三菱総合研究所情報技術研究センター 石谷靖主席研究員に深く感謝いたします．石谷靖氏のご紹介がなければ，本論文をまとめる機会はありませんでした．

株式会社三菱総合研究所情報技術研究センターに所属する研究員の皆様には，多忙な業務の合間をぬって実験への参加をお願いしたり，また時には研究内容に関する議論を求めたりと，数々の協力をお願いしました．本論文の完成は皆様の協力のうえに成り立っていると考えております．ここに改めて感謝申し上げます．

最後に，本研究を遂行し本論文をまとめるために休日を潰すことも多く，そのために家庭を顧みることが少なかったにも関わらず，長い期間にわたり支援を続けてくれた妻と子供たちに感謝します．君たちの笑顔が心の支えとなり，本論文をまとめることができました．

参考文献

- [1] Porta,M.: “Vision-based User Interfaces: Methods and Applications,” *Human-Computer Studies*, Vol.57, pp.27–73, 2002.
- [2] Wu,Y. and Huang,S.H.: “Vision-Based Gesture Recognition: A Review,” *Proceedings of IAPR Conference. on Machine Vision Applications*, pp.196–199, 1994.
- [3] 細田真道, 島田義弘, 小林稔, 石橋聡: “コンテキスト連続性を考慮したウィンドウ操作インタフェース,” 電子情報通信学会技術研究報告 マルチメディア・仮想環境基礎研究会, MVE2002-121, pp.5–8, 2003.
- [4] Massie,T.H. and Salisbury,J.K.: The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects,” *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 1994.
- [5] 財団法人デジタルコンテンツ協会: “3D コンテンツに関する調査研究 報告書,” 平成 18 年度マルチメディア情報システム調査研究等補助事業, 2007.
- [6] Amenta,N., Levy,S., Munzner,T., and Philips,M.: “Geomview: a system for geometric visualization,” *Proceedings of the 11th annual symposium on Computational geometry*, pp.412–413, 1995.
- [7] Wernecke,J.: “The Inventor Mentor: Programming Object-Oriented 3d Graphics with Open Inventor, Release 2,” Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1993.
- [8] Subramanian,S. and Jsselsteijn,W.I.: “Survey and Classification of Spatial Object Manipulation Techniques,” *Proceedings of OZCHI 2000*, pp.300–337, 2000.
- [9] Ware,C.: “Using Hand Position for Virtual Object Placement,” *Visual Computing*, Vol.6, pp.245–253, 1990.
- [10] Ware,C. and Jessome,D.R.: “Using the Bat: A Six-dimensional Mouse for Object Placement,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.65–70, Nov. 1988.
- [11] Liang,J. and Green,M.: “JDCAD: A Highly Interactive 3D Modeling System,” *Proceedings of the 3rd International Conference on CAD and Computer Graphics*, pp.217–222, Beijing, China, Aug. 1993.

- [12] Balakrishnan,R., Baudel,T., Kurtenbach,G., and Fitzmaurice,G.: “The Rockin’ Mouse: Integral 3D Manipulation on a Plane,” *Proceedings of CHI*, pp.311–318, 1997.
- [13] Sachs,E., Roberts,A., and Stoops,D.: “3-Draw: A Tool For Designing 3D Shapes,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.18–26, Nov. 1991.
- [14] Murakami,T. and Nakajima,N.: “Direct and Intuitive Input Device for 3D Shape Deformation,” *Proceedings of CHI*, pp.465–470, 1994.
- [15] Gribnau,M.W.: “Compareing Single- and Two-handed 3D Input For a 3D Object Assembly Task,” Gribnau,M.W. and Hennessey, J.M: *Proceedings of CHI*, pp.465–470, 1998.
- [16] Pierce,J.S., Forsberg,A., Conway,M., Hong,S., Zelezink,R., and Mine,M.: “Image Plane Interaction Techniques in 3D Immersive Environments,” *Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.39–43, 1997.
- [17] Frohlich,B. and Plate,J.: “The Cubic Mouse: A New Device for Three Dimensional Input,” *Proceedings of CHI*, pp.526–531, 2000.
- [18] Fitzmaurice,G.W.: “Situated Information Spaces and Spatially Aware Palmtop,” *Communications of the ACM*, Vol.6, pp.39–49, Jul. 1993.
- [19] Szalavári,Z. and Gervautz,M.: “The Personal Interaction Panel - A Two-handed Interface for Augmented Reality,” *Proceedings of EUROGRAPHICS’97*, pp.335–346, Sep. 1997.
- [20] Iwata,H.: “Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator,” *Proceedings of SIGGRAPH’90*, pp.165–170, 1990.
- [21] 佐藤誠, 平田幸弘, 河原田弘: “空間インタフェース装置 SPIDAR の提案,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J74-D-II, No.7, pp.887–894, 1991.
- [22] Cai,Y., Wang,S., and Sato,M.: “A Human-Scale Direct Motion Instruction System Device for Education Systems,” *IEICE transaction on information and systems*, Vol.E80-D, No.2(19970225), pp.212–217, 1997.
- [23] MacKenzie,I.S., Soukoreff,R.W., and Pal,C.: “A Two-Ball Mouse Affords Three Degrees of Freedom,” *Extended Abstract of the CHI’97 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.303–304, 1997.
- [24] Matsumoto,Y. and Zelinsky,A.: “An Algorithm for Real-time Stereo Vision Implementation of Head Pose and Gaze Direction Measurement,” *Proceedings of ICFGR*, pp.499–505, 2000.

- [25] Gorodnichy,D.O., Malik,S., and Roth,G.: “Affordable 3D Face Tracking Using Projective Vision,” *Proceedings of VI2002*, pp.383–390, May. 2002.
- [26] Gorodnichy,D.O. and Roth,G.: “Affordable yet robust and precise face tracking using USB cameras with application to designing handsfree user interfaces,” *Proceedings of UIST2002*, Oct. 2002.
- [27] Yonemoto,S. and Taniguchi,R: “Vision-based 3D Direct Manipulation Interface for Smart Interaction,” *Proceedings of ICPR*, pp.655–658, 2002.
- [28] 米元聡, 中野裕史, 谷口倫一郎: “画像認識による身体動作入力にもとづく仮想カメラ視点の制御,” *インタラクション 03 論文集*, pp.31–32, 2003.
- [29] 竹村憲太郎, 南出隼人, 松本吉央, 小笠原司: “複数コンピュータ環境における注視行動に基づく操作対象の切り替え,” *ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004*, pp.1149–1152, 2004.
- [30] 北島光太郎, 佐藤洋一, 小池英樹: “ウィンドウインタフェースシステムにおける頭部位置・姿勢の有効な利用法,” *インタラクション 2001 予稿集*, pp.195–202, Mar. 2001.
- [31] De Silva,G.C., Lyons,M.J., Kawato,S., and Tetsutani,N.: “Human Factors Evaluation of a Vision-Based Facial Gesture Interface,” *Proceedings of 1st CVPR-HCI*, Jun. 2003.
- [32] “Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), Part 9: Requirements for Non-Keyboard Input Devices,” International Standards Organization, Feb. 2000.
- [33] 和田将, 佐藤喬, 多田好克: “円錐状の光を用いた低コストで汎用性の高い三次元ポインティングデバイスの提案,” *情報処理学会研究報告 2006-HI-117*, pp.1–7, 2006.
- [34] Shroering,M.A., Grimm,C.M., and Pless,R.: “A New Input Device for 3D Sketching,” *Vision Interface*, pp.311–318, 2003.
- [35] Chen,X. and Davis,J.: “LumiPoint: Multi-User Laser-Based Interaction on Large Tiled Displays,” *Displays*, Vol.23, No.5, Elsevier Science, 2002.
- [36] Sukthankar,R., Stockton,R.G., and Mullin,M.D.: “Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems,” *Proceedings of ICCV2001*, pp.247–253, 2001.
- [37] Xiaojun,B., Yuanchun,S., Xiaojie,C., and Peifeng, X.: “Facilitating Interaction with Large Displays in Smart Spaces,” *Proceedings of Joint sOc-EUSAI conf.*, pp.105–110, 2005.
- [38] 久松孝臣, 岩淵志学, 三木和男, 田中二郎: “大画面向けインタフェースへのレーザポインタの応用,” *Proceedings of JSAI2005*, 3D1-01, 2005.

- [39] Hisamatsu,T., Shizuki,B., Takahashi,S., and Tanaka, J.: “A Novel Click-free Interaction Technique for Large-screen Interfaces,” *Proceedings of APCHI2006*, 2006.
- [40] Cheng,K. and Pulo,K.: “Direct Interaction with Large-scale Display Systems using Infrared laser Tracking Devices,” *Proceedings of the Asia Pacific Symposium on Information Visualization*, Vol.24, pp.67–74, 2003.
- [41] Olsen,D.R. and Nielsen,T.: “Laser Pointer Interaction,” *Proceedings of SIGCHI conf. on Human Factors in Computing Systems*, pp.17–21, 2001.
- [42] Myers,B.A., Bhatnager,R., Nichols,J., Peck,C.H., Kong,D., Miller,R., and Long,A.C.: “Interacting at a Distance: Measuring the Performance of Laser Pointers and Other Devices,” *Proceedings of CHI2002*, pp.33–40, 2002.
- [43] Parker,J.K, Mandryk,R.L., and Inkpen,K.M.: “TractorBeam: Seamless Integration of Local and Remote Pointing for Tabletop Displays,” *Proceedings of Graphics Interface 2005*, pp.33–40, 2005.
- [44] Ahlborn,B.A., Thompson,D., Kreylos,O., Hamann, B., and Staadt,O.G.: “A Practical System for Laser Pointer Interaction on Large Displays,” in *Proceedings of VRST2005*, pp.106–109, 2005.
- [45] Kuo,W.K., and Tang,D.T.: “Laser Spot Location Method for a Laser Pointer Interaction Application using a Diffractive Optical Element,” *Optics & Laser Technology*, Vol.39, pp.1288–1294, 2007.
- [46] Hinckley,K., Sinclair,M., Hanson,E., Szelisk,R.,and Conway,M.: “The VideoMouse: a Camera-based Multi-degree-of-freedom Input Device,” *Proceedings of UIST’99*, pp.103–112, 1999.
- [47] Osgood,C.E., Succi,G.J., and Tannenbaum,P.H. “The Measurement of Meaning,” *Urbana: University of Illinois Press*, 1957.
- [48] 井上正明, 小林利宣: “日本における SD 法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観,” *教育心理学研究*, Vol.33, No.3 (19850930), pp.253–260, 1985.
- [49] 讃井純一郎, 乾政雄: “レパートリーグリッド発展手法による住環境評価構造の抽出,” *日本建築学会論文報告集*, No.367, pp.15–22, 1986.
- [50] 棟近雅彦, 三輪高志: “感性品質の調査に用いる評価用語選定の指針,” *日本品質管理学会誌「品質」* Vol.30, No.4 (20001015), pp.96–108, 2000.
- [51] 恩田浩司, 菊池司, 岡崎章: “CG を用いた不可視オブジェクトの可視化と触感表現に関する研究,” *デザイン学研究*, Vol.52, No.3 (20050930), pp.41–48, 2005.

- [52] 山岸和久, 林孝典: “双方向マルチモーダルサービス品質に関する心理要因分析,” 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, コミュニケーションクオリティ, Vol.104, No.22 (20040416), pp.81–84, 2004.
- [53] 山本健司, 伊藤嘉浩, 田坂修二: “コンテンツがユーザレベル QoS に及ぼす影響の多次元評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. RCS, 無線通信システム, Vol.103, No.12 (20030411), pp.13–17, 2003.
- [54] 河原達也, 小川一, 堂下修司: “声質に関する印象評価および心理的類似性と音響的類似性について,” 電子情報通信学会技術研究報告. SP, 音声, Vol.95, No.140 (19950713), pp.7–13, 1995.
- [55] 阿部眞理: “スギ圧縮材とその突き板化粧単板の接着特性,” デザイン学研究. 研究発表大会概要集, No.50 (20030501), pp.176–177, 2003.
- [56] 佐藤仁人: “生活空間に関連するプロダクトの色彩イメージに関する研究,” 日本建築学会環境系論文集, No.597 (20051130), pp.19–26, 2005.
- [57] 大石康彦, 金濱聖子, 比屋根哲, 田口春孝: “森林空間が人に与えるイメージと気分の比較: POMS および SD 法を用いた森林環境評価,” 日本林学会誌, Vol.85, No.1 (20030216), pp.70–77, 2003.
- [58] 恒松良純, 船越徹, 積田洋: “街並みの「ゆらぎ」の心理量分析: 街路景観の「ゆらぎ」に関する研究 (その 2),” 日本建築学会計画系論文集, No.597 (20051130), pp.45–52, 2005.
- [59] 谷口小百合, 張格, 相田明, 鈴木誠: “庭園景から受ける癒しのイメージに関する調査研究,” 東京農業大学農学集報, Vol.48, No.3 (20031230), pp.115–127, 2003.
- [60] 小林知春, 白井洋子, 福井美津子, 米倉摩弥: “看護師の摂食・嚥下訓練に関するイメージ,” 聖隷クリストファー大学看護学部紀要, Vol.12 (20040331), pp.39–47, 2004.
- [61] 前堂志乃: “大学生のカウンセリングに対するイメージの変化と心理学を学ぶ実感についての研究: 自主的体験学習プログラムとの関連を中心に,” 沖縄国際大学人間福祉研究, Vol.3, No.1 (20050331), pp.1–35, 2005.
- [62] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “汎用動画像処理ソフトウェアライブラリ – MAlib –,” LC2001 予稿集, Aug. 2001.
- [63] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “顔の向きと頭部位置を利用したユーザインタフェースの試作,” 第 8 回画像センシングシンポジウム 予稿集, pp.507–510, Jul. 2002.
- [64] Iio,J., Yatabe,T., and Hiyaane,K.: “3D Model Viewer with Viewpoint Tracking System,” *Proceedings of INTERACT2003*, pp.1107–1108, Sep. 2003.
- [65] Iio,J. and Arai,T.: “Evaluating an Intuitive User Interface for Three-dimensional Model Viewer,” *Proceedings of VSMM2004*, pp.808–811, 2004.

- [66] Sakata,K., Inoue,K., Takubo,T., Arai,T., and Mae,Y.: “Proposal of Wheelchair Support System Using Humanoid Robots for Creating SSR Society,” *Proceedings of SSR2003*, pp. 53–58, 2003.
- [67] 坂田幸太郎, 田窪朋仁, 井上健司, 前泰志, 野中瀬里, 新井健生: “安心・安全空間創出のためのヒューマノイドによる人間支援— 物体受け渡し動作時の心理的影響の評価,” 第4回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, Vol.1 C3–5, 2003 .
- [68] 野中瀬里, 井上健司, 新井健生, 前泰志: “VR を用いた人間共存型ロボットに対する安心評価— 第1報 ヒューマノイドの物体受け渡し動作の評価 —,” 日本ロボット学会第21回学術講演会講演論文集, 3H24, 2003 .
- [69] 濱津陽一, 井上健司, 新井健生, 前泰志: “仮想操作環境システムの開発 —第4報 仮想コックピットの視覚呈示—,” 日本ロボット学会第21回学術講演会講演論文集, 3F14, 2003.
- [70] 難波精一郎, 桑野園子: “音の評価のための心理学的測定法,” 音響テクノロジーシリーズ, コロナ社, 1998.
- [71] 飯尾淳, 新井健生: “レーザーポインタと単眼カメラを用いた3次元情報入力装置,” *Proceedings of WISS2005*, pp.133–134, 2005.
- [72] 飯尾淳, 新井健生: “頭部位置計測による3次元モデル表示系のユーザビリティ評価,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.445–453, 2006.
- [73] 飯尾淳, 井上健司, 新井健生: “複数輝点レーザーポインタによる3次元情報入力装置,” 第5回情報科学技術フォーラム (FIT2006), pp.467–468, 2006.
- [74] 福地健太郎: “レーザーポインタの軌跡を用いた映像パフォーマンスの試み,” インタラクション2005 論文集 (情報処理学会シンポジウムシリーズ Vol.2005, No.4), pp.63–64, 2005.
- [75] Fukuchi,K.: “A Laser Pointer / Laser Trails Tracking System for Visual Performance,” *Proceedings of INTERACT2005*, pp.1050–1053, 2005.
- [76] 小峯一晃, 澤畠康仁, 浦谷則好, 吉田征彦, 石川浩一, 井上友幸: “デジタル放送受信機用ユーザ・インタフェースの試作と評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3 (20070315), pp.1085–1096, 2007.
- [77] 広川美津雄, 井上勝雄: “デザイン評価用語と形態要素の関係分析,” 日本デザイン学会. 研究発表大会概要集, No.47 (20001016) pp.134–135, 2000.
- [78] 関口彰, 嶋暁人, 井上勝雄, 伊藤 弘樹: “感性工学的視点からの携帯音響製品デザインの調査分析,” デザイン学研究. 研究発表大会概要集, No.52 (20050530), pp.186–187, 2005.

- [79] 柳澤秀吉, 福田収一: “印象語による意匠設計支援方法の開発: 感性の多様性を考慮して,” 日本機械学会論文集. C 編, Vol.67, No.657 (20010525), pp.1682–1688, 2001.
- [80] 川浦康至: “対人コミュニケーションにおけるメディアの役割: テレビ電話を中心に,” 国際文化研究紀要, 6, pp.27–60. 2000.
- [81] 堀洋道: “心理測定尺度集 2 人間と社会のつながりをとらえる“対人関係・価値観 ”,” サイエンス社, 2001.
- [82] 原田悦子: “当該メディアを介しての話しかけ行動についてのイメージ (SD 法),” 『人の視点からみた人工物研究』, 共立出版, 1997.
- [83] 和田有史, 續木大介, 山口拓人, 木村敦, 山田寛, 野口薫, 大山正: “SD 法を用いた視覚研究 知覚属性と感情効果の研究を例として,” Vision, Vol.15, No.3, pp179–183, 2003.
- [84] 佐藤順, 森島繁生: “音声に込められた感情の意味次元に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎 Vol.97, No.99 (19970613), pp.21–28, 1997.

研究業績

学術論文

- [1] 飯尾淳, 井上健司, 新井健生: “レーザポインタによる 3 次元情報入力装置の開発とそのユーザビリティ評価,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.9, No.3, pp.313–324, 2007.
- [2] 飯尾淳, 新井健生: “頭部位置計測による 3 次元モデル表示系のユーザビリティ評価,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.445–453, 2006.

国際会議

- [1] Iio,J., Inoue,K., and Arai,T.: “Three-dimensional Pointing Device using a Multi-spot Laser Pointer,” *The Second IEEE Tabletop Workshop*, Newport, RI, Oct. 2007.
- [2] Iio,J. and Hiyane,J.: “Human Detection System using Robust Silhouette Extraction from Surveillance Images,” *Proceedings of SSR2005*, San Francisco, CA. Mar. 2005.
- [3] Iio,J. and Arai,T.: “Evaluating an Intuitive User Interface for Three-dimensional Model Viewer,” *Proceedings of VSM2004*, pp.808–811, Ogaki, Nov. 2004.
- [4] Iio,J., Yatabe,T., and Hiyane,K.: “3D Model Viewer with Real-time Viewpoint Tracking System,” *Proceedings of INTERACT2003*, pp.1107–1108, Zurich, Sep. 2003.

国内会議

- [1] 飯尾淳, 井上健司, 新井健生: “PickPointer: 3次元モデルの直感的な操作法,” Workshop on Interactive Systems and Software (WISS2007), pp.81–86, 佐世保, Dec. 2007.
- [2] 飯尾淳, 井上健司, 新井健生: “複数輝点レーザポインタによる 3 次元情報入力装置,” 第 5 回情報科学技術フォーラム (FIT2006), 一般講演論文集第 3 分冊, pp.467–468, 福岡, (2006.9).
- [3] 飯尾淳, 新井健生: “レーザポインタと単眼カメラを利用した 3 次元情報入力装置,” Workshop on Interactive Systems and Software (WISS2005), pp.133–134, 小豆島, Dec. 2005.

- [4] 飯尾淳, 比屋根一雄: “環境の変化に安定した人物検出手法,” 第 10 回画像センシングシンポジウム (SSII04), pp.129–134, 横浜, Jun. 2004.
- [5] 飯尾淳, 伊達章: “顔検出システム MACAO & FacePoint,” Linux Conference 2003 (LC2003), 抄録集 Vol.1, CP-02, 大阪, Oct. 2003.
- [6] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “Disparity Map を用いたユーザ位置の検出と 3 次元インタフェースへの適用,” 第 2 回情報科学技術フォーラム (FIT2003), 情報技術レターズ, Vol.2, pp.271–272, 江別, Sep. 2003.
- [7] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “観測位置計測を備えた 3D モデル表示システムとその応用,” 三次元映像のフォーラム 第 64 回研究会, 3D 映像, Vol.17, No.2, pp.43–46, 大岡山, May. 2003.
- [8] 飯尾淳: “顔認識による視点位置計測を利用した 3 次元モデル表示装置,” 2003 年度 JSPE 春季大会シンポジウム「人と顔の計測と感性情報処理」, pp.105–110, 東小金井, Mar. 2003.
- [9] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄, 米元聡, 谷口倫一郎: “動画像処理ライブラリ MAlib を利用した 3 次元ユーザインタフェースの実装,” オブジェクト指向 2002 シンポジウム (OO2002), pp.117–120, 台場, Aug. 2002.
- [10] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “顔の向きと頭部位置を利用したユーザインタフェースの試作,” 第 8 回画像センシングシンポジウム (SSII2002), pp.573–576, 横浜, Jul. 2002.

特許出願

- [1] 谷口倫一郎, 飯尾淳: “三次元画像表示装置及び表示方法,” 特開 2004-030408
- [2] 新井健生, 井上健司, 飯尾淳: “情報入力システム,” 特願 2007-039986

本論文に直接は関しないもの

学術論文

- [1] Shimizu,H. Iio,J., and Hiyane,K.: “Realities of Free/Libre/Open Source Software developers in Japan and Asia,” *First Monday*, Vol.9, No.11, Nov. 2004.
- [2] 渡部信一, 熊井正之, 曽根秀昭, 比屋根一雄, 飯尾淳, 菅井邦昭: “ネットワークを利用した不登校児・障害児支援システムの開発,” *日本教育工学会論文誌*, Vol.26, No.1, pp.11–20 Jun. 2002.

国際会議

- [1] Shimizu,H., Iio,J., and Hiyane,K.: “The Realities of Free / Libre / Open Source Software Developers in Japan and Asia,” *The Joint 4S and EASST Conferences 2004*, Paris, Aug. 2004.
- [2] Yamazaki,M., Hongo,T., Hiyane,K., Iio,J., and Yatabe,T. “Genetic Algorithms Based Optimization of 3-Dimensional Alignments for Highways,” *The Eighth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing (ECT2002)*, paper 73, Prague, Sep. 2002.
- [3] Hiyane,K. and Iio,J. “Non-speech sound recognition with microphone array,” *Workshop on Hands-Free Speech Communication (HSC2001)*, Kyoto, Apr. 2001.

国内会議

- [1] 伊藤宣博, 今給黎道明, 清水浩行, 飯尾淳, 吉野公平, 瀧田佐登子: “OSS デスクトップの普及を阻害する Web コンテンツの分布状況,” *Japan Linux Conference 2007 (JLC2007)*, 抄録集 Vol.5, CP-04, 東京 有明, Sep. 2007.
- [2] 飯尾淳, 今給黎道明, 末廣陽一, 三宅直樹, 篠原雅彦, 森蔭政幸, 比屋根一雄: “教材コンテンツと OSS ブラウザの相互運用性問題,” *日本 e-Learning 学会 2005 年学術講演会 (JeLA2005)*, 神戸, Nov. 2005.
- [3] 比屋根一雄, 清水浩行, 谷田部智之, 飯尾淳: “オープンソースデスクトップ導入ガイド,” *Linux Conference 2004 (LC2004)*, 抄録集 Vol.2, CP-04, 東京 有明, Jun. 2004.
- [4] 清水浩行, 谷田部智之, 飯尾淳, 比屋根一雄: “オープンソース / フリーソフトウェア開発者の地域差に関する考察,” *Linux Conference 2004 (LC2004)*, 抄録集 Vol.2, CP-05, 東京 有明, Jun. 2004.
- [5] 齋藤真輝, 曽我正信, 中出実, 山中禎詠, 杉岡利信, 阿部昌裕, 片桐敦, 小島一元, 比屋根一雄, 飯尾淳, 谷田部智之: “Tasklet 方式による Linux のリアルタイム性向上,” *Linux Conference 2004 (LC2004)*, 抄録集 Vol.2, CP-08, 東京 有明, Jun. 2004.

- [6] 比屋根一雄, 清水浩行, 谷田部智之, 飯尾淳: “オープンソースソフトウェア開発者オンライン調査日本版 FLOSS-JP,” Linux Conference 2003 (LC2003), 抄録集 Vol.1, CA-01, 大阪 本町, Oct. 2003.
- [7] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “Linux における動画像処理の現状と応用,” Linux Conference 2002 (LC2002), 大手町, Sep. 2002.
- [8] 比屋根一雄, 中村哲, 飯尾淳, 浅野太, 金田豊, 山田武志, 西浦敬信, 小林哲則, 伊勢史郎, 猿渡洋: “RWC 実環境音声・音響データベース,” 第 16 回人工知能学会全国大会, お茶の水, May. 2002.
- [9] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “組込み Linux 向け動画像処理基盤ソフト「MAlib」,” 第 1 回 IPA Technology Expo (ITX2001), 青山, Nov. 2001.
- [10] 飯尾淳, 谷田部智之, 比屋根一雄: “汎用動画像処理ソフトウェアライブラリ — MAlib —,” Linux Conference 2001 (LC2001), 信濃町, Aug. 2001.
- [11] 西浦敬信, 中村哲, 比屋根一雄, 飯尾淳, 浅野太, 山田武志, 小林哲則, 金田豊: “音声認識や音環境理解のための実環境音声・音響データベースの構築,” 人工知能学会, 第 13 回 AI チャレンジ研究会 SIG-Challenge-0113, pp.55–62, 大久保, Jun. 2001.
- [12] 山崎元也, 本郷延悦, 高橋広幸, 今村博, 比屋根一雄, 飯尾淳, 谷田部智之, 加賀谷誠一: “デジタル地形データの高速道路設計への応用,” 第 23 回土木計画学会研究発表会, 足利, Nov. 2000.
- [13] 比屋根一雄, 澤部直太, 飯尾淳: “マイクロホンアレーを用いた非音声音認識,” RWC 2000 シンポジウム, 東京 平河町, Jan. 2000.
- [14] 田浦健次郎, 遠藤敏夫, 大山恵弘, 田端邦男, 米澤明憲, 比屋根一雄, 西岡利博, 飯尾淳, 小林慎一, 岡田弓子: “次世代マルチプロセッサ PC 向け高効率 C 言語処理系,” IPA 高度情報化支援ソフトウェア育成事業最終成果発表会, 台場, May. 1999.
- [15] 飯尾淳, 比屋根一雄: “非音声信号認識のための擬音語クラスタ,” 電子情報通信学会総合大会, 横浜, Mar. 1999.