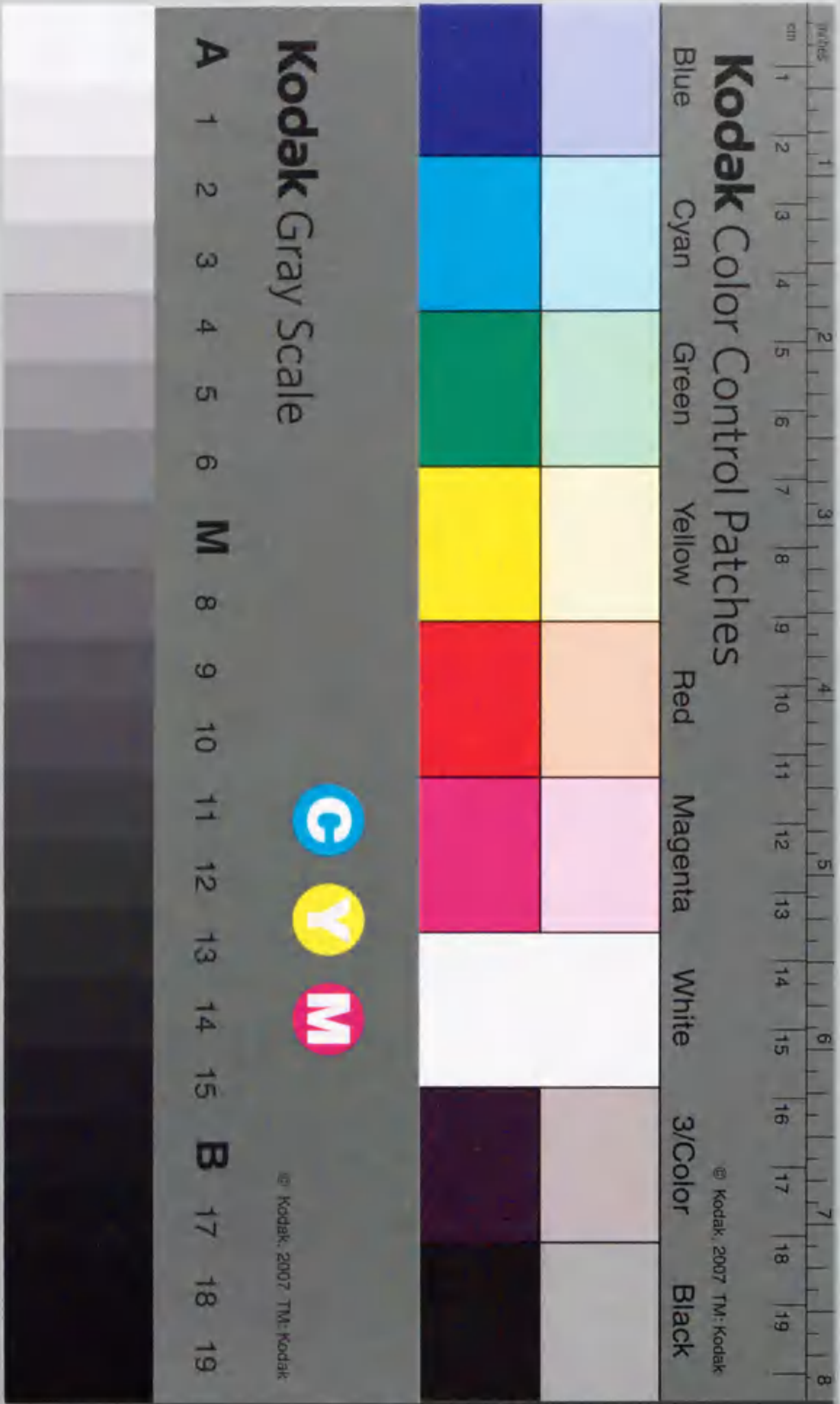


Virtual Realityの工業製品デザインへの応用に関する研究

吉田俊介

名古屋大学大学院人間情報科学研究科

2000年度



報告番号 甲第 4973 号

①

博士論文

Virtual Reality の工業製品デザインへの応用に関する研究

名古屋大学大学院 人間情報学研究科
社会情報学専攻 電子社会システム論講座

吉田 俊介
(2001年1月)

目次

第1章 緒論	1
1.1 デジタル化による工業製品デザインの効率化	1
1.2 Virtual Reality によるデザイン支援	3
1.3 VR 技術の工業製品デザインへの応用	3
1.3.1 関連研究とその問題点	3
1.3.2 本研究の目的と位置付け	4
1.3.3 本論文の構成	5
第2章 Virtual Reality	7
2.1 現実感を伴う人工的な世界	7
2.2 VR 技術の可能性	7
2.3 没入感を与えるための技術－立体視について	8
2.4 本章のまとめ	13
第3章 VR の産業応用	15
3.1 産業分野におけるコンピュータ化の事例	15
3.2 コンセプトデザインのためのデジタルツール	16
3.3 本論文の対象とする範囲	17
3.4 デジタルモデリングに関する研究	19
第4章 空間スケッチシステム	21
4.1 はじめに	21
4.2 関連研究との比較と本研究の目的	23
4.3 システムの概要	24
4.3.1 立体視装置	26
4.3.2 入力装置	28
4.4 モデリング手法	29
4.4.1 ラフスケッチステージ	29
4.4.2 清書ステージ	31
4.5 コマンド切り替え時のインタフェース	32
4.5.1 ジェスチャによるコマンド切り替え	34

4.6 各種補助機能	37
4.7 おわりに	38
第5章 立体視の表示精度に関する検討	41
5.1 はじめに	41
5.2 関連する研究	42
5.3 仮想物体と実物体の知覚傾向の比較—実験1	43
5.4 仮想物体の知覚傾向をより詳しく求める実験	49
5.4.1 提示距離変化に対するズレの傾向—実験2	49
5.4.2 スクリーン距離変化に対するズレの傾向—実験3	51
5.5 知覚に生じるズレに関する考察	52
5.5.1 仮想物体の知覚傾向のまとめ	52
5.5.2 奥行き知覚の仕組みに関する問題	53
5.5.3 立体視に必要なパラメータの計測に関する問題	54
5.6 奥行き距離補正手法の提案	56
5.6.1 奥行き距離補正の必要性	56
5.6.2 提案手法	56
5.6.3 補正パラメータの最適値	58
5.6.4 実用的解法	59
5.6.5 実験による検証	61
5.6.6 各パラメータの妥当性	63
5.6.7 検証実験	65
5.7 考察とまとめ	67
第6章 デザインに適した仮想空間の設計	69
6.1 はじめに	69
6.2 磁気式位置センサにおける計測誤差の補正(A)	70
6.3 実空間と仮想空間の対応付け(B)	75
6.4 奥行き誤差の補正の適用(C)	75
6.5 おわりに	76
第7章 触覚付加による作業支援効果の可能性	77
7.1 はじめに	77

7.2 サイエнтиフィックビジュアライゼーション	78
7.3 VR技術を応用した計算科学	79
7.4 クーロン力体感システム	79
7.5 可視化部における処理	82
7.5.1 分子モデルの表示	82
7.5.2 電気力線の表示	83
7.5.3 3次元モデルの立体表示	85
7.6 可触化部における処理	86
7.6.1 クーロン力の力覚提示	86
7.6.2 原子球面の可触化	86
7.7 対話操作の付加	86
7.7.1 荷電粒子の移動アニメーション表示	87
7.7.2 断面における静電ポテンシャルの可視化と可触化	88
7.8 考察—力覚の効果	89
7.9 クーロン力体感システムのまとめ	90
7.10 空間スケッチシステムに望まれる力覚	90
7.10.1 紙と筆との摩擦による力覚	91
7.10.2 筆圧による力覚	91
7.10.3 定規やテンプレートによる力覚	92
7.10.4 仮想スケッチ特有の力覚	92
7.11 おわりに	93
第8章 考察	95
第9章 結論	101
謝辞	103
参考文献	105
研究業績	111

図 一 覧

図 1-1	初期段階のデザインプロセスの流れ	2
図 3-1	デジタルモデリングの概念	18
図 4-1	空間スケッチシステムの諸機能と入出力の流れ	22
図 4-2	システム操作風景	25
図 4-3	システム構成	25
図 4-4	投影面の違いによる視点移動時の画像変化の比較	27
図 4-5	入力装置	28
図 4-6	ラフスケッチステージでの作例	30
図 4-7	清書ステージでの作例	32
図 4-8	3次元メニューパレットの例	33
図 4-9	コマンド切り替えの流れ	34
図 4-10	ジェスチャによるコマンド切り替え	35
図 4-11	ストロークによる操作の判断	36
図 4-12	角度によるストロークの認識	36
図 4-13	基本構造物の表示例	38
図 5-1	実験装置の構成	44
図 5-2	実験 1 の提示箇所	45
図 5-3	実物体の知覚距離の度数分布	46
図 5-4	仮想物体の知覚距離の度数分布	47
図 5-5	実験 2 の提示箇所	49
図 5-6	仮想物体の提示距離と知覚距離のズレ (正面提示時)	50
図 5-7	仮想物体の提示距離と知覚距離のズレ (左前提示時)	50
図 5-8	実験 3 の提示箇所	51
図 5-9	スクリーン距離の変化によるズレの変化	52
図 5-10	輻輳を考慮した際のズレの理論値	55
図 5-11	修正パラメータの配置	57
図 5-12	物体-スクリーン間距離とズレの関係	62
図 5-13	ds_2 を用いない補正の例	64
図 5-14	補正前後のズレの比較	66
図 6-1	実空間と仮想空間の位置合わせの流れ	70
図 6-2	磁気式位置センサに生じている座標の歪み	71
図 6-3	各センサの配置	72

図 6-4	変換行列の作成	73
図 6-5	融合行列 A を用いる効果	74
図 7-1	クーロン力体感システム	80
図 7-2	システム構成	81
図 7-3	分子モデルの表示例	83
図 7-4	電気力線の描画アルゴリズム	84
図 7-5	電気力線の表示例	85
図 7-6	荷電粒子のアニメーションの例	87
図 7-7	対話操作による静電ポテンシャルの表示	88
図 7-8	斥力の体感	89
図 8-1	初期段階のラフスケッチ	98
図 8-2	清書後のデザイン	99
図 8-3	仮想の街を使った走行シミュレーション	100

表 一 覧

表 2-1	立体知覚要因	9
表 2-2	主な立体視装置の例	11
表 4-1	必要な頻度による操作の割り当て	33
表 5-1	実物体の知覚距離の平均値と標準偏差	48
表 5-2	仮想物体の知覚距離の平均値と標準偏差	48
表 5-3	各パラメータの必要性	65
表 6-1	補正後の光学式位置センサとの誤差の平均値	75
表 7-1	試作システム開発環境	81

第1章 緒論

1.1 デジタル化による工業製品デザインの効率化

近年におけるコンピュータ関連技術の発展は目覚ましく、コンピュータは既に現代社会の生活基盤を支える上で必要不可欠なものとなった。様々な分野での各種作業工程のデジタル化や知識のデータ化による効率化は、これからの高度情報化社会へ向けた重要なテーマであり、現在、多岐にわたり様々な研究が盛んになされている。

産業分野もそのようなデジタル化による作業の効率化が望まれる分野の一つであり、工業製品デザインも例外ではない[1][2][3]。これまでも幾つかのシステムが提案されてきており、代表的なものとしては CAD(Computer Aided Design)と総称されるコンピュータ支援によるデザインシステムが挙げられる。

広義における CAD システムは、初期のアイデア検討から製品形態の図面化、試作による立体化、評価や過去の検討結果のデータベース化といった一連のデザインプロセス全体を支援する概念である。しかしながら、当初のコンピュータ性能の限界などからそれらを一度に実現するには課題が多く、まずは図面化段階の作図支援をするためのシステムが整備されてきた。そのため、現在主流の CAD システムは、パーソナルコンピュータの CAD に代表されるような 3次元モデリング機能を実装しているアプリケーションを指すことが多い[4]。広義の CAD システムのようなデザインプロセスに一貫して用いられるコンピュータ支援環境、特に、デジタルデータだけを使い製品デザインが行える環境を構築することができれば、デザインプロセスに費やす時間と費用を削減でき、繰り返し行われるデザインの早期段階から最終段階までの試行錯誤を短期間で効率よく行えるだろう。

しかしながら、その狭義の CAD システムであり製図に関する機能であるモデリング CAD システムについてさえも幾つかの問題点がある。ひとつの例と

しては、その操作の煩雑さや直観的でないインタフェースがデザイナーの創作活動の障壁となっていることが挙げられる。例えば、ディスプレイなどの2次元平面に投影した三面図を介したモデリング作業は3次元形状のデザインに適するとは言えず、平面画像による立体形状のデザイン評価はかなりの熟練度を要する。そのため、アイディアスケッチのように頭の中のイメージをその場で形にしていくようなスピードや創造性が要求されるような作業に用いるのは、かえって作業効率を落としかねないために適さない。

その代わり、モデリング CAD は左右対称な形状や連続した曲面など数値的に整った形状を作成したり、微妙に変更した形状を幾通りも作成したりすることは得意とする。そこで、ある程度デザイン形状が固まった後の作図を支援し、省力化を図るという用途で特化して使われることが多い。

そのため、現在のデザインプロセスでは、初期デザインは紙と鉛筆によるスケッチや粘土による造形を行い、ある程度形状がまとまった時点で CAD を用いて作図しデジタル化した3次元モデルを作り上げてゆくという手法を採ることが多い。しかしながらディスプレイに表示される形状データのみを用いた検討は難しいために、この後、実物大のクレイモデルを実際に作成して検討を行い、その修正を再びコンピュータ上の3次元モデルに反映させるという実物とデジタルデータを行き来する余計な手順を踏むことになる (図 1-1)。

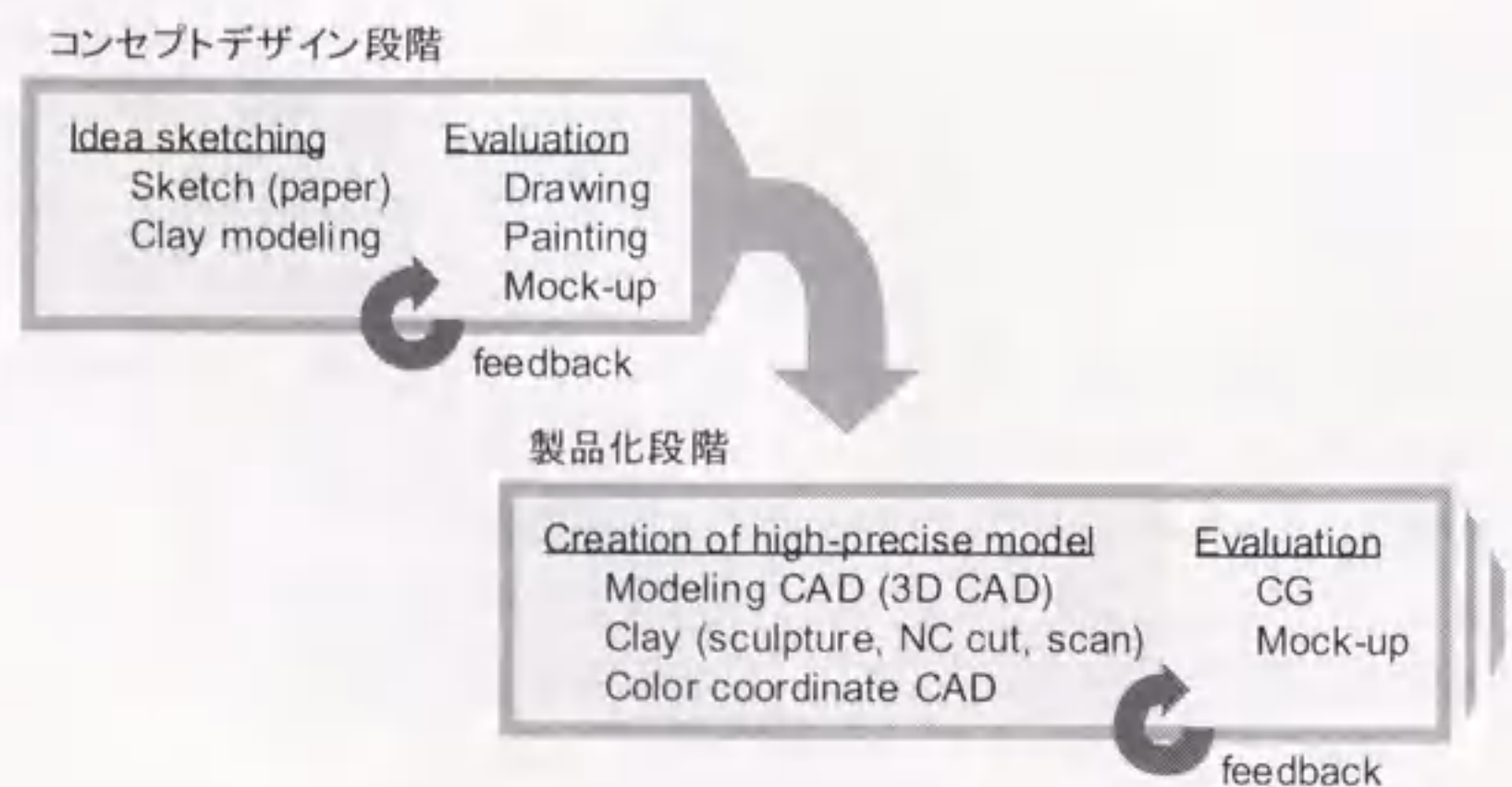


図 1-1 初期段階のデザインプロセスの流れ

1.2 Virtual Reality によるデザイン支援

Virtual Reality (以下 VR と略す)、日本語で仮想現実感と訳される一連の技術には、これらの問題を克服し、統合されたデザイン環境を提供できる可能性がある。VR とはコンピュータにより創り出された情報を何らかの手段を用いて五感に提示することで、現実には存在しない物体に対して何らかの操作を行ったり、遠隔地間や同時刻に存在しなくてもコミュニケーションしあえるような、疑似体験ができる環境を創り出す技術の総称である[5]。なかでも没入型仮想環境と呼ばれる世界を構築すれば、利用者はあたかも仮想の世界に自分が存在するかのよう様々な体験ができ、さらに物理法則をシミュレートしていれば仮想の物体を実際に持ち上げるように掴んで投げるといった操作も可能とする世界が構築できる。この技術を応用することにより、仮想的な3次元作業空間を直観的に操作できる環境や、デジタルデータをそのまま立体的に空中に表示し、評価、検討できるようなデザインプロセスを一貫して行える環境が実現できるであろう。その利点は多く、高い自由度と直観的な操作性によってデザイナーの持つアイディアを容易に3次元形状に具現化することができる。また、編集作業やデータの再利用が容易であるというデジタルデータの利点を生かし、これまでと同じ検討時間でより多くの試行錯誤を行えることだろう。さらに、現状ではクレイモデルに頼らざるを得ない実寸大での立体形状評価をも融合した従来とは異なる新しいデザイン支援のためのツールをデザイナーに提供でき、本当の意味でのコンピュータ支援デザイン環境が構築できると考えられる。

1.3 VR 技術の工業製品デザインへの応用

1.3.1 関連研究とその問題点

仮想空間をデザイン作業の場として活用しようとする研究はこれまでも幾つかあるが、それを工業製品デザインに応用するには幾つか問題がある。

モデリング部分に関して挙げると、既存の研究 (例えば[22][23]) では初心者でも扱えるような直観的なモデリングシステムのためのインタフェースの開発を重視していることから、提案されるシステムで作成される形状はプリミティブ (球や立方体等の単純な基本形状) で構成される単純な形でしかないことが多い。工業製品デザインにおいても当然直観的なモデリングインタフェースは必要不可欠な要素であるがそれだけでは足りず、アイディアが出しやすく、描

きたい場所に描きたい形で素早く立体形状をデザインできるようなデザイナーの要求を満たすインタフェースが求められる。また、単純なプリミティブの組み合わせではなく様々な形状を表現できることが望ましい。

別の問題としては精度の問題[29][42][46]が挙げられる。ここでいう精度とは作成される形状の精度と、空間中に立体表示される形状の見た目の精度であるが、現在一般的に用いられている立体表示の技術ではあまり精度を重要視していないという問題がある。例えば、VR の実用化がいち早く進んだ娯楽分野においては、立体感を得ること、すなわち迫力のある映像を提示することが立体表示の目的であり、デジタルデータからの正確な形状の再現にはさほど意味がない。また、景観シミュレータなどは遠くに離れた建物を観察することが目的になるため、ミリメートル単位の細かい距離の表現は意味を持たず、むしろ疲れにくく立体感の得やすい映像を作ることが望まれる[62][63]。しかしながら、手元での作業が必要となるデザイン作業においては立体感の表現は大きな意味を持ち、立体感に精度が伴うことで形状を正しく評価でき、編集操作といった様々な作業を直観的に行うことができるようになる。仮に、仮想モデルがデータ上の位置と異なる空間に立体表示されていたとすれば、立体映像から受けていた印象と、デジタルデータから作られた実際の製品との間に印象の不一致が生じ、デザイナーが意図したデザインが製品に反映されないという問題が生じる。また操作の面から見ても、操作を加える手の位置と仮想のツールとの位置が一致していなければ、表示物体を操作する場合や細かい作業での操作性に大きく影響してくる。

1.3.2 本研究の目的と位置付け

そこで本論文では、VR 技術を応用した工業製品デザインのためのデジタルツールの提案として、初期段階の形状デザインに適した直観的なインタフェースを供えるシステムの試作とその実現について述べる。

空間スケッチシステムと題した提案システムは、従来のモデリング CAD システムのような平面ディスプレイ上の三面図は使わずに、目の前の 3 次元空間をキャンバスとして空間でモデリング作業が行えるものである。映像の表示に広視野角が覆える大型スクリーンを用い、空間に 3 次元形状を立体表示していることにより、この環境下では頭を動かすだけで自由な方向からモデルを観察することが可能である。本研究では自動車内外装デザインのような大型のデザイン作業を想定しているため、このようなデジタルモックアップは実物のモックアップと比較して、試行錯誤が容易な点や即座に修正結果が反映される点な

どでデザインサイクルを短縮することができ、実物を作成する時間的、金銭的なコストが削減可能であることから有用である。

モデリング手法には紙に描くスケッチのようなアナログ的な手法を取り入れており、従来の CAD システムでは表現が困難であったアイデア段階のスケッチを可能とするデジタルツールとなることを目指し実装している。さらに、コンセプトデザイン時のデザイナーの創造的な活動を阻害しないためにシステムの操作性も重要な課題として捉え、筆ツールと消しゴムツールの切り替えといった各種のコマンド変更操作にジェスチャなどを用いることによって極力作業を中断させない環境を提供している。また、デザイナーが整った線画を描く際には、視覚情報だけではなく紙と鉛筆が接触する際の触覚情報も利用していると考えられる。そこで、仮想空間でのデザイン作業を支援する効果があると考えられる触覚に関しても触れておく。

加えて、前節で述べたような直接操作を直観的に行うためには実空間と仮想空間を高い精度で一致させた環境の実現、すなわち、正しい空間座標に仮想物体を表示させることも必要となる。そこで、直接操作に適した環境と検討に必要な立体形状表示能力を有したシステムの構築方法についても述べる。実験により大型スクリーン投影式立体視に生じている立体感である奥行き方向の知覚傾向を求め、実際に生じているデータ上の位置と知覚する位置とのズレを補正する手法を提案する。提案する手法は立体表示用の画像生成に必要な各種パラメータの厳密な計測は現実的に不可能であり、あらかじめ誤差が含まれているとの仮定を基にする。実験より本提案手法の有効性を検討し、その効果を確認した。

1.3.3 本論文の構成

以降、第 2 章では本研究の基礎となる VR 技術を簡単に紹介し、第 3 章でそれを産業応用する際に留意すべき点と既存研究に対する本研究の位置付けを明確にする。その後、本研究で提案する空間スケッチシステムの特徴とその実現方法を述べてゆく。

まず第 4 章では試作した空間スケッチシステムの設計方針と具体的な実現方法について記す。ステレオ画像の作成方法やスケッチを模したモデリング手法について述べ、直観的な作業を妨げないインタフェースの提案を行う。

第 5 章では産業応用する際に問題となる立体視に関する精度について述べる。始めに実験により立体視における仮想物体の知覚傾向を調査し、実物体との知覚の比較を行う。次に、実際に生じている知覚のズレの要因について考察する。

その後、具体的にその解決方法を提案する。そして第6章ではデザインに適した仮想空間の設計方法について述べる。

また、触覚情報を与えることによるデザイン作業への支援効果を模索するために、分子のまわりに働くクーロン力を題材にした可視化に可触化を加えたシステムを試作した。第7章ではその結果を基に、空間スケッチシステムに望まれる力覚について考察し、その可能性を検討した。

最後に、第8章で空間スケッチシステムの試用実験の結果を示して考察し、第9章で工業製品デザインへのVR技術の応用に関して行った本研究をまとめる。

第2章 Virtual Reality

2.1 現実感を伴う人工的な世界

人は五感を使って世界を認識しているが、その五感を何らかの手段を用いて人工的に与えることができれば現実ではないが現実であるかのような体験をすることができる。Artificial Reality (人工現実感) や Virtual Reality (仮想現実感) と呼ばれる一連の技術は、コンピュータ等で人工的に創り出した情報を人に提示して仮想の体験を与える技術の総称であり、創り出される情報が現実のものに近ければ近いほど臨場感が増してゆく[5]。例えば、立体視技術を使い映像を空間中に浮かび上がらせることにより、目の前に実際に物があるかのような感覚を与えることができる。さらにセンシング技術を用いて人の行動をコンピュータに取り込み、見ている方向に合わせた映像や動作に応じた変化を映像中に提示することにより、よりいっそう没入感を高めることができる。また関連する技術として、通信技術やロボット工学と組み合わせることにより、今存在する実環境とは別の環境へ時間と空間の制約を離れて介入したり、遠く離れた場所にいる者同士でも同一の空間に存在するかのようにコミュニケーションが取れたりする環境を創ることもできる。これは Tele-Existence (遠隔臨場感) と呼ばれる技術であり、人工的な仮想世界に没入するという点においてはVRに近いものである。究極のVR環境とは現実と仮想の世界の境界が希薄になり、没入した世界において現実と同じ全ての行動ができ、時空を越えた活動をも現実としてしまう世界である。しかしながら、現在の技術ではそれにはまだ遠くおよばなくSF映画などの架空の世界においてのみ実現している。

2.2 VR技術の可能性

ここで、より現実的で実用的なVRに関する研究について述べる。長らくVRに関する研究は、情報を五感に提示するための手法やデバイスの開発を中心に

進められてきた。近年においてようやくそれらの技術が成熟し、これらを様々な分野で応用し、実用化しようという研究がなされるようになってきた。

その応用分野は幅広く、産業、通信、医療、福祉、娯楽、教育等の多岐に渡る。この技術を早くから実用化してきたのは娯楽の分野である。各地のテーマパークのアトラクションでは、宇宙空間や原始時代などの普段体験することのできない環境が音や映像を駆使して創り出され、非現実な世界を気軽に体験することができる。教育の分野では、航空機や自動車の操作シミュレーションがあり、物理法則までも考慮した仮想環境を設計して行うことにより、挙動実験や操作訓練など実物では高いコストや危険が伴う状況でも安全かつ低コストに実施することが可能である。また、科学計算のビジュアライゼーションでは、実際には見ることのできない空気の流れや分子構造を可視化することによって人間の理解を助けている。他にも手術の演習やわかりにくい病床を可視化することで医師を助けるシステムや、遠隔地にある会議室をつないだ仮想の部屋で互いの顔を確認しながら行える会議システムなどが研究されている。

当然産業分野もその恩恵を受けることが望まれる分野のひとつであり、その応用範囲は本論文で述べるような工業製品デザインへの適用だけではない。例えば家屋のウォークスルーシステムでは、実際に完成予定の家へ顧客を案内して直に確認してもらうことができる。家具の配置やキッチン等の扱いづらさといった不満な点があれば即座に変更することも可能であり、顧客の要望を正確に反映しやすくなる。また、原子炉等の危険を伴う場所にロボットを派遣して遠隔操作する作業も、ロボットからの映像量を増やし、ロボットアームに加わる反力を操作者にも感じさせるような臨場感を与えることで、その操作性は大いに向上するだろう。

2.3 没入感を与えるための技術—立体視について

人は外界からの情報の80%近くを視覚に頼っているとされている[6]。すなわち、高い臨場感や没入感を体験者に与えるためには、いかに現実感のある映像情報を生成して与えるかが重要になってくる。そこで、VR技術の中でも没入感を与える上で特に重要となってくる立体視についてここで簡単に述べておく。

まず、人が視覚を使い情報を得るとは、両目に映る映像を脳が処理して認識するということである。この時、両目が離れているためにそれぞれの網膜に映る像は微妙に異なり、その網膜像の差(両眼視差)によって人は立体感を感じ

ることができる。このような奥行きを感じずる手がかり(立体知覚要因)は両眼視差だけではなく、表2-1に挙げるようなものが存在する[6]。これらは単独で機能するわけではなく、それぞれが連携しあっている。また、それぞれの要因には有効範囲があり、調節や輻輳、両眼視差はその仕組み上至近距離から数メートルの範囲でしか働かない。遠距離では前後関係やおおまかな大きさといった程度の情報のみが得られる。

表 2-1 立体知覚要因

片眼視による情報		
調節 (accommodation)		毛様体筋による水晶体の調節作用のこと。ボケを検出する。
運動視差 (motion parallax)		頭の動きや身体の移動による相対的な像の変化のこと。
大きさ (size)		網膜像の大きさや概念的な大きさによる判断のこと。
重なり合い (occlusion)		物体の重なり具合や隠れ面による前後関係の判断のこと。
線状透視 (liner perspective)		平行線が遠方で一点に収斂して見える現象のこと。
大気遠近法 (atmospheric)		大気により遠方は不鮮明な像になること。フォグとも言う。
きめの勾配 (texture gradient)		連続的なきめの勾配変化による3次元の情報のこと。
陰影 (lighting and shadows)		陰影分布による立体情報のこと。
両眼視による情報		
輻輳 (convergence)		物体を注視する際の両眼の回転運動のこと。
両眼視差 (binocular parallax)		両眼の視線方向の差により生じる網膜像のズレのこと。

没入感を高めるには大きく分けて映像を作成する方法と映像を提示する方法が重要になってくる。単に立体感を得ることが目的であれば視差の付いた写真からでも立体視は行うことができるが、仮想世界への高い没入感を利用者に与えたいのであれば、視線の向きに応じて見える風景が変わったり、触れた物体が動いたりという行動に対するリアクションを、即座に映像として提示する必要がある。これらの理由から、映像の作成にはコンピュータグラフィックス(Computer Graphics; CG)を用いるのが一般的である。近年では、様々な作画技術

の発展や劇的なハードウェアの性能向上により、現実のものと見間違ふかのような画像をリアルタイムで作成することも不可能ではなくなってきた。

両目の位置から見えるであろう視界をシミュレートした2枚1組の画像（ステレオ画像）を作成し、それぞれの眼、もしくは網膜になんらかの装置を使い提示することで立体感を観察者に知覚させようというのが一般的な両眼立体視の仕組みである。

表 2-2 に、主な立体視システムの例を挙げる。

VR に用いられることが多い方式は、動画表示が可能であるという点と高い没入感を得られる点から HMD か特殊なメガネを用いるものである。それぞれ長所と短所があり、HMD は視界を完全に覆うように映像を提示できるために高い臨場感が得られるが、解像度の高い映像を表示できるだけの小型の表示装置を作るにはまだ技術が十分でなかったり、装着時の違和感が大きかったりという短所がある。液晶シャッタ式メガネを用いた方式は、既存の PC をベースに簡単かつ安価に実現できることから現在最も一般的に使われている方式である。しかし、CRT ディスプレイを表示装置に選んだ場合では広い視野角を確保することができないために臨場感は乏しくなる。これに対して表示面を大型スクリーンにして広視野角を実現したものがある。CAVE[7]に代表される Immersive Projection Technology (IPT) と呼ばれるこれらのシステムでは、観察者の視界を完全に覆うよう部屋状に配置したスクリーンの壁を用意し、それに映像を投影することで広い視野を確保することに成功している[8]。現状では最も高解像度、広視野角で臨場感を創り出せるシステムであるが、装置はかなり大掛かりでありコストも高い。さらに、メガネを用いるタイプのものは、観察者の手などにより映像が隠れることで前後関係と奥行き感に矛盾が生じる問題（オクルージョンの問題）などが発生する。立体視を活用する VR 環境を作る際には、それぞれのニーズに合致した適切な立体視システムを選択する必要がある。

表 2-2 主な立体視装置の例

観察者側に特殊な装置を装着させるもの

アナグリフ式メガネ+表示装置

左右異なる色のついた（通常は赤色と青色）メガネを装着する。用いるステレオ画像は赤色だけで描かれたものと青色だけで描かれたものであり、色がフィルタの役目をしてそれぞれの絵が他方の目には見えなくなる仕組み。

長所：非常に仕組みが単純でコストも低い。表示は紙媒体等でも可能。

短所：カラー表示に向かないため現実感に乏しい。

液晶シャッタ式メガネ+表示装置

表示装置にはステレオ画像が時分割で交互に表示される。交互投影に同期した信号によって、対応する目のシャッタだけが開くようになっている。

長所：現在の VR で最も一般的。普及率が高いためコストは比較的低い。

短所：交互投影の周波数が低いと残像が見えてしまう。

偏光式メガネ+表示装置

それぞれの視点の映像が特定の方向に偏光させており、メガネ側の偏光フィルタによって対応する光のみが目に映る。

長所：メガネの仕組みは比較的単純。

短所：頭が傾くなどして偏光の方向が一致しないと像が見えなくなる。

頭部装着型ディスプレイ(Head Mounted Display; HMD)

それぞれの目の前に小型の表示装置を置き、異なる画像を表示させる。

長所：完全に仮想世界に没入することができる。オクルージョンの問題が生じにくい。

短所：装着時の違和感が大きい。

表 2-2 主な立体視装置の例 (つづき)

表示側に特殊な仕組みがあるもの

視差画像, ランダムドットステレオグラム

視差のついた2枚の画像を平行に配置して裸眼で観察する。右の絵は右目だけで、左の絵は左目だけに見えるように観察者が意識することで立体視ができる(平行法)。寄り目にして観察すると逆の奥行き感が得られる(交差法)。

長所: 仕組みが単純。表示は紙媒体等でも可能。

短所: 見るためにはコツが必要で万人がすぐに見られるわけではない。

レンチキュラ・レンズ

表示装置側にかまぼこ状の細かい間隔の特殊なレンズ(レンチキュラ・レンズ)を配置し、画面上には縦長に細く分割された左右の画像を表示する。レンズによって光が屈折するため、それぞれの目には対応する画像だけが見える。

長所: 裸眼で立体視可能。

短所: 特定の観察位置以外では立体に見えない。

ホログラフィ

物体に光が当たった時の散乱光を再現させることで空中に結像させる。

長所: 裸眼で立体視可能。

短所: 動画表示はまだできない。

2.4 本章のまとめ

以上、本研究を進める上で鍵となる技術の解説として、現実感を伴った人工的な世界へ没入するための技術である VR に関して簡単に述べてきた。特に、五感の中で最も用いられ重要な情報源となる視覚に着目し、人が臨場感や立体感を得るための手がかりである立体視の原理とそれを実現するための各種 VR 装置について述べた。

当然視覚のみならず他の感覚を提示するための装置に関しても様々な研究が行われている。第7章で挙げている反力提示装置は触覚を与えるための VR 装置の例であり、ここでは触れていないが他にも多くの VR 装置が開発されている。また、情報を提示する側だけではなく人間の行動をコンピュータに取り込むための研究開発も活発である。

このように VR は様々な技術の複合によって実現する環境である。直観的に情報を把握することが可能で、自分の意思をコンピュータやその先に存在する他人に容易に伝えることを可能とするこの技術は、今後より一層の利用が期待される分野である。一方、まだ歴史が浅く発展途上にある分野でもあるため、各分野へ応用する際の技術的な問題や人体に与える影響の調査など幾つかの課題も存在する。

以降の各章では VR を産業分野に応用する際の課題点とその解決手法についても述べてゆく。

第3章 VR の産業応用

3.1 産業分野におけるコンピュータ化の事例

産業分野におけるコンピュータの導入は早い段階より行われてきた。数値制御による部品加工やロボットによる自動組み立てといったものはコンピュータの恩恵を受けている代表的な例である。VR 技術を実際に応用している事例としては、旅客機などの部品組み立てや点検作業に使われているシステムなどが挙げられる。これは、小型の HMD とウェアラブルコンピュータを装着することで、特定の個所を観察した際に現実世界の映像に重畳して必要な作業手順、点検項目やその個所が作業者の目の前に自動的に表示されるシステムである [9][10][11]。このような現実世界に仮想物をスーパーインポーズするような技術は特に Mixed Reality (複合現実感) や Augmented Reality (拡張現実感) と呼ばれ、完全に仮想世界に没入しないという意味で VR と区別される場合もある。

これらは実物を対象にした作業が目的にあるため、デジタル化という点での恩恵はデータベースとして蓄積された知識の再利用や、作業の自動化といった支援的な側面しか受けることが難しいが、新しくこれから創造する物が対象である工業製品デザイン等の作業においては、それらに加えてコンピュータ上でのシミュレーションといった完全なデジタル化も視野に入れることができるであろう。

現在の初期段階からのデザインプロセスを簡単に図示したものを図 1-1 に挙げたが、この中にも既にコンピュータ化されている部分が幾つかある。コンピュータ支援によるデザイン作業には CAD システムとして提案されている概念が古くからあるが、今現在では一般的に CAD とは 3次元形状をコンピュータへ入力し、整形、加工するモデリング部分のアプリケーションのみを指すことが多い (モデリング CAD, 3次元 CAD)。これは、これまでのコンピュータではリアルタイムで 3次元 CG を表現するだけの計算能力があまりにも乏しかっ

たことや、マウスやキーボード程度しか存在しなかった貧弱なヒューマン-マシンインタフェースの問題に起因すると考えられる。しかしながら、近年の様々な技術的発展により、従来の CAD システムに足りない部分を補うかのようなシステムの研究が幾つか進められるようになってきた。

デジタルモックアップという考え方がそのひとつであり、これまでは木や粘土などで作成していた試作形状の実物大模型（モックアップ）をコンピュータ上で作成して検討や評価を行おうというものである。特に、対象となる形状が大きければ大きいほどそのデザイン検討時のモックアップの作成には多くの時間と労力が必要であるため、フルスケールのバーチャルモックアップを作成することができれば非常に有用なツールの一つとなることが期待できる。今現在のデザインプロセスにおいては製品の 3 次元形状はモデリング CAD により設計されることが一般的になってきているため、このようなシステムを実現する上で必要となってくるのはリアルタイムで CG を作成する技術と、モックアップに替わるように 3 次元形状を立体的に表現できる技術である。デジタルモックアップを使うことにより、例えば、設計した自動車の運転席に座った時の計器類の見易さや操作性を確認することができ、それらの配置が悪ければ即座に変更して確認するということが容易に行えるようになる。既に幾つかの自動車メーカーや建築の分野などで仮想製品を使った検討評価シミュレーションが行われている[12]。

3.2 コンセプトデザインのためのデジタルツール

次にデザインプロセスの最も初期の段階であるコンセプトデザインを考えてみる。

現在の一般的なデザインプロセスの第一段階では、デザイナーは自分の思い浮かべたイメージを紙に鉛筆でスケッチして表現する。あるいは粘土をこねて新しいデザインを模索する。紙と鉛筆によるスケッチは手軽かつ簡単に即座にアイデアを表現できるため、数多くのデザインを発想し検討することができる。一方、粘土による造形はスピード的にはスケッチに劣るが、立体にした際に矛盾が生じないように作れるといった立体の成立性を確認できるという点において優れている。様々なアイデアや意見を反映しつつ描かれた数多くのアイデアスケッチや粘土の造形物は、次の段階においてスキャナやデジタイザによってコンピュータ上に取り込まれる。

コンピュータ上では 3 次元形状として存在しうるデザインを CAD システム

によって作りこんでゆく。アイデアで出した机上のデザインを立体として成立させることや、面の美しさの追求といったことにも重点をおきながら、加工、再設計を繰り返し、さらに検討を重ねられデザインは洗練されていく。この時、コンピュータ上の画像だけでは実物のスケール感や内装から受ける取り囲まれ感といったものは表現できないため、何度かは実際にモックアップを作成して検討しなければ質の高い形状は設計することができない。

初めからモデリング CAD 上でコンセプトデザインを行う場合も見られるが、製品デザインといった独創性が要求され、ひらめきを即座に形にしていけることが求められる作業においては、操作などに非直観的な手続きが存在する現状の CAD システムはその作業に向かない場合が多い。特に平面図を介したモデリング作業の煩わしさや、単眼画像による立体形状のデザイン評価はある程度熟練した者でなければ難しく、初期デザイン段階におけるデザイナーの創作活動の障壁となっている。

この初期デザイン時のツールとして 2 次元に束縛された紙を選択したとしても、デザイナーの描くスケッチからは彼らが駆使した様々なテクニックによって、平面に描かれているにもかかわらず我々でも立体感を感じることができる。しかしながら、スケッチをするかのような感覚で 3 次元空間に絵が描け、見ることができ、空間上に浮かぶ線を直接編集できるシステムでデザインした方がより独創的で質の高いアイデアを生み出すことができるのではないかと。VR 技術を応用することで新たなデザインツールをデザイナーに提供することができる可能性がここに存在する。

また、従来のモデリング CAD システムの問題点を補う入力システムとして VR 技術を応用するというアプローチもある。製造プロセスでのデジタルデータを利用した効率化は時流であり、いったんデジタル化されたデータは様々な用途で再利用することができる。しかしながらアイデア形状のデータ化は容易ではなく、アナログ媒体を使わずに直接コンピュータ上で形状データを造ることができるような、コンセプトデザイン段階のモデリング CAD の研究開発が近年では活発に行われ始めている。2 次元表示のディスプレイや、マウス、タブレットといった従来の入出力機器ではできなかった、直観的で簡便な入力システムとしての VR 技術が脚光を浴びている。

3.3 本論文の対象とする範囲

以上のような産業分野におけるデジタル化の流れの中で、本論文が対象とす

る分野は工業製品デザインにおけるコンセプトデザインの効率化に関する部分である。

現在紙や粘土といったアナログ媒体を用いるを得ない初期段階のデザインプロセスを、より効果的に進めることができるデジタルツールを提案して実現することで、今はまだ簡単な配置シミュレーションしか行うことができないデジタルモックアップという概念にも直結した、本来の意味での統合的な CAD システムの実現が期待できる。本研究の対象とする範囲を図 3-1 に概念的に示す。図中太字の部分本研究の対象とする範囲である。

本研究の目的は、従来のスケッチに代わるようなコンセプトデザインのためのコンピュータ支援環境である空間スケッチシステムの提案である。デザイナーがスケッチでよく用いる線を重ねた形状の表現を 3 次元空間内で行うために、VR 装置であるペン型の入力装置と立体視技術を使い、ペンの軌跡をそのまま空間に残すことで空間へのスケッチを可能とさせる。これによりデザイナーは頭に思い描く立体形状を即座に表現することができる。線だけではなく面としても描かれる形状は、データとしてコンピュータ上に存在するためにその編集や試行錯誤は容易である。また、そのもののスケール感と立体感で確認できるだけではなく、巨大な設計対象であれば小さく手元に表示してデザインするなど、仮想モデルを使う利点は多い。これに CAD 的な編集作業をも同時に行える機能を付加していくことで、初期デザインだけではなく次のプロセスであるより洗練された立体形状の作成も同時に行えるようになる。

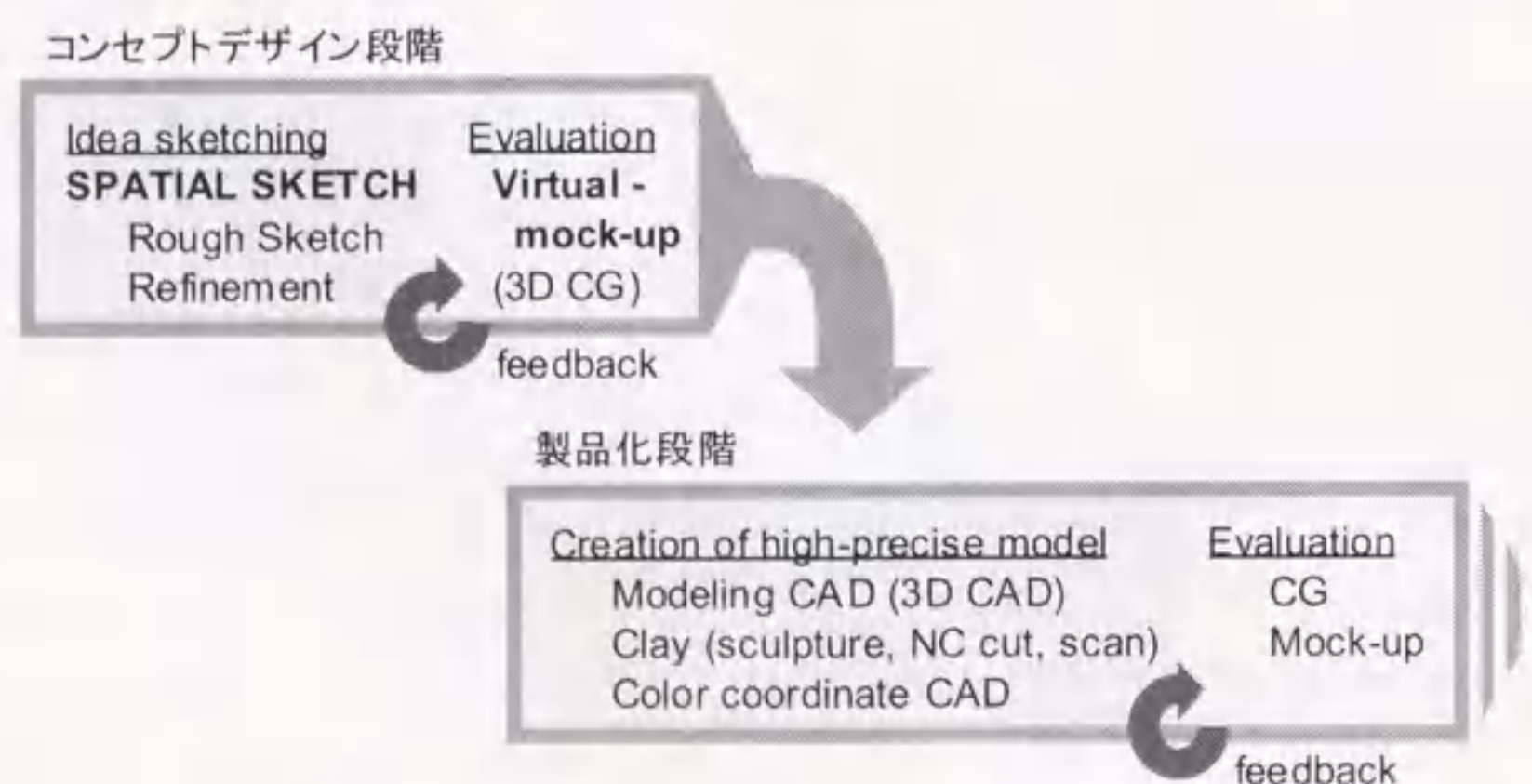


図 3-1 デジタルモデリングの概念 (図 1-1 と比較)

3.4 デジタルモデリングに関する研究

コンピュータを媒介とした造形作業を行うデジタルツールの研究はこれまでも幾つかある。

SKETCH[13]や Teddy[14]はマウスやタブレットを使い直接コンピュータ上に紙と鉛筆を使うようにスケッチしながら 3 次元形状をモデリングすることができるシステムである。これら[13][14][15]のシステムの特徴として、2 次元のスケッチ動作からある規則に従い 3 次元形状を自動的に構築することが挙げられる。従来のスケッチと同じ感覚でデジタルデータとしての 3 次元形状を作成できることから、アナログデータである絵をデジタル化する 1 段階を省略できるだけでなく、2 次元の絵では不可能な観察方向やパースの変更などを容易に行うことができるようになる。

VR 技術を用いて従来のモデリング手法のインタフェースを改良したものには次のものが挙げられる。3-Draw[16]はマウスの代わりに 3 次元ポインティング装置を使うことで従来の平面図を介さずに 3 次元の曲線を直接入力できるようにしたシステムである。FreeForm[17]やスタイリング CAD システム[18]は粘土造形をモチーフとしたモデリング環境であり、仮想のモデルに触れた際の触覚を利用者に提示することで操作性の向上を試みている。また、HMD とデータグローブなどを使い没入感を高め、仮想物体を直接操作できる環境を構築したものもある[19][20][21]。例えば VLEGO[22]はブロック遊びを真似たモデリング操作を取り入れ、仮想のブロックを組み合わせることで形状を作成する初心者でもモデリングしやすい環境を提供している。プリミティブを使った簡単な変形操作により形状を作成するものや、従来のモデリング CAD と同様な操作を 3 次元空間内で行おうとする研究もある[23][24]。

いずれも従来のモデリング CAD の概念を超えた新しいモデリングツールの提案である。初めの段階からデジタルデータであるということから、

- ・ 試行錯誤が行いやすい。
- ・ データベース化が容易である。
- ・ 様々な方向からの絵を作りやすい。

など様々な恩恵を受けることができる。

産業デザイン分野において、今後の発展が期待される分野のひとつである。

第4章 空間スケッチシステム

4.1 はじめに

空間スケッチシステムとは目の前の空間をキャンバスに見立て、直接3次元空間にスケッチをするかのようにデザインが行える新しいモデリングシステムである。提案システムはスケッチを模したアナログ感覚のモデリング手法と3次元座標を直接扱える直観的なインタフェースを備えるため、これまでのCADでは表現しにくかったひらめきや想像力が要求される初期段階のコンセプトデザインを自由にコンピュータ上で形にすることができる。ここでスケッチした形状は全てデジタルデータとして扱われるため、併せ持つ従来のモデリングCADのような編集作業機能によって、より整った形状へと修正することも容易である。

また、これまでのデザインプロセスでは立体形状を正しく評価するためには実物の3次元モデルの作成が必要であり、試行錯誤が必要なデザインプロセスのボトルネックになっていた。特に自動車の形状デザインのように実物が大きいものほどその労力は増し、その作業時間がデザイナーの創作意欲を落としかねない。しかしながら没入型立体視を使う本システムでは、フルスケールの立体感で修正や変更を即座に確認することができるため、試行錯誤が行いやすく、デザイナーが頭に思い描く形を即座に忠実に立体化することができる。

ここで、本システムの持つ諸機能と入出力の流れを大まかに表したものを図4-1に示しておく。

以降の章では、自動車スタイルデザインを例にとり、本システムの具体的な機能とその実現方法について述べる。また、VR技術を産業応用する際に重要となる問題についての検討を加え、それを解消する方法を提案する。

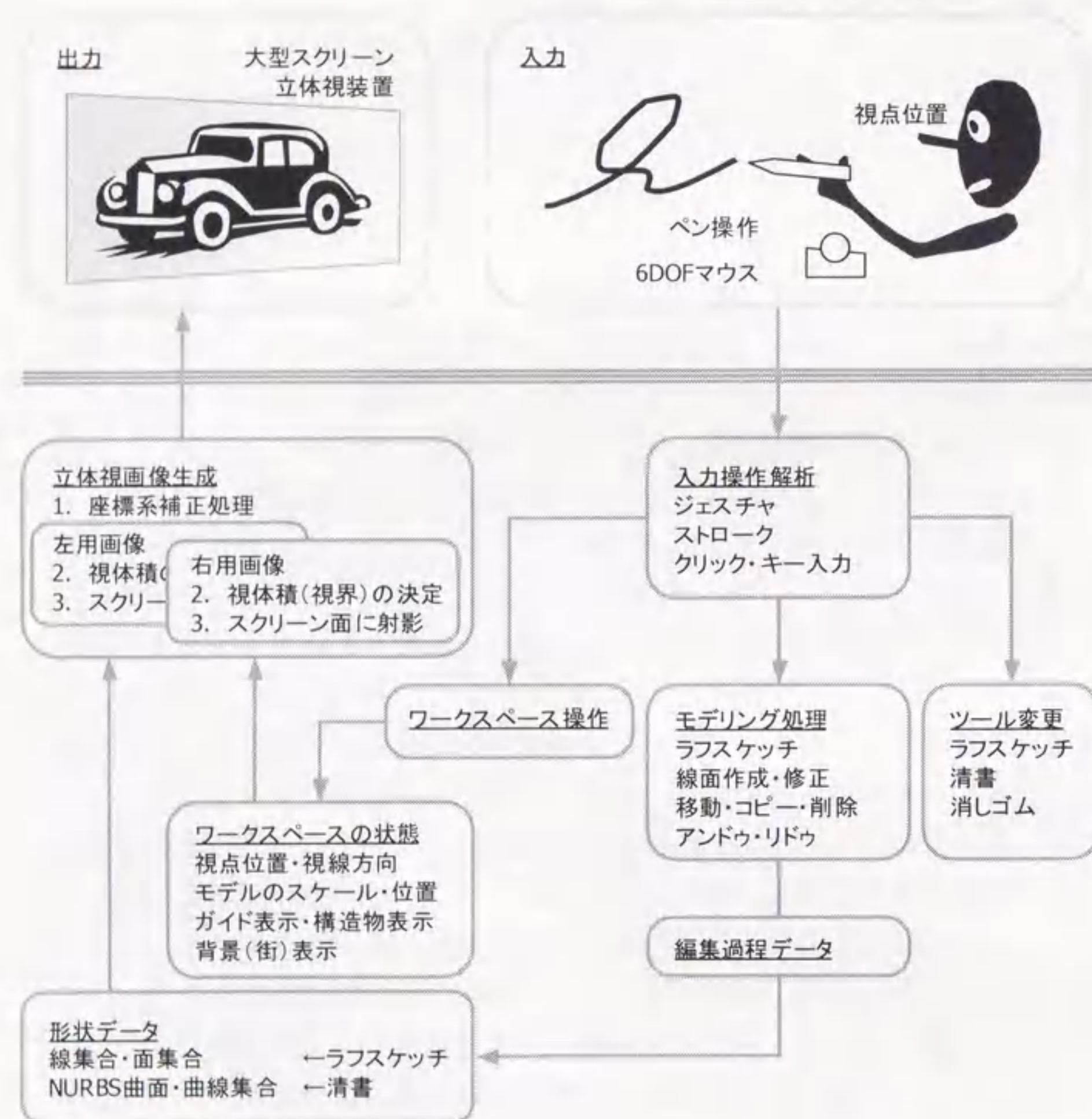


図 4-1 空間スケッチシステムの諸機能と入出力の流れ

4.2 関連研究との比較と本研究の目的

3.4で述べたように、これまでもいくつかのデジタルモデリングに関する研究がなされているが、それらとここで実現したシステムとは以下の点において異なる。

まず、2次元スケッチより3次元形状を自動生成するシステム（例えば[13][14]）は、従来のスケッチと同じ操作で立体形状がモデリングできる非常に興味深いシステムである。しかしながら、もともと1次元不足している情報を無理やり与えてしまうために、生成される立体形状が常に同一のものになるとは限らずあいまいになってしまうという欠点もある。これらは、従来のモデリングシステムのような煩雑なモデリング作法を必要としない手軽なシステムとして有用であるが、立体化の際にシステムが適当な解釈をしてしまうために、デザイナーの自分の意図した形状をそのまま形にしたいという根本的な要求が満たされずデザイナーのツールとしては適さない部分が多い。本システムは入力した形状をデザイナーの意図に忠実な位置と形で3次元化を試みるツールであり、これらとは開発の主旨が異なる。

本システムはむしろVR技術を用いたモデリングインタフェースの改良に含まれる。3.4で挙げられたもの（例えば[16][22][23]）は、3次元空間を作業スペースすることでモデリングの自由度を広げ、直観的なモデリング作業空間を構築している。しかしながら、直観的で操作しやすいインタフェースの提案と初心者でも扱いやすいプリミティブを使ったモデリングツールの開発を主題としているために、デザイナーが用いるツールとしてはやや不満が残る。本研究の対象とする利用者は工業製品のデザイナーであるために、直観的でわかりやすいだけでは十分でなく、曲面を多用する自動車デザインのようなモデル構築のためのツールとしての機能も必要となる。

さらに、本研究ではアイデアを形にする段階のコンセプトデザインを対象としたデジタルツールの実現を試みているという違いもある。3次元座標を直接入力できるVR装置を用いたヒューマン-マシンインタフェースは直観的ではあるが、最終的に作成される形状の美しさは細かい数値制御が得意な一般的なモデリングCADの方に一日の長があると言わざるを得ない。しかしながら、アイデアスケッチのようなコンセプトデザインは従来のCAD的なモデリング手法では作成することが難しい。そこで本システムではアナログスケッチの感覚を残したモデリング手法を提案し、コンセプトデザインに適したデジタルツールを実現する。

また、従来の研究ではインタフェース面を重視することが多く、操作や形状検討のための立体表示の精度についてはあまり重視していないという問題もある。例えば VR 空間と実空間の対応が正確でなければ、作成される仮想自動車内装とその後作成される試作品や消費者に渡る実製品とのデザイン的印象は異なるであろう。また、仮想空間のパスが狂っていれば必要とする精度も満たすことは難しく、これを実際の製品設計現場で用いることはできない。本研究ではこれらの点にも着目し、立体視における人の仮想物体の知覚傾向を調査した上でこれらの問題を解消してゆく。

以上をまとめると、本システムは工業製品デザイナーのためのコンセプトデザインに適したデジタルツールの開発という主旨を持ち、以下の事柄を中心に研究を行った点が従来の研究との差異である。

- ・ コンセプトデザインに適した環境の構築。
- ・ 直観的なモデリング手法の提案。
- ・ 創造的な作業を妨げないインタフェースの模索。
- ・ 立体視環境下における仮想物体の知覚傾向の調査。
- ・ 仮想物体の表示精度向上手法の提案。
- ・ 仮想空間と実空間が融合した空間の作成。
- ・ 触覚を提示することによる作業支援効果の検討。
- ・ デジタルモックアップの実現。

4.3 システムの概要

図 4-2 に本システムの操作風景を、図 4-3 に使用機器の配置を示す。

利用者（主にデザイナー）は、液晶シャッタ式の立体視メガネと視点位置検出用の位置センサを装着して大型スクリーンの前に設置されたシートに座る。グラフィックワークステーションで作成されたステレオ画像はスクリーン上に背面から交互に投影され、立体視メガネにより空中に像を知覚することができる。

スケッチや各種のモデリング操作は、利き手に持った 6 自由度のペン型入力デバイスと、空いた手に持つ補助操作指示用の 6 自由度の入力が可能なマウスで行う。ペン型デバイスにはボタンがひとつ取り付けられており、空間でのクリック操作、またはドラッグによりデザイン作業を進める。これらの基本操作を組み合わせることにより利用者は線や面を描画し、曲面を作成する。

次に、各装置の選択基準について説明する。



図 4-2 システム操作風景

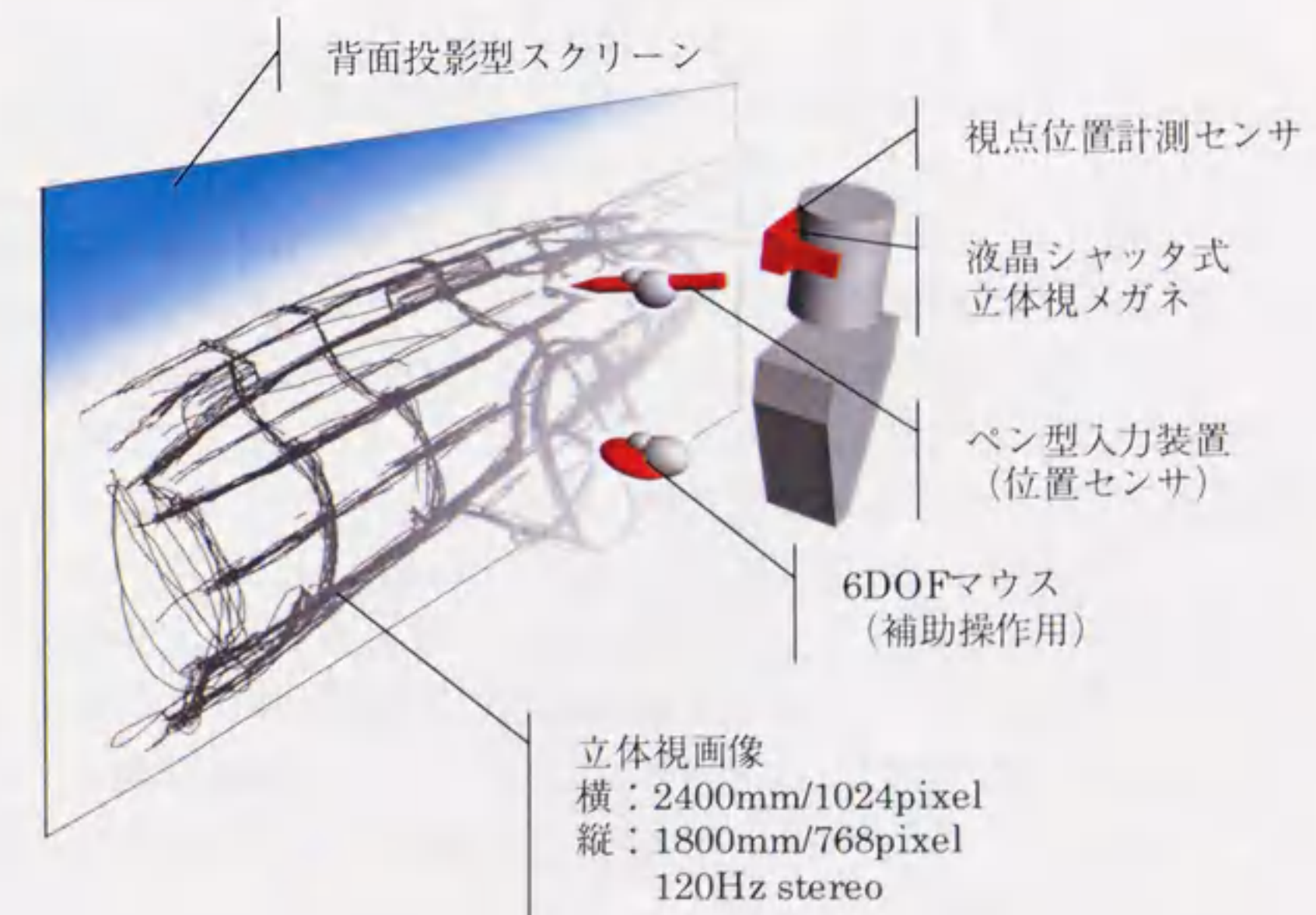


図 4-3 システム構成

4.3.1 立体視装置

リアルタイムでの任意の方向からのモデルの観察を可能とするためには、視点位置を常に計測して即座に CG に反映させる必要がある。また、没入感を高めるためには広い視野を覆うことができる提示装置を選択する必要がある。

本システムでは没入型立体視のための投影装置に HMD ではなく大型スクリーンを用いている。これは以下の理由による。

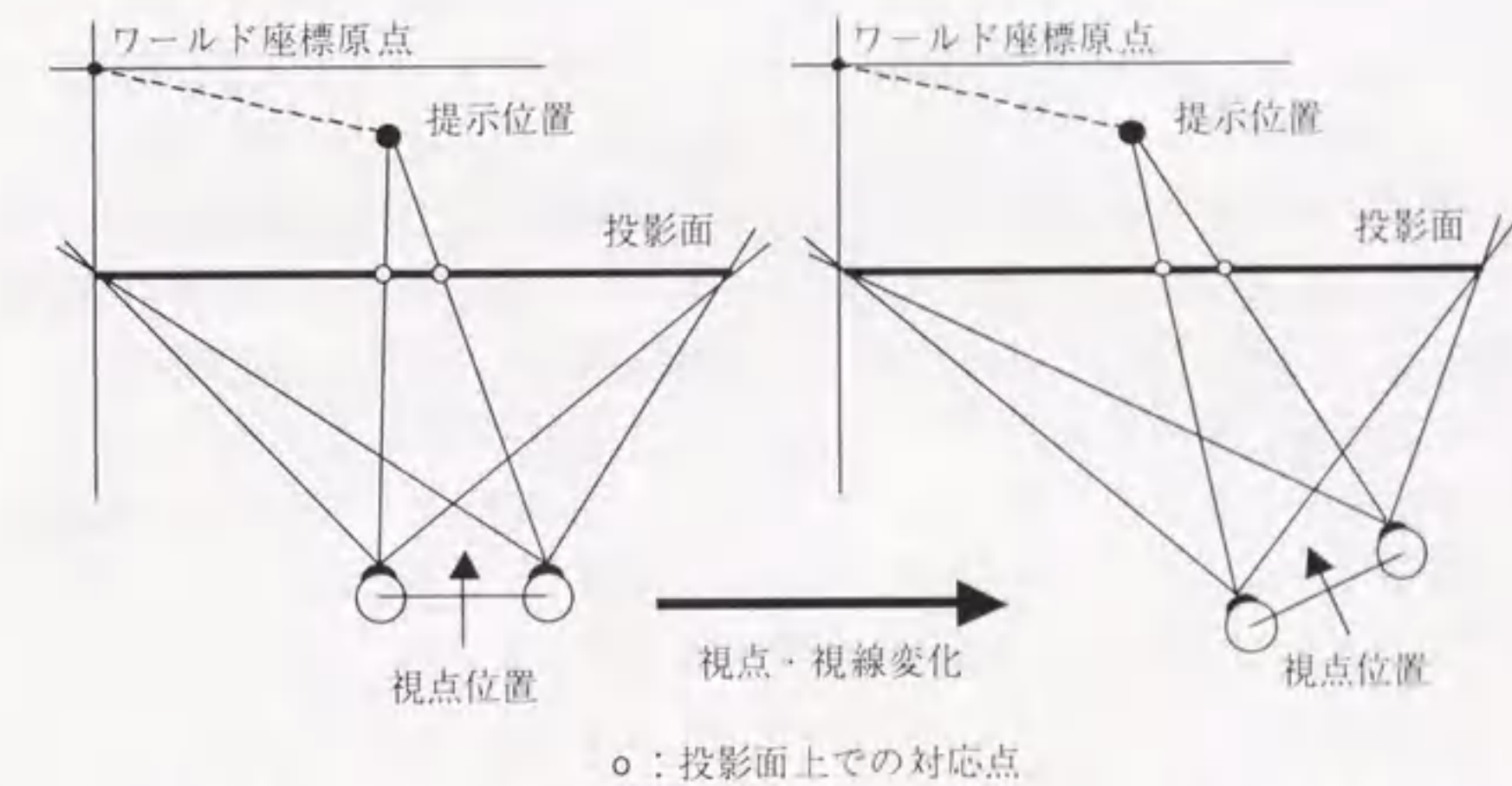
まず、現時点において解像度や利用時の快適さの点において HMD よりも優れている点が挙げられる。HMD はその構造上高解像度を得るためには装置が大きく重くなってしまいう上、その装置の大部分を装着しなければならないために利用時の不快感が強くなる欠点がある。スクリーン式では利用者はメガネを装着するだけであり不快感は HMD よりも低く、広視野角を確保するためには大型のスクリーンを用いるか利用者を囲うように配置すればよく、高解像度を望むのであれば一つの映像を複数のコンピュータで分担して表示するという選択肢もある。しかしながら、これは今後の技術の発展によってはこの限りではなく、むしろオクルージョンの問題が発生しない完全な没入環境を作れる利点から、HMD を選択することが最良となる可能性はある。

次に、HMD は頭部の移動とともに画像の投影面も動くため、視点移動により生じる画像中の変化量が大きく不自然さを強く感じるという問題が挙げられる。図 4-4 にステレオ画像を作成する際の視点と画像投影面の幾何学的な関係を示す。

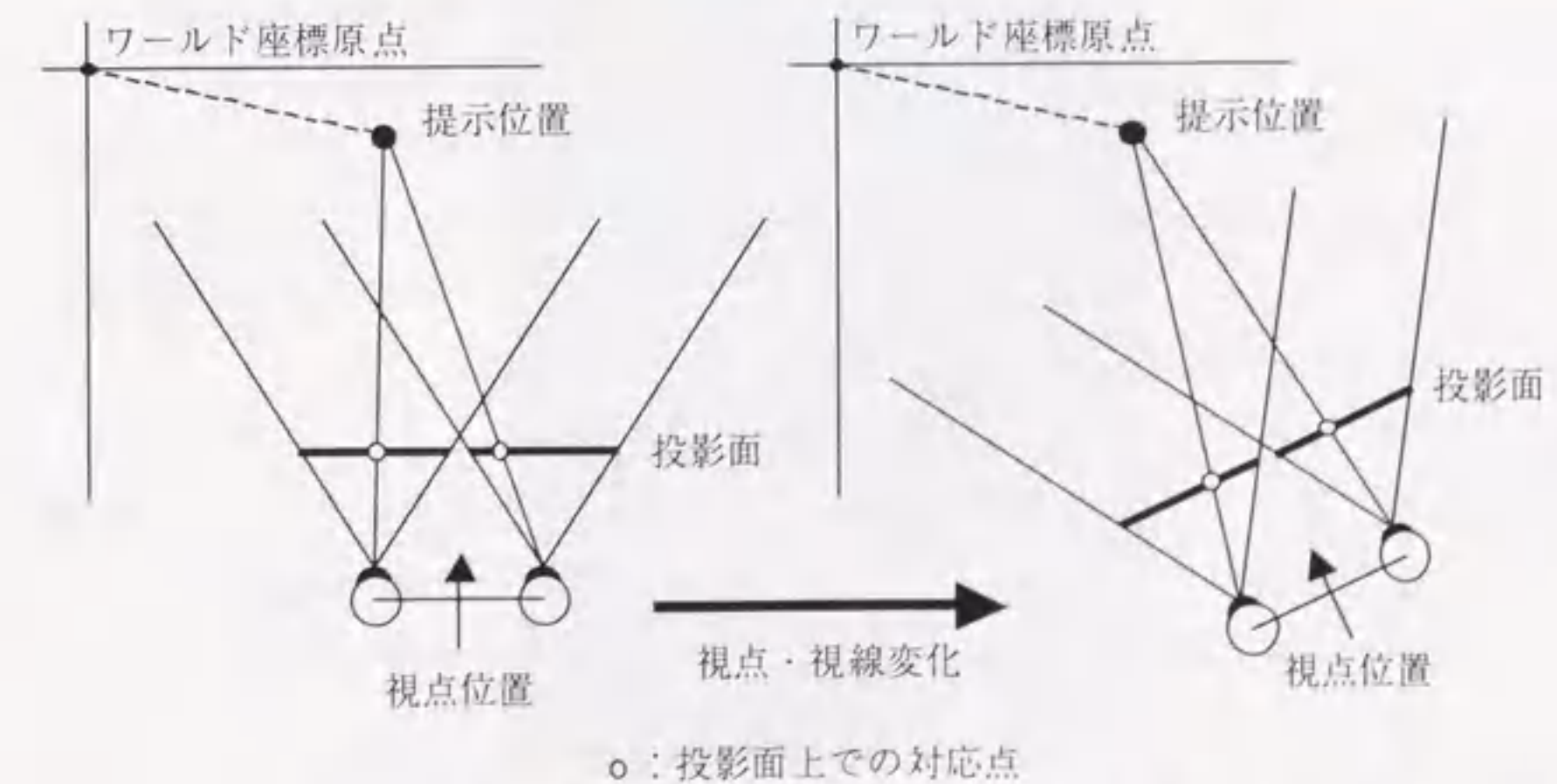
ステレオ画像とは、それぞれの目と投影面の上下左右四隅とが結ばれた四角錐（視体積）内に含まれる物体を投影面上に射影して作成される 2 枚 1 組の画像である。図中、投影面の画像上白丸で示される位置に物体の画像が表示されていれば、黒丸で示される位置に物体が提示されたように見える。ここで、提示位置が同じ場合で視点位置と視線方向が変化した時の前後でステレオ画像を比較してみると、(a)の固定式で作成されるステレオ画像よりも、(b)の頭部装着式の投影面で作成されるステレオ画像の方が敏感に反応して激しく変化することがその仕組みからわかる。このような変化が激しい映像を長時間観察することにより、疲労感や酔いといったものが生じる恐れがある。これに対してスクリーン式は投影面がワールド座標に固定されているために若干の頭部位置の変化では大きな映像の変化はみられない。

最後に、次章以降で述べる正確な距離感を与えるステレオ画像を HMD では作りづらい点がある。ステレオ画像を作成する際に必要となる代表的なパラメ

ータとしてはワールド座標系での視点位置と投影面の四隅の位置があるが、それらは全て HMD を装着した内側にあるために正確にそれらを計測することは難しい。よって、距離感を重視するシステムにおいては、より計測が容易な固定式である大型スクリーンを選ぶほうが妥当だと言える。



(a) 投影面が固定式である場合 (CRT ディスプレイや大型スクリーン)



(b) 投影面が頭部装着式である場合 (HMD)

図 4-4 投影面の違いによる視点移動時の画像変化の比較

4.3.2 入力装置

利用者の視点位置は頭部に取り付けられた位置センサからの相対位置を基にリアルタイムで計測され、投影するステレオ画像へ適切に反映される。また、ペン型の位置センサを目の前の空間で動かすとその軌跡に沿って線が描かれてゆく(図4-5)。

これらの位置計測には磁気式位置センサ FASTRAK を用いている。FASTRAK は発信機の半径 76cm 以内にある受信機の相対位置(x, y, z)と姿勢(*azimuth, pitch, roll*)をリアルタイム(受信機 2 個使用時, 1 受信機あたり 60Hz)で検出することができる。光学式やアームの角度などで位置を検出するリンク式と比べて、磁気式は周囲の金属により磁場が乱されるために環境によって計測精度が大きく左右される点で劣るが、光学式では難しいリアルタイムでの位置取得や姿勢まで計測可能な点や、リンク式と比べて格段に取り扱いが容易な点で優れる。

それらを考慮して本システムではリアルタイム性が必要となる行動の計測に磁気式位置センサを選択している。しかしながら、精度面で若干不満が残るため、その精度を補うように光学式位置センサを用いた補正処理を行い、精度を向上させる。その詳細については第 6 章で述べる。



図 4-5 入力装置

4.4 モデリング手法

本システムによるモデリング過程は、大きくラフスケッチステージと清書ステージの 2 段階に分けられる。

ラフスケッチとはいわば 2 次元平面のスケッチを 3 次元空間に拡張したものであり、空間に自由にスケッチして初期段階のアイデアを膨らませるためのツールとして位置付けられる。

清書ステージではさらに一段階進んだより堅実なデザインを作成するためのツールを提供する。ラフスケッチを参照しながらパラメトリック曲線や曲面を使い 3 次元モデルを作成していくことができる。

これらのステージは明確に分離されているわけではなく、筆を持ち替えるようにジェスチャによって簡単に切り替えることができる。また、随時立体表示されている形状を様々な方向から観察して検討することができる。

次に、各ステージについて詳しく述べる。

4.4.1 ラフスケッチステージ

様々なアイデアを膨らませながらデザイン検討を行う段階であるラフスケッチは、さらにラインスケッチとサーフェイススケッチの 2 つの機能に分けられる。

ラインスケッチは空間に線を引くことができる機能で、ドラッグの軌跡から 3 次元空間内に曲線が描画される。これにより大まかな形状をスケッチし、デザインの基礎となる形状を作成していく。ドラッグ中のペン位置の計測値として得られる点列は、手の移動速度に対して計測機器の時間分解能が十分ではないためある程度離散的になる。そこでこの点列を B-spline 曲線により補間して滑らかな曲線を生成する。

サーフェイススケッチは線の代わりに向きや大きさを持った面を空間に描画する機能である。ラインスケッチと同様にドラッグによる軌跡に面が描画され、その向きは描画時のペンの向きに追従し、ペンの移動速度により大きさが決定する。従来の紙を用いた 2 次元でのスケッチでは曲面を表現するためには面上線や陰影をつけるなどのテクニックを要したが、この機能によってより手早く直観的に立体感のあるデザインを行うことが可能となる。

通常のラフスケッチと同じく、これらの作業には描いては消す試行錯誤が要求されるため、消しゴムを使うように描いた線や面をペンでこするようにして消去する機能も備える。さらに、ラフスケッチを使い簡単なデザイン検討が加

えられるよう、描画される線の太さや面の基本形状（丸形や方形）とそれらの色を変更する機能や、複数のキャンバスを切り替えることで数種類の検討を同時に行えるレイヤー機能がある。これらの各機能は空間に浮かぶメニューパレットを用いて設定される。

図 4-6 にラインスケッチとサーフェイススケッチを用いてデザインした例を示す。これは自動車の外装（オープンカーをイメージ）した作例である。まずベースとなる車体の大きさや膨らみ具合などの大まかなスタイルをラインスケッチから作成した後、サーフェイススケッチを使い細かい部分を追加していくという手法で作成された。比較的大きな面となるボンネット付近は大きな形状で、細かいコンソールパネル付近やドア付近では小さな形状で仕上げた。通常のスケッチと同じようにこの段階では試行錯誤をすることが多く、頻繁に消しゴム機能呼び出す光景が見られた。

従来の 2 次元のスケッチと比較して、これまでと同じような感覚でデザインすることができ、さらに面による立体形状を意識したコンセプトデザインが可能であることが確認できた。

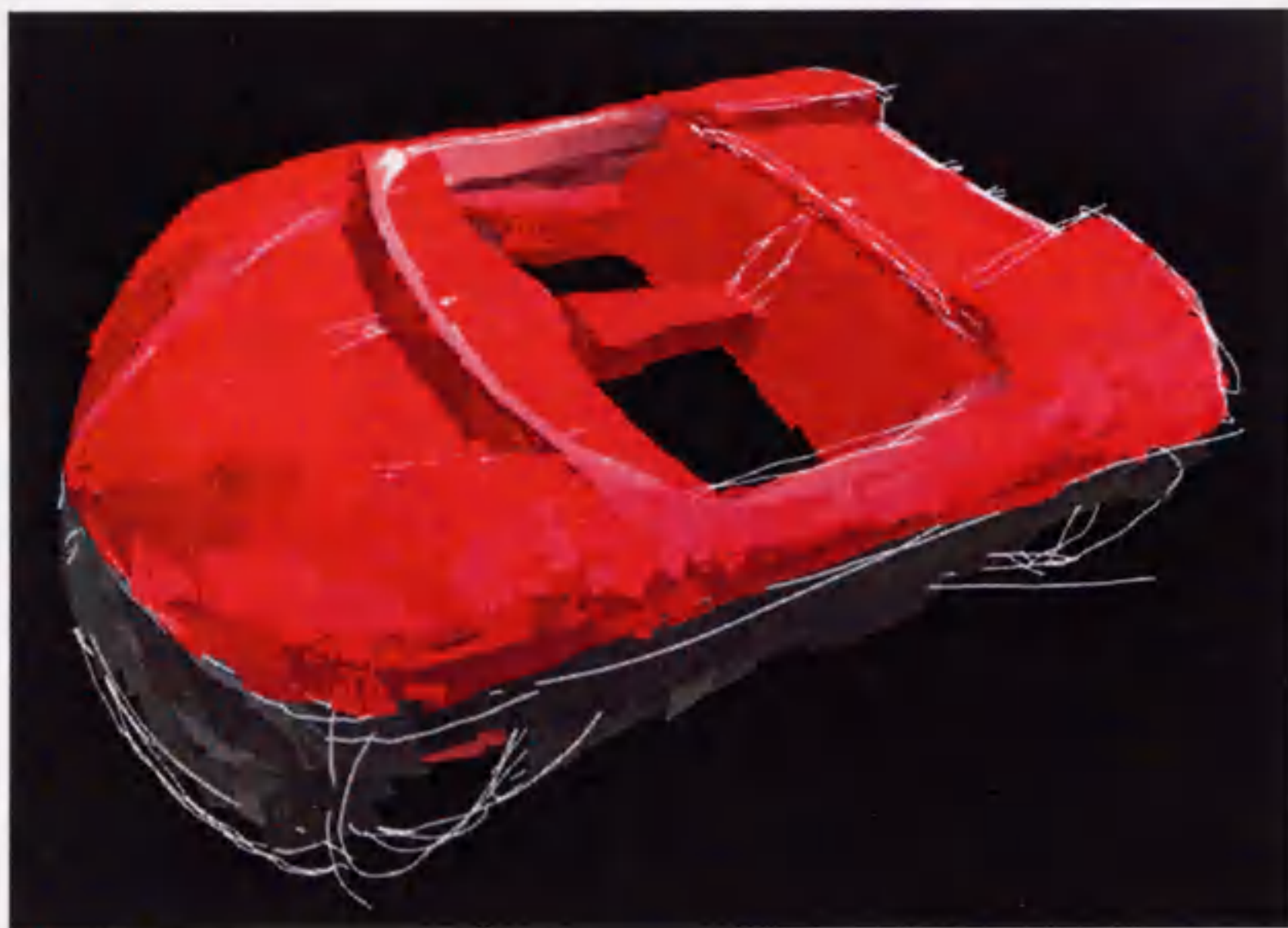


図 4-6 ラフスケッチステージでの作例

4.4.2 清書ステージ

ラフスケッチにより大まかな形状を作成した後、それを洗練しながら 3 次元モデルを作成する段階をここでは清書ステージと呼ぶ。清書ステージでは数値的な制御が容易な NURBS 曲線または曲面を使用してモデルを作成してゆく。

曲線は利用者が任意数の特徴量を設定することで生成される。具体的には、利用者は立体表示されているラフスケッチで描いた線を参照しながら、作成したい曲線の通過点をクリック操作により配置していく。最後の点でダブルクリックすることによりそれらの点を滑らかに通過する曲線が作成される。

曲面は作成された曲線を組み合わせることにより生成される。面の作成方法は曲線の組み合わせ方により数種類あり、任意のものをメニューパレットより選択する。例えば、挿引タイプの曲面を作成するのであれば、あらかじめ基準となる曲線を作成しておき、メニューパレットから挿引を選択してからそれをドラッグする。すると、その軌跡と選択しておいた基準曲線を特徴量とするような挿引曲面が生成される。

清書ステージで作成された形状は、作成後も自由に編集ができる。曲線や曲面といったオブジェクトをクリックすることで各種のハンドルが表示され、それらをドラッグすることにより形状が回転、拡大縮小する。さらに通過点や制御点といった特徴点をドラッグすることにより形状そのものが編集される。また、オブジェクトは直接ドラッグすることで移動することができ、ジェスチャを用いたコマンド操作によりコピーや削除が実行される。また、配色や質感の変更はこれまでの補助操作と同様にパレットメニューから行う。

図 4-7 に清書ステージで作成された形状の例を示す。ラフスケッチの後、曲面を使い最終的な形状を仕上げた結果である。この例では参照したラフスケッチは非表示にし、視点を標準的なシートに座った場合の位置に合わせている。実物大で立体表示されているため、デザイナーは周りのドアやピラーから受ける圧迫感やメーターの見易さなどを考慮に入れながらデザインすることが可能である。

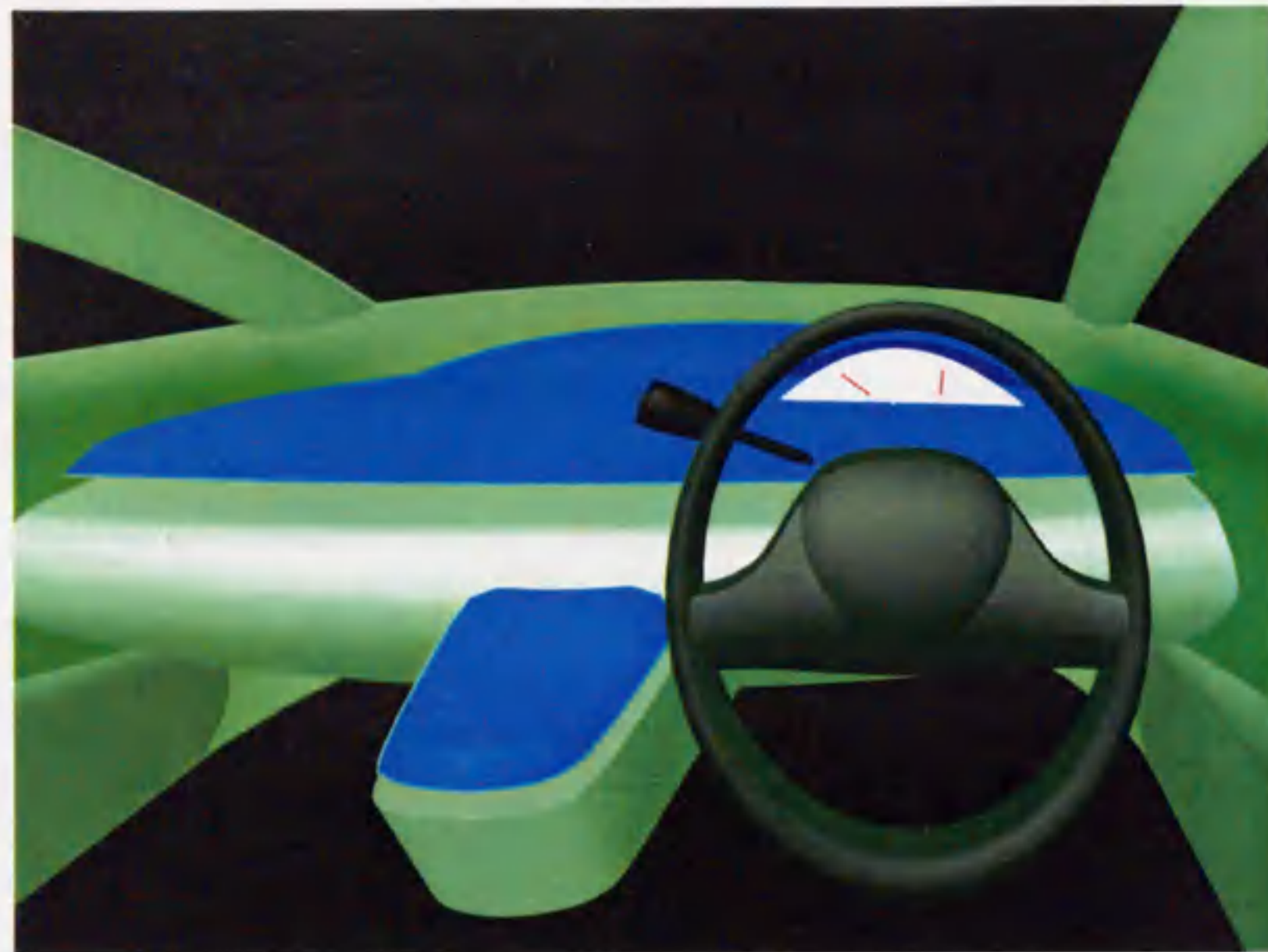


図 4-7 清書ステージでの作例

4.5 コマンド切り替え時のインターフェース

ラフスケッチと清書から構成される空間スケッチの各ステージや、鉛筆と消しゴムといった頻繁に行われるツールの切り替え、また移動とコピーのような似た性質のコマンドの変更については図 4-8 に示すような空間に浮かぶメニューパレットからではなく、ジェスチャやアクションによって行う。

メニュー方式はコマンドが体系的に並べられているためわかりやすいという反面、操作に熟練すると煩わしくなるという面もある。ジェスチャを用いることの利点は、創造的な作業を中断することなく少ない動作で迅速に各種の切り替えが行える点にある。例えば、現在広く一般的に用いられている 2 次元の GUI を模した 3 次元のメニューパレットを使う場合には、まずメニューまでポインタを動かして希望するコマンドを目で確認しながら探し出し、最後にそれを選択して作業に復帰するという手順を踏む必要がある。しかし、ジェスチャを用いればこれを簡単な 1 動作で行うことが可能である。

そこで本システムでは、各コマンドの使用頻度を考慮し一時的に使う機能や種類が多いコマンドについてはメニューパレットによる切り替え操作を行い、作業中に頻繁に切り替えることが多い操作には必要なステップ数が少ないジェスチャによる変更を割り当てる。また、常に使う機能については専用の装置を用意する。表 4-1 に代表的な機能とその変更手法を示す。

表 4-1 必要な頻度による操作の割り当て

必要頻度	変更方法	変更, 切り替えの例
低	3Dメニュー	カラー, レイヤー, 線種, 面の生成方法
中	ジェスチャ	消しゴムとペン, スケッチステージ, 移動とコピー
高	ボタン, マウス	描画, アンドゥ, ワークスペースの調整



図 4-8 3次元メニューパレットの例

4.5.1 ジェスチャによるコマンド切り替え

図 4-9 に切り替え操作の流れの一覧を示し、具体的な事例を幾つか以下で説明する。

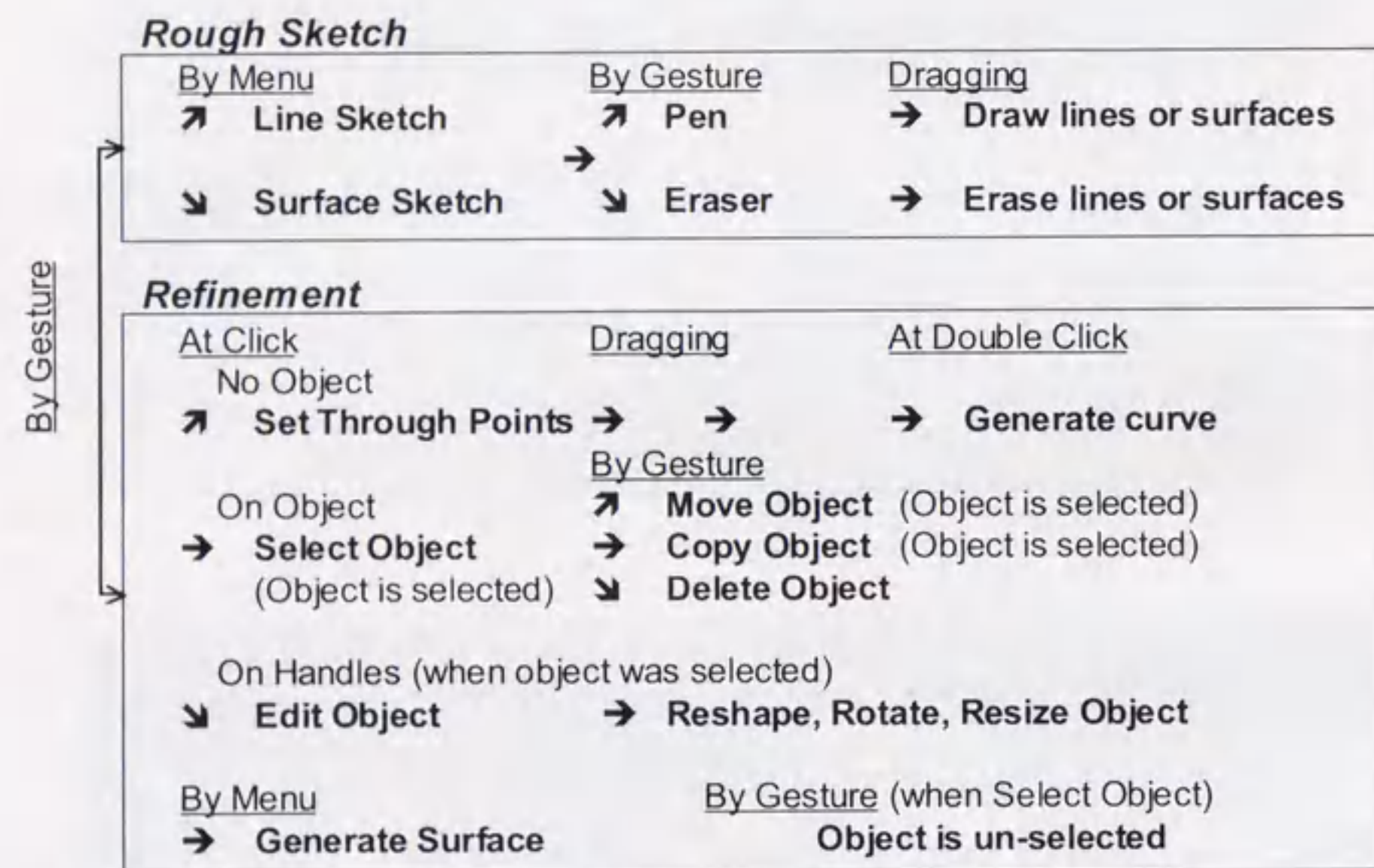


図 4-9 コマンド切り替えの流れ

1. ラフスケッチと清書の切り替え

利き手側の肩付近でクリックした際にステージが切り替わる。判定条件を厳しくしすぎると扱いづらいため、ここではペンが視点の前方 10cm から後ろ側かつ利き手側の位置にあるときにクリックした場合とした (図 4-10)。

2. ペンと消しゴムの切り替え

ペンを持っていない方の肩付近でクリックすることでペンと消しゴムが切り替わる。判定基準は上と同様である (図 4-10)。

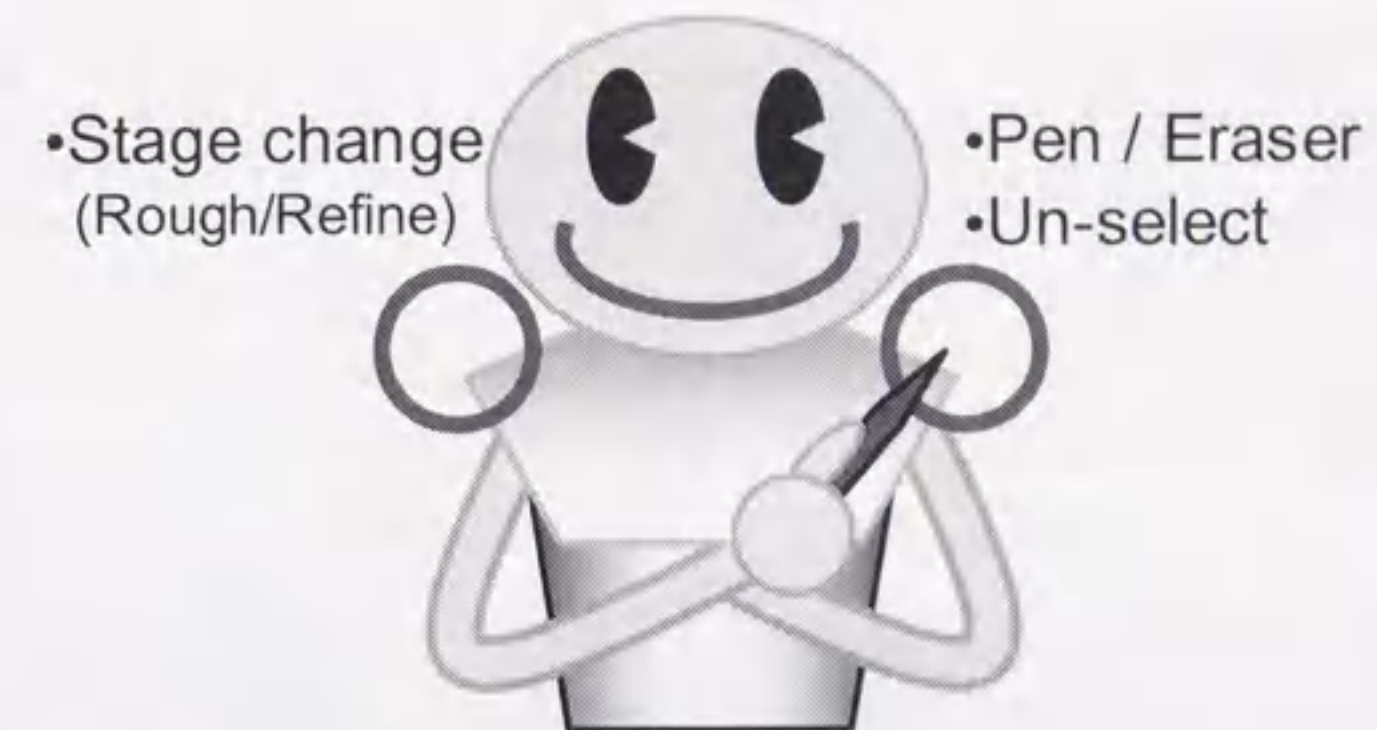


図 4-10 ジェスチャによるコマンド切り替え

3. 清書における次動作の決定

清書時の曲線作成や物体選択といった各種のモードは、利用者のアクション (具体的にはクリック操作) によって自動的に切り替わる。何もない場所でクリックした時は曲線作成モードになる。その後任意数の通過点をクリックして設定した後、最後の点をダブルクリックすることで曲線が生成される。

オブジェクト上でクリックした時はそのオブジェクトが選択され、そのままドラッグすることで移動やコピーとなる。オブジェクトが選択されると同時にその制御点や通過点、回転や変形用の制御ハンドルなどが表示される。図形編集モードへはそれらをクリックすることで移行し、ドラッグすることで回転や変形などの図形編集が行える。なお、この際中にペンを持っていない方の肩付近でクリックするというジェスチャによって選択中のオブジェクトを未選択にすることもできる。

4. 移動、コピー、削除の判定

オブジェクトをドラッグした際、その軌跡を解析することで移動、コピー、削除の動作のうち利用者がどれを望んだのかを判別する。単純にドラッグをしたただけの場合、最も使用頻度が高い移動操作になる。ドラッグの始めにループを描けばオブジェクトのコピーを望んだと判定し、ボタンを離れた場所にオブジェクトがコピーされる。また、オブジェクトをつかみ振り払うかのようなジ

ジェスチャを行えばそれを削除したいのだと判定し、ドラッグ中のオブジェクトを消去する (図 4-11)。

これらの各操作の判別には文献[25][26]の各ストローク間の角度を利用する方法を3次元に応用したもので行っている。図 4-12 にここで用いたアルゴリズムを簡単に説明する。

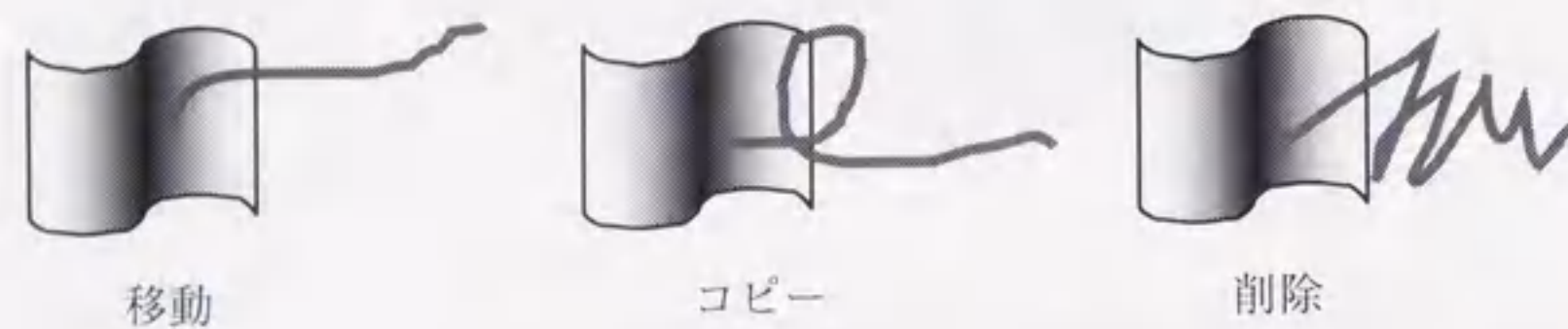
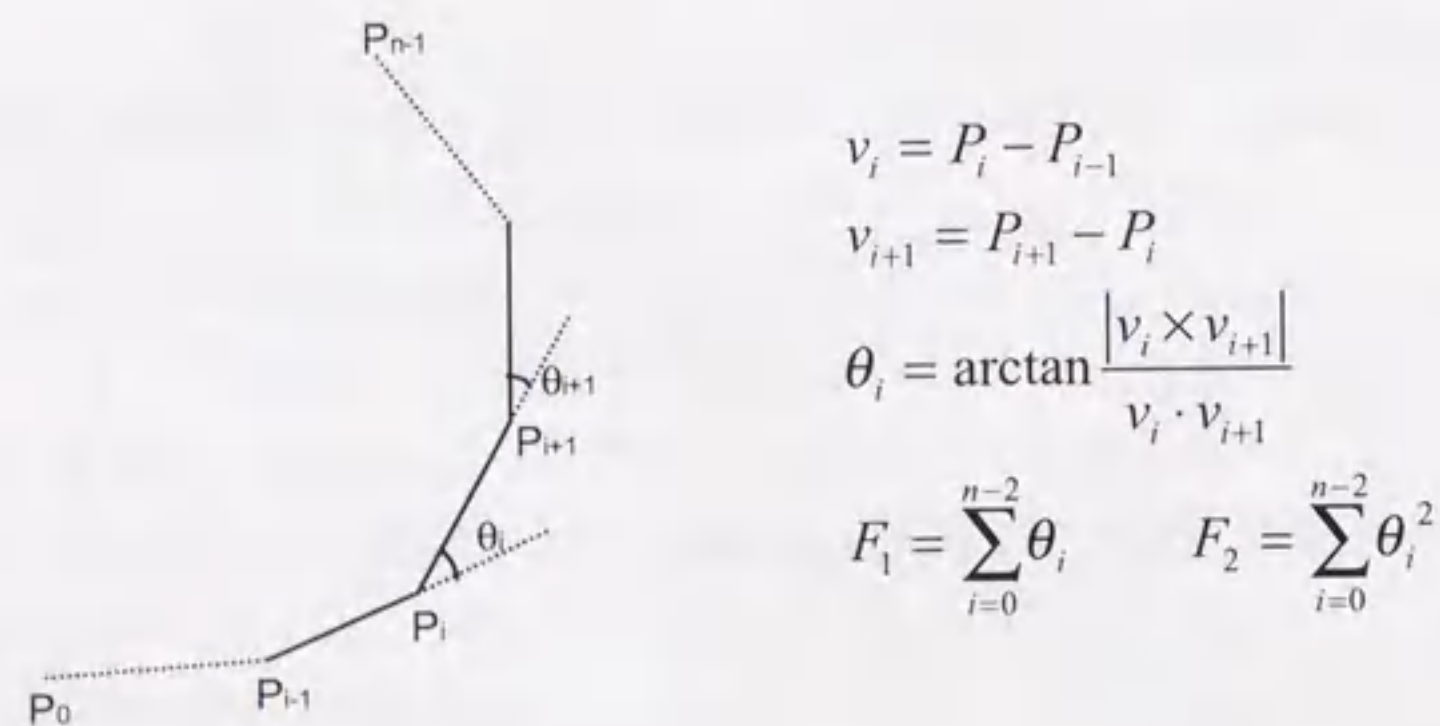


図 4-11 ストロークによる操作の判断



```
At the stroke in 0.7 seconds from the beginning
if F2>6000
    then DELETE
if F1>330 and 20<average(theta)<60
    then COPY
else
    MOVE
```

図 4-12 角度によるストロークの認識

4.6 各種補助機能

空間スケッチシステムには以上のほかに幾つかのデザイン作業を効率よく進めるために必要な補助機能が存在する。ここでは主なものについて紹介する。

1. ワークスペースの調整

手元の 6DOF マウスを操作することで、ワークスペースを回転、移動、拡大、縮小することができる。本研究の対象としている主な用途は自動車スタイルデザインといった大きな形状デザインであるためにこの機能は重要であり、ジェスチャでもなく専用のデバイスを使い直接操作することとした。これにより、アイデアスケッチ時には半分のスケールでラフスケッチを行い、その後実寸大に戻してデザインを検討するといったことが可能になる。また、視点を大きく動かすことなく細部を様々な角度から検討できるという利点もある。

2. アンドゥ・リドゥ

スケッチ過程を全てメモリ上に記憶し、任意の回数だけ操作の取り消しや再実行を行える環境を提供することで試行錯誤を行いやすくする。また、ファイルに保存することで後日再開することや任意の箇所から派生する数パターンでのデザイン検討をも可能にする。これも頻繁に使用する操作のため、ジェスチャやメニューではなくマウスのボタンにより実行する。

3. 左右対称物体のスケッチ

自動車のスタイルは左右対称であることが多いため、片側に描いた図形を反対側にも描くことができると重宝する。そこで、左右同時にスケッチし消す機能や片側を編集すると自動的に対になる形状も編集される機能を与える。この機能はメニューを使い設定する。

4. ガイド線・構造物表示

ガイド線を表示し、ガイド線上にオブジェクトを合わせることでより精密なデザイン作業を行いやすくする。またエアコンユニットなどは各車で共通の部品を流用することが多く、あらかじめデザインに制約を与えることがわかっている。そこでそれらの構造物を表示しておく機能を付加することでデザイン上の問題点を探しやすくする。

図 4-13 に基本となる構造物であるハンドルやエアコンユニット等を表示している例を示す。この例では目安となる基準形状のワイヤフレームモデルも同時に表示している。

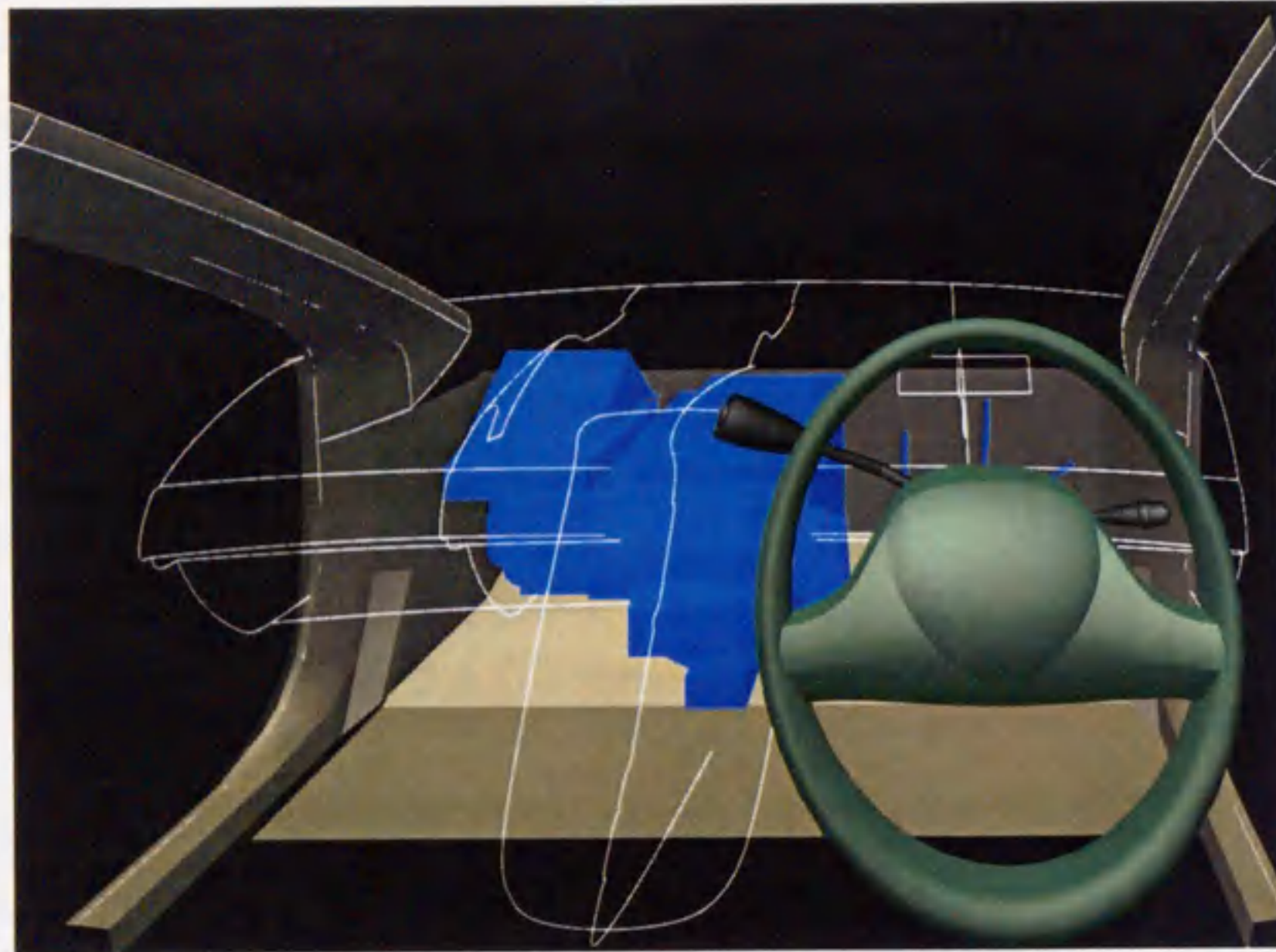


図 4-13 基本構造物の表示例

4.7 おわりに

以上、空間スケッチシステムの具体的な実現方法と機能について述べてきた。モデリング手法に従来のスケッチの手軽さを生かしたラフスケッチステージと数値制御が容易な清書ステージを用意し、コンセプトデザインからそのまま設計に移行できる環境を構築した。また、デザイナーの創造的な作業を妨げないようにツールの持ち替えなどのインターフェースにも配慮し、従来型のアイコンを用いたコマンド選択のほかにジェスチャなどによる少ない動作で迅速に行動が起こせるインターフェースを提案した。各コマンドの使用頻度を考慮し、頻繁に必要な操作については特別なボタンや単純なジェスチャにそれを割り当て、多くの機能から選択して用いる必要があるものについてはメニューパレットを使用する方式を取っている。

作成された立体形状は常に立体的に表示され、視点位置や形状のサイズを自

由に変更しながらスタイルを確認することも可能である。

ここで研究対象としたものは従来のモデリングシステムでは困難であった初期段階のデザインを行うためのデジタルツールの模索であり、いかに数値的に整った形状を作成できるかという機能面においてだけ見ればまだ一般的なモデリングシステムの方が有利である。しかしながら、既に数多くの手法が提案されているそれらの機能をこのシステムで実現することは容易であり、これは次の実装段階の問題だと考え今後の課題としたい。

第5章 立体視の表示精度に関する検討

5.1 はじめに

前章では空間スケッチシステムの機能面について述べてきたが、デジタルモックアップを使ったプロトタイプデザインを考えた場合、なるべく実物との誤差が少ない形状をデザイナーに見せる必要がある。仮に、仮想世界で検討して仕上げた製品と、それから実際に作られる実製品の印象が異なるようであれば、仮想世界での検討が無駄になり、実用化する上で大きな問題となるだろう。

また、本システムのような空間に絵を描いたり、仮想物体に対して様々な操作を加える場合には、何らかのインタフェースを用いて仮想世界と直接対話する必要がある。特に、場所を的確かつ素早く指示し、直観的な操作を可能とするには、実際に自分の手やポインティングデバイスを用いて作業できれば効果的であろう。この時、自分の指している現実世界の位置と操作が加えられる仮想世界のポインタの位置とが著しく異なるようであれば、操作効率は低下するに違いない。

娯楽や訓練に使われることが多いこれまでの VR アプリケーションでは、目的とする作業にさほどの精度が必要ではなかったためこれらの問題はあまり重要視されてこなかった。例えば、景観シミュレータやフライトシミュレータなどは遠くに離れた物体を観察することが目的であり手元の細かい距離の表現には意味がない上に、遠方の物体を注視する際には両眼視差はほとんど生じない。また、手元の操作が含まれる部品の組み立て作業の訓練システムでは、直観的な操作が可能となるように実世界と仮想世界的一致は重要となるが、それでも作業内容を訓練させることが目的であって、立体形状を正確に再現して表示させることが目的ではない。

そこで本章では、まず、両眼立体視における仮想物体の知覚傾向について調査を行う。ここで対象とする立体視は大型スクリーンと液晶シャッターメガネを

用いる方式で、実物であるポインタを使った作業を想定する。そのような立体視システムではどのような映像が提示されているのかを調べ、表示された仮想物体を人が観察した際にどの程度の正確さで知覚できているのかを実験より検証する。その結果、ステレオ画像作成の原理より仮想物体の知覚には多少のズレが生じることがわかる。そこで次に、その実際に生じているズレを補正するために、画像生成時の視点位置およびスクリーンの位置をパラメータとした、奥行き距離の補正の手法を提案する。最適なパラメータの補正量は実測に基づくズレ量から二乗誤差最小の基準で決定される。最後にその有効性を検証し、考察する。

5.2 関連する研究

立体表示時にズレが生じる問題、特に立体視で新たに得られる手がかりである奥行き方向の知覚に関する問題は、既に幾つかのケースについて報告されている[27][28][29][30][31]。以下に挙げる研究は、両眼立体視による奥行き距離の知覚特性を求めた代表的な研究であるが、デザイン検討に適用する場合以下のような点が問題となる。

柴崎ら[32]は3次元直接操作手法を用いたCADの可能性について述べており、簡単な立体モデルの直接操作に基づいた奥行き認知特性を調査している。仮想物体の絶対知覚距離のズレ量を磁気式位置センサによる指示具で計測しているが、評価において許容誤差25mmとしている点が十分でない。内海ら[33]はズレの要因として輻輳による瞳孔間距離の変化に加え画像のボケを示唆している。実験結果からこれらの要因がズレの発生に影響しているとは考えられるが、具体的なズレ量への影響の度合いは不明である。黒川ら[34]の輻輳を原因と仮定してズレ特性のモデル化を行っている点は評価できるが、基本的に口頭表現による知覚距離の計測では十分な精度を得ることは難しい。これらの研究は仮想物体の知覚傾向を調査し、ズレの要因を模索している点で有意義なものであるが、表示の精度を積極的に改善するには至っていない。

奥行き距離補正に関する研究は次のようなものがある。その補正には通常、奥行きへの相関が大きい瞳孔間距離に補正パラメータを設定することが多い。特に、清水ら[35]は表示系の誤差がなく、知覚距離が視差情報に忠実であると仮定して、仮の瞳孔間距離を用いた場合に発生するズレ量から真の瞳孔間距離を算出する方法を提案している。この結果は、人間の視覚が指示に用いる実物体と仮想物体との間の相対視差要因にかなり忠実であるという事実を裏付ける

ものである。しかしながらズレの許容範囲が±20mm程度と大きく、デザイン作業に用いるのであれば更に高い精度が望まれる。また、黒川ら[34]の報告では、輻輳とピント調節を考慮してズレ特性のモデル化を行っており、その中で提案されている輻輳眼球運動を考慮した瞳孔間距離の補正方法は興味深い。しかしながらここで言う補正とは、輻輳眼球運動を考慮した瞳孔間距離を計算により求めることであり、ズレを除去するように瞳孔間距離を調整する本文で述べる補正とは明らかに異なる。また、輻輳眼球運動を考慮することによるズレの改善の効果もズレを根本的に除去するものとはなっていない。

本研究では、大型スクリーンを用いた立体視において、仮想物体の直接操作とデザイン検討が可能な数ミリ以内の精度を実現する手法について提案する。

5.3 仮想物体と実物体の知覚傾向の比較一実験1

まず、一般的なVRアプリケーションである大型スクリーンと液晶シャッターメガネからなる立体視と、実物であるポインタを使った作業を想定して、そのような立体視での知覚される仮想物体の位置にどのような傾向が見られるのかを実験より調べる。ここでは特に立体視の重要な要素である奥行き方向の知覚傾向について検討を行う。

実験方法

被験者には立体視可能な21~36歳の男女10名を用意し、被験者の観察位置からある距離に仮想物体が提示されるように作成したステレオ画像を観察させる。次に、提示距離をランダムに変えながら画像を提示し、そのつど被験者に物体の知覚した位置を指示具で指させ、その位置の視点からの距離を奥行き知覚距離として計測する。この提示物体の計算上の奥行き距離(提示距離)と観測者が実際に知覚する奥行き距離(知覚距離)との差をここでは奥行き誤差「ズレ」と定義する。また、実物体の知覚傾向も同様に実験より求め、仮想物体のものと比較してみる。提示方法は仮想物体と同じとし、指示した位置より知覚距離とズレを計算する。

実験装置の配置を図5-1に示す。表示装置は空間スケッチシステムと同じ物を用い、視点位置を固定するための顎台をスクリーンから1300mmの位置に用意した。ステレオ画像を作成するのに必要な瞳孔間距離は、遠方を注視した状態でノギスを使い被験者ごとに計測した値を用いた。視点位置は眉間よりこの瞳孔間距離だけ左右に移動した位置とする。また、視点からスクリーンまでの距離(視点-スクリーン間距離)も、台で固定する際に若干生じる個人差を考

慮して、頭を固定した後に計測し直した値を視点-スクリーン間距離として用いた。

提示する仮想物体および実物体の形状は共に、単純かつ指示が容易な円錐とし、寸法は高さ 100mm、底面の半径 25mm とした。ステレオ画像はなるべく実物体に近づけるよう陰影付けを行い、アンチエイリアシング処理を施した。また、没入感の低下を防ぐため、表示系全体を暗室内に設置し、外部光がスクリーンに映りこまないよう考慮した。実験中は、背景としてチェックパターンをスクリーン上に表示し、相対的な奥行き手がかりを与えることで立体視を行い易くした。なお、仮想物体の実験と条件が同じになるよう実物体での実験時も立体視メガネを装着し、背景を表示した。

物体の提示位置は被験者の正面前方と左前方 20 度の方向、視点から 400mm と 800mm の距離 (図 5-2) であり、前回差した位置が記憶されないよう若干の休憩を挟みつつ各距離で 7 回ずつ計測を繰り返す。これを各被験者で仮想物体と実物体について行うが、実物体の接触による位置の知覚を避けるため、どちらの場合でも円錐の頂点の約 10mm 上を指すよう被験者に指示した。指示具にはその動きに追従するようなメーターが取り付けられており、その値を読み取ることによって位置を計測した。

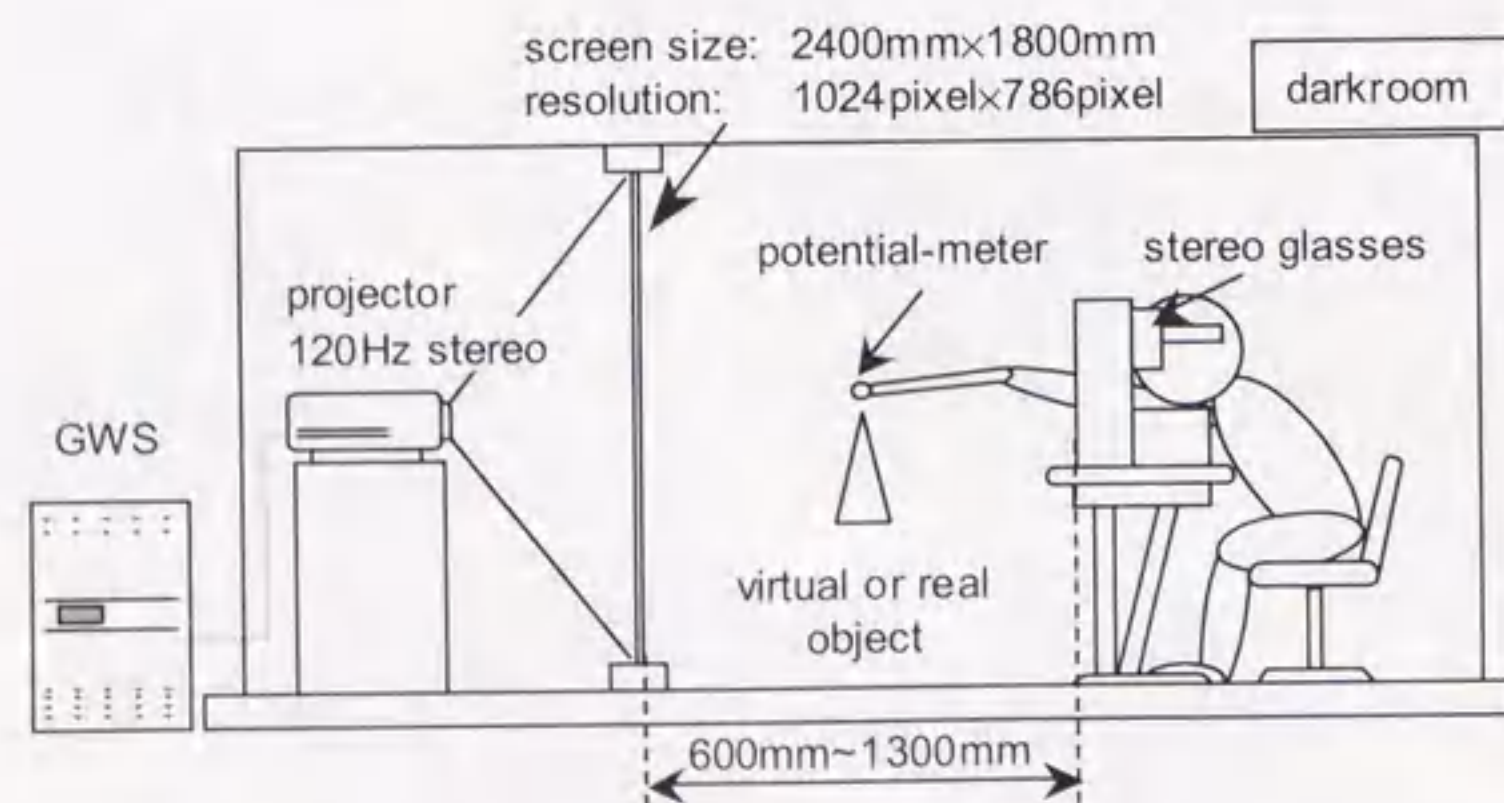


図 5-1 実験装置の構成

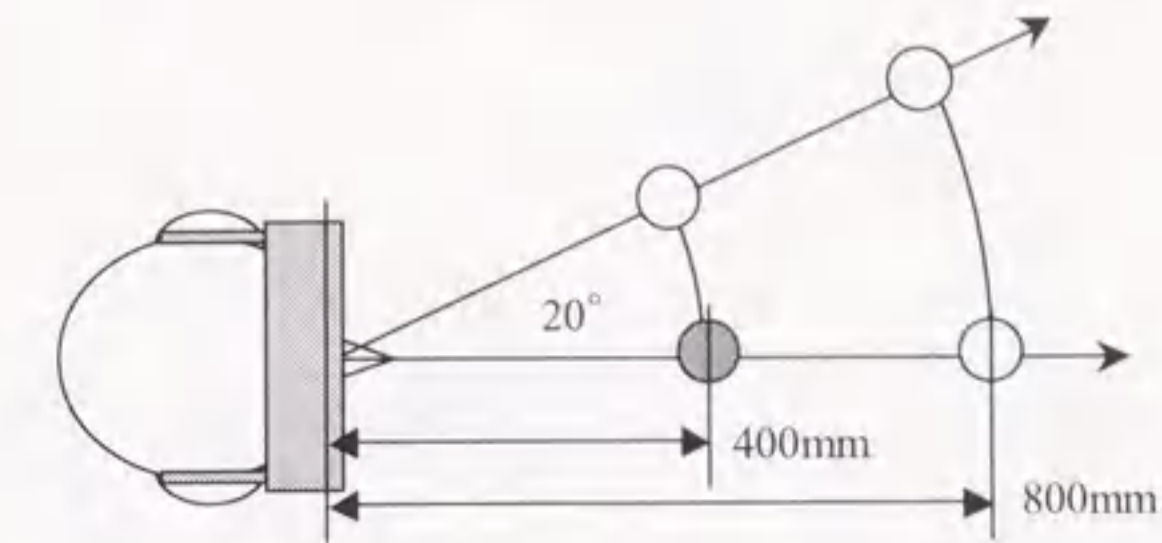


図 5-2 実験 1 の提示箇所

実験結果と考察

10 名の被験者各 7 回、合計 70 度数の計測によって得られた知覚距離の度数分布を、正面に提示した場合と斜め方向に提示した場合、また実物体を提示した場合と仮想物体を提示した場合とで図 5-3, 図 5-4 に示す。更に、実験により得られた被験者別の知覚距離の平均値を実物体、仮想物体それぞれの場合について表 5-1, 表 5-2 に示す。ただし、かっこ内は標準偏差である。

図 5-3 や表 5-1 から、実物体においては提示位置に関わらず、常に若干手前を指し示す傾向が見られるものの、標準偏差が $\pm 1\text{mm}$ 強程度に収まっており、ほぼ正確な距離に安定して知覚していることがわかる。これに対し、

図 5-4 や表 5-2 の仮想物体の場合では、まず、図 5-4 より実物体と比較して全体的に分布が広がる傾向があることから、知覚距離のばらつきが明らかに増加していることが分かる。しかしながら、表 5-2 より知覚する距離のばらつきである標準偏差が実物体の 2 倍程度に大きくなってはいるものの、仮想物体でもその程度で安定して奥行き距離を知覚していると言える。次に、知覚距離の平均値についてみると、実物体では若干手前を指すのに対し、仮想物体では全員の平均で正面 400mm に提示した場合で約 9mm 手前、同 800mm では 2mm 程度奥、斜め 400mm に提示した際には約 18mm 手前、同 800mm では約 12mm 手前と、提示距離と知覚距離とに明らかなズレが見られる。また、被験者毎でズレ量が異なることから、仮想物体の知覚距離には個人差が存在することが考えられる。

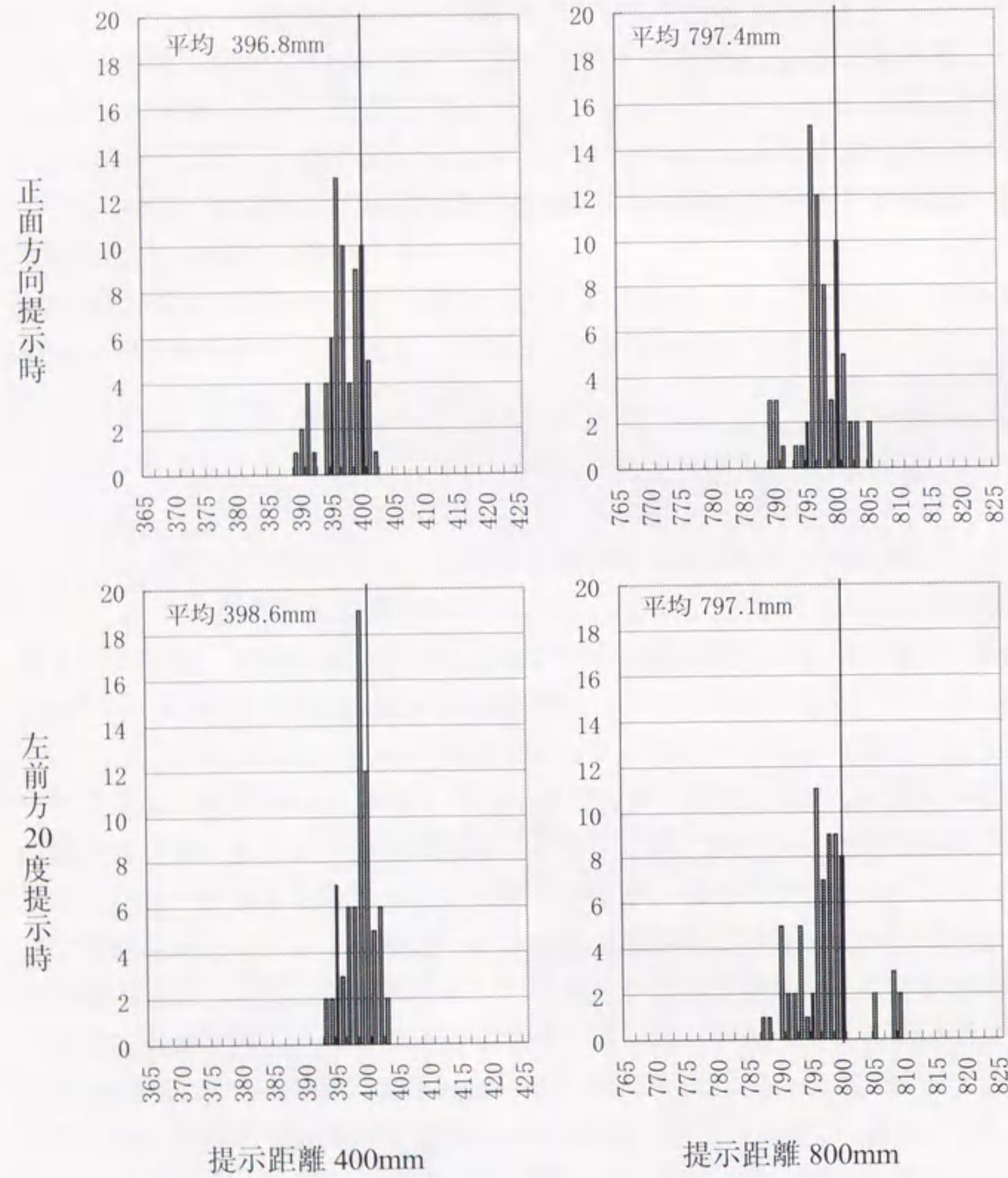


図 5-3 実物体の知覚距離の度数分布

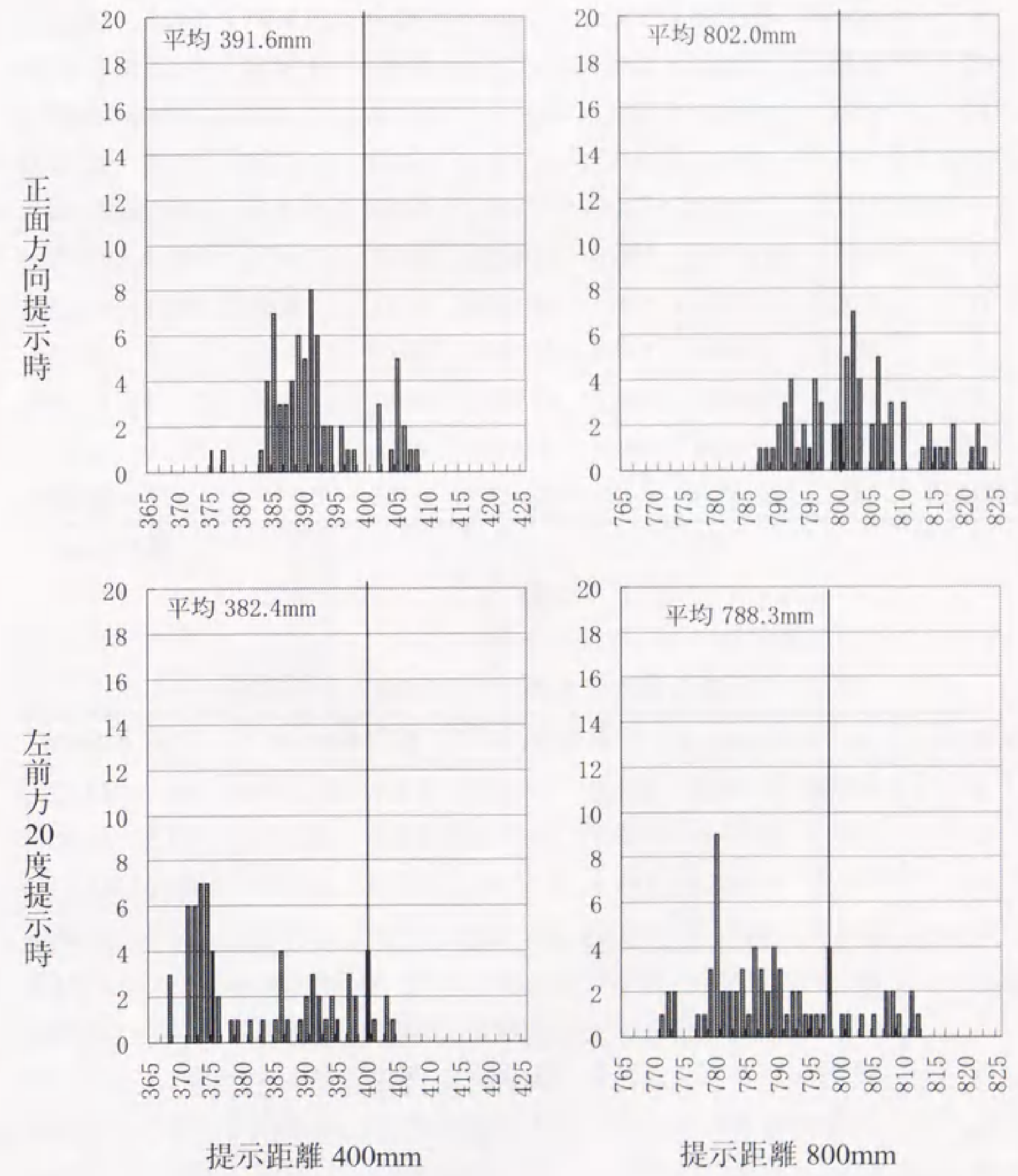


図 5-4 仮想物体の知覚距離の度数分布

表 5-1 実物体の知覚距離の平均値と標準偏差

被験者	正面 400mm	正面 800mm	左前 400mm	左前 800mm
A	398.4 (0.787)	796.7 (0.488)	399.6 (0.535)	796.1 (1.676)
B	395.0 (1.528)	796.9 (0.690)	398.9 (0.378)	799.1 (0.900)
C	394.9 (0.900)	797.9 (3.237)	395.4 (1.272)	795.3 (1.976)
D	390.4 (0.787)	789.7 (0.756)	398.6 (1.134)	795.7 (1.113)
E	396.3 (0.951)	795.7 (2.563)	394.4 (0.976)	790.7 (2.928)
F	397.6 (1.512)	801.9 (1.676)	401.7 (0.951)	798.3 (1.496)
G	400.0 (0.577)	800.6 (1.618)	401.1 (1.069)	807.4 (1.718)
H	398.9 (1.069)	799.1 (0.900)	397.1 (0.900)	798.7 (1.254)
I	396.1 (0.690)	796.9 (1.069)	399.9 (1.069)	798.7 (0.756)
J	400.9 (0.690)	798.3 (1.890)	399.1 (1.069)	791.3 (1.604)
平均	396.8 (0.949)	797.4 (1.489)	398.6 (0.935)	797.1 (1.542)
標準偏差	3.027 (0.332)	3.281 (0.890)	2.325 (0.275)	4.692 (0.620)

(単位: mm)

表 5-2 仮想物体の知覚距離の平均値と標準偏差

被験者	正面 400mm	正面 800mm	左前 400mm	左前 800mm
A	385.9 (1.915)	801.0 (1.113)	370.1 (2.289)	789.5 (3.024)
B	390.7 (3.934)	810.5 (7.712)	375.4 (1.272)	773.3 (3.266)
C	390.7 (0.900)	791.5 (2.268)	373.6 (0.756)	780.2 (1.345)
D	388.0 (0.900)	801.5 (3.132)	385.9 (1.826)	795.3 (3.606)
E	385.3 (7.743)	795.5 (1.864)	371.6 (0.756)	783.6 (4.152)
F	402.6 (2.628)	817.2 (4.220)	401.0 (1.676)	808.2 (1.952)
G	392.7 (1.676)	805.0 (2.690)	392.0 (3.338)	784.3 (5.228)
H	389.3 (2.440)	798.5 (3.934)	385.0 (7.010)	786.7 (2.637)
I	405.7 (1.215)	809.6 (4.112)	397.3 (2.878)	800.9 (5.062)
J	385.4 (2.440)	789.6 (2.360)	372.4 (1.134)	780.6 (2.360)
平均	391.6 (2.579)	802.0 (3.341)	382.4 (2.294)	788.3 (3.263)
標準偏差	7.084 (2.036)	8.757 (1.842)	11.411 (1.868)	10.510 (1.277)

(単位: mm)

5.4 仮想物体の知覚傾向をより詳しく求める実験

5.4.1 提示距離変化に対するズレの傾向—実験2

実験方法

ズレの傾向をより詳しく調べるため、仮想物体の提示距離を視点から300,400,600,800,1000mmの5点に増やして知覚距離を計測した(図5-5)。仮想物体はそれぞれの距離について各7回ずつ出現するよう合計35回ランダムに提示する。被験者は先程と同じ10名で、正面方向と斜め方向に提示した際のズレを計測する。

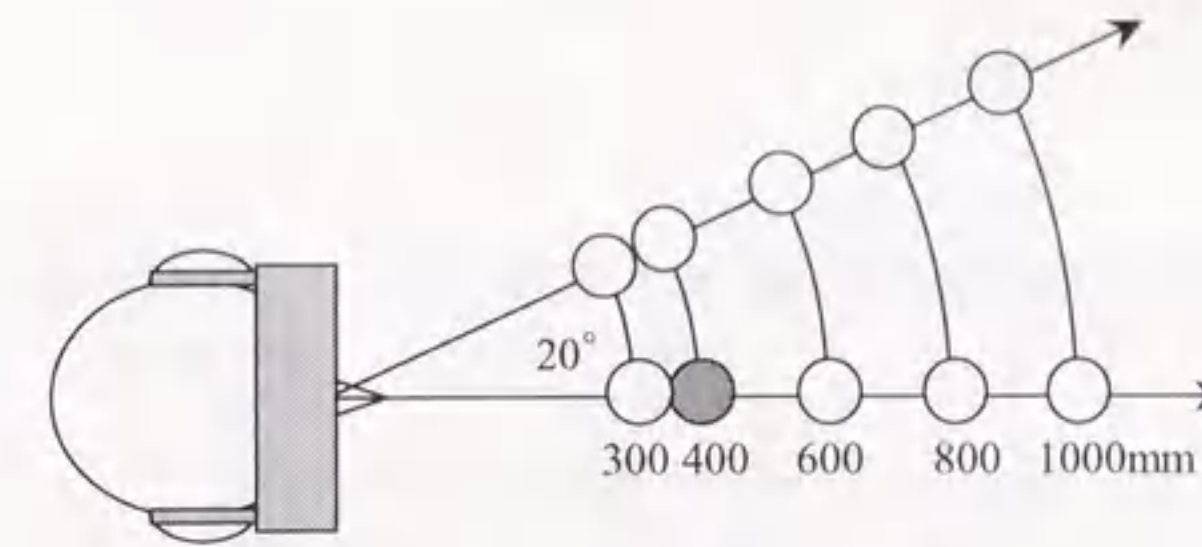


図 5-5 実験2の提示箇所

実験結果と考察

各提示距離での知覚距離と提示距離のズレ量を、正面に提示した場合を図5-6、左前方に提示した場合を図5-7に示す。グラフの各点の示すズレ量は、7回の試行により得られた知覚距離の平均値と提示距離の差である。

グラフより、提示距離と知覚距離とのズレの関係は、ズレが0となるある距離を基点として、手前の物はより手前に、奥の物はより奥に知覚し、その変化はほぼ比例関係にあるという結果が得られた。ただし、基点距離と比例定数は被験者ごとに異なる。また、斜め方向に提示した場合は、正面の場合と比較して、全体に物体をより手前に知覚する傾向が確認された。これはズレが0となる基点が奥に移動したと解釈することもできる。

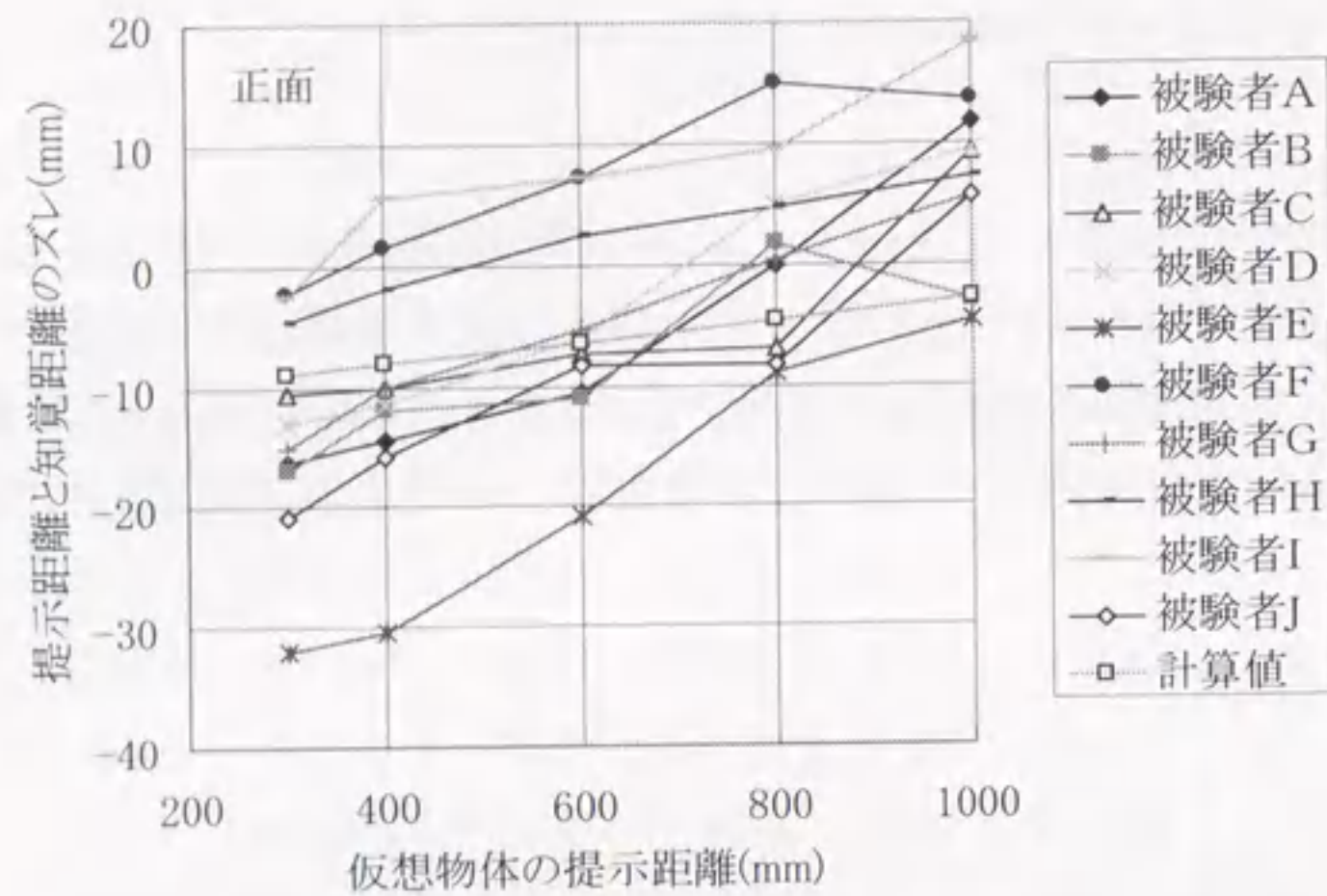


図 5-6 仮想物体の提示距離と知覚距離のズレ (正面提示時)

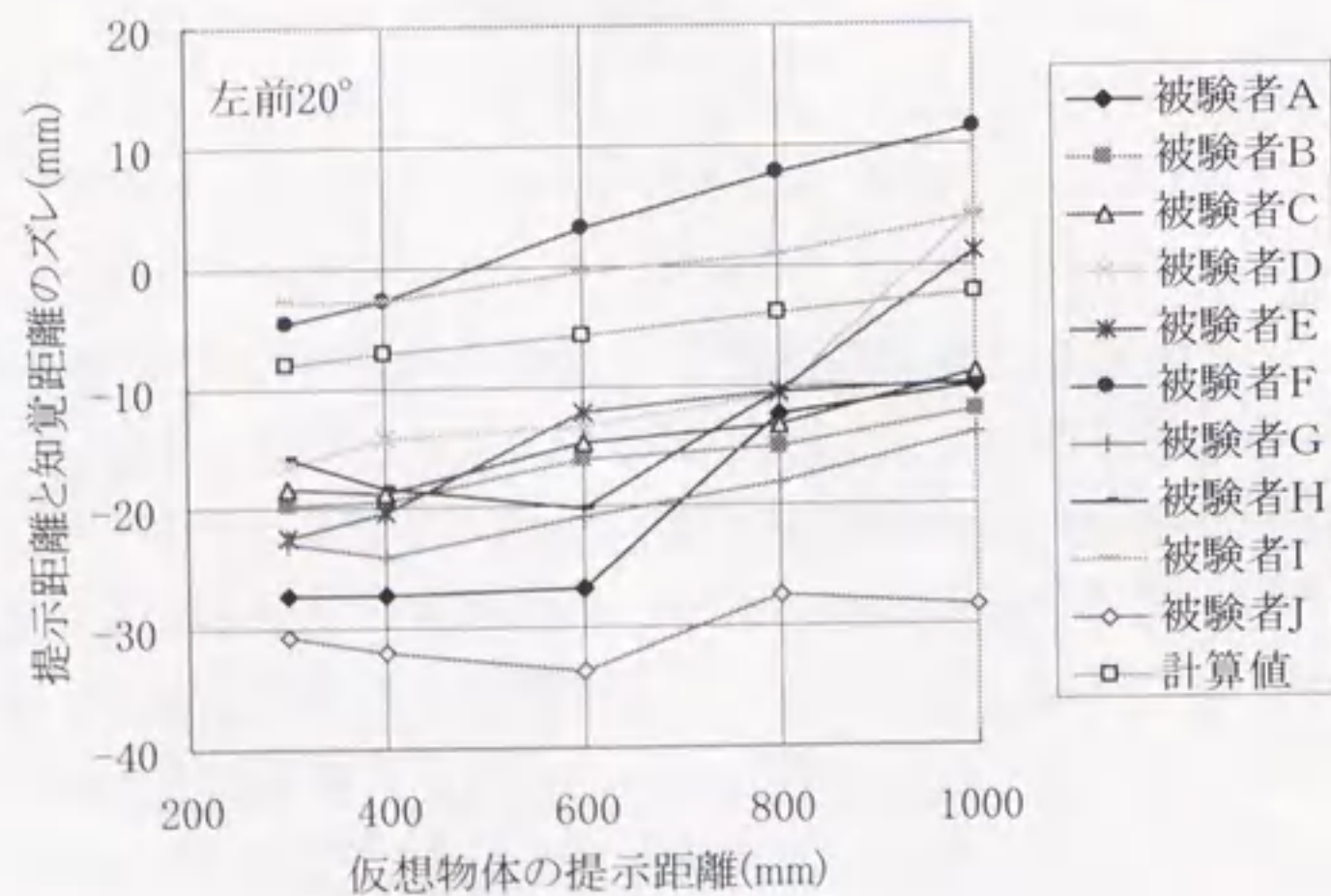


図 5-7 仮想物体の提示距離と知覚距離のズレ (左前提示時)

5.4.2 スクリーン距離変化に対するズレの傾向—実験 3

実験方法

様々な位置と角度からモデルを検討する通常のデザイン作業を考えると、このようなシステムでも同様な様々な視点位置からの仮想物体を観察できることが必要になる。必然的にそのような状態では視点—スクリーン間距離は視点の移動により変化するので、この変化の傾向を検討する必要もある。そこで、スクリーン位置を変化させた場合の知覚距離の計測を 3 名の被験者に対して行う。計測したスクリーン位置は視点から 600,700,800,900,1000mm 付近の 5 箇所、仮想物体の提示距離は視点から 400mm とし、各位置について 8 回計測し、一人の被験者に対して 40 点のサンプルを得る (図 5-8)。

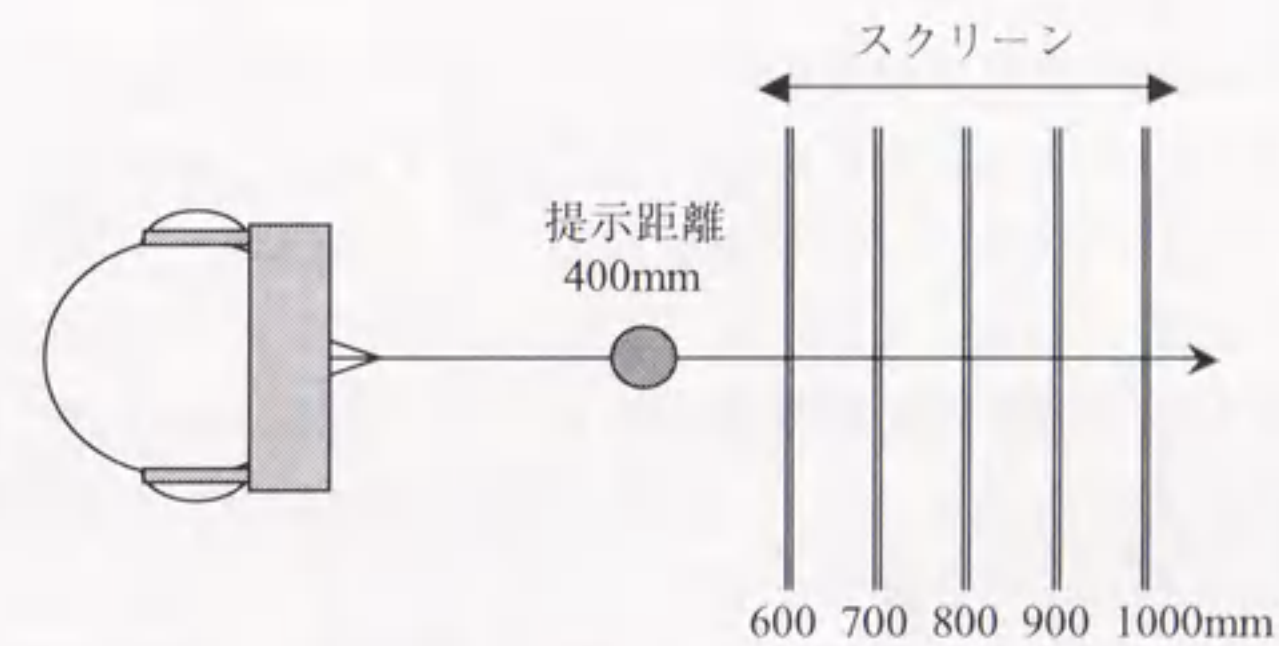


図 5-8 実験 3 の提示箇所

実験結果と考察

実験 2 と同様の方法で、各スクリーン位置について得られた知覚距離と提示距離のズレ量を図 5-9 に示す。グラフの各点の示すズレ量は、8 回の試行により得られた知覚距離の平均値と提示距離の差である。グラフより、スクリーンの位置が視点に近い程、仮想物体をより奥へ知覚する傾向が読み取れる。

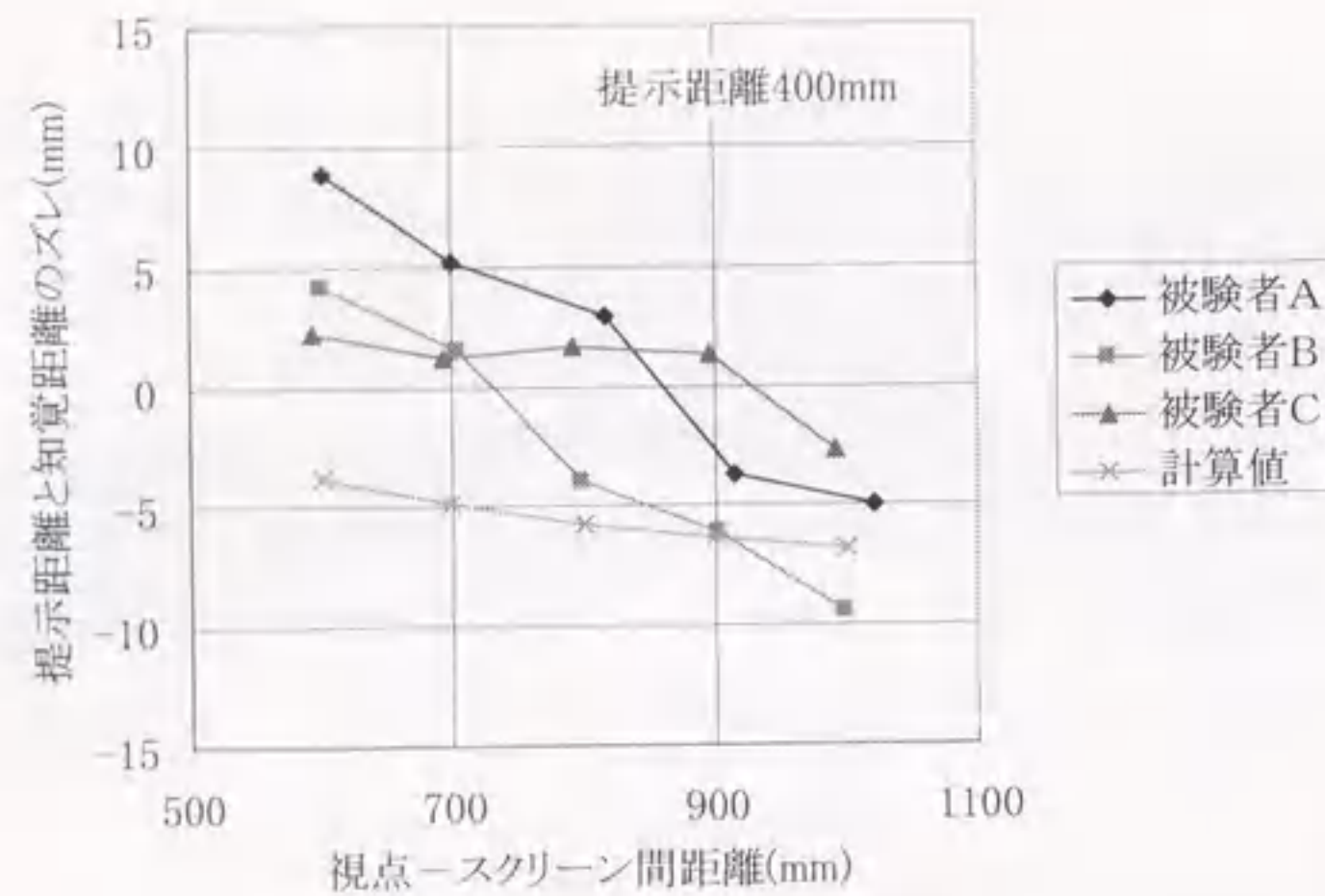


図 5-9 スクリーン距離の変化によるズレの変化

5.5 知覚に生じるズレに関する考察

5.5.1 仮想物体の知覚傾向のまとめ

以上3種類の実験から、仮想物体のズレに関する傾向として以下のことが言える。

- 1) 実物体と比較して2倍程度に知覚距離のばらつきは大きくなるが、仮想物体でもその程度で安定して知覚が行われている。
- 2) 仮想物体の知覚においては提示距離と知覚距離の間に明らかなズレが存在する。そのズレの量は提示距離が視点に近いほどより手前方向に、視点から遠いほどより奥方向に大きくなり、提示距離のほぼ線形な関数となる。また、ズレ量には個人差が見られる。
- 3) 斜め方向への提示では、正面方向への提示と比較してズレ量は一様に手前方向に大きくなる。
- 4) 知覚距離のズレ量は視点-スクリーン間距離にも依存し、スクリーンが遠いほどより手前に知覚する傾向が見られる。

これらの結果から、知覚距離には明らかにズレが存在するが、その変動にはある程度の傾向が見られ、実験によりズレ量は安定して求めることが可能であることがわかった。

このような仮想空間と実空間との空間座標の整合に問題が生じる要因としては、様々なものが考えられる。それらについて考察してみる。

5.5.2 奥行き知覚の仕組みに関する問題

ステレオ画像作成に必要な視体積を、両目とスクリーンの相対位置に応じて忠実にシミュレートすれば、両眼視差による奥行き知覚の原理から仮想空間と実空間の座標位置は正確に一致するはずである。すなわち、人間の視覚が視差情報のみから忠実に奥行き距離を知覚できるならば、仮想空間中の物体は計算された提示位置に見えるはずである。

しかしながら、表 2-1 で挙げたような立体知覚要因は連動しており、単体で正確な奥行き感を得ることは難しいと考えられている。特に、表示にディスプレイを使い両眼視差を奥行き手がかりとする立体視では、立体知覚要因である焦点調節を再現することができないという問題が存在する。このような立体視では、その原理上、輻輳に関しては仮想物体に合うのだが焦点は必ずディスプレイ上に合ってしまうことがわかっている[36]。これは立体視アプリケーションを使用した際の疲れや酔いといった生理的不快感を引き起こす原因の一つと考えられ研究されている[37][38][39][40][41]。ズレを引き起こす現象にも関連しているとも考えられるが、これについてはまだ明らかではない。関連して、知覚距離に影響を及ぼす隠蔽や色の違い等による錯視の問題もズレを引き起こす要因と考えられるが、これは実世界でも同様に生じることであり次段階の問題であると考え、本論文の範囲外とする。

本分野の研究の遂行を困難にしている理由の一つとして、知覚距離を計測する確実な方法が定まっていない点がある。過去の報告では、奥行き距離の計測について、ポインティング装置で仮想物体の奥行き距離を指し示させる方法[32][33][35]と、口頭で答えさせる方法[34]の2種類の方法がとられているが、それらには以下のような違いがある。

まず、後者の方法では仮想物体の絶対知覚距離を計測していると言えるが、デザインで要求される精度は理想的にはミリメートルのオーダーであることを考えると、この方法による計測では十分な精度が得られない。これに対して前者の方法では、実物体を用いて仮想物体を指示しており、それらの間の相対視差が奥行き手がかりとして与えられてしまうため、この方法で純粋に仮想物体

までの絶対知覚距離を計測したとは言い難い。しかしながら、製品の操作性の検討などを考えれば、遠方から眺めただけでその物体までのおおよその絶対距離を言い当てる後者よりもむしろ、実物体、例えば手をステアリングやコンソールに近づけた時にそれらの間の相対距離が厳密に知覚できる前者の方が重要となる場合が多い。また我々の日常生活での物体操作を考えても前者の方が自然であり、本研究の主な目的の一つである実物体の入力デバイスによる表示物体の対話操作において、少なくとも奥行き関係が整合することが期待できる点から、ここでは前者の方法を用いることを前提としている。

5.5.3 立体視に必要なパラメータの計測に関する問題

立体視に必要なパラメータの計測に誤差がまったく存在しない理想的な環境であり、両眼視差のみから正しく奥行き感を知覚できると仮定すれば、このようなズレは発生しないはずである。しかしながら、そのような理想的な環境の構築は極めて難しく、一般的なアプリケーションとしての利用を目指すほど計測の精度は落ち、その結果ズレが生じてしまうことになるだろう[42]。

具体的に存在している計測誤差としては、両眼視差画像を作成するための瞳孔間距離の設定に関するものが挙げられる。これは、実験2の結果のような提示距離に応じてズレ量が変化する要因として、実際には輻輳眼球運動により変化すると考えられる瞳孔間距離を、実験の画像生成時には固定してしまっていることに起因するのではないかというものである。

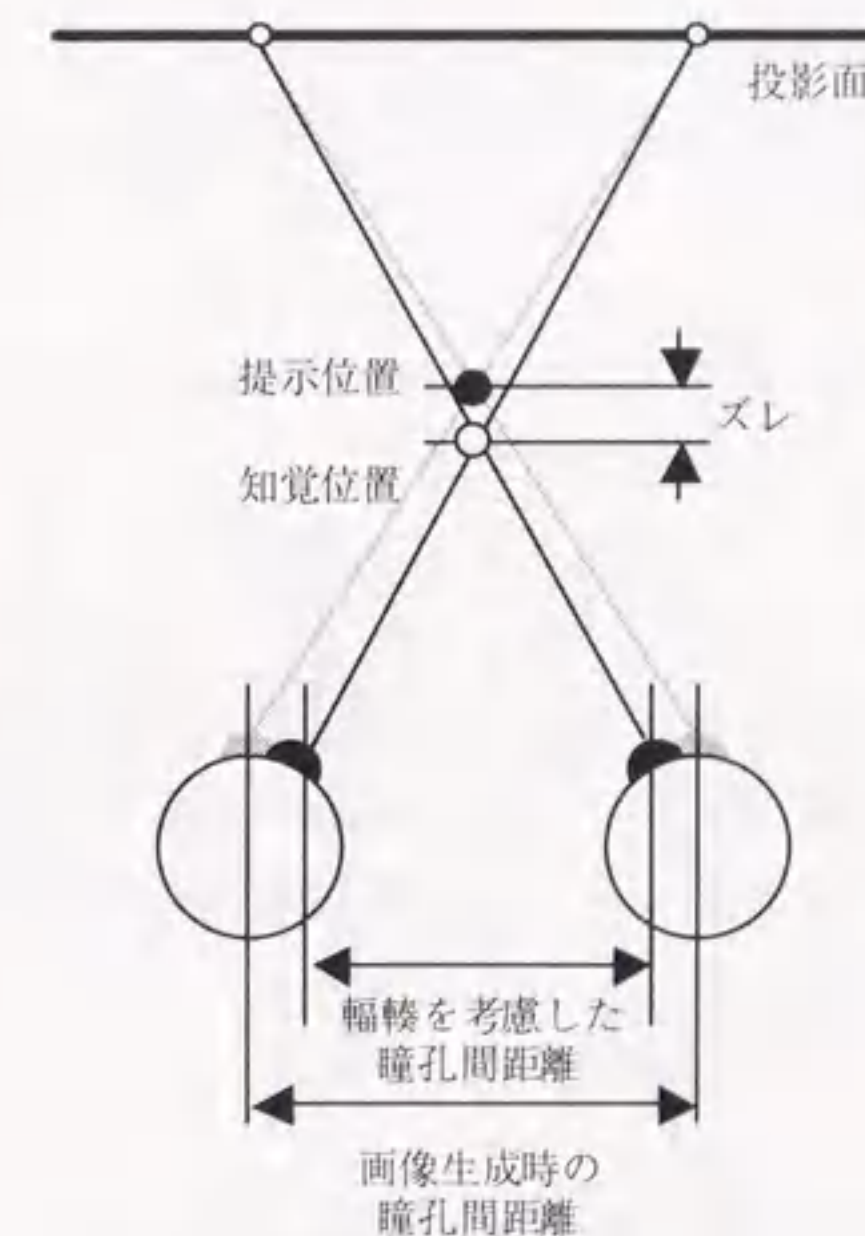
視体積をシミュレートする際に視点位置とするのにふさわしいと思われる場所は幾つかあるが、中でも眼球内の結節点が最適と考えられ、必然的に視差を生み出すための眼間距離はそれらの距離となる。しかしながら、注視点によって変化すると考えられるその位置を、現在の計測装置を使って常に検出することは難しく、一般的なアプリケーションでは適当に目のある位置を定義し、眼間距離は瞳孔間距離を近似的な値として用いることが多い。しかも、通常は平均的な瞳孔間距離をあらかじめ設定して万人共通なステレオ画像を作成しているものがほとんどであり、個人ごとに変更したとしてもその計測方法は今回の実験で行ったようなノギスや専用の器具で計測するものである。ちなみに、市販の計測器で測ったとしてもその精度は0.5mmまでである。

そこで、提示物体を注視した際に輻輳により変化しているであろう瞳孔間距離の変化を無視することにより、どの程度のズレが発生するのかを計算してみた。

図5-6、図5-7に実験2と、図5-9に実験3の結果と併せて示してある。

図中計算値とあるのズレの理論値は、瞳孔間距離を日本人の平均である65mm[43][44]として作成されたステレオ画像を、Taitの法則[45]により求まる輻輳を考慮した実際の瞳孔間距離(図5-10中 PD_{Tait})で観察した際に生じるズレである。

この結果から理論的なズレと実測値とを比較すると、傾きは共に正であり傾向は同じであるといえるが、傾きの値やズレの変域が多少異なる事がわかる。したがって、少なくとも輻輳運動による瞳孔間距離の変化を考慮していないことは、ズレの発生要因の一つであると言える。



$$PD_{Tait} = PD_{inf} \times (d-10) / (d+10)$$

PD_{Tait} : pupil distance by law of Tait (mm)

PD_{inf} : pupil distance referring to the infinity (mm)

d : presented depth (mm)

図5-10 輻輳を考慮した際のズレの理論値

5.6 奥行き距離補正手法の提案

5.6.1 奥行き距離補正の必要性

立体視による仮想物体の奥行き知覚における研究目的の一つは、これまで述べてきた提示距離と知覚距離の間に存在するズレの特性を計測することにより、ズレの発生原因を究明することである。現在までに様々な研究がなされているが完全にその要因が特定されているわけではなく、これに加えて瞳孔間距離や各種パラメータの計測方法やその精度にも限界があることを考えると、現状においてズレ発生のメカニズムを完全に解明することは困難であると考えられる。

しかしながら、VR 技術を活用したアプリケーションの需要は高まっており、現段階において現実に発生しているズレをどの程度改善できるかを明らかにすることも工学的に重要な意味がある。特に、工業製品のデザイン検討などの用途においては、このズレが大きいと立体映像と実際の製品との間に印象の不一致が生じ、デザイナーが意図したデザインが製品に反映されないという問題が生じる。また、実物体の入力デバイスで表示物体を操作する場合には、細かい操作においてズレが操作性に大きく影響する。これらの要求を満たすにはズレを数ミリ程度まで補正することが理想的である。

そこで以下では、スクリーン投影式の立体視環境を対象とし、画像生成時の視点位置およびスクリーンの位置をパラメータとして、奥行き距離の補正を行う手法を提案し、その有効性を検証する。本手法では、生じているズレ量を実測し、得られたズレ量のサンプルから二乗誤差最小の基準に基づく最適な補正量を決定し、補正パラメータであるステレオ画像生成時の視点位置とスクリーン位置に修正を加える。

5.6.2 提案手法

図 5-11 はステレオ画像生成時の視点およびスクリーン位置の関係を表しており、図中灰色の図は補正前の状態を表す。すなわち、A の位置に仮想物体を知覚させるために、左眼用画像はスクリーン上で A_L の位置に像を表示し、右眼用では A_R の位置に表示している様子である。瞳孔間距離や視点-スクリーン間距離の計測値には誤差が含まれていると考え、実際には図中黒色の状態でステレオ画像を観察したと仮定すれば、結果的に y のズレが生じることになる。

本手法ではズレ量の実測値 y より推定される計測誤差を補正するものである。すなわち、瞳孔間距離は補正の前後で p から $p+dp$ に変更され、視点およびスクリーンの位置は、補正によりスクリーン面に垂直な方向に、それぞれ ds_1 お

よび ds_2 平行移動される。つまり、視点-スクリーン間距離は s から $s+ds_1-ds_2$ に補正されることになる。

対象物体のステレオ画像間での表示位置の差を示すパラメータ q についてもプロジェクタ投影時の画像の歪みを考慮した補正が考えられるが、あらかじめプロジェクタの画像補正機能を用いて十分に調整して歪みを排除したため、以下ではこれについて考慮しない。

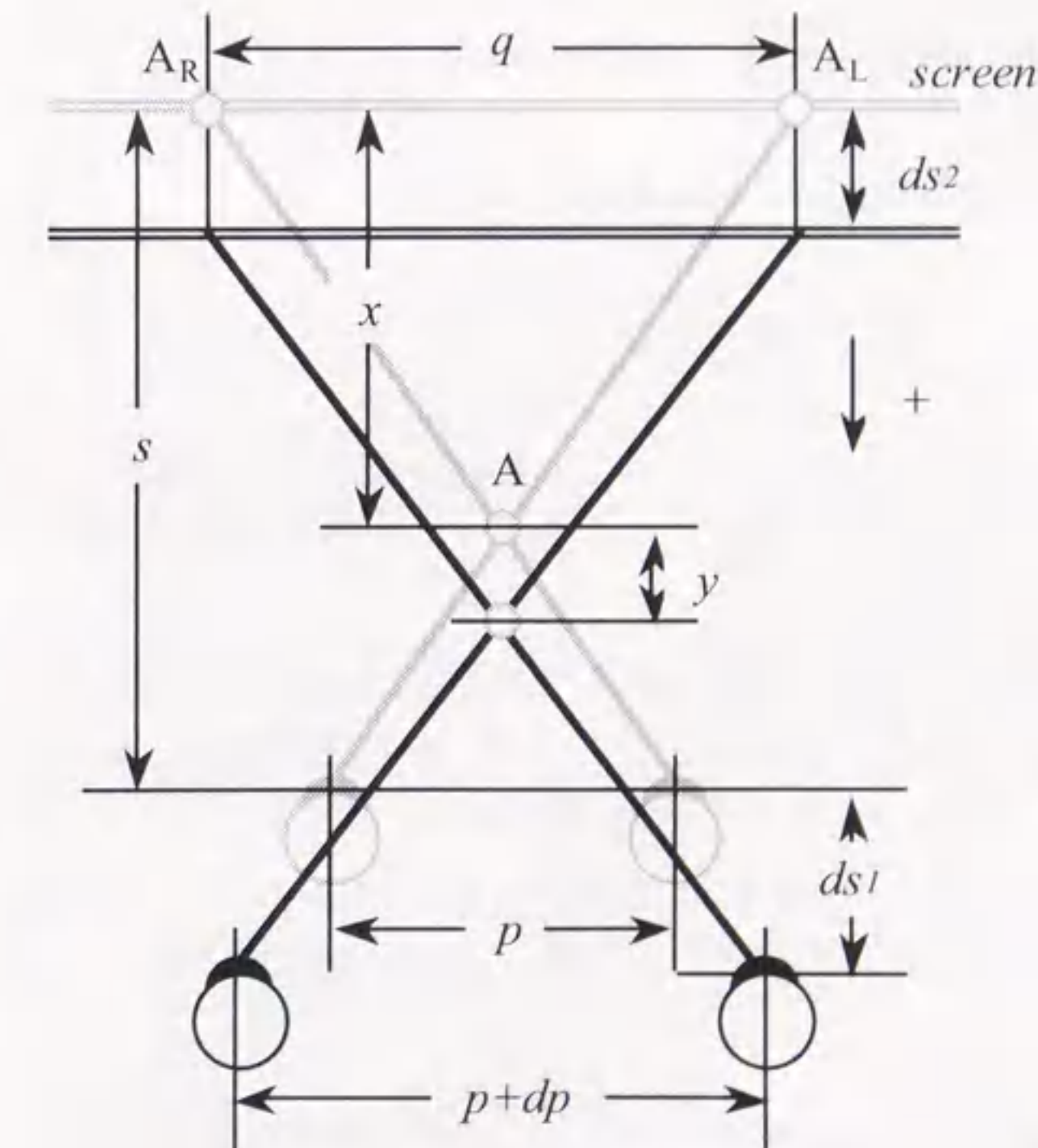


図 5-11 修正パラメータの配置

5.6.3 補正パラメータの最適値

5.6.2 における補正前の視点とスクリーンの位置で生成したステレオ画像を、補正後の位置で観察したとする。このとき表示物体とスクリーン間の補正前の距離 x と奥行き距離のズレ量の理論値 y には

図 5-11 より以下のような関係が成り立つ。

$$\frac{p}{q} = \frac{s-x}{x} \quad (1)$$

$$\frac{p+dp}{q} = \frac{ds_1+s-x-y}{x+y-ds_2} \quad (2)$$

式(1)および式(2)より変数 q を消去することにより以下の式が得られる。

$$(s-x)(p+dp)(x+y-ds_2) = p x(ds_1+s-x-y) \quad (3)$$

これを y について解くと次式となる。

$$y = \frac{p x(ds_1+s-x) - (s-x)(p+dp)(x-ds_2)}{(s-x)(p+dp) + p x} \quad (4)$$

奥行き距離の知覚実験より得られる 3 変数 (x, s, y) の組のサンプルのうち、第 i 番目のサンプルを (x_i, s_i, y_i) と表す。ここで、瞳孔間距離 p はあらかじめ個人ごとに測定される定数である。この時、個々のサンプルに対しては式(4)を満たす補正量 (dp, ds_1, ds_2) が存在する。これを全てのサンプルに拡張し、補正量 (dp, ds_1, ds_2) の最適解を以下の関数 g を最小とするものとする。

$$f_i(dp, ds_1, ds_2) = y_i - \frac{p x_i(ds_1+s_i-x_i) - (s_i-x_i)(p+dp)(x_i-ds_2)}{(s_i-x_i)(p+dp) + p x_i} \quad (5)$$

$$g(dp, ds_1, ds_2) = \sum_i \{f_i(dp, ds_1, ds_2)\}^2 \quad (6)$$

それは、以下の連立方程式を解くことにより求められる。

$$\frac{\partial g}{\partial dp} = \frac{\partial g}{\partial ds_1} = \frac{\partial g}{\partial ds_2} = 0 \quad (7)$$

式(7)の連立方程式は、数値的に解く必要がある。

5.6.4 実用的解法

式(7)は数値解法に頼る必要があるため (dp, ds_1, ds_2) の解を常に安定して得ることは難しい。従ってここでは、瞳孔間距離の計測値と真値との差が高々数ミリ以内であることに着目し、3 変数のうち dp をこの範囲内で変化させながら dp を定数としたときの ds_1 および ds_2 の解析解を求めることを考える。

$$\delta_i = (s_i - x_i)(p + dp) + p x_i \quad (8)$$

とし、以下の 3 変数：

$$\alpha_i = -p x_i / \delta_i \quad (9)$$

$$\beta_i = -(s_i - x_i)(p + dp) / \delta_i \quad (10)$$

$$\gamma_i = \{(s_i - x_i)(x_i + y_i)dp + p s_i y_i\} / \delta_i \quad (11)$$

を用いて式(5)は以下のように表される。

$$f_i(dp, ds_1, ds_2) = \alpha_i ds_1 + \beta_i ds_2 + \gamma_i \quad (12)$$

すなわち、 (ds_1, ds_2) の最適解は以下の二元連立一次方程式の解となる。

$$\begin{cases} \sum_i \alpha_i^2 ds_1 + \sum_i \alpha_i \beta_i ds_2 + \sum_i \alpha_i \gamma_i = 0 \\ \sum_i \alpha_i \beta_i ds_1 + \sum_i \beta_i^2 ds_2 + \sum_i \beta_i \gamma_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

ここで、以下の5変数を用いれば、

$$a_1 = \sum_i \alpha_i \gamma_i \quad (14)$$

$$a_2 = \sum_i \alpha_i^2 \quad (15)$$

$$b_1 = \sum_i \beta_i \gamma_i \quad (16)$$

$$b_2 = \sum_i \beta_i^2 \quad (17)$$

$$c = \sum_i \alpha_i \beta_i \quad (18)$$

ds_1 および ds_2 の解析解は以下のように表される。

$$ds_1 = \frac{b_1 c - a_1 b_2}{a_2 b_2 - c^2} \quad (19)$$

$$ds_2 = \frac{a_1 c - a_2 b_1}{a_2 b_2 - c^2} \quad (20)$$

ここで、 dp を0付近で連続的に変化させながら、 dp に対応する ds_1 および ds_2 の解を求め、それらの中で式(6)を最小とするものを (dp, ds_1, ds_2) の最適解として選択する。 dp の変動範囲はゆとりをもたせて $\pm 30.0\text{mm}$ 以内とし、 0.01mm 刻みとした。

5.6.5 実験による検証

本手法の実際にシステムに適用し、実験よりその効果を確認する。

実験環境

実験に使用した装置はこれまでの実験とほぼ同様であるが、今回の位置の計測には全て光学式位置センサ（精度 0.51mm ）を用いた。また、瞳孔間距離の計測には瞳孔間距離測定器（最小読み取り間隔 0.5mm ）を使用して実験を行った。提示する仮想物体の形状もこれまでと同じく円錐（高さ 100mm 、半径 25mm ）とし、奥行き知覚距離の計測方法は被験者が位置センサである指示具を使い円錐の頂点を指示するものとする。

実験結果

3名の被験者に対して補正前の画像を用いた奥行き知覚距離の計測を行った。その結果得られるズレ量のサンプルを元に上の手順で補正パラメータの値を求めた。

手の届く範囲での物体操作を前提とし、 $700\text{mm}, 800\text{mm}, 900\text{mm}, 1000\text{mm}$ の4種類の視点-スクリーン間距離のそれぞれに対して、視点-物体間距離を $300\text{mm} \sim 500\text{mm}$ の間の 50mm 置きの5種類に変化させた計20通りの場合について奥行き知覚距離を計測した。これを図5-11の画像生成時のパラメータ s と x で表すと以下のようなになる。

$s = 700\text{mm},$	$x = 200\text{mm} \sim 400\text{mm}$
$s = 800\text{mm},$	$x = 300\text{mm} \sim 500\text{mm}$
$s = 900\text{mm},$	$x = 400\text{mm} \sim 600\text{mm}$
$s = 1000\text{mm},$	$x = 500\text{mm} \sim 700\text{mm}$

各条件におけるズレの計測値 y_i は、それぞれ5回の計測の平均値を代表値とした。この結果得られる計20個の (x, s, y) のサンプルから5.6.3の計算方法で補正量 (dp, ds_1, ds_2) の最適値を決定する。

図5-12に、ズレの計測値 y_i を赤色の折れ線、補正量 (dp, ds_1, ds_2) と (x, s) を式(4)に代入することで得られるズレの理論値 y を水色の折れ線で示す。

赤色と水色の折れ線の各節点における y 座標の差は、補正後の視点位置とスクリーン位置によるステレオ画像を用いた場合の、補正後のズレ量として期待されるものである。従って、補正の良さの評価量として、それらの二乗平均平

方根値(Root Mean Square: RMS)についても併記する。

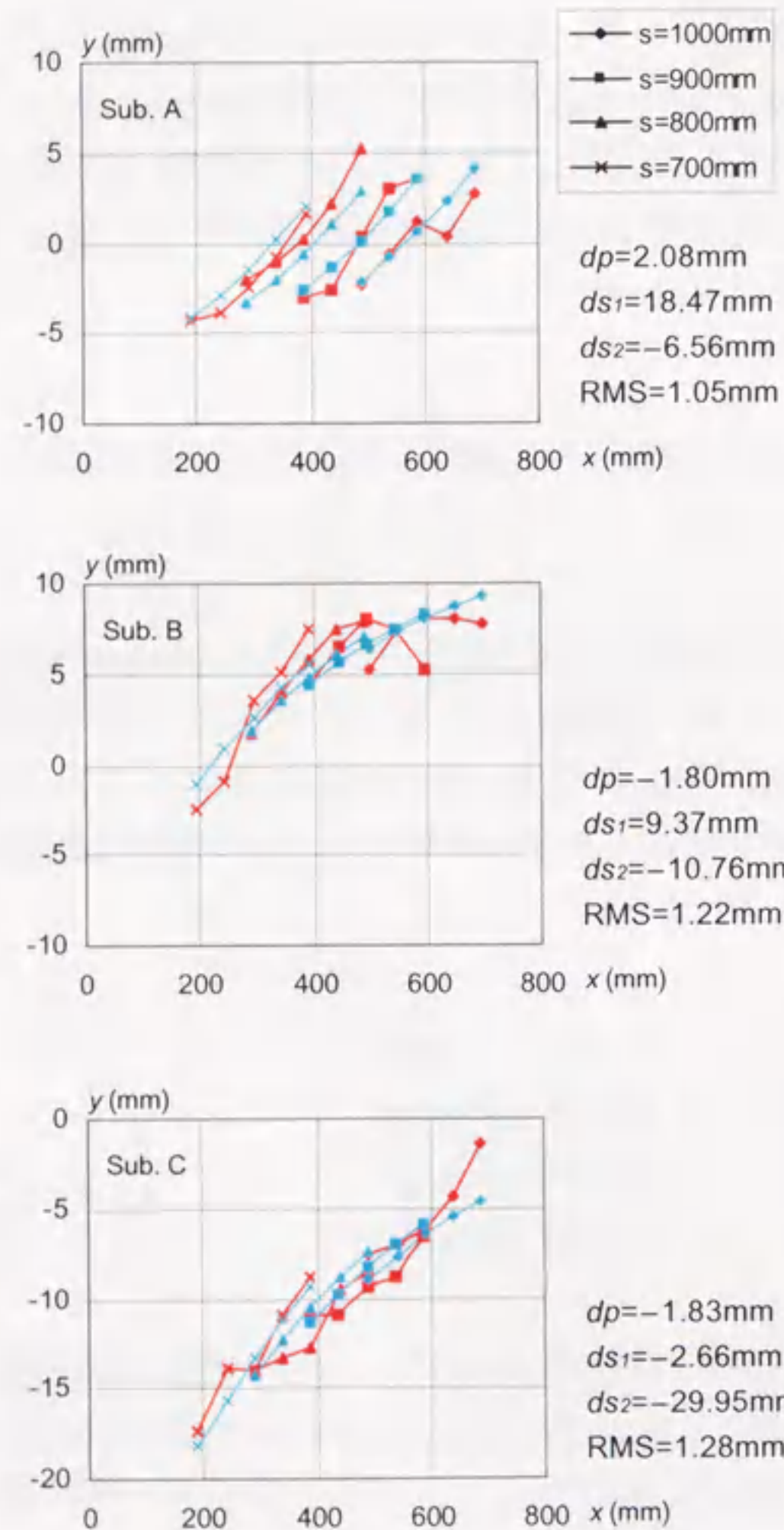


図 5-12 物体-スクリーン間距離とズレの関係

5.6.6 各パラメータの妥当性

3つの補正パラメータのうち、 ds_1 は式(4)の x に s を代入したときの y の値と等しいことから、視点付近での奥行き距離の補正量となっていることがわかる。同様に ds_2 は式(4)の x に0を代入したときの y の値が ds_2 となることから、スクリーン付近での奥行き距離の補正量である。図5-12における被験者Aの結果と被験者BおよびCの結果との間には明らかな空間分布の差異が見られるが、このように奥行き距離に一樣のバイアスを与える効果しかない ds_1 および ds_2 を変化させるのみでは、すべての被験者に対して効果的な補正を行うことは難しい。すなわち、図5-12のズレサンプルの x, s, y の3次元空間における分布曲面を考えた場合、 s 方向の傾き、分布の非線形の度合い(曲率)について被験者間にばらつきがあるにもかかわらず、 dp を用いるが故に3被験者のいずれの結果においても式(4)の示す理論曲面が分布曲面に非常に良く合致していると考えられる。

次に、 ds_2 の必要性を確認するために ds_2 を0とし、 dp および ds_1 の最適値を求めた結果を図5-13に示す。3被験者のうち被験者A, Bについては ds_2 を0としても補正効果はそれほど低下していないので、ズレ発生の原因がスクリーンに対する視点の相対位置を含む計測誤差のみであると考えて、 dp および ds_1 の2パラメータで補正する方が自然である。しかしながら被験者Cの結果では、 ds_2 を用いないことにより補正効果が明らかに低下している上に、 dp の補正量も6mm程度とかなり大きなものになっており、 dp および ds_1 の2パラメータでの補正は不適當であると言える。 ds_1 を用いずに補正を行った場合も同様であり、被験者AについてRMSの増加、およびグラフの一致度の低下がみられた。表5-3に結果をまとめる。

以上のような考察結果より、多くの被験者に幅広く対応するためには、これら3つのパラメータをすべて用いる方が効果的であると考えられる。

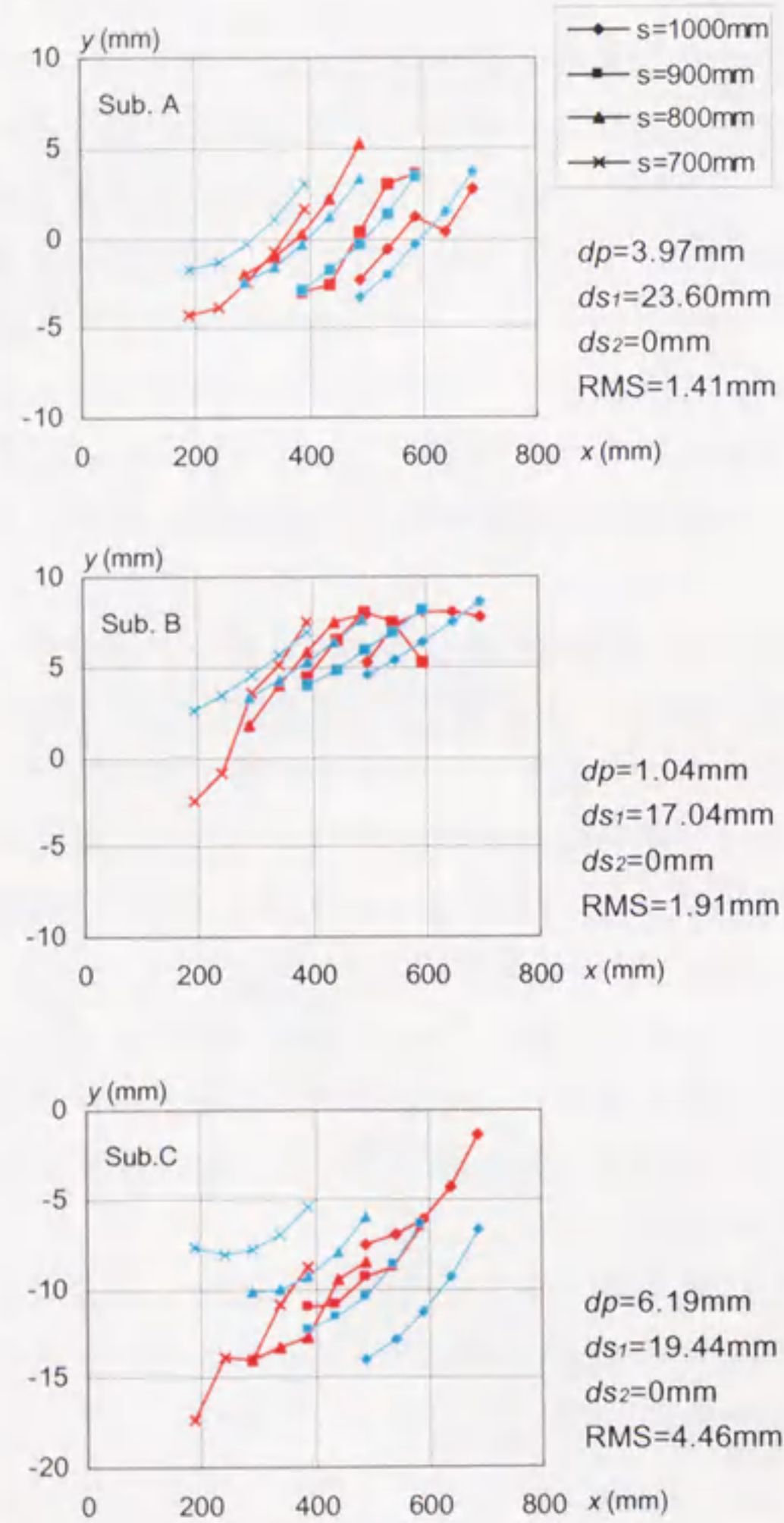


図 5-13 ds_2 を用いない補正の例

表 5-3 各パラメータの必要性

		3変数	dp なし	ds_1 なし	ds_2 なし
Sub.A	dp	2.08	0	-1.68	3.97
	ds_1	18.47	9.75	0	23.60
	ds_2	-6.56	-10.62	-11.42	0
	RMS	1.05	1.31	1.86	1.41
Sub.B	dp	-1.80	0	-3.69	1.04
	ds_1	9.37	16.91	0	17.04
	ds_2	-10.76	-6.99	-13.47	0
	RMS	1.22	1.40	1.46	1.91
Sub.C	dp	-1.83	0	-1.31	6.19
	ds_1	-2.66	5.40	0	19.44
	ds_2	-29.95	-25.99	-29.17	0
	RMS	1.28	1.47	1.30	4.46

(単位:mm)

5.6.7 検証実験

図 5-14 に、4名の被験者に対して本補正手法を適用した実験結果を示す。今回は、視点-スクリーン間距離を 700mm, 800mm, 900mm の 3種類、視点-物体間距離を 300mm, 400mm, 500mm の 3種類の計 9箇所に仮想物体を提示した。得られた奥行き知覚距離のズレのサンプルから補正パラメータの最適値を求め、補正後の視点位置とスクリーン位置を用いてステレオ画像を生成し、再度奥行き知覚距離のズレを計測した。補正効果の評価値として、補正前と補正後のズレ量の二乗平均平方根値(RMS')を図 5-14 中に示す。

この結果、補正後の RMS' は全被験者平均で 1.35mm と補正前の 31% に減少していることから、物体-スクリーン間距離に不変の補正パラメータ値を用いているにもかかわらず、視点-スクリーン間距離および物体-スクリーン間距離の計測範囲の全てに関して本補正手法の効果が確認できた。

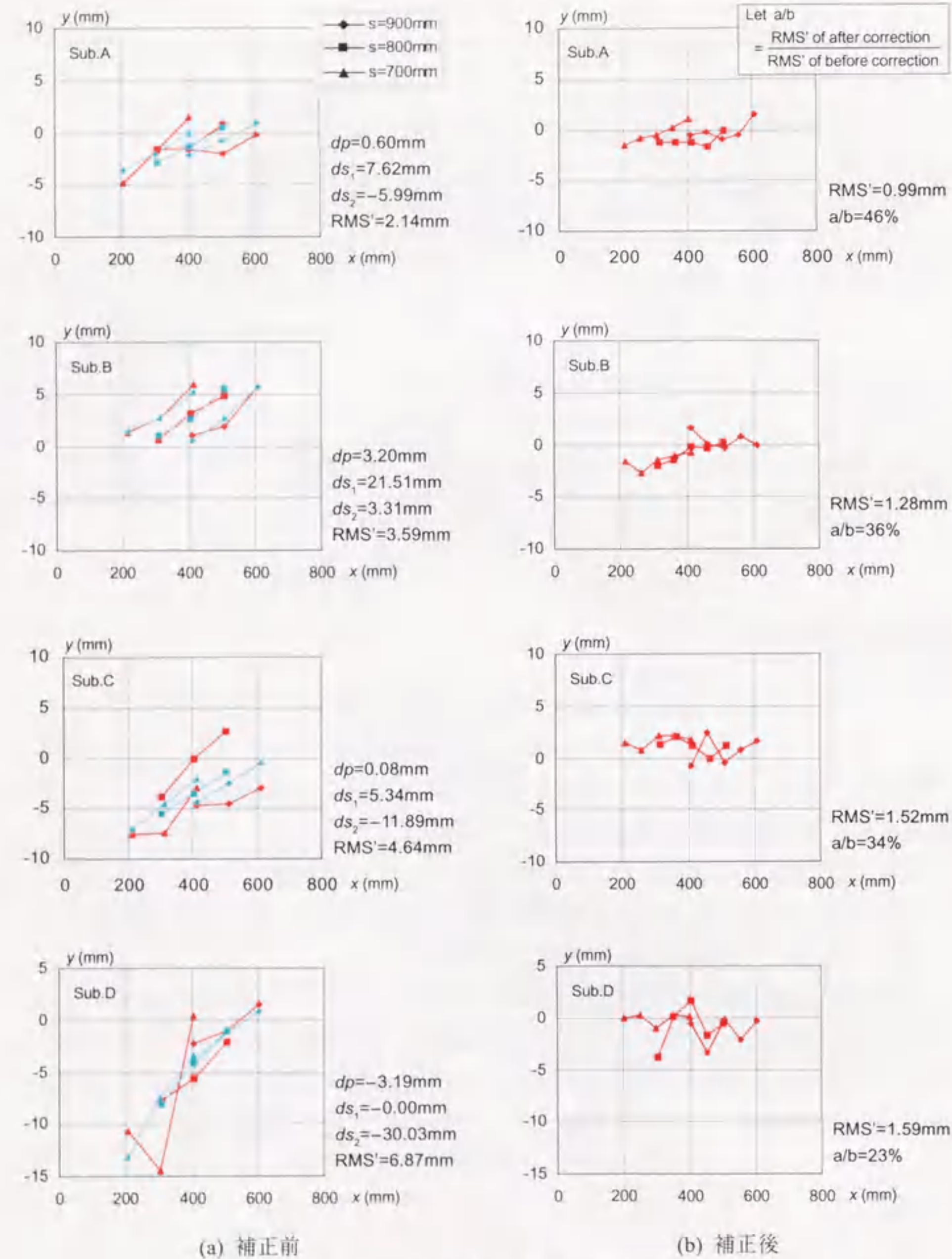


図 5-14 補正前後のズレの比較

5.7 考察とまとめ

従来の補正手法では、奥行きへの相関が大きい瞳孔間距離に補正パラメータを設定することが多かった。奥行き距離の補正を瞳孔間距離に集約して行うことは、補正精度の要求がそれほど厳しくない場合であれば簡便で合理的な方法である。しかしながら、ズレの発生要因のひとつと考えられる計測誤差は、瞳孔間距離だけでなく投影面と視点の相対位置にも存在する。過去に行った実験においても[46]、瞳孔間距離のみでの補正では補正量を物体の提示位置とスクリーンとの距離に応じて可変とすることなしでは数ミリ程度まで補正することは不可能であった。

また、計測誤差が原因で現れるズレは、物体の提示位置がスクリーン上である時は0となり、基本的には提示位置がスクリーンから離れるほど絶対値が大きくなるという特性がある。しかしながら、過去の報告[33][35][46]にあるように、実際には物体の提示位置がスクリーン付近にある場合でもズレが0とはならない。この原因としては焦点調節の影響や表示枠の影響（箱庭効果）[28][29][36]等が考えられているがこれらがどのように組み合わさってズレが発生するのかの詳細についてはいまだ明らかになっていない。瞳孔間距離を変化させてもスクリーン上に位置する表示物体の奥行きは原理的には変化しないので、瞳孔間距離による補正ではスクリーン付近の提示位置に対しては補正の効果が少ないだけでなく、瞳孔間距離の補正量が不必要に大きくなってしまう。また、瞳孔間距離の補正量を可変にするためには観察者が注視している物体の奥行き距離が既知でなければならず、実用上問題があった。

ここで提案した手法は、奥行き知覚距離計測の実験結果に基づき、ステレオ画像生成時の視野に関する3つのパラメータを用いて、ステレオ視における仮想物体の奥行き距離を補正するものである。ズレ量のサンプル分布から補正パラメータの最適値を求める具体的な手順を示し、本手法で選択した補正パラメータの妥当性について考察した。また、検証実験より補正の効果を確認した。

本手法は、過去の研究にあるような補正パラメータを瞳孔間距離のみとし物体-スクリーン間距離に対して可変とする方法[46]と比較して、補正パラメータを追加することにより物体-スクリーン間距離に対して不変の補正パラメータ値を用いながら同程度の補正精度を実現している。

今回の実験では安定した結果を得るためのズレ量のサンプル数は経験的に定めている。ズレ量のサンプルを多く採取すれば補正精度の向上が期待できるが、実用化においては、少ないサンプルでより高い精度の補正を行うことが重要と

なる。また、ズレ量のサンプルを利用者が満足するまで逐次的に入力するなど、入力操作を工夫することによって利用者の負担を軽減することも考えられる。要求されるズレの許容範囲に対して、必要最低限のサンプルの数を決定することが今後の課題として挙げられる。

第6章 デザインに適した仮想空間の設計

6.1 はじめに

理論的には必要なパラメータをリアルタイムで誤差無く計測してステレオ画像を作成できれば、意図した位置に物体を立体表示できるはずである。しかしながら、現実的には計測値に多少の誤差が含まれるのはやむを得ず、その作成は不可能に近い。例えば今回使用した市販の瞳孔間距離計測器の精度は0.5mmでありそれ以上の精度を得ることは難しい上、眼球内部にあると思われる画像を作成するのに適した視点位置を計測することは容易ではない。さらに、立体視で得られる立体知覚要因は確実に実世界よりも少ないことは明らかであり、たとえ正確なステレオ画像を作成したとしても、そのみで人が正しく立体感を知覚するとは限らない。

正しく立体感が提示できないとは実世界と仮想世界の座標系が一致していないことを意味し、本研究の目指すようなデザイン環境を構築する上では重大な問題となる。また言い換えればこのような環境下ではペン先と仮想線が一致しておらず、ペンの軌跡と異なる場所に表示される仮想線を常に意識して描かなければならないという不必要な入力ルールをデザイナーに強要し直観性を損なうことになる。

そこで本章では、実空間と仮想空間とが融合したデザインに適した環境を構築するために本システムで用いている手法について述べる。まず、磁気式位置センサによりリアルタイムに計測される視点位置とペン先の位置の計測結果には大きな誤差が含まれているため、これを光学式位置センサで計測される誤差の少ない座標系を基準に補正し、実空間座標系へと変換する。次に、この実空間座標系での座標値を仮想空間での座標系へと変換する処理を行う。これらの補正と変換が正しく行われていると仮定すれば正確な立体感を与えるステレオ画像が作成されるはずであるが、実際には第5章で述べたような様々な要因に

よりまだ十分に正確な立体感を得ることはできない。そこでさらに、前章で提案した手法により仮想物の知覚傾向を考慮したステレオ画像の作成を行う。

図 6-1 にこれらの大まかな流れを示し、以下でさらに詳しく述べる。

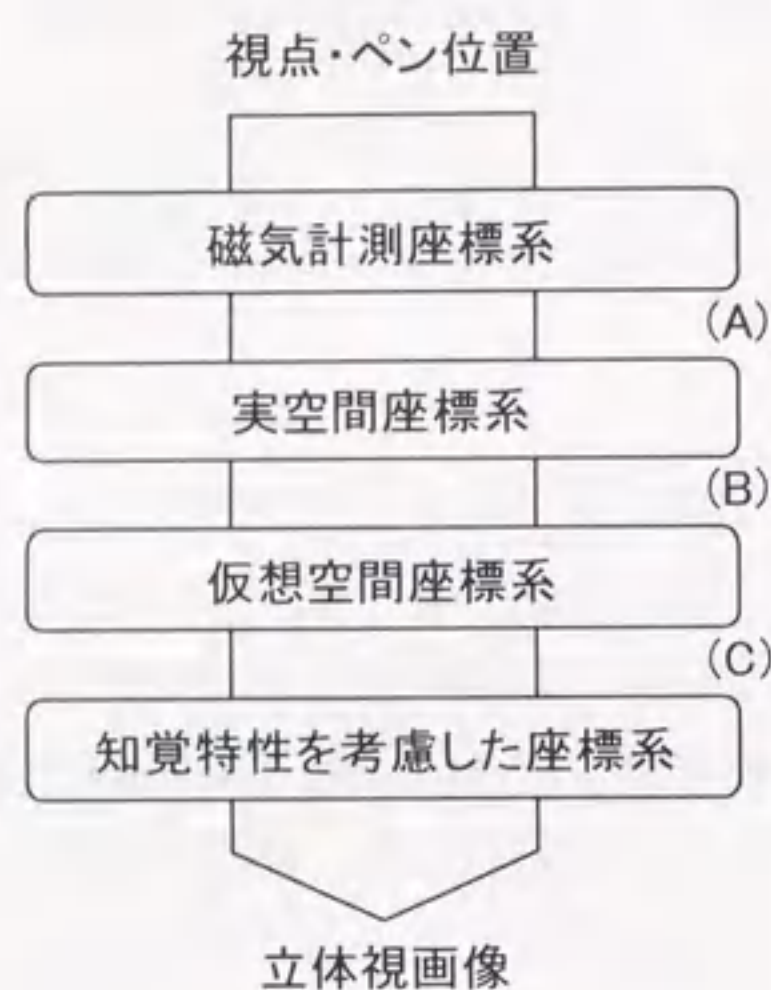


図 6-1 実空間と仮想空間の位置合わせの流れ

6.2 磁気式位置センサにおける計測誤差の補正(A)

本システムでは位置計測に光学式位置センサと磁気式位置センサの2つを、それぞれの短所と短所を考慮し組み合わせて使用した。光学式は高精度（今回使用したもので 0.51mm）であるが、リアルタイムでの計測が難しく、遮蔽物がある場合には計測不能となる。対して、磁気式は遮蔽物に影響されずに計測することが可能であるが、磁界の乱れに弱く、その精度に問題があることが知られている[47]。図 6-2 にこの歪みを計測し、可視化したものを示す。格子状に区切った空間の頂点（一辺 100mm）を光学式と磁気式の位置センサで計測したものであり、図中灰色のワイヤフレームが光学式による計測値で基準点を表す。黒色が磁気式による計測値で、これより発信機から離れるほど精度は落ちることが確認できる。

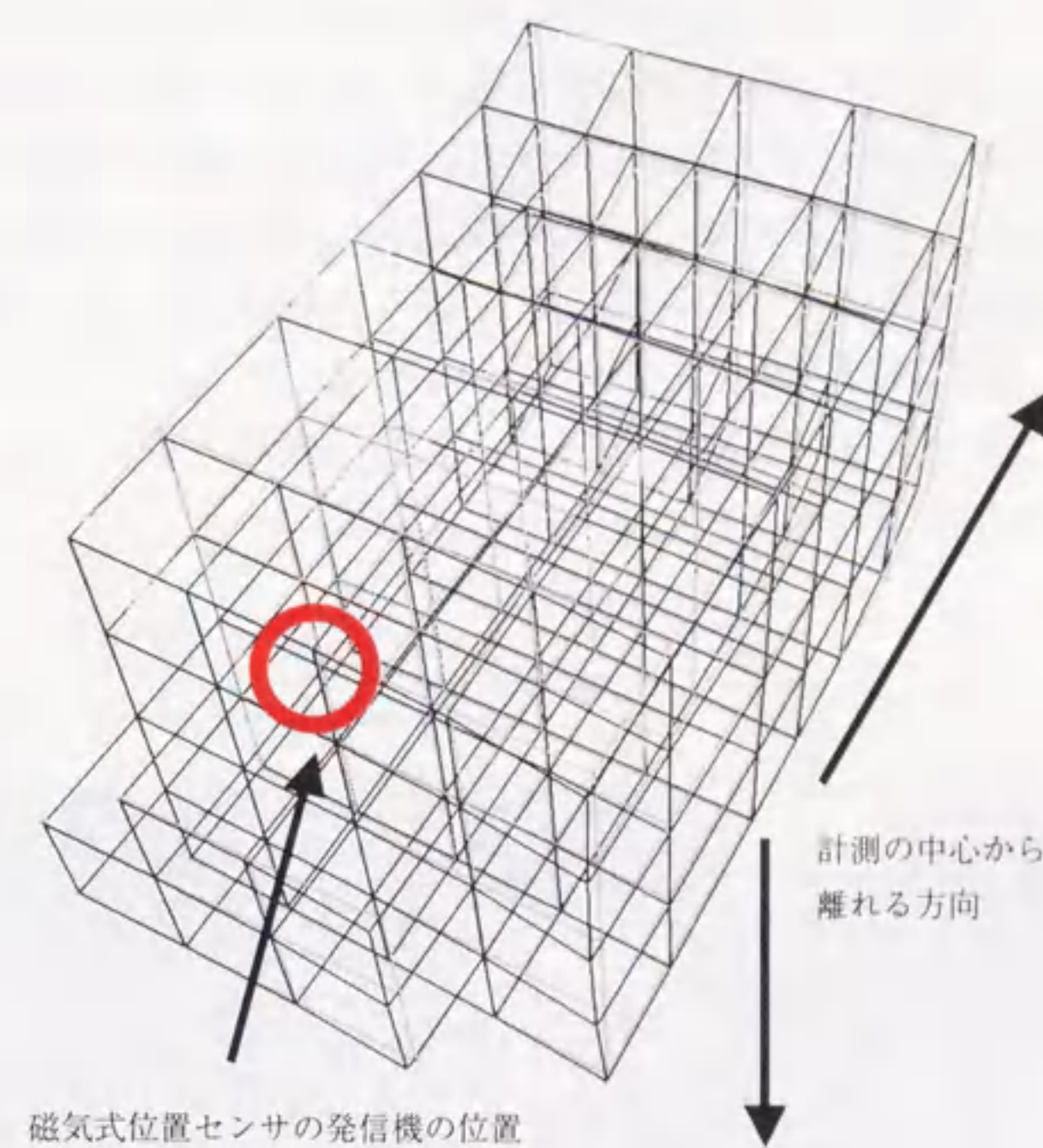


図 6-2 磁気式位置センサに生じている座標の歪み

そこで、位置と角度の計測がリアルタイムに必要な視点とペン位置の取得には磁気式を用い、光学式は磁気式の補正や実座標と仮想座標を一致させるための予備計測に使用する。すなわち、事前に光学式位置センサによる高精度の計測値との比較から補正手順を確立しておき、これにより磁気式位置センサの計測値を補正する。

いくつかの計測の結果、

- 1) 発信機の位置から離れるほど歪みが大きくなる。
- 2) 離れるほど弧を描くような歪みが見られる。
- 3) 離れるほど膨張するような歪みが見られる。
- 4) 発信機に近い位置ではそれほど歪みが見られない。

というような、ある程度の傾向が見られたため、ここでは計算が単純で回転、拡大縮小、移動の変換が実現できる 4×4 の行列変換で対処する。ただし、視

点とペン先では計測側のセンサが存在する頻度の高い領域が異なる上に、視点は発信機に近くペン先は遠い箇所で計測をする。そこで、精度を高めるために視点用の補正行列とペン先用の補正行列を別に求め適時組み合わせて使用することとした(図6-3)。以下で補正行列の作成方法を述べる。

歪みを持つ磁気式位置センサの座標系で計測された視点とペンの座標値は、まずは歪みのない実空間座標系に変換される(図6-1A)。ここでの実空間座標系とは比較的歪みの少ない光学式位置センサの座標系を基準として定義する。そして、両座標系の変換行列Aを次のようにして求める。

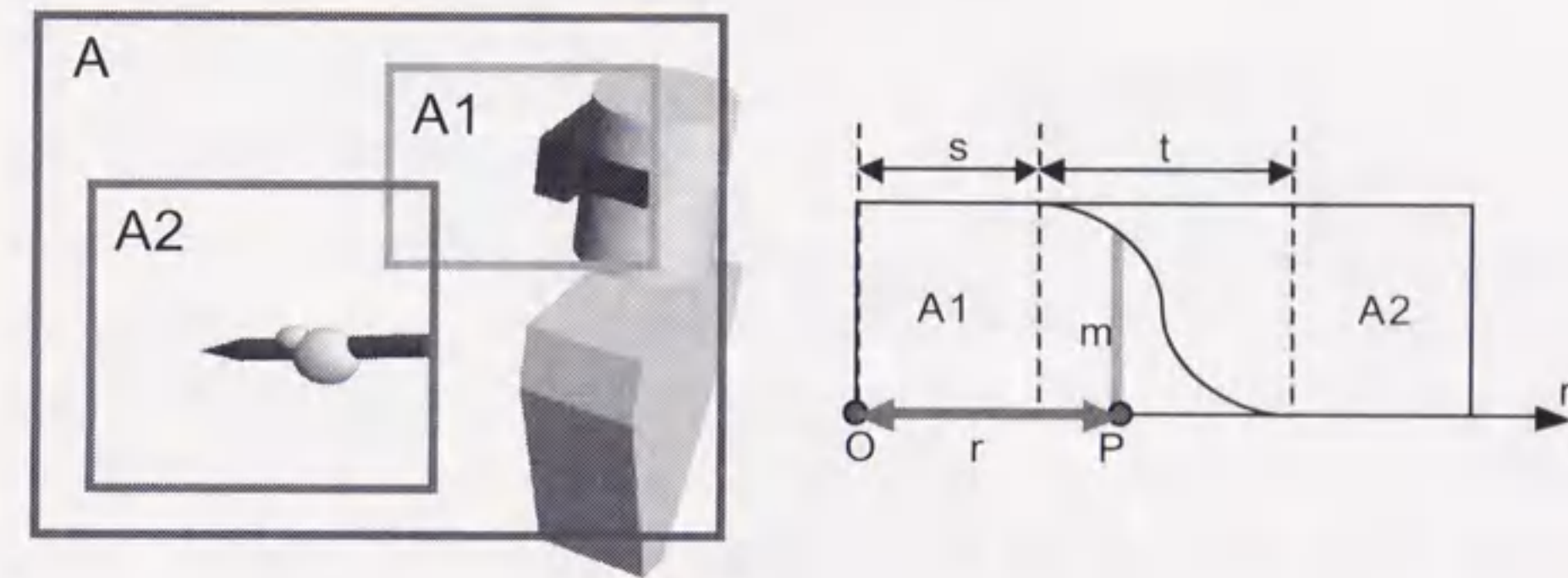


図6-3 各センサの配置

まず、空間上の複数箇所の座標値を光学式と磁気式のそれぞれのセンサで計測する。次に、それらの対応する座標値を基にし、磁気式位置センサの座標値を入力として、光学式位置センサの座標値を出力とするような行列の各成分を最小二乗法で求める。ただし、視点用の補正行列A1とペン先用の補正行列A2は別に求める。視点用の行列A1は、標準的な視点位置を基準とした奥行き

300mm×横350mm×高さ250mmの範囲での60点より求めた。また、ペン先用の補正行列A2は、ペンが主に存在する領域、視点からやや手前下の奥行き300mm×横500mm×高さ500mmの範囲での90点より求めた。

最後に、計測した領域以外の空間座標ではこれらを融合するような変換行列Aを作成して適用する。図6-4にここで用いたアルゴリズムを示す。



The transformation matrix A is,

$$\begin{aligned} &\text{if } r \leq s && \text{then } A=A1 \\ &\text{if } s < r < s+t && \text{then } A=m \cdot A1 + (1-m) \cdot A2 \\ &\text{if } r \geq s+t && \text{then } A=A2 \end{aligned}$$

where m is the ratio for mixing of two matrices,

$$m = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\pi \frac{r-s}{t} \right) \right\}$$

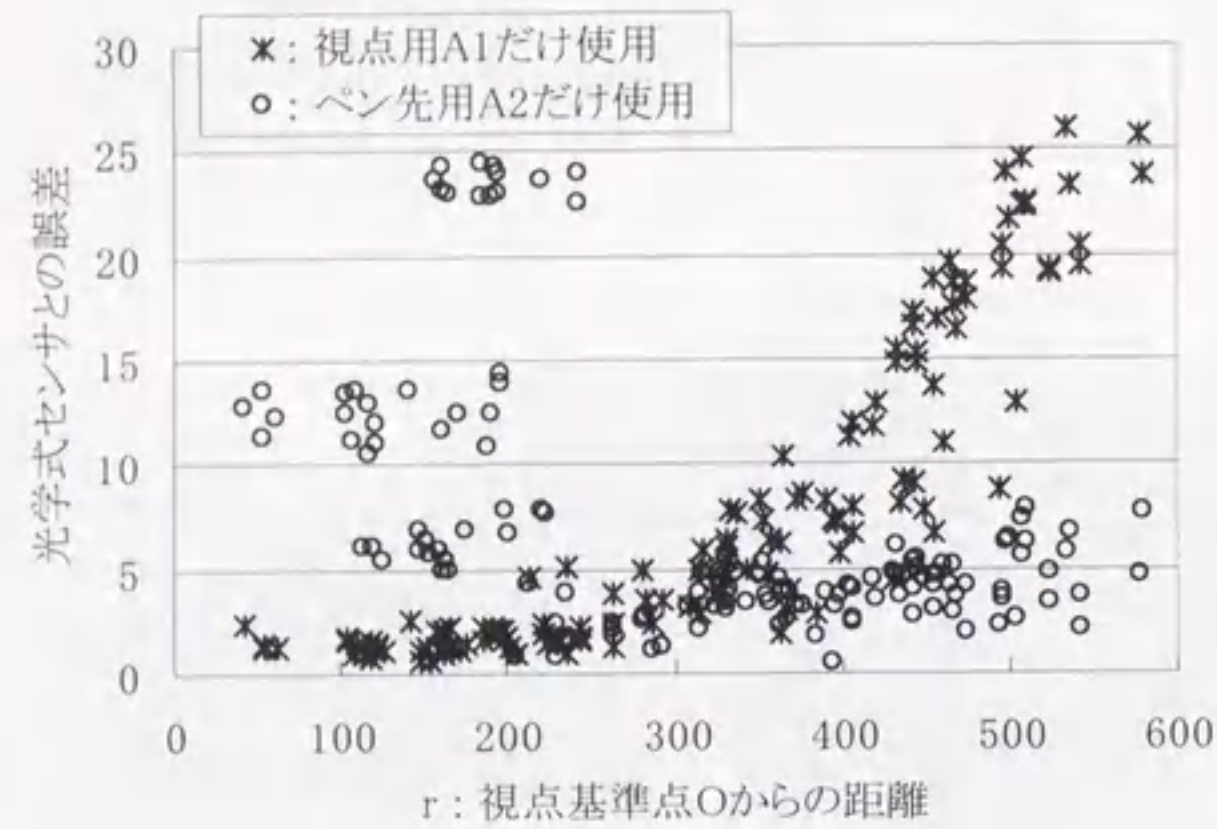
r is the distance between the position of the sensor P and the origin of the magnetic field source O.

s is the effective radius of matrix A1. ($s=250\text{mm}$)

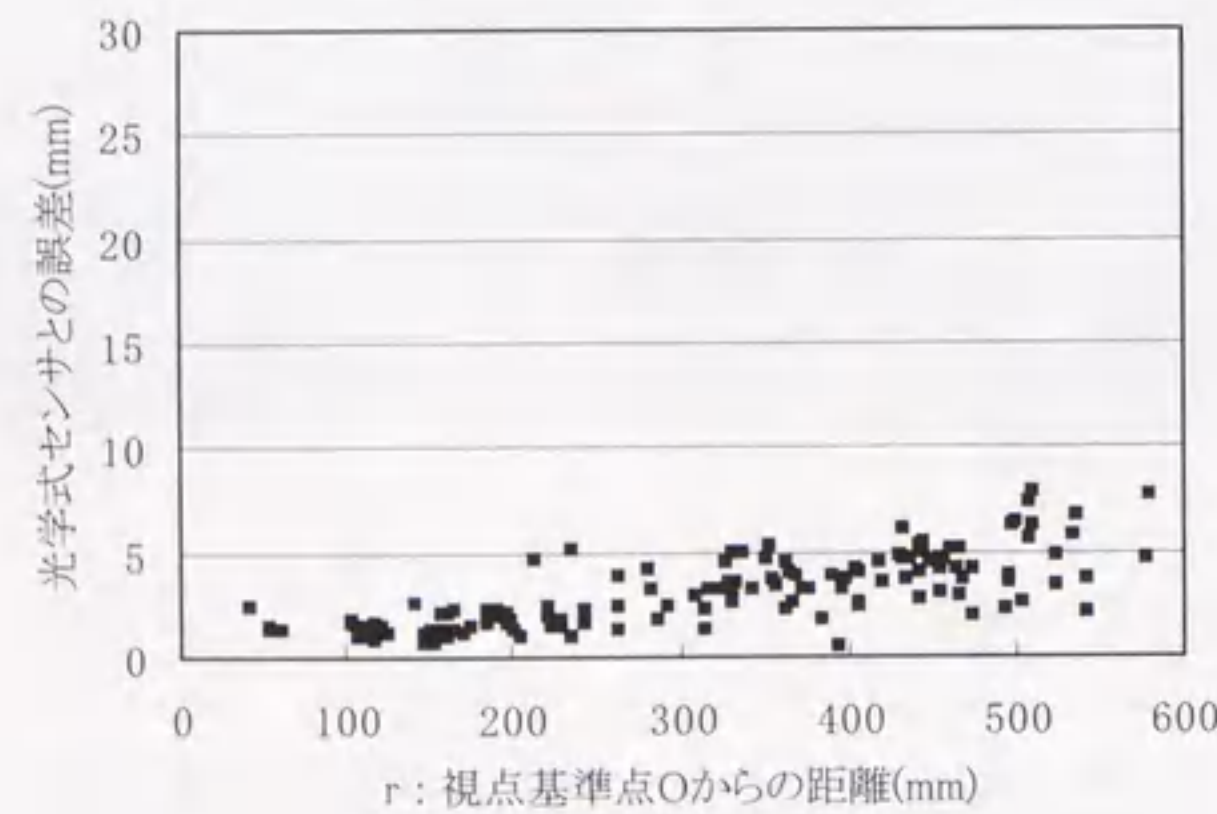
t is the range which mixes matrix A1 and A2. ($t=100\text{mm}$)

図6-4 変換行列の作成

このアルゴリズムによる補正の効果を図 6-5, 表 6-1 に示す. 融合しない場合, 7 mm 以上あった誤差が半分以下の 3 mm 程度までに改善されていることがわかる.



(a) 単一の行列で変換した場合



(b) 融合した行列で変換した場合

図 6-5 融合行列 A を用いる効果

表 6-1 補正後の光学式位置センサとの誤差の平均値

	領域		
	視点付近	ペン先付近	全体
A1のみ使用	1.612	10.692	7.534
A2のみ使用	13.368	3.816	7.138
A	1.612	3.799	3.038

(単位:mm)

6.3 実空間と仮想空間の対応付け(B)

本システムは自動車の内装デザインを主題にしているため, 実空間と仮想空間の両座標系において, 唯一座標値が定義されているのはシートの位置のみである. そこで, これを基準に両者間の座標の対応付けを行う. 実際にはより扱いが簡単なスクリーン面 (シートからの相対位置として唯一に求まる) を基準とする. 両座標を変換する行列はスクリーン面を基準にして次のように定義される.

まず, 仮想座標系はスクリーン面中心を原点とし, スクリーンから観察方向手前に向かう法線方向, 水平方向, 垂直方向に X,Y,Z の正規直交座標系を取ると定義する. この時, スクリーン上の投影面は X=0 の平面となる. 次に, スクリーン上に CG による 100mm 間隔の水平, 垂直なグリッドを表示し, それを光学式位置センサで計測する. これの計測より水平軸 Y, 垂直軸 Z は計算でき, 残る法線方向軸 X はそれらの外積ベクトルとして求まる. こうして作成された仮想空間座標系と先程の実空間座標系とを変換する 4 × 4 行列を作成しておき, 実空間から仮想空間への座標変換を行う.

6.4 奥行き誤差の補正の適用(C)

ここまでの変換が誤差無く行われれば観察者は正しい立体感を得るのだろうが, 実際には前述の理由などから奥行き感に誤差が生じている. そこで最後に第 5 章の手法を用いて奥行き知覚に生じているズレを補正し, 正しい奥行き感を与える画像を生成する.

システム利用時には、補正パラメータ導出用の実験を行う。経験的に、数十点、時間にして5分程度のサンプルの計測が必要になる。得られたズレ量のサンプルを基に補正量は自動的に計算され、ステレオ画像に反映される。

6.5 おわりに

取り扱いの容易さから VR システムで一般的な入力装置として用いられることの多い磁気式位置センサには、リアルタイムでの計測が得意である一方、計測値に大きな誤差や歪みが生じる問題を抱えている。また、立体視特有の問題などから正確に作成したはずのステレオ画像でも正しい立体感が得られるとは限らない。

そこで、これらの問題を解決しデザインに適した仮想空間を構築するための手法について提案し、実装した。従来の VR システムでは、AとB (図 6-1) の補正のみを行うことが多いが、本システムでは知覚特性を考慮してステレオ画像生成時のパラメータの最適化を行い、より精度の高い立体表示環境を実現している。本章で述べたこれらの各補正過程を経ることにより、最終的にペン先と知覚される描画位置とが 5mm 以内程度で一致する環境を構築することができた。

第7章 触覚付加による作業支援効果の可能性

7.1 はじめに

究極的な VR 環境を目指すのであれば視覚以外の他の感覚、触覚や聴覚などの人工的な提示方法を模索していくことも重要である。特に、スケッチという作業を考えてみると、描く道具として鉛筆を使うか筆を使うかということによって絵のタッチが変化し、紙の材質によっても表現のしやすさが左右されることから紙とペンとが接触する際の触感がその作業に少なからず影響してくることがわかる。

空間スケッチシステムが従来のスケッチと大きく異なる点に、支えの何も無い空間中でペンを動かし描くという入力方法から、紙に描きつけるような感覚が得られないというものがある。これは従来の2次元的な制約を取り払ったという利点がある反面、接地する場所、支えになる場所が無く自由度が大きすぎるために、手が疲れたり線が乱れたりといった欠点にもなりうる。何らかの物理的な拘束条件を付加することによりその操作性が向上する可能性がある[48]。

触覚（ここでは特にスケッチの場合を想定してペンが紙に接触した際に受ける力覚）を仮想的に与える研究についてはこれまでも幾つかなされている（例えば[49][50][51]）。Haptic Display 技術と総称されるこれらの力覚提示装置のうち、いち早く商用化されたものは SensAble 社の PHANTOM[52]である。

PHANTOM はアームにペン（スタイラス）が取り付けられたかのようなインタフェースを有しており、6自由度で動くスタイラスの情報($x, y, z, yaw, pitch, roll$)をアームの状態から読み取ることができる。また、制御用コンピュータより提示したい力の向きと大きさを与えることにより、アームを通じてスタイラスに任意方向(x, y, z)の望む力を発生させることができる装置である。これを用い、仮想物体の位置とスタイラスの移動方向をリアルタイムに計算して、進行方向に物体が存在すればそれ以上進めないような適切な反力をこの装置より提

示することにより、実際には存在しない物体に触れる感覚を得ることもできる。

2.3 で人は外界からの情報の 80%近くを視覚に頼っていると述べたが、目に見えない現象を視覚情報から得ることは当然できない。従来は力の大きさや流れといった不可視の現象を理解するためには、現象を数値化し、そのデータを何らかの手法を用いて CG 等で可視化するという方法がとられてきた。しかしながら、直接それらを感じることができ可触化という技術があればより直観的にそのままの現象を理解することができるはずである。あるいは産業分野を想定し、仮想世界での部品組み立て訓練システムに力覚を取り入れることにより、視覚情報だけでは得ることができないその箇所にはめ込まれる瞬間が実感できる、より効果的な訓練が可能になる。

そこでこの章では、通常は目に見ることのできない分子中の原子の間に働くクーロン力を可視化し、さらに可触化をもするシステムの実現を通じ、力覚を付加することの有効性を検討する。その後、本空間スケッチシステムに力覚を取り入れる利点について考察する。

7.2 サイエнтиフィックビジュアライゼーション

物理現象や化学反応の数値シミュレーション結果を可視化することは、メカニズムをより容易に把握できることから有用である。例えば、イオン性の分子について反応性の解析や反応中心を予測する際には、分子のまわりの静電ポテンシャルに注目することが有効である。大型計算機により膨大な計算時間をかけ数値の羅列として出力される大量の解析結果は、人が一見して理解するにはあまりにも難しすぎるが、数値の大きさに応じて空間が色分けされた画像を作成したり、力の流れを示す線を分子構造に併せた画像を作成したりすることで、反応性の解析や反応中心の予測がしやすくなる。

サイエнтиフィックビジュアライゼーションはこのような計算科学における膨大な解析データを人がより容易に理解できるように可視化して提示する技術の総称である。なかでも CG を用いた様々な現象の可視化技術は、その映像表現による感覚的な分かり易さと観察方向などの各種表示が瞬時に切り替えられる扱い易さから市販の解析ツールにも取り入れられており計算科学の分野では不可欠の技術であると言える。

分子の反応性に関する様々な物理量の可視化にはこれまでも幾つかの手法が提案されている。例えば、静電ポテンシャルに着目した電氣的性質の観察を行いたい場合には、解析された電気力線や等電位面を分子構造に併せて画像表

示するという手法が一般的に用いられる[53]。ディスプレイに表示されるこれらの情報を観察することで、利用者は数値データの羅列よりも格段に容易に電場の性質を理解することが可能である。しかしながら、2次元であるディスプレイから本来3次元情報であるこれらの性質を読み取ることはある程度習熟した者でなければ難しく、より直観的に分かり易い可視化技術の登場が望まれている。

7.3 VR 技術を応用した計算科学

VR 技術をサイエнтиフィックビジュアライゼーションに応用した例としては立体視を用いた分子構造や各種シミュレーション結果の3次元表示が第一に挙げられる[54][55][56][57]。これらは CG と立体視技術を用い映像を直接空間中に表示することで、3次元的に入り組んだ構造や性質を立体的かつ直観的に利用者に知覚させることを試みている。また少し趣が異なるものに、可視化に数値データの可聴化を加えることで局所的な情報は視覚から得て大局的な情報は聴覚から得ようとしている試みもある[58]。しかしながらこれらのようなシステムで得られる情報は不可視の情報がある種の変換規則に従って可視化、可聴化しただけであり、もともと力として存在している現象をより簡単に理解するためには、直接触れて実際に体感することが有効である。

ここで提案するシステムは、VR 技術を応用した直観して理解可能な新しい計算科学のツールであり、立体視だけではなく体感をも可能とする環境の構築を目指す。分子のまわりに働くクーロン力を題材とし、立体視により電気力線などを3次元的に観察できるだけでなく、電場に仮想的に置いた電荷が受ける力を実際に体感することが可能である。システムは一般的なパーソナルコンピュータに市販の立体視装置と力覚提示装置から構成される。シミュレートされたクーロン力を実際に感じられるインタフェースと幾つかの表現手法が組み合わせることで、3次元的な電場の性質を利用者は仮想的に体感することができる。そのため、分子の電子構造についての高度な知識が無くとも分子内の電子の偏りを直観的に理解することが容易である。また、リアルタイムでの対話操作を重視することで利用者が参加しながら分子の静電場の大きさなどを興味深く体験することができるシステムとなっている。

7.4 クーロン力体感システム

本システムで扱う分子に存在する性質は帯電した原子からのクーロン力であ

る。利用者の指示する 3 次元位置に荷電粒子を仮想的に配置し、その点電荷にかかる電場からのクーロン力をリアルタイムでシミュレートすることにより様々な表現を行い、利用者にその力を体感させる。システムは大きく分けて可視化部と可触化部の 2 つの処理から構成されている。

可視化部では Ball-Stick モデルの分子構造と併せて、数値計算した電位や電気力線を CG で表示する。この際、映像は立体視により 3 次的に空間に立体表示される。また、アニメーションによる荷電粒子が移動していく様子のシミュレーション結果や、原子の持つ有効電気量の情報表示、分子構造の観察方向の変更などもここで処理する。一方、可触化部ではクーロン力をリアルタイムで計算し、力覚提示装置によって利用者に適切な力を感じさせる処理を行う。図 7-1 に試作したシステムの概観を示す。



図 7-1 クーロン力体感システム

クーロン力のシミュレーションと CG の作成や力覚提示装置の制御等を行うコンピュータは一般的な Intel 製 CPU を搭載した WindowsNT マシンであり、開発環境は表 7-1 の通りである。VR デバイスとなる立体視装置と力覚提示装置以外は極力一般的に用いられている物を選び、科学教材や解析ツールの一つとして利用しやすい物を目指した。使用した VR デバイスもすべて市販品であるため、入手は比較的容易である。立体視装置には Stereo Graphics 社製 Crystal Eyes[59]を用い、液晶シャッターメガネによる両眼立体視方式での立体視を行う。

力覚提示装置としては SensAble 社製 PHANTOM Desktop[52]を使用した(図 7-2)。

本システムの利用者は PHANTOM のペンを持ち、ペン先に取り付けられたボタンやコンピュータのマウス、キーボードを用いて様々な対話操作を加えながら電場の性質を体験する。以下では本システムが有する機能とその実現方法について述べる。

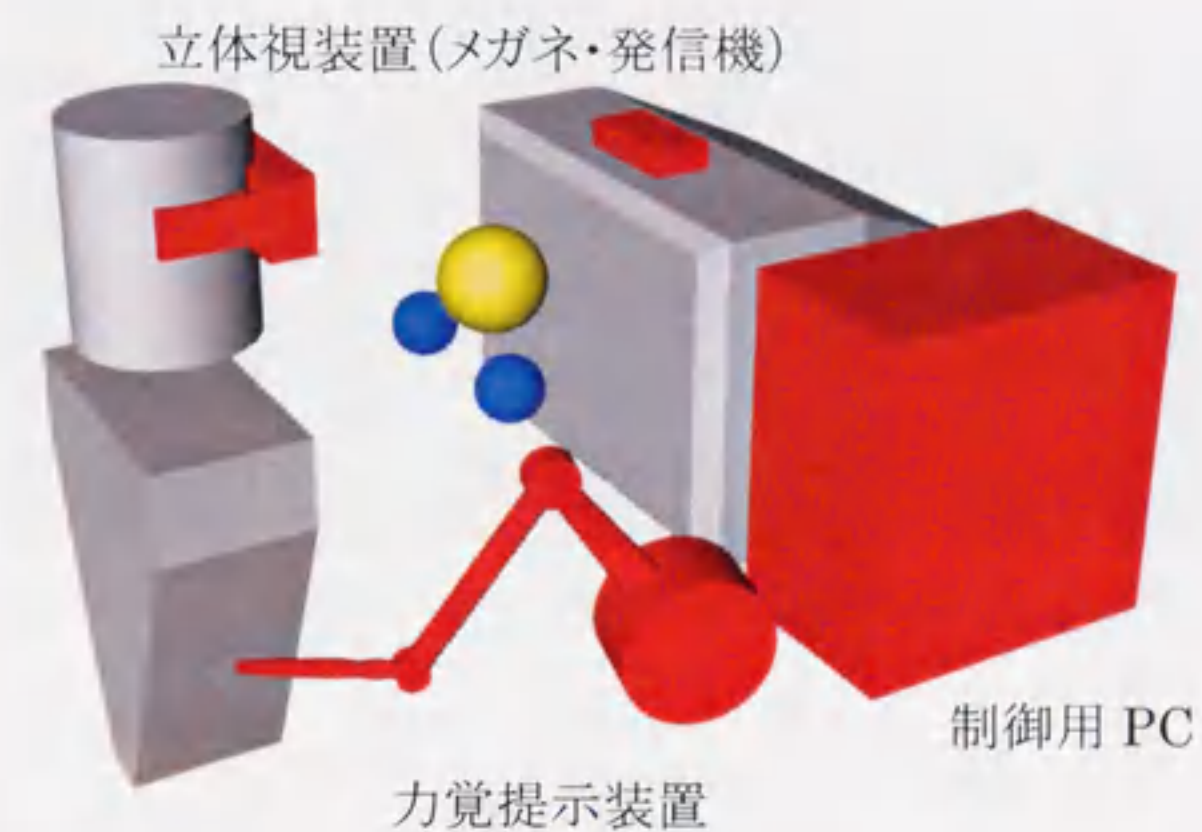


図 7-2 システム構成

表 7-1 試作システム開発環境

開発環境	
OS	WindowsNT4.0
CPU	Intel PentiumIII 450MHz
Graphics Chip	nVIDIA GeForce256
Memory	128MB
開発言語	
	Visual C++ 6.0
使用ライブラリ	
CG 作成	OpenGL
PHANTOM 制御	GHOST SDK 3.0

7.5 可視化部における処理

7.5.1 分子モデルの表示

今回のシステムを試作するために必要な分子のまわりの静電ポテンシャルは以下の手順で計算されたものを使用する。まず、*ab initio* 分子軌道法計算により静電ポテンシャル(ESP)を計算する。次に、この ESP に合わせるように各原子の位置の点電荷を CHelp の方法によって決定する[60]。数値シミュレーションの結果は、分子を構成する各原子の3次元座標値と原子が持つ電荷のデータ列としてファイルに保存される。システムは起動時にそれらを読み込み、可視化部と可触化部のそれぞれのプロセスで利用する。

可視化部では分子を画面の表示域に合わせて適切な大きさに拡大して Ball-Stick モデルで表示する。具体的には、1Å が画面上で 1cm 程度とされる程度に拡大する(正確には立体視を行っているので空間上で 1cm に知覚させる)。この際、目安として 1Å のものさしを補助的に画面に表示しておくことで現在のスケール感を表現する。

また、原子間の結合を示す棒を以下の条件を満たす箇所に表示する。

$$R_A + R_B + C \geq |P_A - P_B|$$

ここで、 R_A, R_B はそれぞれ原子 A, B の共有結合半径(Å)、 P_A, P_B は原子 A, B の座標値(Å)である。C は経験的に求めた定数であり、ここでは 0.05 とした。

原子の色や大きさは標準値を設定しているが、補助的に原子の持つ電気量に応じた色(正:黄←灰→紫:負)で表示することも可能である。また、大きさは共有結合半径を基準とし、キー操作によって利用者が変更できるようにする。さらにマウス操作によりモデルは回転、拡大、縮小され、利用者は自由な方向から分子構造を観察することができる。

図 7-3 に分子モデルの表示例を示す。図はグリシンエステルの金属錯体を Ball-Stick モデルで表示した例である。原子の名前と電気量があわせて表示され、画面隅に 1Å を表すものさしが表示されている。

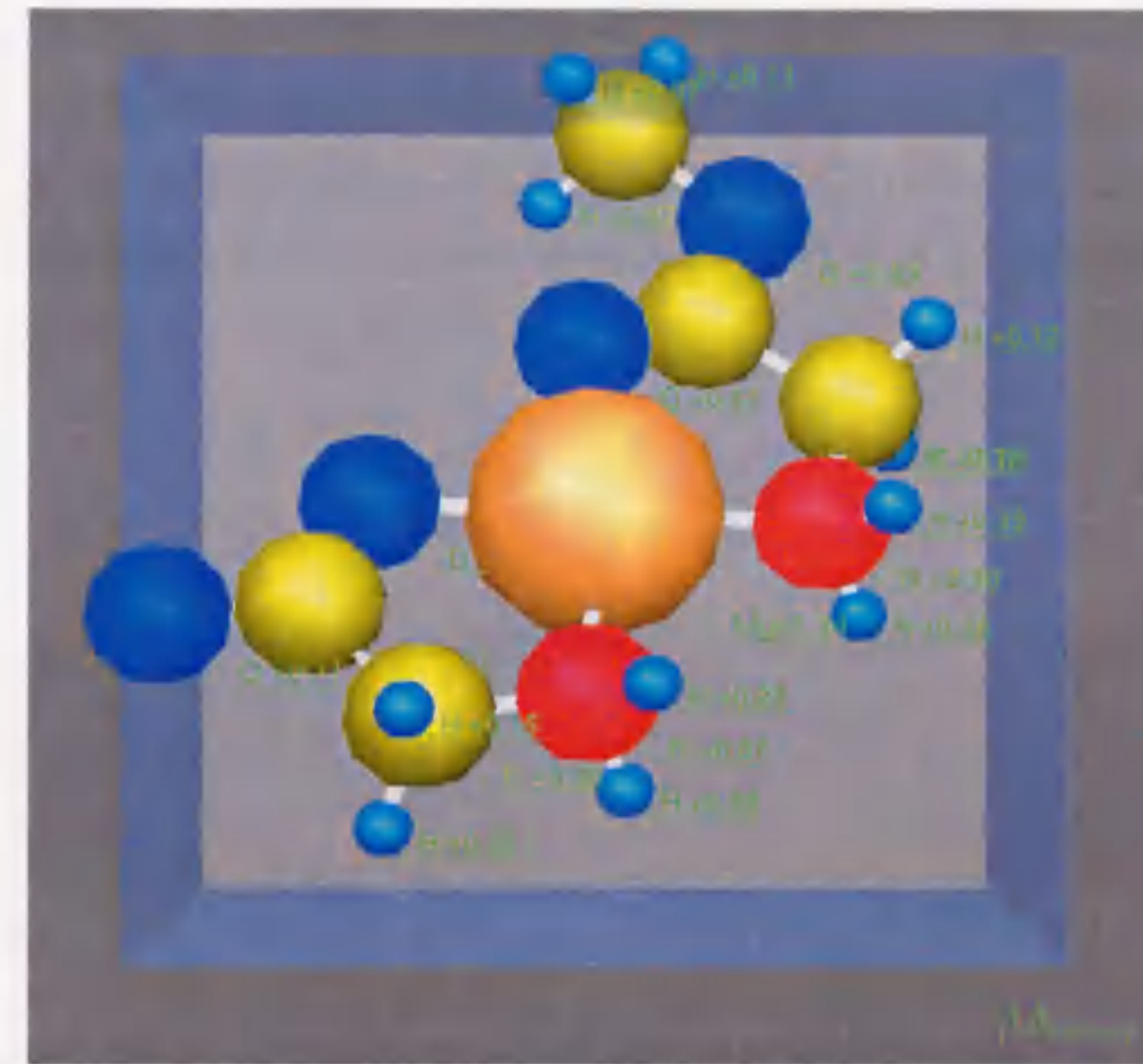


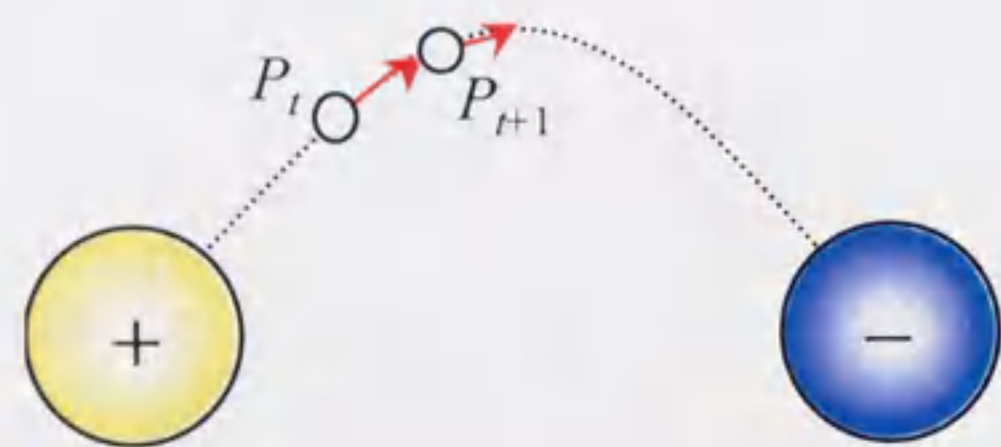
図 7-3 分子モデルの表示例

7.5.2 電気力線の表示

すべての正に帯電した原子の球面上にランダムに配置した複数の点を起点として電場を計算し、電気力線として描画する[53]。原子球面上に置かれた仮想点電荷は電場からのクーロン力を受け微小時間後にはある位置に移動する。この移動の軌跡をすべてつなぎ合わせたものが1つの電気力線となり、これを配置したすべての点について計算することで電気力線が作成される。図 7-4 にここで用いたアルゴリズムを示す。

各原子球面上に配置する起点の数はそれぞれの原子が持つ電気量に比例させ、比例定数は利用者がキー操作により変更できるようにした。原子球面上の起点がなるべく均等に配置されるよう、初期位置として球を近似する正多面体の頂点をランダムに選択する。ここで用いた多面体は正三角形で構成される正 20×4^3 面体であり、これは正 20 面体を再帰的に細分化していくことで得られる[61]。ここで、あまりに多量の電気力線を一度に画面に表示すると立体視環境下でさえもその状態の把握がしにくくなるため、任意の原子から出る力線のみを表示する機能を付加してその電場の状況を見やすくする。また、電気力線の

計算にはすべての起点に配置した仮想電荷について全原子より受けるクーロン力を微小時間づつ計算していかなければならないという比較的多量の計算時間が必要となるため、現状のコンピュータ性能では常に計算しながらリアルタイムで表示することは難しい。そこで、初回の計算時に同時にメモリ上のテーブルに計算結果を保存しておき、次回からはテーブルを参照して計算せずに表示のみ行うことで計算時間の短縮を図った。



Initial stage

$P_0^{(j)}$ = position somewhere on surface of the i^{th} positively-charged atom, and it is the initial position of the j^{th} virtual charged particle.

Drawing procedures

Draw a segment ($P_{t+1} - P_t$).

$$P_{t+1} = P_t + dt \cdot E / |E|$$

where E is a vector of the electric field, dt is a suitable tiny constant.

Termination condition

When the particle reaches some minus-charged atom, or it exceeds some distance from the center of the molecule.

図 7-4 電気力線の描画アルゴリズム

図 7-5 に電気力線の表示例を示す。図はホルムアルデヒドの電気力線を表示した例である。掲載した図では線が入り組んでその構造がわかりづらいが、実際には立体視により 3 次元的に観察できるために電場の状態を確認することが容易である。

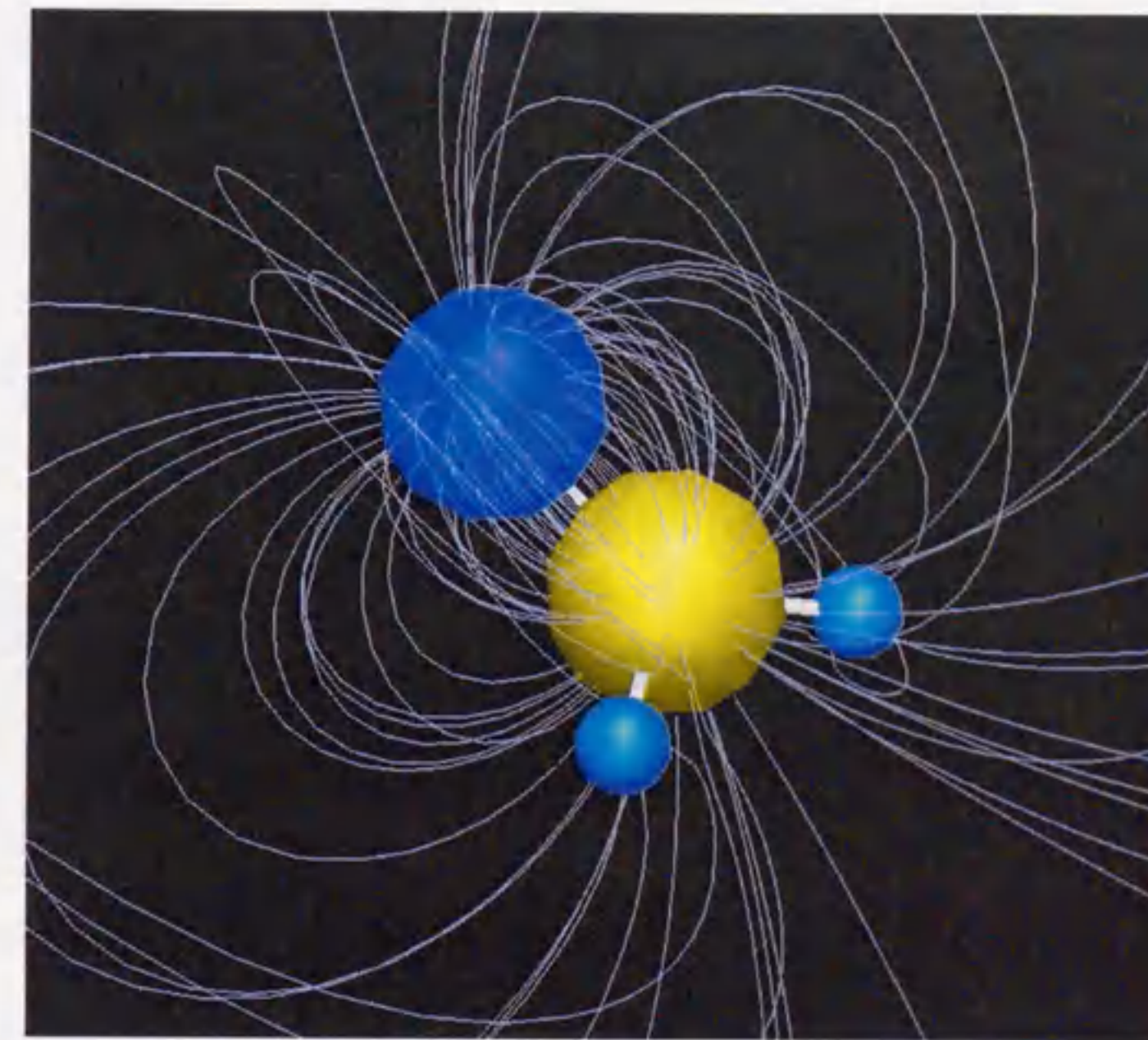


図 7-5 電気力線の表示例

7.5.3 3次元モデルの立体表示

これらの表示は全て両眼立体視を用い、利用者に立体的に知覚させる。そのためには、観察者の視点を頂点とし、ディスプレイ面の四隅を通過する四角錐として定義される視体積をディスプレイ面上に射影したステレオ画像を作成する必要がある。

第 5 章で述べたように、正確な奥行き感を与える画像を作成するためには視点の位置をリアルタイムで計測して画像に反映させる必要がある。しかしながら、このようなシステムの利用目的であれば、正確な立体感を与えるのが主題ではないためにそれにこだわる必然性は無く、むしろ簡単に立体感が得られ、疲労が少ない映像のほうが利用者にとっては好まれる[62][63]。

そこで、ここで用いるステレオ画像は、利用者の瞳孔間距離が平均的な 65mm、視点がディスプレイ中心から 50cm 離れた位置から観察していると仮定して作成する。

作成された左眼と右眼用のステレオ画像は立体視装置によってディスプレイ上に交互に表示される。それに同期して発せられる赤外線信号により立体視メ

ガネの液晶シャッタが交互にシャッターリングされ、対応する画像のみがそれぞれの眼に映ることで両眼立体視が成立する。

7.6 可触化部における処理

7.6.1 クーロン力の力覚提示

ペン先に $\pm 1e$ (電気素量) の点電荷があると仮定して、ペンの位置に存在する仮想電荷が電場より受けるクーロン力をリアルタイムで計算して力を提示する。

ある座標 p における q の電気量を持つ点電荷が電場から受けるクーロン力 F は、電場を構成する n 個の原子 (分子を構成する i 番目の原子の座標は P_i , 電気量は Q_i) を用いて次の式から計算される。

$$F = k \sum_i^n \frac{q \cdot Q_i}{|p - P_i|^2} \quad (k: \text{比例定数})$$

ここで、比例定数 k は通常 $9.0 \times 10^9 \text{ [N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2]$ と置かれるが、そのままでは小さすぎて体感できない。そこで、本システムでは真空中に2つの $1e$ の帯電体が 1\AA 離しておかれたときに働く力が 1N となると定義して k を設定する。すなわち、 k は $1[\text{N} \cdot \text{\AA}^2/e^2]$ とした。計算された力 (ベクトル) は力覚提示装置に即座に送られ、適切な大きさと向き of 力を発生させる。この際、点電荷と引力の働く原子との距離が近くなりすぎると装置が許容する以上の力を加えることになるため、力の大きさが上限値を越えた場合には上限値の力を発生させることとした。

7.6.2 原子球面の可触化

原子球面より内側にペンが入り込もうとする際には、それを相殺する反力を計算し、クーロン力に加算して発生させる。結果的にペンは原子球面上で止まるため、利用者は分子模型に触るように原子球面を実感することができる。

7.7 対話操作の付加

仮想体験しているという感覚をさらに利用者を与えるためには、対話操作を重視して利用者を仮想環境へ参加させることも重要となってくる。そこで、以

上の基本機能に様々な対話操作を付加し、より興味深い体感ツールとなることを目指す。

7.7.1 荷電粒子の移動アニメーション表示

静的なあらかじめ計算された電気力線だけでなく対話的に配置できる荷電粒子らの移動する様子を動的に表示することで電場の状態を表現する。

仮想的な $\pm 1e$ の荷電粒子が、利用者のボタン操作により任意の3次元座標に置かれる。リアルタイムで更新される画像の更新タイミングに合わせ、荷電粒子らは電場から受けるクーロン力の影響に応じて現在の座標から次の瞬間の座標へと移動する。この際の移動方向はクーロン力が働く方向であり、移動量はクーロン力の大きさと前回更新時からの経過時間の積となる。

図7-6に移動アニメーションの例を示す。図中の線分が対話操作により発生した仮想的な荷電粒子のアニメーション中の軌跡である。この次の瞬間、全ての粒子は残像を残しながら移動してゆく。



図7-6 荷電粒子のアニメーションの例

7.7.2 断面における静電ポテンシャルの可視化と可触化

分子を横切る断面を作成し、その平面上での静電ポテンシャルとクーロン力の可視化、可触化を行う。この機能を選択すると、利用者が決定する任意の平面が画面内に作成され、ペンの動きはその仮想平面上に拘束され2次元的なものになる。平面上でペンのボタンを押しながらドラッグすることで、その任意断面上の静電ポテンシャルの状態をインタラクティブに体感することができる。

図 7-7 にこの機能の実行例を示す。図中赤紫は負の、黄色は正の値を示す箇所、ドラッグ時のカーソル位置の静電ポテンシャルに応じた色で塗り分けられている。平面に拘束する力とクーロン力とを同時に提示するため、強く引きつけられる箇所が赤紫色に着色され、反発する箇所が黄色になる様子を視覚と触覚の両方から同時に感じることができる。この際、カーソルは平面に拘束する力により物理的に平面上しか動かすことができない。

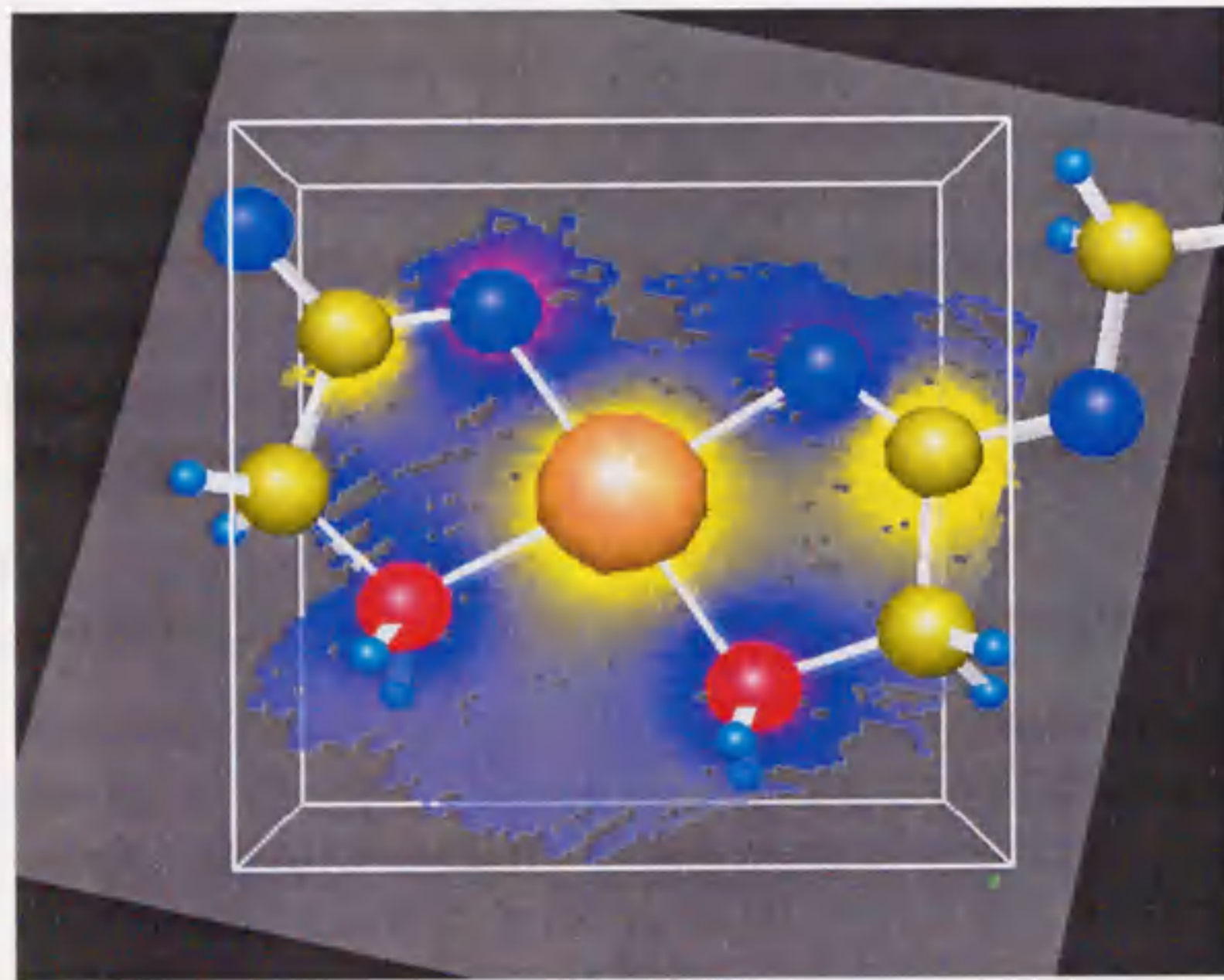


図 7-7 対話操作による静電ポテンシャルの表示

7.8 考察—力覚の効果

アプリケーションに力覚を取り入れることにより、視覚のみと比較してより直観的にその世界を理解することが可能になる。例えばこのクーロン力体感システムの場合、電気力線やポテンシャルに応じた色分けによりどこで強いクーロン力が発生するかは一目でわかるが、実際に体感することによりそれは見ずとも明らかになる。

さらに本システムでは、カーソルの移動方向を物理的に制限して意図的に自由度を減らすということも試みている。クーロン力は3次元ベクトルで表される力であるため、その力を体感するためにはそのような制限は本来不必要である。しかしながら、意図的に自由度を減らすことにより利用者は力の大きさをより感じやすくなる。例えば、斥力を感じようとしても通常はペンがいなされるような動きをしてしまうためにその大きさを感じる事が難しい。しかしながら、2次元に拘束することで平面的な反発する力のみになるためにそれが感じやすくなる (図 7-8)。

仮に現実的にクーロン力が体感できたとしても、このような制限を加えて体感することは難しい。このような現実には無い仮想的な状態を作り出すことができる点は VR 技術を用いる利点のひとつである。

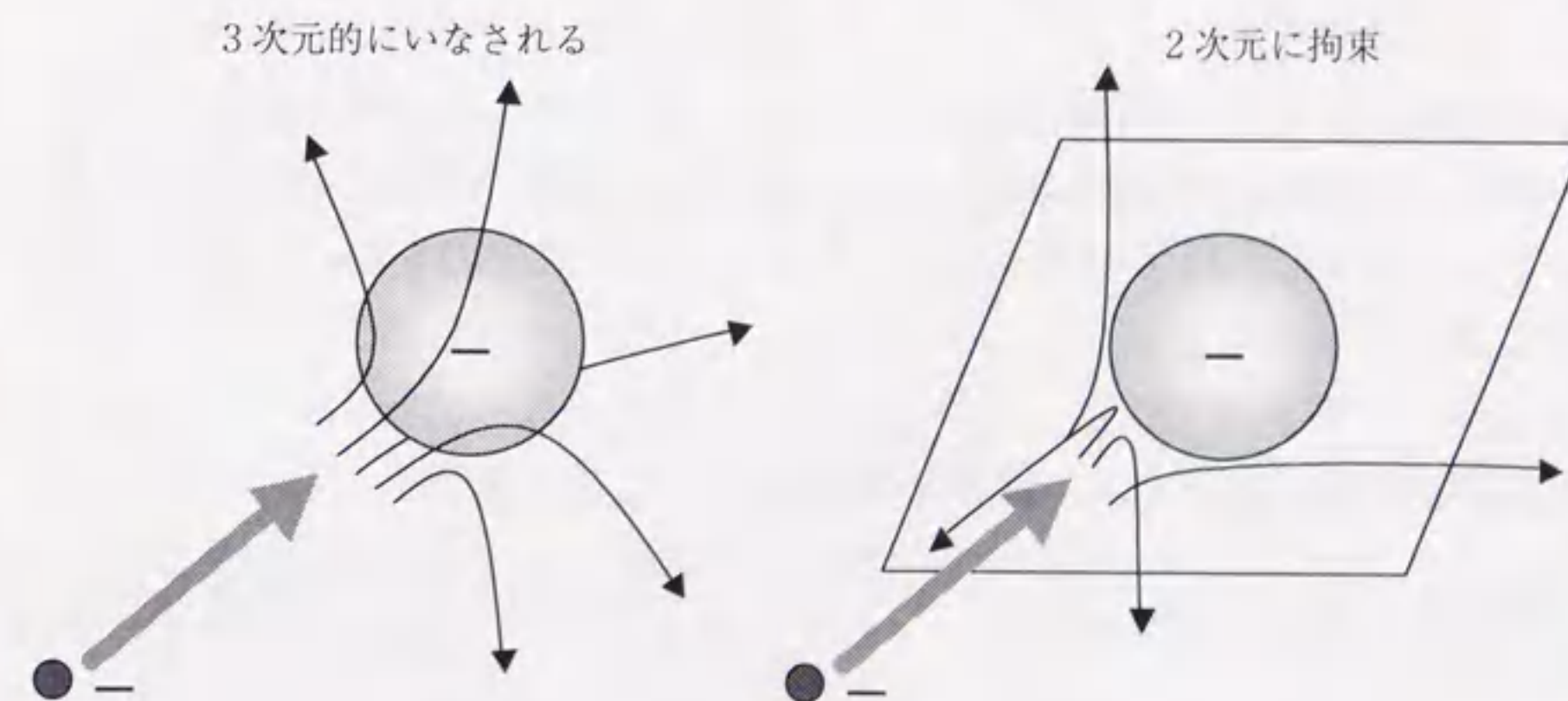


図 7-8 斥力の体感

7.9 クーロン力体感システムのまとめ

視覚と触覚を同時に使い分子の世界の性質を仮想的に体験して理解することが可能なクーロン力体感システムの実現について述べた。システムは一般的な PC と VR デバイスである立体視装置と力覚提示装置から構成され、分子構造や電場の状態を空間中に立体表示して3次元的に可視化し、シミュレーションによる適切な力を力覚提示装置から発生させることでクーロン力を可触化する。本システムは利用者が仮想環境に参加できる対話操作も重視していることから、教育分野における興味深い科学教材として活用ができ、サイエンティフィックビジュアライゼーション分野における新たな可能性を持つ解析ツールとなることが期待できる。

このような体感システムを構築する際には、人が現実であると錯覚する処理速度が視覚と触覚によってそれぞれ異なることも考慮しなければならない。一般的に、視覚には 30Hz 程度の更新速度、触覚には 1000Hz 程度の更新速度がなければ不自然さを強く感じるという[64]。そこで本システムでは、可視化部と可触化部の二つの処理部分をそれぞれ独立のプロセスとして動作するように設計し、高速な動作が必要な可触化部ではクーロン力のシミュレーションのみを行いこの更新速度をなるべく満たすようにしている。このような理由から本来なら 2CPU での処理が望ましいのだが、今回用いた程度の分子構造データ（原子核 30 個程度で構成）による可視化と可触化であれば、1CPU システムである表 7-1 に挙げた本試作システムのスペックでも十分実用的な動作速度が得られた。

今後の課題としては、計算能力の乏しい PC ではリアルタイムでの表現が難しい外界からの影響により電場が乱された際の電気力線の動的変更や、分子に存在する他の様々な力の可触化や新たな表現手法などの模索を含めた検討が挙げられる。

7.10 空間スケッチシステムに望まれる力覚

この章のまとめとして、空間スケッチシステムに望まれる力覚の種類について考察してみる。

まず現実のスケッチ時に存在する力覚としては、以下のようなものが挙げられる。

- 1) 紙と筆との摩擦による力覚
- 2) 筆圧による力覚
- 3) 定規やテンプレートによる力覚

これらは絵を描く上での様々な手がかりとして使われる要素である。

紙と筆との摩擦による力覚は、線の引きやすさに影響してくる。例えば、ガラスのような摩擦の少ないものに鉛筆で鋭角に曲がる線や細かな模様を描こうとしても、鉛筆がすべり過ぎるために思い通りの線を引くことが難しい。さらに、手を机などに乗せず浮かせた状態で筆を使い真っ直ぐな線を引くことも、支点となる場所が無いために容易ではない。

筆圧による力覚は絵に表情をつけるために使われる。筆を紙に押し付ける際の力加減により線の太さに強弱をつけることで、細やかな線や力強い線を表現することができる。

また、定規やテンプレートを用いることで、正確な直線や決まった曲率を持つ滑らかな曲線を引くことができる。

スケッチを3次元に拡張したものとして位置付けられる空間スケッチシステムでも、これらの力覚を3次元に拡張したものが提示されれば、同じような利点が享受されると考えられる。次に、これらの力覚を3次元空間で表現する場合の手法と、VR の利点を生かした仮想スケッチ特有の力覚について提案する。

7.10.1 紙と筆との摩擦による力覚

スケッチの紙に対応するものは空間スケッチシステムでは空間であり、もともとペンと接触するという概念が無い。しかし摩擦による力覚を、線の引きやすさを得るための手がかりであると考えれば、別な種類の力覚を提示してそれを与えることも可能である。

空間スケッチでは自由度が高すぎる上に、どこにも接触する機会が無い。作業中は空中で手を動かさなければならないために、疲れやすく線も不安定になりやすい。そこで、空間に若干の粘性があるかのような力覚を描画時に与えることで摩擦の代わりとする。描画時にわずかな抵抗が加わることで、まったく抵抗の無い時と比較して、2次元のスケッチと同じ理由から細かい描画や安定した線の引けることが期待できる。

7.10.2 筆圧による力覚

この力覚も紙に相当するものが存在しないためにそのまま表現することは

きない。しかし、線や面の強弱を表現するためであれば次の2種類の方法が考えられる。

ひとつは、ペンの移動速度により表現する方法である。スケッチの筆圧が高い時は紙との摩擦が大きくなるために移動量が少なくなるはずである。また、低いときはラフスケッチをしている状態であり移動量は比較的多くなる。そこで、その移動量に応じて線や面の強弱を変化させる。移動量に応じた表現の変化は既に試作したシステムにおいて実現しているが、さらに、移動量に応じた粘性を与えてやることにより、筆圧による力覚を表現することができる。

もうひとつは、仮想の面を定義し、その平面上でスケッチする方法である。面には紙と同じような摩擦を設定し、その面とペンとの位置関係により適切な反力を与えてやることで筆圧による線の強弱が表現できるようになる。この方法は従来のスケッチと同様の感覚で絵が表現でき直観的であるという利点があるが、3次元空間を用いる利点は減少する。

7.10.3 定規やテンプレートによる力覚

これらはそのまま3次元でも表現することができる。線に拘束するような力覚や3次元テンプレートに沿うような動きのみに拘束する力を発生させることで実現可能である。定規は線だけではなく面も設定することができ、ある曲率を設定した曲面を用いることも可能である。他にも仮想スケッチ特有のテンプレートとして、グリッドに合わせやすくなるような力覚を発生させることで、幾何学的に整った図形を作成させることもできる。

7.10.4 仮想スケッチ特有の力覚

以上は従来のスケッチを踏襲した力覚の提示方法であるが、仮想スケッチ特有の力覚も幾つか考えられる。

ひとつは、今まで描いた仮想線、面との接触時に多少の抵抗を与える力覚である。これは整った形状を作成する場合に有効であると考えられ、特に清書時において望まれる力覚である。

次に、線の密集度に応じてその周辺を移動する際の抵抗を変化させる力覚を与えることも挙げられる。ラフスケッチにおいて線が密集しているということは、そこに候補と残しておきたい線がある確率が高いことを意味する。そこで、その周辺では粘性を上げることでより安定した線を描きやすくさせることができると考えられる。

他には、清書時の形状の修正時に力覚を与えることも考えられる。例えば、

面の修正をする際に微妙な修正のみを行いたいのであれば、特徴点の移動時の抵抗を大きくし、大幅な移動量が入力されないようにするということが可能である。

これらの力覚は単独で発生させるのではなく、組み合わせて用いることで新しい効果が得られることが期待される。

7.11 おわりに

本章では触覚を取り入れた場合のデザイン作業に及ぼす効果を検討するために、クーロン力体感システムの実現を通じて力覚提示することの効果とデザイン作業支援の可能性を考察した。

視覚情報だけではなく触覚情報も提示することはより直観的な理解を促す上で重要である。また、3次元での自由すぎる操作は転じて安定性の無い操作になりがちであるために、力覚を使いある程度の制限を設けることにより安定性を高めてやることも必要である。

そこで従来のスケッチにおける力覚の効果を検討し、それを空間スケッチシステムで実現するための手法について提案を行った。この実装にはまだ幾つかの問題点がある。

ひとつには提示装置の問題がある。直観的で使いやすいデザインシステムを目指すのであれば、ペンと作業空間は一致していることが望ましい。しかしながら、現状の力覚提示システムはその構造上の問題から設置する場所が制限されるためにオクルージョンの問題が発生しやすい。スクリーン投影式の立体視を使うのであれば装置が極力視界に入らないようにする必要がある。

もうひとつに処理速度の問題がある。触覚には1000Hzの更新速度が必要となるが、大規模なデータとなる形状データとカーソルとの衝突判定の計算や各種の力覚の計算には多くの処理時間が要求される。これはいずれコンピュータの性能向上に伴い解決する問題ではあるが、現状において実現するためには何らかの手段を講じる必要がある[65]。

第8章 考察

最後に、複数のデザイナーによる本システムの試行検証を実施したのでその結果を基に考察する。実験の参加者は自動車デザイナー 8 名であり、従来のモデリング CAD システムにある程度熟練した者が多い。

まずは、あるデザイナーによる試行時の自動車内装のデザインを例に考察を加える。図 8-1 から図 8-3 に例示したデータの作成に要した時間はラフスケッチに 3 時間程度、清書ステージで 1 時間程度であった。

図 8-1 はラフスケッチステージで作成された初期段階のスケッチである。紙面上では従来の紙を使った 2 次元的なスケッチのように見えるが、他の観察視点があることからわかるように実際には 3 次元空間で描いた立体形状である。本システムによって従来のスケッチと同じ感覚でアイデアを形にするだけでなく、同時に立体形状のスケッチが作成できることが確認された。

作業中、最も頻繁に行われた操作はサイズの拡大縮小や移動に代表される視点変更に関するものであり、続いて鉛筆と消しゴムツールの切り替え操作であった。専用のボタンやジェスチャに割り当てられたこれらの操作は、作業を中断することなく効果的に進められると好意的な意見が得られた。

このスケッチで興味深い部分は、平面ではなく 3 次元空間で作業しているにもかかわらずデザイナーは従来と同じように面上線を描いて立体感をつかもうとしていることである。このことに関して利用後に尋ねたところ、このシステムでは線が立体形状として観察でき、従来のスケッチでも面上線を見るだけで頭の中でおおよその立体感が把握できたために特にサーフェイススケッチを用いるまでも無かったという回答があり、それに慣れているデザイナーにとっては、サーフェイススケッチよりもラインスケッチの方が使いやすいという意見が得られた。逆に、そうでない者にとっては立体感が直接得られるサーフェイススケッチに可能性を感じるという意見も合った。サーフェイススケッチはこれまでにない新しいモデリング手法であるために、既に描き方を熟知している

線によるスケッチという手法をより好んだとも考えられる。

次に、図 8-2 にこれをベースに清書をしたデザインを示す。ここに挙げた最終段階の形状データは、本システムで清書した NURBS 曲線・曲面で構成される形状データを既存のモデリング CAD システムで読み込みさらに細部の数値的な調整を行ったものである。それを再度本システム上に読み込み立体表示し検討を行っている。

本論文で提案し試作した空間スケッチシステムは従来のモデリング CAD システムでは表現しづらいコンセプトデザインのためのデジタルツールである。そのため、精密な面の数値制御や高機能なモデリング機能は有しない。コンセプトデザイン以降の数値的に整った形状の作成といった従来の高機能な CAD システムが既に実現しておりそれらに適した作業については、既存のモデリング CAD システムに委嘱する。しかしながら、データを変換する機能を有するため、一方の変更を他方に反映させることは容易である。今回挙げた最終デザイン例はデザイン検討過程の初期段階に当たる物でありまだ細部まで作り込まれてはいない。実際に製品化するにはさらに精度を追求する必要があるが、これは本研究の目的とすべき課題の次の問題だと考える。

この試行実験の結果、従来のアイデアをスケッチしてからモデリングし、3次元形状を作成するまでの期間と比較して格段に短縮できることを確認した。また、クレイモデルに頼った立体検討ではその作成にかなりの時間を要するため、データを直接立体表示して検討に用いることができ、即座に変更できる本システムはコスト面、スピード面で共に有効であると考えられる。

この実験に参加したデザイナーらのアンケートからは、

- ・ 自分の想像するスタイルを直観的かつ短時間でデザインできる。
- ・ アイデアを出しながら細部のモデリングも行える。
- ・ 従来の CAD システムよりも作業スペースを広く自由に使える。
- ・ デジタルデータとしてアイデアを再活用できる。

等の点で新しいコンセプトデザインのためのデジタルツールとしての可能性を感じるという高い評価を得ることができた。

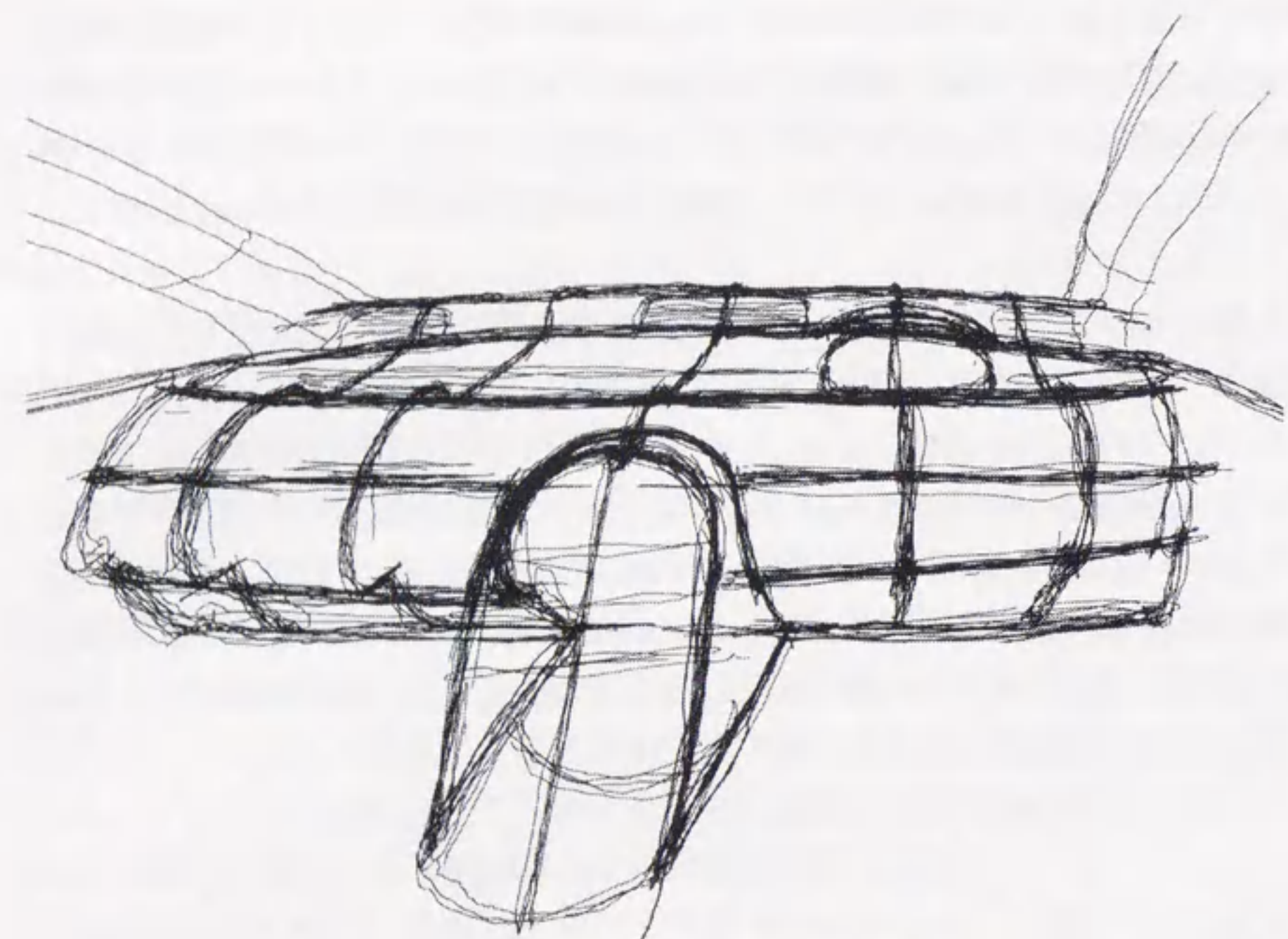
しかしながら、

- ・ 既存の CAD と比較してモデリングの機能や精度がまだ低い。
- ・ 立体視表示の精度を上げるための予備実験が若干煩わしい。
- ・ 装置が大き過ぎるために個人利用が難しい。

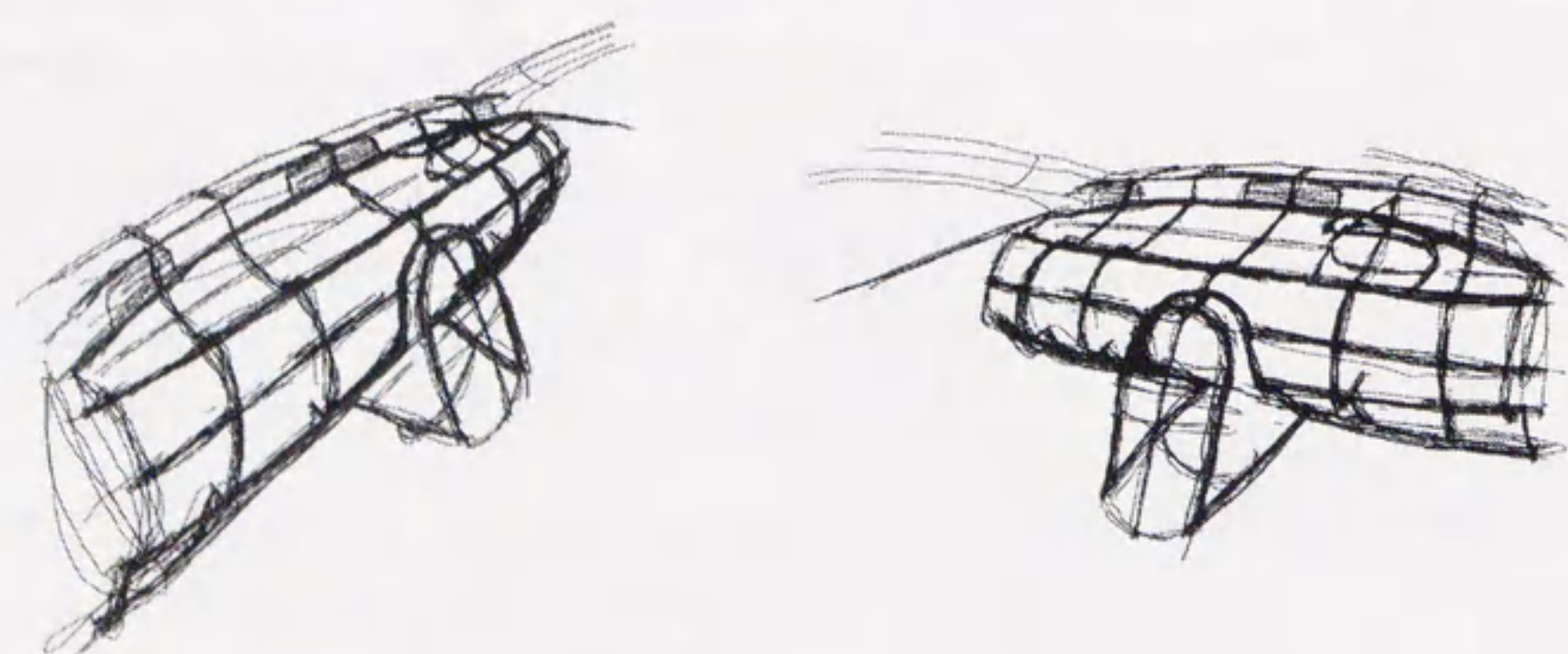
という意見もあり、まだ改善の余地は残る。

また、従来のビジュアルシミュレーション系アプリケーションの試行、評価は、物珍しさも手伝い初めは興味を持ち熱心に利用するがそれでも数十分で終了するのが通例だった。しかし本システムの場合、デザイナーが時間を忘れデザイン作業に没頭し始めるため、1名につき数時間が必要であったということも付記しておきたい。

さらに、本システムはデザインした自動車を仮想の街の中で走行させる機能も有する。最後にその例を図 8-3 に示す。従来のモックアップでは静止した状態のスタイルのみを評価することしかできないが、デジタルモックアップとすることで走行時の各種機器類の取り扱いの容易さや視認性、実際に街中をその車が走っている場合の印象についても検討することが可能である。また、仮想的に視点位置を調整することにより、平均的な女性と男性から見える視界の比較や、子供の視点で見た街の風景など、新しい観点での検討が加えられると期待できる。



(a) シート位置からの観察した例



(b) 他の視点からの観察例

図 8-1 初期段階のラフスケッチ

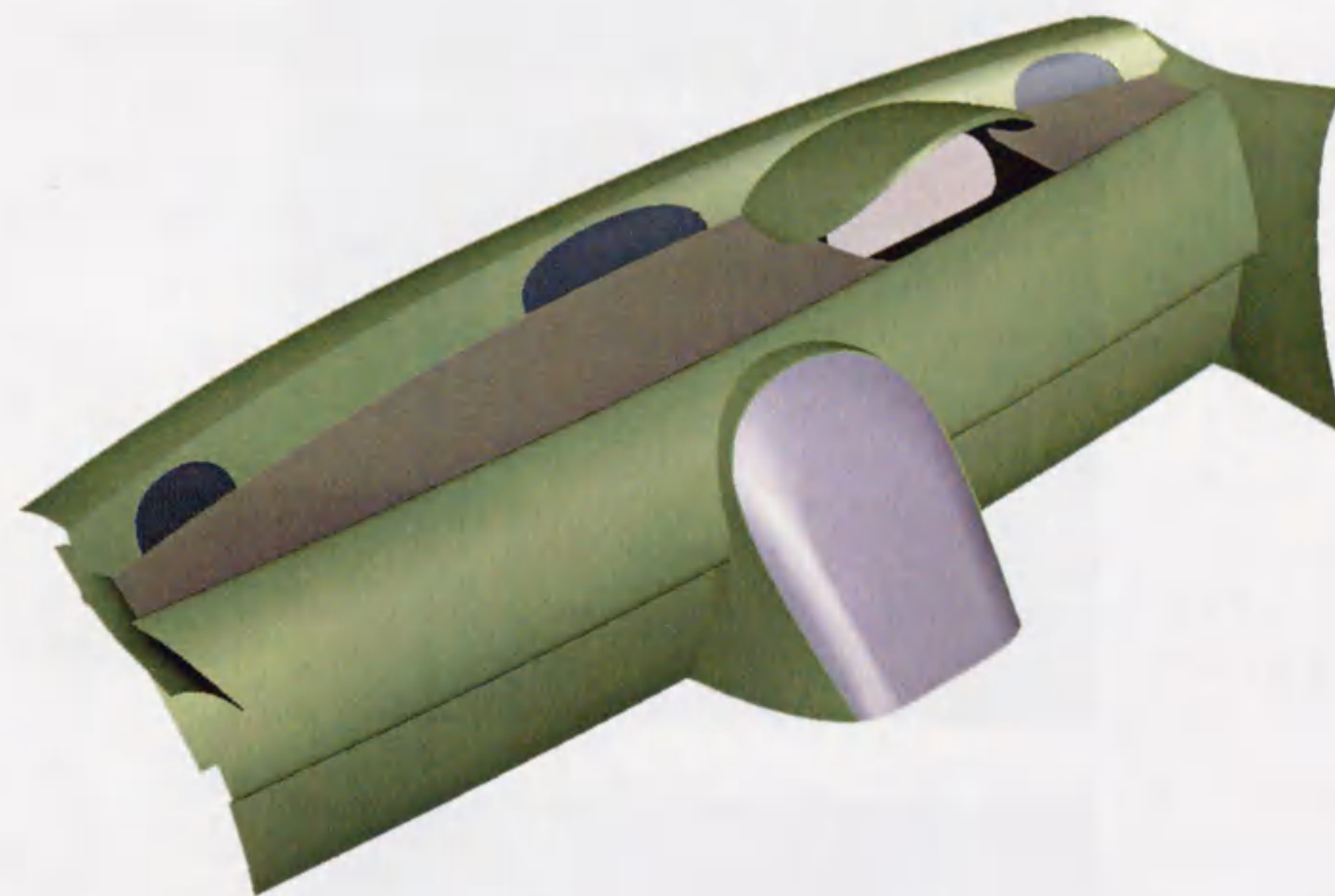


図 8-2 清書後のデザイン



図 8-3 仮想の街を使った走行シミュレーション

第9章 結論

本論文では産業分野におけるデジタル化の流れを取り上げ、Virtual Reality 技術の工業製品デザインへの応用に関する事例として、2次元空間のキャンバスにスケッチする感覚で製品デザインをすることが可能な空間スケッチシステムの提案とその試作を通じた実現手法について述べてきた。

本システムの対象とする利用者は工業製品のデザイナーであり、コンセプトデザインの段階において重要となるデザイナーの創造的な作業を妨げないインタフェースを持つ新しいデジタルツールの提案として、2次元のスケッチを模した3次元のラフスケッチと清書を組み合わせたモデリング手法を実装した。また、ペンと消しゴムの持ち替えといった頻繁に行われる操作についてはジェスチャによる変更操作によってメニューよりも少ない手順で迅速に切り替えられる仕組みを提案し、作業が中断することによる集中力の低下を避けることを試みた。

次に、工業製品デザイン分野へVR技術を応用する際に特に注意すべき事例として、他分野での応用時にはさほど重要視されてこなかった立体視の精度の問題についても取り上げた。立体視にどのような問題があるかを調査し、実際に仮想物体を知覚する時に生じている知覚のズレの傾向を実験により求めた。それを解決する一つの手法としてステレオ画像作成時のパラメータをズレ量のサンプルを基に調整する手法を提案し、その効果を検討した。そして実空間と仮想空間が一致する直接操作に適した環境と検討に必要な立体形状表示能力を有したシステムの構築方法について述べた。

また、視覚情報に加え、触覚情報を取り入れることの効果を模索するために、通常では感ずることのできないクーロン力を体感できるシステムを試作し、触覚情報を用いることの利点について検討した。さらに、デザイン作業に有効だと思われる力覚について考察し、その可能性について論じた。

最後に、提案した本システムを実際に自動車のスタイルデザイナーに試用し

てもらいその反応を得て評価をし、本システムの可能性を考察した。本システムを用いることにより、従来のモデリング CAD システムよりも少ない制約の下で自由により直観的にデザイン作業を進められることが期待でき、これまでは作成することが困難だったコンセプトデザインのような初期段階の形状を創造することができる。

本研究はコンセプトデザインから実寸での最終形状評価までの全デザインプロセスを視野に入れた新たな創造的デジタルツールの実現を目指すものである。ここで実現したシステムはその第一段階であるコンセプトデザインを支援するためのツールであるが、将来的には現在のモデリング CAD と置き換えた使用をも考慮に入れた新しい作業空間を持つ CAD システムとしての使い道を模索していくことも重要である。その一つとして、従来のモデリング機能を全て実装し、従来の平面入力では不可能な 3次元空間を生かした効果的な形状の入力方法や数値制御の方法について検討することが有意義である。

また、本システムのインタフェース部についてはまだ考慮の余地が残されている。例えば、ここで提案したジェスチャの認識アルゴリズムでは精度が十分でなかったために、操作が意図通りに出来ない時があるという意見が試用時に得られた。この認識精度を高めるか、音声認識などによる別のインタフェースも視野に入れて検討する必要がある。さらに、インタフェースや立体感の再現性を含めたシステムの全体の評価実験や、デザイナーではなく一般ユーザも用いるモデリングシステムを想定して熟練者とそうでない者のモデリング過程の比較なども興味深い研究対象であると考えられる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました主指導教官である名古屋大学人間情報学研究科横井茂樹教授、及び査読を快諾して頂いた同研究科森本宏教授に慎んで深謝の意を表します。並びにゼミ活動を通じた有益な議論により本研究の発展に貢献して頂いた同研究科茂登山清文助教授、同学情報文化学部安田孝美助教授、及び所属研究室 Media & Design Group の皆様に感謝致します。特に英語での研究発表にあたり多くのご助力を頂いた同研究室博士課程在学中の皆様には改めてお礼を申し上げます。

本研究は私が中京大学情報科学研究科修士課程への進学と共に始め今日に至る研究であります。本研究を始める機会を与えて下さった中京大学及び名古屋大学名誉教授福村晃夫先生、並びに中京大学情報科学部メディア科学科長谷川純一教授、宮崎慎也助教授、トヨタ自動車株式会社デザイン部の星野俊仁氏、大関徹氏に慎んで深謝の意を表します。特に宮崎先生には学部時代から公私に渡り親しくして頂いた上に、研究の進め方や論文の書き方など今日の研究者としての自分を築く上で欠かすことのできない数多くの事柄を学ばせて頂きました。改めて心からのお礼を申し上げます。また、共同研究者である星野さんには多くの貴重な時間を本研究に割いて頂きました。研究機材の調達から活発な討論を通じた有用な発案まで様々な面で本研究の遂行に深く関与して頂いております。改めて感謝の意を表します。

なお、本研究の主な部分は中京大学 CG ラボを使用させて頂き、トヨタ自動車との共同研究として進められてきました。全てのお名前を記すことができず心苦しい限りですが、関連する全ての方々、機関に感謝の意を表します。特に、被験者として知覚実験にご協力頂いた方々には改めて厚くお礼申し上げます。

最後になりましたが、この場をお借りして私の両親に感謝の意を伝えたいと思います。長い学生生活の経済的支援だけではなく、常に深い思いやりと暖かい愛情を持って私の人生を力強く支えて頂きました。時にはご心配をおかけし、ご苦勞を与えてしまいましたが、ここによりやく一つの形を成す事ができました。言葉で表し尽くすことのできない感謝の気持ちをひとつに込めて、次の言葉を贈ります。ありがとうございました。

平成 13 年 1 月

参考文献

- [1] トヨタ自動車:“デザイン期間の短縮目指しサーフェスマデラーの本格活用に向かう”, 日経 CG, 3 (1999)
- [2] 坂井佐千穂:“3次元 CAD を活用した IT システム構築指針”, 日経 CG, 4 (2000)
- [3] 高田良祐, 山田滋己:“CAD/CAM/CAE を中核としたデジタルエンジニアリングプロセス実現への取り組み”, 情報処理学会誌, Vol.42, No.8, pp.945-950 (2000)
- [4] “3次元 CAD/CG ツールを活用し始めたプロダクトデザイナーたち”, 日経 CG, 12 (1998)
- [5] 舘, 広瀬ら:“バーチャル・テック・ラボ”, 工業調査会 (1992)
- [6] 松田隆夫:“視知覚”, 培風館 (1995)
- [7] Cruz-Neria, C.N., Sandin, D.J., Defanti, T.A.:“Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE”, COMPUTER GRAPHICS Proceedings, Annual Conference Series, pp.135-142 (1993)
- [8] “バーチャルリアリティからフルスケールリアリティへ”, 日経 CG, 11 (1999)
- [9] 稲坂令:“ウェアラブルコンピュータ”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.5, No.1, pp.13-16 (2000)
- [10] 株式会社島津製作所, <http://www.shimadzu.co.jp/hmd/> (2000)
- [11] XYBERNAUT Corporation, <http://www.xybernaut.com/> (2000)
- [12] Karen Moltenbrey:“フルスケールバーチャルプロトタイプを活用する GM”, 日経 CG, 7 (2000)
- [13] Zeleznik, R.:“SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes”, SIGGRAPH'96 Proceedings, pp.163-170 (1996)
- [14] Igarashi, T., Matsuoka, S., Tanaka, H.:“Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design”, SIGGRAPH'99 Proceedings, pp.409-416 (1999)
- [15] 松田浩一, 小森望, 近藤邦雄, 木村文彦:“3次元形状モデリングのためのフリーハンドによる直接入力法”, 情処学研報, 99-HI-83, pp.13-18 (1999)
- [16] Sachs, E., Roberts, A., Stoops, D.:“3-Draw: A Tool for Designing 3D Shapes”, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol.11, No.6, pp.18-26 (1991)

- [17] SensAble Technologies, Inc., "FreeForm", <http://www.sensable.com/> (2000)
- [18] 亀山研一: "スタイリング CAD システム", 信学技法, MVE97-28, pp.53-56 (1997)
- [19] Butterworth, J., Davidson, A., Hench, S., Olano, T.: "3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-Mounted Display", Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.27-34 (1992)
- [20] 川村洋介, 田中和明, 鄭絳宇, 安部憲広, 何守杰, 滝寛和: "人工現実感を利用した意匠設計システム", 信学技法, MVE97-74, pp.125-131 (1997)
- [21] 西野浩明, 凍田和美, 宇津宮孝一: "両手ジェスチャで変形可能な3次元形状表現法", 情処学論, Vol.40, No.2, pp.698-701 (1999)
- [22] Kiyokawa, K., Takemura, H., Katayama, Y., Iwasa, H., Yokoya, N.: "VLEGO: A simple two-handed modeling environment based on toy blocks", Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology 1996, pp.27-34 (1996)
- [23] 橋本直己, 中嶋正之: "CAVE における直感的操作手法と動的自由度制御を用いた3次元形状モデラ", 日本VR学界論文誌, Vol.4, No.3, pp.487-494 (1999)
- [24] Hashimoto, N., Takahashi, H., Nakajima, M.: "Design and Manipulation of 3-D geometry using a CAVE System", Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology, pp.201-206 (1999)
- [25] Lipscomb, J.: "A Trainable Gesture Recognizer. Pattern Recognition", Vol.24, No.9, pp.895-907 (1991)
- [26] Rubine, D.: "Specifying Gestures by Example", Computer Graphics, Vol.25, No.4, pp.329-337 (1991)
- [27] Lampton D.R., McDonald D.P., Singer M.: "Distance estimation in virtual environments", Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 39th Annual Meeting-1995, pp.1268-1272 (1995)
- [28] 森田寿哉, 比留間伸行, 三橋哲雄, 元木紀雄: "両眼融合式立体画像における大きさの知覚と輻輳運動", テレビジョン学会誌, Vol.50, No.9, pp.1300-1310 (1996)
- [29] Ohtsuka, S., Ishigure, Y., Kanatsugu, Y.: "Virtual Window: A Technique for Correcting Depth-Perception Distortion in Stereoscopic Displays", The Society for Information Display Symposium Digest, 27, pp.893-898 (1996)
- [30] 長田昌次郎: "立体映像の奥行き感と大きさ感", 映情学技報, HIR'97-35, pp.45-50 (1997)
- [31] 高野英彦: "見やすさと距離認識誤差を考慮した仮想物体表示法の評価について", 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.5, pp.347-352 (1998)

- [32] 柴崎宏武, 猪田克美: "CAD の3次元直接操作手法の検討", 8th Symposium on Human Interface, pp.1-6 (1992)
- [33] 内海章, ポール ミルグラム, 竹村治雄, 岸野文朗: "仮想空間表示における奥行き知覚誤差の要因について", 信学技報, HC94-10, pp.63-70 (1994)
- [34] 黒川隆夫, 村田浩之, 宮南雅也, 緒方誠人, 森本一成: "液晶眼鏡を用いた両眼立体視における奥行き知覚特性とそのモデル", Progress in Human Interface, 5, pp.61-68 (1996)
- [35] 清水久夫, 砂川正一, 小田哲, 宮近幸逸: "二眼式立体表示における立体知覚に関する研究", Progress in Human Interface, 4, pp.85-90 (1995)
- [36] 志和新一, 大村克之, 岸野文郎: "焦点調節を補償する立体表示 3DDAC", テレビジョン学会誌, Vol.50, No.5, pp.570-576 (1996)
- [37] 畑田豊彦: "生理光学(14)-奥行き知覚特性-", plus E, pp.108-118 (Oct.1985)
- [38] 畑田豊彦: "両眼視を中心とした空間認識機構", 日本眼光学学会誌, 24 (1989)
- [39] 魚森謙也, 山田光穂: "立体・奥行き知覚", テレビ誌, Vol.48, No.12, pp.1502-1508 (1994)
- [40] 畑田豊彦: "3次元表示技術の最近の動向", 画電学誌, Vol.24, No.5, pp.466-472 (1995)
- [41] Nagata, S.: "The binocular fusion of human vision on stereoscopic displays - field of view and environment effects", Ergonomics, Vol.39, No.11, pp.1273-1284 (1996)
- [42] Deering, M.: "High Resolution Virtual Reality", COMPUTER GRAPHICS, Vol 26, No.2, pp.195-202 (1992)
- [43] 田崎京二, 大山正, 樋渡涓二: "視覚情報処理", 朝倉書店 (1979)
- [44] 鈴木正二: "医学大事典", 南山堂 (1954)
- [45] 津田節哉: "米国式 21 項目検査入門—視機能の検査と分析—", 近代光学出版社 (1983)
- [46] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 横井茂樹: "大型スクリーンを用いたステレオ視表示に基づく表示誤差の評価とその補正", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.331-338 (1999)
- [47] Muller, S.: "Experiences and Applications with a CAVE at Fraunhofer-IGD", Forschung und Praxis T51, 1.International Immersive Projection Technology Workshop, pp.97-108 (1997)
- [48] 杉本敏彦, 田野俊一: "3次元空間におけるスケッチのための自然なインターフ

- エースの設計”, ヒューマンインタフェースシンポジウム'99 論文集, 1111 (1999)
- [49] Thomas Massie: “Initial Haptic Explorations with the Phantom, Virtual Touch Through Point Interaction”, Master's Thesis M.I.T. (1996)
- [50] Iwata, H.: “Artificial Reality with Force-feedback Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator”, Computer Graphics, SIGGRAPH 1990, Vol.24, No.4 (1990)
- [51] 佐藤誠他: “仮想作業空間のためのインタフェース・デバイス-SPIDAR-”, 信学技報, PRU-88 (1989)
- [52] SensAble Technologies, PHANTOM, <http://www.sensable.com/> (2000)
- [53] Yasuyo Hatano, Masanobu Nishimoto: “Graphical Representation of the Electric Field around a Biomolecule”, Bioimaging Society, Bioimages 3, pp.19-24 (1995)
- [54] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 山田俊郎, 石綿昌平: “没入型多面ディスプレイ (CABIN) を利用した数値シミュレーションの可視化”, 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, pp.141-144 (1997)
- [55] Abraham Anderson, Zhiping Weng: “VRDD: Applying virtual reality visualization to protein docking and design”, J. Molecular Graphics and Modelling, Vol.17, pp.180-186 (1999)
- [56] R. Rodriguez, G. China, N. Lopez, G. Vriend: “Full window stereo”, J. Molecular Graphics and Modelling, Vol.17, pp.310-314 (1999)
- [57] Akira Kageyama, Tsuchi Tamura, Tetsuya Sato: “Scientific Visualization in Physics Research by CompeXcope CAVE System”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.711-722 (1999)
- [58] 田村祐一, 佐藤哲也, 陰山聡, 藤原進, 中村浩章: “数値シミュレーションデータ表現のための音情報機能を付加したバーチャルリアリティシステムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.3, pp.943-948 (2000)
- [59] StereoGraphics Co., Crystal Eyes, <http://www.stereographics.com/> (2000)
- [60] L. E. Chirlian, M. M. Francl: “Atomic charges derived from electrostatic potentials: A detailed sturdy”, J. Compt. Chem. 8, pp.894-905 (1987)
- [61] Open GL Architecture Review Board: “OpenGL Programming Guide”, Addison-Wesley Publishers Ltd.
- [62] Ware C., Gobrecht C., Paton M.A.: “Dynamic Adjustment of Stereo Display Parameters”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol 28. No 1, pp.56-65 (1998)
- [63] Wartell Z., Hodges L.F., Ribarsky W.: “Balancing Fusion, Image Depth and Distortion in Stereoscopic Head-tracked Displays”, SIGGRAPH 99, Computer

- Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.351-358 (1999)
- [64] “General Haptic Open Software Toolkit Programmer's Guide”, SensAble Technologies (1996)
- [65] William A. McNeely, Kevin D. Puterbaugh, James J. Troy: “Six Degree-of-Freedom Haptic Rendering Using Voxel Sampling”, Computer Graphics, SIGGRAPH99, pp.401-408 (1999)

研究業績

論文誌

- [1] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 横井茂樹:“大型スクリーンを用いたステレオ視表示に基づく表示誤差の評価とその補正”, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.331-338 (1999)
- [2] 宮崎慎也, 吉田俊介, 安田孝美, 横井茂樹:“局所形状保持に基づく仮想弾性モデルの提案”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-A, No.7, pp.1138-1155 (1999)
- [3] 吉田俊介, 秦野甯世, 宮崎慎也, 横井茂樹:“仮想現実感技術に基づくクローン力体感システム—分子の電気的性質の立体表示と力覚提示—”, Japan Chemistry Program Exchange Journal, Vol.12, No.3, pp.229-236 (2000)
- [4] 吉田俊介, 宮崎慎也, 星野俊仁, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹:“ステレオ視表示における高精度な奥行き距離補正の一手法”, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.3, pp.1019-1026 (2000)
- [5] Shunsuke YOSHIDA, Shinya MIYAZAKI, Toshihito HOSHINO, Toru OZEKI, Junichi HASEGAWA, Takami YASUDA, Shigeki YOKOI:“A Technique for Precise Depth Representation in Stereoscopic Display”, The Visual Computer, Now printing (2000)

国際会議, シンポジウム

- [6] Shunsuke YOSHIDA, Toshihito HOSHINO, Toru OZEKI, Shin-ya MIYAZAKI, Jun-ichi HASEGAWA, Teruo FUKUMURA:“An Improvement Method of Depth Perception in Stereoscopic Display”, International Symposium on Real-Time Imaging and Dynamic Analysis, ISPRS, Vol.XXXII, Part 5, pp.386-391 (1998.6)
- [7] Shunsuke YOSHIDA, Shin-ya MIYAZAKI, Toshihito HOSHINO, Toru OZEKI, Jun-ichi HASEGAWA, Takami YASUDA, Shigeki YOKOI:“A Technique for Precise Depth Representation in Stereoscopic Display”, Proceedings Computer Graphics International 1999, pp.80-84 (1999.6)
- [8] 吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹:“空間スケッチシステム—仮想空間における自動車のスタイルデザイン—”, Visual Computing グラフィクスとCAD 合同シンポジウム 2000, 画像電子学会/情報処理学会, pp.89-94 (2000.6)
- [9] Shunsuke YOSHIDA, Shinya MIYAZAKI, Toshihito HOSHINO, Toru OZEKI, Junichi HASEGAWA, Takami YASUDA, Shigeki YOKOI:“Spatial Sketch System for Car Styling Design”, International Archives of Photogrammetry and

Remote Sensing, Vol.XXXIII, Part B5, pp.919-925 (2000.7)

研究会, 学会発表等

- [10] 吉田俊介, 宮崎慎也, 福村晃夫: “複数端末からの同一仮想空間内におけるモデリング操作の実現”, 1995年電気関係学会東海支部連合大会, 797, pp.399 (1995)
- [11] 吉田俊介, 宮崎慎也, 福村晃夫: “モデリング操作に基づく同一仮想空間内での協調作業環境の実現”, 電子情報通信学会 1996年全国大会, A-415, pp.417 (1996)
- [12] 吉田俊介: “複数端末からの同一仮想空間内におけるモデリング操作の実現”, 中京大学情報科学部卒業研究 (1996)
- [13] 吉田俊介, 宮崎慎也, 福村晃夫: “複数端末からの同時入力が可能なモデリングシステム”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU96-7, pp.47-52 (1996)
- [14] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 福村晃夫: “自動車内装デザインのための立体視画像の物体位置把握に関する一考察”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU96-116, pp.91-96 (1996)
- [15] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 福村晃夫: “デザイン支援システム構築のための仮想物体の奥行き知覚に関する一考察”, 電子情報通信学会 1997年全国大会, A-16-23, pp.395 (1997)
- [16] 星野俊仁, 大関徹, 吉田俊介, 宮崎慎也, 長谷川純一, 福村晃夫: “仮想空間における視覚の知覚誤差を軽減する手法”, 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会, pp.304-307 (1997)
- [17] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 福村晃夫: “立体表示された仮想物体に対する知覚位置補正について”, 情報処理学会研究報告, CVIM-106-22, pp.163-170 (1997)
- [18] 吉田俊介: “仮想空間デザインのための両眼立体視奥行き知覚精度の改善に関する研究”, 中京大学情報科学研究科修士論文 (1998)
- [19] 宮崎慎也, 吉田俊介, 安田孝美, 横井茂樹: “局所形状保持に基づく仮想弾性物体モデルの提案—3次元物体の計算方法の確立—”, 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会, pp.49-52 (1998)
- [20] 星野俊仁, 大関徹, 吉田俊介, 宮崎慎也, 長谷川純一, 横井茂樹: “自動車デザインシステムにおける立体視奥行き知覚の補正法の検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会, pp.103-106 (1998)
- [21] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂

- 樹: “ステレオ視表示における高精度な奥行き距離表現のための補正手法の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU99-4, pp.25-30 (1999)
- [22] 星野俊仁, 大関徹, 吉田俊介, 宮崎慎也, 安田孝美, 長谷川純一, 横井茂樹: “空間スケッチシステムの基礎研究”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会, pp.327-330 (1999)
- [23] 吉田俊介, 宮崎慎也, 秦野甯世, 横井茂樹: “VRによる分子のまわりのクーロン力体感システム—電気力線の立体表示と力覚提示—”, 2000 計算化学討論会, pp.174-175 (2000)
- [24] 吉田俊介, 安田浩司, 鬼頭良彦, 鈴木考彰, 秦野甯世, 宮崎慎也: “分子のまわりの静電ポテンシャル, クーロン力体感システム—電気力線の立体表示と力覚提示—”, 第23回情報化学討論会, pp.142-143 (2000)

