

力・触覚・疑似力触覚の融合による  
人工現実感の高度化

名古屋大学大学院 情報科学研究科

複雑系科学専攻

坪井 諭之



# 目次

<b>第 1 章 緒 論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.1.1 ヒューマンフレンドリー・インタフェース	3
1.1.2 バーチャルリアリティの歴史 [9–11]	7
1.1.3 バーチャルリアリティ・インタフェースの研究動向 [40–42]	13
1.1.4 ヒトの力覚・触覚 [58, 59, 78]	29
1.1.5 力触覚ディスプレイに求められる機能と実現に向けた方針	34
1.2 本論文の目的	37
1.3 本論文の構成	41
<b>第 2 章 接触力を鉛直方向変位に置き換えることによる物体操作</b>	<b>42</b>
2.1 緒 言	42
2.2 ディスプレイ装置	45
2.2.1 力覚触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイ	45
2.2.2 平面 3 リンクマニピュレータ形力覚ディスプレイ	47
2.2.3 分布圧覚呈示形触覚ディスプレイ	47
2.2.4 VR 呈示面の鉛直方向における位置制御	49
2.3 呈示方法	50
2.3.1 VR 物体間に生じる接触力の計算	50
2.3.2 力覚呈示	52
2.3.3 触覚呈示	53

2.4	実験方法 . . . . .	54
2.5	実験結果と考察 . . . . .	56
2.5.1	評価尺度 . . . . .	56
2.5.2	壁の傾斜角度 30[deg] における物体整列精度 . . . . .	57
2.5.3	壁の傾斜角度 60[deg] における物体整列精度 . . . . .	61
2.6	結 言 . . . . .	64
<b>第 3 章</b>	<b>モーメントを回転角度情報に置き換えることによる触知方式</b>	<b>66</b>
3.1	緒 言 . . . . .	66
3.2	ディスプレイ装置 . . . . .	68
3.2.1	力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイ . . . . .	68
3.2.2	VR 呈示面の鉛直方向における位置制御 . . . . .	70
3.2.3	VR 呈示面の姿勢制御 . . . . .	71
3.3	実験方法 . . . . .	73
3.3.1	重心位置推定検証実験 . . . . .	73
3.3.2	高さ識別実験 . . . . .	74
3.3.3	球の直径識別実験 . . . . .	76
3.4	実験結果と考察 . . . . .	79
3.4.1	重心位置推定検証実験 . . . . .	79
3.4.2	高さ識別実験 . . . . .	79
3.4.3	球の直径識別実験 . . . . .	81
3.5	結 言 . . . . .	87
<b>第 4 章</b>	<b>疑似力触覚と分布圧覚呈示が硬さ知覚へ及ぼす影響</b>	<b>89</b>
4.1	緒 言 . . . . .	89
4.2	ディスプレイ装置 . . . . .	90
4.2.1	力覚・触覚融合形 2.5 次元ディスプレイ . . . . .	90



4.2.2	VR 呈示面の鉛直方向における位置制御 . . . . .	91
4.3	呈示方法 . . . . .	91
4.3.1	VR 物体の構造 . . . . .	91
4.3.2	硬さ呈示 . . . . .	92
4.4	評価実験 . . . . .	93
4.5	結 言 . . . . .	96
第 5 章 結 論		97
参考文献		101

# 目 次

1.1	PC ownership ratio . . . . .	4
1.2	Tactile perceptron organs [78] . . . . .	30
1.3	Exploratory procedures and associated object properties [78, 85] . . . . .	33
2.1	2.5D-display generating combined tactile sensation and force . . . . .	45
2.2	Schematic block diagram of compound display system . . . . .	46
2.3	Tactile display . . . . .	48
2.4	Altitude control . . . . .	50
2.5	Approximation of virtual block . . . . .	51
2.6	Contact between virtual cylinders . . . . .	51
2.7	Contact between virtual cylinder and wall . . . . .	52
2.8	Surface of virtual objects . . . . .	53
2.9	Virtual building tasks . . . . .	54
2.10	Scenario of experiments . . . . .	57
2.11	Definition of criteria . . . . .	57
2.12	Average of all results (30[deg]) . . . . .	59
2.13	Standard deviation of all results (30[deg]) . . . . .	60
2.14	Average of all results (30[deg]) . . . . .	62
2.15	Standard deviation of all results (30[deg]) . . . . .	62
3.1	Advanced 2.5D haptic display generating combined tactile and force sensations	68
3.2	Structure of handle part . . . . .	69

3.3	Handle part of 2.5 haptic display . . . . .	69
3.4	Altitude control using three pressure sensors . . . . .	70
3.5	Centroid estimation . . . . .	72
3.6	Orientation control . . . . .	73
3.7	Consecutive rotations using roll-pitch-yaw angles . . . . .	73
3.8	Verification of centroid estimation . . . . .	74
3.9	Height discrimination experiment . . . . .	75
3.10	Setup for height discrimination experiment . . . . .	75
3.11	Pin protrusion distribution on display pad during sphere discrimination . .	77
3.12	Stop-motion photographs for two models . . . . .	78
3.13	Measurement precision for centroid estimation . . . . .	79
3.14	Relationship between proportionality constant and DL for each subject . .	80
3.15	Relationship between probability and size felt compared with 15-mm stan- dard sphere . . . . .	81
3.16	Relationship between probability and size felt compared with 30-mm stan- dard sphere . . . . .	82
3.17	Relationship between probability and size felt compared with 45-mm stan- dard sphere . . . . .	82
3.18	Relationship between probability and size felt compared with 60-mm stan- dard sphere . . . . .	83
3.19	Standard and comparison spheres; a) standard sphere of 30-mm diameter, b) the smallest and c) the largest comparison spheres . . . . .	83
3.20	Variation in DL of virtual sphere diameter under different standard diameter	86
3.21	Dependence of DL on method of touching . . . . .	87
4.1	Virtual deformable sphere . . . . .	92
4.2	Stiffness presentation . . . . .	93

4.3	Scaling results of Group 1 . . . . .	95
4.4	Scaling results of Group 2 . . . . .	95

## 表 目 次

1.1	Type of somatic sensation . . . . .	21
1.2	Type of mechanoreceptor . . . . .	31
2.1	Main parameters and constants . . . . .	55
2.2	Average of experimental data(subject A) . . . . .	57
2.3	Average of experimental data(subject B) . . . . .	58
2.4	Average of experimental data(subject C) . . . . .	58
2.5	Average of experimental data(subject D) . . . . .	58
2.6	Average of experimental data(subject E) . . . . .	58
2.7	Average of experimental data(subject F) . . . . .	59
2.8	$F$ -test and $t$ -test for experimental criteria (30[deg]) . . . . .	61
2.9	$F$ -test and $t$ -test for experimental criteria (60[deg]) . . . . .	64
3.1	Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 15[\text{mm}]$ ) . . . . .	84
3.2	Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 30[\text{mm}]$ ) . . . . .	84
3.3	Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 45[\text{mm}]$ ) . . . . .	84
3.4	Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 60[\text{mm}]$ ) . . . . .	85
3.5	$F$ -test and $t$ -test for differential limens . . . . .	87
4.1	Main parameters and constants of virtual deformable sphere . . . . .	93

4.2	Sample of virtual sphere . . . . .	94
4.3	Sample of virtual sphere . . . . .	95



# 第1章 緒 論

## 1.1 研究の背景

本研究では、力覚、触覚、視覚の刺激を同時に呈示できる新しいハプティック・インタフェースを社会に提供することを最終目的としている。本インタフェースの開発では、低拘束かつ低疲労であり、誰もが簡単に使える人間にやさしく、人間を支援することができる装置の実現を目指している。そのために、力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイを開発する。これによって演出できるモダリティ感相互作用により、認識および操作の両面における精度を向上する。本研究では、力覚、触覚、疑似力触覚を以下のように定義する。

- 力覚：主にヒトの深部感覚（筋・腱紡錘）に作用する力・モーメント
- 触覚：分布した単位面積あたりの力
- 疑似力触覚：視覚情報によって生じる力覚・触覚の錯覚

本節では、そのようなインタフェースが求められる社会背景から議論を始めることにする。現代の情報化社会では、家庭の情報家電、電車の自動券売機、銀行の自動窓口機などあらゆるものが情報システムに支えられている。情報システムを利用するためには、情報の入出力情報を相互処理するための情報機器が使用される。情報機器の操作では、現前しない仮想のボタンやカーソルに触れ、作業を行い、人間と情報システムとのインタラクションが生じる。したがって、情報システムは、いわば一種のバーチャルリアリティ（Virtual Reality, 以下 VR）システムであると言える。すなわち、VR 技術は、私たちの日常生活で自然に触れている馴染み深いものとなっており、生活を支える必要不可欠なものとなって

いる。しかし、現状として、情報機器の操作は、年齢・性別を問わず誰もが利用できるまでには至っていない。これには、主に二つの要因が考えられる。第一に、利用者がシステムおよび機器についての予備知識と経験が必要であることが挙げられる。システムおよび機器の開発には、人間の知覚に適した設計が必要である。近年、視覚心理学者の Gibson が提唱したアフォーダンス (affordance) [1] という概念が注目を集め、日常生活で用いられる道具の設計などに活かされている。アフォーダンスとは、外界の環境や事物自体が持っている生体の活動に影響を与える情報のことである。すなわち、インタフェースの開発では、ユーザが対峙した際に直感的に使用方法を理解できるような機器の設計が求められる。第二に、電子技術および情報技術の発達による多機能化・高機能化に伴い、機器の操作がより複雑になったことが挙げられる。私たちにとって身近な携帯電話もスマートフォンに移行し、ユーザに対して有用な機能が増加し、時間や場所を選ばず、あらゆる情報を手に入れることが可能になっている。しかしながら、情報機器に対して嫌悪感や抵抗感を感じる一種のコンピュータアレルギーに陥っている人は少なくない。そのため、人によって獲得できる情報量において格差が生じてしまう。現代の日本では、少子高齢化が進んでおり、あらゆるユーザが簡単に操作をすることのできる機器の需要が高まっている。

以上のような問題を解決するためには、人間とシステムの接点であり、人間とシステムを結び付ける入出力システムとなるヒューマンインタフェース (Human Interface) が人間にやさしいものとなる必要がある。物体操作を伴う VR では、対象物体の位置・姿勢および形状を認識し、把持や移動・回転などの反復動作を行うため、五感のうち特に視覚および力覚、触覚情報を呈示可能なインタフェースが求められる。

本研究では、上述のインタフェースを設計・製作して、一連の心理物理実験によってその有効性を示す。次節では、本研究の重要なコンセプトである「人間にやさしく、人間を支援することができるヒューマン・インタフェース」の重要性について議論する。



### 1.1.1 ヒューマンフレンドリー・インタフェース

電子・情報技術の目覚ましい発展により、情報関連の新しい技術やシステムが急速に進歩している。特に、インターネットなどの情報通信技術（Information Communication(s) Technology, 以下 ICT）の発展は加速度的に進展している。一方、現代の情報化社会では、デジタル・ディバイド（digital divide, 情報格差）が大きな社会問題の一つとなっている [2]。デジタル・ディバイドという用語は、1998 年に NTIA（National Telecommunications Infrastructure Administration）が「Falling Through the Net II: New Data on the Digital Divide」を発表したころから広く使われるようになった。デジタル・ディバイドとは、情報技術（Information Technology, 以下 IT）の使用可否によって得られる情報量の差が原因で生じる格差のことである。デジタル・ディバイドには、主に三つの原因が考えられる。第一に、先進国と途上国間、都市部と過疎地域の間に見られる国際間および地域間における情報技術力・普及率の格差が挙げられる。国際間、国内地域の格差をそれぞれ国際間デジタル・ディバイド、地域間デジタル・ディバイドと呼ぶ。第二に、学歴の有無や貧富の差などの社会的条件の相違による情報機器を操作する機会の格差が存在する。第三に、性別や年齢、障がいの有無などの身体的な条件による格差が挙げられる。このような身体的・社会的な条件による個人間の格差を個人間デジタル・ディバイドと呼ぶ。地域間および国際間デジタル・ディバイドを解決するには、経済支援やインフラ設備の整備などでブロードバンド・ゼロ地域および携帯電話不感地帯の解消をする必要がある。一方、個人間デジタル・ディバイドを解決するには、原因が多様であるため、多方面からの支援が求められる。特に、現在の日本は少子高齢化社会であるため、身体的な格差による個人間デジタル・ディバイドが大きな問題となっている。

内閣府による消費動向調査では、PC や携帯電話などの主要耐久消費財の普及・保有状況が世帯主の年齢階級別に示されている。年齢階層による PC 普及率の差異は小さくなりつつあるが、最も普及率の高い 30～59 歳と比較すると最も普及率の低い 60 歳以上の普及率は 20%以上の差があることが分かる。Figure 1.1 は、2005 年から 2013 年までの PC 普及率の推移を示したものである。横軸および縦軸は、それぞれ年度 [年] および PC 普及率 [%]

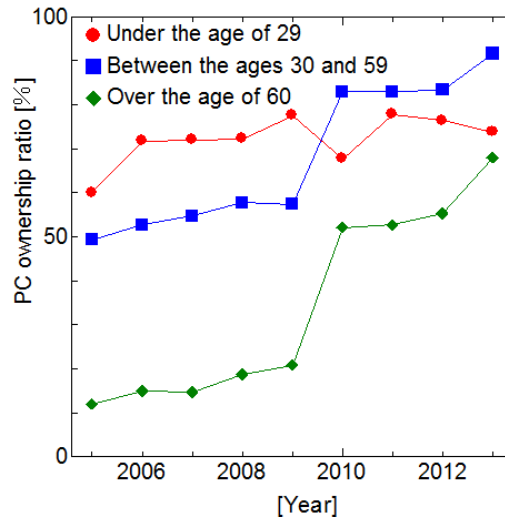


Figure 1.1: PC ownership ratio

を表している。2005年では、29歳以下、30～59歳、60歳以上のPC普及率は、それぞれ60.0%、49.3%、12.0%であった。その後、30～59歳、60歳以上の普及率は上昇し続け、2013年には29歳以下、30～59歳、60歳以上のPC普及率は、それぞれ73.8%、91.6%、68.0%となった。なお、通信利用動向調査 [3] によると、日本国内におけるインターネット利用率は2008年には75.3%であったことに対し、2012年では79.5%となっており、増加傾向にある。なお、2008年から2012年の統計を比較すると60歳以上のインターネット利用は拡大傾向にあるが、13～59歳と比べて60歳以上の利用率は極めて低いのが現状である。一方、平成21年度の通信利用動向調査では、障がい者のインターネットの利用は52.2%となっており、非常に低い水準にとどまっているため、障がい者のインターネットの普及についても課題があると考えられる。平成23年度情報通信白書では、高齢者および障がい者におけるインターネット未活用の原因が調査されており、主に3つの要因が大きな影響を与えていると考えられる。

- 機器の購入費やインターネット利用料など経済的に負担がかかる。
- 情報機器や情報システムの活用技術の習得手段が不足している。
- ユニバーサルデザイン機器が充実していない。

経済的な問題を解決するには、経済支援やインフラの整備が求められる。一方、活用するための知識および技術面の問題を解決するには、より包括的な支援が必要である。一般的に、情報機器の操作や情報システムの利用方法は、学校もしくは家族や友人など人から学んで習得している人が多いと考えられる。しかし、インターネット未利用者の高齢者は、積極的に外出し、講習会に参加することに抵抗を感じる人も多く、十分な習得機会が得られず、学びたくても学ぶことができない状況に陥っている。そのため、情報機器や情報システムの利用方法や活用方法が分からないという回答が多いことが報告されている。インターネット中心のサービスや新しい技術・製品・サービスについていくことに対する不安を感じている人が多いのが現状である。これらの課題の解決に向けた調査では、使い勝手がよい端末の開発を求める声が高齢者の中に非常に多いことが報告されている。なお、点字ディスプレイ、ジョイスティック、読み上げソフト、その他の補助機器・ソフトウェアの開発普及や操作性が不十分であるために障がい者にとって情報機器や情報システムの利用が難しいという意見が多い。そのため、情報バリアフリーを実現するには、誰にでも活用が容易で、使いやすいシステムを構築する必要がある。すなわち、用途や操作が直感的に理解でき、人間の身体および心理状態に応じて支援を行うことが可能なシステムの実現に向けて、情報機器および情報システムの発展がソフトウェアおよびハードウェアの両面で求められている。そのため、人間工学、認知科学、エルゴノミクスデザインなど人間を中心としたシステム開発を進めていかなければならない。

今後の日本では、少子高齢化がより一層深刻化すると考えられる。2012年度の高齢社会白書 [4] によると、日本における65歳以上の高齢者は、過去最高の3,079万人となっている。日本の総人口は、1億2,752万人（2012年10月1日現在）であるため、総人口に占める高齢者の割合（高齢化率）は、24.1%となっている。高齢化率が7%を超えると「高齢化社会」、14%を超えると「高齢社会」、21%を超えると「超高齢社会」と定義されており、現在の日本はまさしく超高齢社会である。高齢化率は今後も上昇を続け、2060年には39.9%に達して、国民の約2.5人に1人が65歳以上の高齢者となると推計されている。さらに、少子化の影響により、生産年齢人口（15～64歳）の減少が考えられる。生産年齢人口は、2012

年の国勢調査によると 8,173 万人であったが、2013 年、2027 年、2051 年にはそれぞれ 8,000 万人、7,000 万人、5,000 万人を割り、2060 年には 4,418 万人となると推計されている [5]。なお、生産年齢人口割合は、2010 年の 63.8%から減少を続け、2060 年には 50.9%となると予想される。したがって、高齢者の就業の人数および割合が増加するために、生産活動に従事する人の高年齢化が進むと考えられる。そのため、高齢者の生産活動を支援するために生産環境の整備が必要である [6]。人間の身体機能、運動機能は、加齢によって影響を受けることが知られている [7]。私たちは、視聴覚や皮膚感覚などの感覚知覚機能から自身の身体状態および外部環境の情報を得ているが、加齢によって機能が低下する。加齢の影響による感覚機能の低下、訓練によって回復することが難しいため、身体機能に合わせた環境を整えなければならない。視覚に関する加齢の影響として、視力（遠方視力）、眼調節能力、光波長の分光視感効率が低下するため、作業場の明るさやコントラストに配慮する必要がある。聴覚に関しては、加齢とともに高い周波数の音が知覚しにくくなるため、低くて大きな音を用いることが求められる。皮膚感覚についても圧覚、振動覚、痛覚、温度感覚において識別能力が低下することが知られている。また、加齢による筋力および柔軟性の低下や関節可動域の減少運動機能が劣化する。そのため、運動速度や力、持久力などが衰え、運動調整機能や瞬発反応に影響を与えと考えられる。高齢者の心身機能データに則した機器およびシステム開発、環境の構築に向けた取り組みが必要である。

一方、これまでに蓄積された技術・技能をさらに発展させるためには、経験豊富な技術者の技能やノウハウを伝承することが求められている。匠の動きなどの技能を学ぶには、実際に動作を体験し、五感を用いた反復作業によって体得することが効果的である。しかし、少子高齢化の影響により、製造に携わる人の数が減少してしまうと直接的な指導の機会が不足することが懸念される。そこで、VR を用いた疑似体験を行うことで技能を身につける方法が提案されている [8]。例えば、鋳造技術の伝承を目的とした VR システムでは、立体視システムとロボット技術を用いた力覚呈示装置を組み合わせることで、視覚情報とともに鋳造技能における力覚を体得することができる。技能の獲得に向けて、学び手に対する情報呈示が重要であるが、それ以上に伝承者の技能に関する情報を保存することが大切

である。そのために、伝承者にとって利用しやすい機器およびシステムの開発が必要不可欠である。

以上の議論から、少子高齢化や技術伝承に対応して、性別・年齢・学歴などを問わず誰もが利用できる情報機器および情報システムが益々社会から求められることが予想される。本研究が目指す人間にやさしいヒューマン・インタフェースとは、上述の情報機器・情報システムの実現するための核となるインタフェースである。

また、ヒューマン・インタフェースは、VRの中核技術であり、VRシステムとともに発展してきている。すなわち、ヒューマン・インタフェースおよびディスプレイ装置の高機能化は、開発されたVRシステムの影響を強く受けている。このようにヒューマン・インタフェースとVRには密接な関係がある。そこで、本研究の位置付けを明確にするために、次節では現代までのVR研究の歴史を概観する。

### 1.1.2 バーチャルリアリティの歴史 [9–11]

VRの概念は非常に古く、芸術、娯楽、訓練など多種多様な領域で起源を見ることができる。これは、VRの技術がコンピュータグラフィクス (computer graphics, 以下CG)、ヒューマン・インタフェース、ロボットなどの多岐にわたる分野の技術要素を基にして成り立っていることから理解できる。以下では、あらゆる分野からVR技術の歴史について述べる。

アミューズメントやゲームの分野では、人間の多感覚に刺激を与えることができる体験型シミュレータのSENSORAMAがHeiligによって1962年に開発された。このシステムには、いくつかのシナリオがあり、バイクや自転車、ヘリコプターに乗る感覚を疑似体験することができる。事前に収録された立体映像、ステレオ音響、匂い、風、振動を提示することができたが、ユーザとのインタラクションは実現していなかった。このシステムは、VRによる疑似体験および五感情報提示の先駆けとなる技術であった。

CGの分野において、Sutherlandが1965年に提唱したUltimate Displayという概念はVR技術の基盤となっている。これは、ヒトの感覚に与える刺激を完全な形で人工的に合成す

ることができれば，その人工的な環境をあたかも現実であると感じるという概念である．そこで，彼は，VRにおいて，人工的な世界を構築するために，映像，力，音，香り，味に関する五感フィードバックの重要性を説いた．さらに，彼は，1968年に世界初のVRシステムである「The Sword of Damocles」という頭部搭載型ディスプレイ（Head Mounted Display，以下HMD）を開発している [12]．小型のCRT（Cathode Ray Tube）の映像をハーフミラーを介して見ることのできる光学式シースルーのシステムであり，VRおよびARの先駆けとなる技術であった．このシステムでは，利用者の頭部の方向を認識し，それに応じた映像を提示することが可能であった．さらに，左右の眼に別々の小型ディスプレイをあて，視差を利用した立体映像を投影することで，人間の周囲に3次元VR空間を知覚させることができた．しかし，当時の計算機の性能では，線画による単純なCGしか表示できず，ポリゴンベースの3次元CGは描画できなかった．

また，VR環境における人間とVR物体とのインタラクションを考慮したシステムについては，1971年のBrooksらによるGROPEプロジェクトが起源である [13]．このプロジェクトでは，視覚に対するディスプレイに加えて，力覚フィードバックのハプティック・ディスプレイを用いることで，物体の知覚や認識を向上させることを目的としていた．分子結合シミュレーションから得られる分子間反力をロボットアームによって操作者に力覚呈示することが可能であった．この一連の研究以降，視聴覚だけでなく，触覚や前庭感覚，嗅覚などの人間の感覚に反応するヒューマン・インタフェースの研究が盛んに行われるようになった [14–16]．なお，特定の感覚器官だけではなく，複数の感覚器官に刺激を与えることで，操作精度やリアリティを高めるマルチモーダル・インタフェースの研究が注目されるようになった．

インタラクティブアートの分野は，1970年代にKruegerによるMETAPLAYやVIDEO-PLACEの発表に伴って発展した [17–19]．インタラクティブアートとは，鑑賞者が作品に対してインタラクションをもたらすことのできる技術である．これらのような現実世界の情報にコンピュータによって作りだした情報を重ね合わせる技術は，拡張現実感（Augmented Reality，以下AR）[20]や複合現実感（Mixed Reality）[21]につながっている．METAPLAY

では、ユーザの影を撮影し、大きなディスプレイに反映させ、影と絵画とのインタラクションを実現した。VIDEOPLACE では、バーチャルな生物がユーザの影に反応して動き、一緒に遊ぶことができた。また、通信回線を用いて複数の参加者とインタラクションをすることができた。このようなネットワークを介して同時に複数のユーザがアクセス可能な VR 空間である CVE (Collaborative Virtual Environment) は、遠隔会議、共同学習支援などの技術につながっている。

VR 技術は、1980 年代に発展期を迎え、人間とコンピュータ間のコミュニケーションに関するマン・マシン・インタフェースおよびヒューマン・インタフェースについても研究開発が進められた。1982 年には、米軍空軍のライトパターソン基地で Furness らによって VCASS (Visually Coupled Airborne Systems Simulator, 画像接続航空機搭載シミュレータ) というスーパーコックピットが開発された。コックピット内の電子機器の表示として、最適な飛行経路などの情報を HMD のディスプレイに提示することが可能であった。航空宇宙分野では、NASA の McGreevy や Fisher らが 1985 年に「Virtual Environment」を発表した [22]。このシステムは、宇宙船内のコックピットを設計する目的で開発された。手の位置や動きを検出するデータグローブ、HMD、3 次元音響などを利用することで、コックピット内の周囲環境を 3 次元 VR 空間で認識することが可能であった。また、1981 年に MIT の Negroponte らは、音声、ジェスチャーなどで物体操作が可能な「Media room」を開発した [23]。このシステムでは、壁面のスクリーンに向かって、音声や身振りで指示を出すことで、スクリーン上の物体を動かすことが可能であった。この手法は、人間の操作する 3 次元空間自体をコミュニケーションのキーとして利用する空間型インタフェースにつながっている。

ロボット工学の分野では、1980 年頃より、遠隔地に置かれたロボットを操作者の意図するように制御する技術が開発された。日本では舘によって「テレイグジスタンス (teleexistence)」, 米国では Minsky によって「テレプレゼンス (telepresence)」が提案された [24]。テレイグジスタンスでは、遠隔でロボットを操作しているにもかかわらず、操作者がロボットの中に乗り込んで操作する臨場感を持って作業やコミュニケーションを行うことができる技術で

ある。つまり、人間は安全な場所に居ながら、災害現場などの危険な場所での作業が可能となる。1982年には、舘らによって、テレイグジスタンスを実現するためのマスタースレーブ型のロボット TELESAR (Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot) の研究開発が進められた。このシステムは、スレーブロボットが得た視覚および力覚情報をユーザが操作するマスター側のロボットに伝達する視覚・力覚フィードバックシステムであった。

VRにおける最初の商用デバイスは、1989年にVPL社が発表したEyePhone [25]、DataGlove, DataSuit [26] である。これらのシステムの宣伝において、「バーチャルリアリティ」という言葉が誕生し、研究機関だけでなく一般的にもVR技術が知れ渡るようになり、親しまれるようになった。

近年では、操作者の動作および操作の対象を計測するためのセンサおよび操作を行うためのアクチュエータの進歩やコンピュータおよびソフトウェア性能が向上した。そのため、コミュニケーション、宇宙や医療およびリハビリテーション支援など高度なシステムに応用される。

VRを用いたコミュニケーションシステムでは、前述のTELESARを発展させたTELESAR2が挙げられる。このシステムでは、現地にいる人と通常の言語コミュニケーションができるだけでなく、ジェスチャーや握手などの非言語コミュニケーションが可能となった。なお、再帰性投影技術(RPT: Retroreflective Projection Technology)により、操作者の姿をロボットの胴体にリアルタイムに投影している。そのため、現地にいる観察者は、プロジェクタを介して操作者の表情を見ることができ、操作者の存在を感じ取ることができた。さらに、TELESAR4では、ロボットアームおよびハンドを有する全方向移動ロボットおよび没入型の視聴覚ディスプレイが用いられた。操作者は、視聴覚および物体操作における力覚を感じることができ、現地の情報をフルカラーの3D映像で360度見渡すことで、臨場感を高めることに成功している。

宇宙分野におけるVRの応用には、ロボットの遠隔操作、惑星ローバーの運用、宇宙飛行士の訓練が挙げられる [27]。ロボットの遠隔操作では、前述のテレイグジスタンス技術を利用したRobonautが開発されている [28]。操作者は、HMD、データグローブ、力・触覚呈示



機構、位置・姿勢センサを装着する。そのため、操作者は、物体操作において、視覚情報とともに力触覚情報を得ることができるのでより高臨場感の作業が可能となる。また、惑星ローバーとしては、火星の探索に用いられた MER (Mars Exploration Rover) が挙げられる [29]。Spirit と Opportunity と名付けられた 2 台のローバーが、火星の地表下に存在するといわれる液体の水を探す探査計画に利用された。これらのローバーにはパノラマ画像撮影カメラ (Panoramic Camera, Pancam) や岩石を削り取る研磨装置 (Rock Abrasion Tool, RAT)、組成を分析する熱性外線分光器 (Miniature Thermal Emission Spectrometer, MiniTES)、メスバウアー分光器、アルファ線・X線カメラ (Alpha particle X-ray spectrometer, APXS) などが搭載されていた。これらのローバーによって、火星にはかつて水が存在していたことが確認された。なお、NASA の VR ラボにおいて、宇宙飛行士に対する船外作業の訓練が行われている。訓練者は、HMD とともに手足の関節角度を計測するためのグローブを装着する。そのため、VR 空間内に、操作者の手足の動きが投射される。それに加えて、ロボットアームの動きも VR 空間内に投射することができるため、船外活動において利用するロボットアームの操縦を含めた訓練を行うことが可能である。

医療分野における VR 技術の応用としては、画像診断支援、手術シミュレーション、ロボット手術などが挙げられる [30]。画像診断支援では、AR を用いた遠隔超音波診断の支援を行うシステムが開発されている [31]。超音波診断は、超音波プローブを患者の体表に押し当てることで生体内を診察する非侵襲的な診断手法である。遠隔超音波診断では、患者宅などの遠隔地で撮影した超音波画像を病院に送信し、それに対して医者が診断を行う。この際に、提案手法によれば、遠隔地にいる専門医がプローブの位置や姿勢などを患者側の操作者に教示することで撮像支援を行うことができる。手術シミュレーションでは、力覚フィードバック機能を有するバーチャル手術 (virtual surgery) システムが提案されている [32]。このシステムでは、人体の構造を弾性モデルで表現し、リアルタイムでの変形シミュレーションを実現している。さらに、三本の指にマニピュレータ形の力覚ディスプレイを搭載することで力覚呈示を行うことができる。ロボットを用いた手術支援システムとしては、ダ・ヴィンチ (da Vinci, Intuitive Surgical 社) が挙げられる [33]。ダ・ヴィンチ

は、サージョンコンソール、ペイシェントカート、ビジョンカートの3つから構成される。操作者は、サージョンコンソールに座り、ステレオビューワに映し出される3D画像を見ながらマスターコントローラを操作する。各マスターコントローラの制御によって、ペイシェントカートの鉗子と3D内視鏡を操作することができる。なお、3D内視鏡によって撮影された画像は、ビジョンカートに送信され、画像の収集および処理を行うことで、3D映像としてサージョンコンソール内のステレオビューワに表示される。この装置には、操作者の手と鉗子の動きに関する移動の割合を調整することが可能なモーションスケール機能が搭載されている。さらに、操作者の手先の震えを軽減する手ぶれ防止機能によって操作者を支援することができる。

リハビリテーションの分野においては、手指の細かな動作の訓練ができるリハビリテーション支援システムが開発されている。装置としては、近位指節間関節(proximal interphalangeal joint)の屈曲・伸展、中手指節関節(metacarpophalangeal joint)の屈曲・伸展、内外転動作を各指ごとに補助できるデバイスが研究されている。このシステムでは、患者の負担を軽減させるためにゲーム形式のプログラムを訓練に用いている。患者に対して臨床試験を行い、システムがリハビリテーションに有効であることが報告されている[86]。さらに、医療やリハビリテーションの分野では、EEG、EMG、ECGなど人間の生体信号を測定する技術[35]や光学式モーションキャプチャのような非接触で人間の動きを検出するシステム[36]が活用されている[37-39]。また、VR技術による感覚代行システムに関する研究も進められており、音声・音響スペクトルを触覚情報に変換するタクトルエイドなどの技術が開発されている。感覚の身体機能および運動機能の補助および拡張が可能となれば、個人間デジタル・ディバイドに関する問題の解決につながると思われる。したがって、人間の身体および心理状態を把握し、それに応じた支援をすることで、能力を補助するとともに拡張することが可能なVRシステムの実現に対する期待がさらに高まっていくことが考えられる。

これまで、VRの歴史を概観したが、システムがVRとして満たすべき主な要点は三つ存在する。第一の要点である「3次元の空間性」は、人間にとって自然な3次元空間を構成し

ていることである。立体的な視覚および聴覚空間をコンピュータによって生成し、人間に呈示することが必要である。第二の要点である「実時間の相互作用性」は、環境と実時間との相互作用をしながら人間が自由に行動できることである。実時間におけるユーザの入力に対して、適切な処理および出力が得られなければならない。第三の要点である「自己投射性」は、その環境と人間とがシームレスになっていて環境に入り込んだ状態が作られていることである。ユーザがあたかも VR 空間に入り込んでいる感覚を与える必要がある。これらの三つの要点を満たすためには、システムとユーザを結び付けるヒューマン・インタフェースが大きな役割を担っている。次に、VR 技術を支えるヒューマン・インタフェースの研究動向について述べる。

### 1.1.3 バーチャルリアリティ・インタフェースの研究動向 [40–42]

VR システムは、入力システム、出力システム、シミュレーションシステムの三つの要素から構成される。まず、入力システムにおいて、人間の身体および心理状態や行動を検出・判断し、VR システム側に伝達する。各種センサによって実時間計測された情報は、人間の状態を認識するソフトウェアである認識エンジンで処理される。次に、シミュレーションシステムにおいて、入力システムで得られた情報に基づき、VR 世界に存在するオブジェクトや環境との干渉を計算する。このとき計算される VR 世界における相互作用で生じる変化から、ユーザにフィードバックする感覚情報を決定し、出力システムによって、人間の感覚に反応する刺激を呈示する。刺激物理量を呈示する装置をディスプレイと呼び、高臨場感の VR システムの実現にはより高度なディスプレイの開発が求められる。VR システムでは、以上の三要素が円滑に組み合わせられることで、操作と感覚フィードバックが適切に行える仕組みが必要である。さらに、人間が VR システムと相互作用する際に接する部分である入力および出力インタフェースは、システムを構成する上で重要な役割を担っている。そこで、VR システムを支える入力および出力インタフェースの研究動向について述べる。

## 1. 入力インタフェース

人間の身体および心理状態や行動を判断するために、物理的特性、生理的特性、心理的特性を検出するセンサの開発が進められてきた。物理的特性の計測とは、人間の位置姿勢と回転角度、顔の表情や視線を測定することで、身体形状や運動や意思を検出することである。次に、生理的特性の計測とは、心電図 (Electrocardiogram, ECG) や生体電気信号など人間の生体情報を測定することで、心理状態や運動を推定することである [44]。そして、心理的特性の計測とは、BMI (Brain Machine Interface) のように生体情報をもとに総合的な判断によって間接的に知覚や行動の想起などの推定を行うことである [45]。本論文では、VR 空間における操作者と物体や環境との相互作用に焦点を当てており、人間に関する物理的特性の中でも位置および姿勢、運動の計測に着目している。

人間が VR 世界において操作をする上で、最も重要な作業はポインティング操作である。対象となる物体に触れ、操作をするためには、操作者の位置姿勢情報を的確に取得することが必要である。PC など画面上の操作を行う場合には、2 次元の情報を入力するためにマウスが主に用いられている。なお、IBM 社の TrackPoint のように、ひずみゲージ (strain gauge) を用いて 2 次元情報を入力する方法も実用化されている。操作者は、指先で短い棒状のボタンに加えるせん断方向の圧力を調整することでマウスポインタを動かすことができる。この装置では、指先での小さい力で細かな作業をすることができる。この方法では、他のポインティング方法とは異なり、手や腕を大きく移動させる必要がないので、操作における疲労を軽減することが可能である。一方、VR システムにおいて、3 次元空間を作業空間として扱うことが多くなり、それに伴い、3 次元運動を入力できるデバイスの需要が高まってきている。人間の身体形状や運動を計測するために、人間の位置姿勢と回転角度から測定を行うことが一般的である。人間の姿勢情報を計測する装置は、モーションキャプチャ (motion capture) と呼称され、機械要素、磁気、超音波、画像などを利用したシステムが開発されている。

#### (a) 角度計測

機械式モーションキャプチャは、角度計測を目的とした計測方法であり、ロータリエンコーダ、ポテンショメータ、光ファイバなどがセンサとして利用されている。この方法では、計測した角度情報とともに、人間の関節や手指の長さなどを反映した人体モデルを用いることで位置計測を同時に行うことができる。

ロータリエンコーダやポテンショメータを用いた計測方法としては、外骨格(exoskeleton)型やリンクによる方式が挙げられる。外骨格型の装置では、操作者の手に沿うようにフレームを取り付け、そのフレームの関節角度をポテンショメータによって計測する [46]。リンク方式では、操作者は、リンクの先端を把持して操作を行う。多自由度のリンクの関節角度をロータリエンコーダやポテンショメータで測定することで、操作者の手の位置および角度を計測できる。この計測方法では、複雑な情報処理が不要であるため、測定精度、計測時間遅れ、サンプリングレートにおいて他の方法よりも優位である。なお、リンクの関節にアクチュエータを設置することで、容易に力覚ディスプレイに応用することができる。一方、装置が重くなる傾向にあり、操作をする上で動作制約を受けてしまうという問題がある。

光ファイバを用いた装置では、VPL社のDataGloveやDataSuitが挙げられる。これらの装置では、光ファイバを手や腕、足に対して沿うように取り付けることで関節角度を計測する。関節の曲げに応じて光ファイバを通過する光の量が減少する現象を利用している。この計測方法には、関節の形状をPCに直接入力することができるという特長がある。一方、外部からの光の影響を受けてしまうため、計測精度はロータリエンコーダやポテンショメータを利用した方式よりも低くなるのが課題である。

#### (b) 位置計測

磁気、超音波、画像を用いた計測方法では、計測対象の位置を求めることを目的としている。この方法では、人間の関節などの位置情報を複数計測するこ

とで、関節角度などの姿勢情報を求めている。

磁気式モーションキャプチャの一つに Polhemus 社の FASTRAK がある。この装置では、磁場発生装置と小型コイルを用いる。小型コイルは位置および角度を計測する部位に設置する。まず、作業空間内において X 軸、Y 軸、Z 軸の各方向に対応する交流磁場を発生させる。そして、小型コイルを移動させたときに生じる誘導起電力の大きさを測定し、磁場の中心を基準とした相対的な位置および角度を求める。この装置は、計測精度と応答速度が高く、安定した磁場が得られれば複雑な姿勢や激しい運動の計測にも利用できるという特長がある。一方、磁場を利用するために、周囲の金属から影響を受けると計測が正確に行えないという問題点がある。

超音波を用いた位置計測では、送受信する超音波の時間差から距離を求める。この計測方法には、大きく分けて二通りの方法が存在する。第一に、超音波を送受信可能なセンサを用いる方法がある。基準となる位置に超音波センサを設置し、センサヘッドから超音波を計測対象に向けて発信し、反射波を再度センサヘッドで受信する。第二に、計測対象に超音波の送信器を設置し、周囲の受信器によって超音波を取得する方法がある [47]。双方の計測法では、同様に超音波の発信から受信までに要した時間と音速との関係を演算することでセンサから対象物までの距離を算出することができる。超音波を利用した計測方法の利点としては、他の計測原理と比較すると低コストで受信器数を増加させて精度や分解能を向上させることが可能なことである。一方、超音波は空気によって激しく減衰してしまうため、計測領域が狭いことが課題である。

画像処理による光学式モーションキャプチャには、マーカを利用したものと Microsoft 社の Kinect のようにマーカレスの装置が存在する。マーカを利用する方法では、計測部位にマーカを装着し、複数のカメラによる観測を行う。各カメラにおけるマーカの 2 次元位置情報とカメラ間の相対距離から三角測量の原理によって 3 次元位置を測定する。マーカを利用しない方法では、複数のカメ

ラで観測した計測対象と人体モデルのマッチングを取ることによって姿勢情報を求めている。画像を用いた計測方法では、操作者が動作制約を受けることなく、自然で多様な動作を計測することができる。また、取得画像から手などの形状特徴を抽出し、指差しなど形状の情報を用いた静的なジェスチャによる操作も可能である [48]。なお、計測部位における連続的な位置計測やオプティカルフローを利用することによって、計測部位の移動を認識し、運動計測に応用することも容易である。一方、マーカや計測部位が障害物や動作によって隠れた場合には計測ができないという問題点がある。なお、初期設定における環境整備に対して十分に配慮しなければならない。

加速度センサ (accelerometer) を用いた計測方法では、計測部位にセンサを設置し、得られた加速度を積分することで部位の速度や移動距離を計測することができる。指などを計測対象とした場合には、運動の軌跡を計測することができる。そのため、軌跡を動的なジェスチャとして認識し、入力情報として扱うことが可能である。計測部位の検出において、外部環境の影響を受けにくいため、画像処理を用いる方法と比較して安定性が高い。一方、速度および移動距離の計算において積分演算による計測誤差が問題である。

## 2. 出力インタフェース

人間の感覚は、特殊感覚 (special sensation)、体性感覚 (somatic sensation)、内臓感覚 (visceral sensation) に分類され、人間は感覚から得られる情報によって外部環境や自身の状態を把握している。特殊感覚には、視覚、聴覚、嗅覚、味覚、前庭感覚が含まれており、それぞれの機能に特化した感覚受容器を持つ感覚である。体性感覚とは、受容器が体全体に分布する感覚であり、皮膚感覚 (cutaneous sensation) と深部感覚 (deep sensation) に分類される。深部感覚は、固有感覚 (proprioception) とも呼ばれる。内臓感覚とは、内臓に分布した神経によって内臓の状態を神経活動の情報として感知する感覚である。すなわち、前述の VR における三要素を満たすシステムを実現するには、人間の感覚に適切な刺激を呈示することが可能な出力装置が

必要不可欠である。そのため、VRにおいて臨場感を与えるために各感覚に対応する各ディスプレイの研究開発が進められている。以下にVRシステムを構成する上で各ディスプレイが担う役割と研究動向について述べる。

#### (a) 視覚ディスプレイ

視覚ディスプレイは、VR空間の奥行きと広がり、物体の色や形、材質感など空間を把握するための情報を映像で呈示する。視覚ディスプレイは、2眼式ディスプレイと体積走査型ディスプレイ（volumetric display）に分類される。

2眼式ディスプレイの一つとしてHMDが挙げられる。この装置を用いることでユーザの頭部運動に連動した立体映像を表示することができる。しかし、一般的なHMDでは、人間の周辺視野を含めた広い視野角をすべてを覆うことのできる映像を提示することは難しい。そこで、ユーザの周囲を覆うように大型スクリーンを設置することで広視野の映像を提供し、没入感を与えることができるIPT（Immersive Projection Technology）の研究が行われている。イリノイ大学のCAVEや東京大学のCABINといったシステムがこの技術に該当し、ユーザはスクリーンに投影されたVR世界に身体ごと入り込む感覚を得ることができる。

一方、体積走査型ディスプレイは、VRにおける物体形状を点の集合体として表現し、各点に対応する3次元実空間の場所を発光させることによって映像を表示するものである。この装置の利点は、複数の人があらゆる方向から立体映像として物体を認識できることである。

#### (b) 聴覚ディスプレイ

聴覚ディスプレイは、バーチャルな音場の空気信号を耳に伝えることでVR空間における音源の距離や方向を知覚させる装置である。聴覚呈示の方法としては、立体角分割法、音像定位伝達関数合成法、音場直接合成法の3つがある。

立体角分割法は、5.1chサラウンドシステムのように複数のスピーカーをあら



ゆる方向に設置し配置し、3次元音空間を実現する方法である。このシステムは、ホームシアター・オーディオなどに利用されており、残響や反響音を再現することで臨場感を高めることができる。

音像定位伝達関数合成法は、音波の変化を表す伝達関数を操作者の耳を始点としてすべての方向について求め、左右の耳それぞれに対して計算した音波形をヘッドフォンで呈示する方法である。伝達関数は、室伝達関数（Room Transfer Function, RTF）と頭部伝達関数（Head-Related Transfer Function, HRTF）に分けて計算される。RTFは、音源位置から聴取位置に到達するまでの空間内における音の反射や回折などを表す伝達関数である。HRTFは、自由空間において頭部や耳介の影響による音の変形を表す伝達関数である。これらの伝達関数を求め、デジタルフィルタなどを用いたデジタル信号処理を行うことで、両耳の位置に正しく立体音響を呈示することができる。この方法の利点は、音源位置の認識が左右のみならず上下方向についても可能なことである。

音場直接合成法は、立体角分割法と同様に多数のスピーカーを用いた方法である。しかし、ユーザの両耳元だけでなく、一定の空間におけるすべての場所で3次元音空間を正しく呈示することを目的としている。この方法が確立すれば、複数のユーザが同時に3次元音空間を共有することが可能となる。

#### (c) 前庭感覚ディスプレイ [49]

前庭感覚とは、移動や傾斜による加速度を検出する受容器から構成され、主に人間の平衡感覚を司る感覚である。前庭感覚に刺激を呈示する方法として、モーションプラットフォームや前庭電気刺激（Galvanic Vestibular Stimulation, 以下GVS）が挙げられる。

モーションプラットフォームは、ドライビングシミュレータのようにユーザが座るシートにステージに並進および回転運動を与える方法である。シートに3本の直動アクチュエータを設置し、平行に伸縮させることで3自由度の運動を与えることができる。この手法の問題点は、機械装置が大きくなることで

ある。

一方、GVSは、耳の後ろに微弱な電気刺激を与えることで、前庭器官に加速度が発生したときと同様の作用を人工的に生成することが可能である。この方法は、モーションプラットフォームのような大きな装置を必要とせず、電極や電流制御装置で構成されるため、装置の小型化が可能であり、ウェアラブルなインタフェースに応用できる。ユーザが知覚する加速度感覚は電流量に比例して増加するということが実験により確認されている。つまり、GVSによる前庭感覚の刺激によってユーザが知覚する加速度を変化させることで、身体を平衡に保つために行われる起立反射や視界を平衡に保つために行われる眼球の回旋運動を意図的に引き起こすことが可能である。したがって、前庭感覚ディスプレイは、行動の誘発や臨場感の向上への活用が期待される。

#### (d) 味覚ディスプレイ

味覚は、甘味、塩味、酸味、苦味、うま味の5つの基本味を組み合わせることである程度表現できることが知られている。味覚を定量化するために、味覚センサが開発されている [50]。人工脂質膜センサを用いて、味を呈する物質との吸着反応によって変化する膜電位を測定し、味をデジタル化（数値化）することができる。なお、各基本味に対応した味物質についても特定されている。したがって、味情報をもとにこれらの味物質を調合することによって味を表現することは原理的に可能である。しかしながら、味物質間には相乗・抑制効果の相互作用などが存在するため、このような味覚現象を再現することは非常に難しい。そこで、メタクッキーのように視覚と味覚を同時呈示することによる感覚間相互作用（cross modality）の効果によって味を再現する試みが進められている。

#### (e) 嗅覚ディスプレイ

匂いは色や味などとは異なり、基本となる要素が確認されていない。そのため、特定の匂いを再現するには、1対1で対応した匂い物質が必要となる。東京ディズニーランドのアトラクションであるミッキーのフィルハーマジックでは、

Table 1.1: Type of somatic sensation

皮膚感覚	触覚 (tactile sensation), 温度感覚 (thermal sensation), 痛覚 (pain)
深部感覚	位置覚 (sense of position), 運動覚 (sense of moment), 力覚 (sense of force)

3D 映像とともに匂いを呈示しており，ケーキが登場する場面において甘い香りの演出により臨場感を高めている．しかし，このような手法では，様々な匂いの呈示が可能なシステムを開発するために，膨大な数の匂い物質を保有しなければならない．なお，匂いは空気中に留まってしまうので，匂いの切替などの制御が難しいという課題がある．

#### (f) 体性感覚ディスプレイ [51]

体性感覚は，皮膚感覚（表在感覚）と深部感覚に大別できる．皮膚感覚は，皮膚と物体が接触したことによる皮膚の機械的変形や時間変化，温度変化を検出する．一方，深部感覚は，骨格筋や腱，関節に対する変化を検出する．皮膚感覚および深部感覚はさらに **Table 1.1** のように分類される．体性感覚の受容器は全身に分布しており，そのすべてを刺激することはほとんど不可能であるため，手や足など特定した体の部位に刺激を与えるディスプレイが開発されている．このように体性感覚に物理刺激を呈示するディスプレイは，ハプティック・インタフェース (haptic interface) と呼ばれ，皮膚感覚を刺激する触覚ディスプレイと筋および腱を刺激する力覚ディスプレイに分類される．以下に，力覚ディスプレイおよび触覚ディスプレイそれぞれに対して研究動向をまとめる．

#### (g) 力覚ディスプレイ

力覚ディスプレイは，VR 空間においてオブジェクトや環境との接触によって生じる反力を呈示する．人体に力を作用させる機構として，手や腕と力覚ディスプレイとの間での相互作用によって反力を呈示する方法が提案されている．こ

これらの手法は、外骨格型、道具媒介型、対象指向型の三つに分類される。

外骨格型は、人体にフレームや多関節マニピュレータを沿うように装着する方法である。この方法を用いたディスプレイとしては、Immersion 社の CyberGrasp/CyberForce や Nakagawa らの遭遇型多指マスタハンド [54] などが挙げられる。これらのシステムでは、ワイヤやモータを制御することで五指に対してそれぞれ独立した力を呈示することができる。そのため、VR 空間の中で物体に触れる感覚だけでなく、物体の把持において指同士で生じる相互作用を表現することができる。一方、脱着に手間がかかったり、手腕の骨格や大きさなど個人差に対する調整が必要である。

道具媒介型は、操作者がペン型のデバイスなどの道具を利用し、それを介した操作によって生じる反力を呈示する方法である。この方式のディスプレイは、道具を把持して作業を行うので、把持型ディスプレイとも呼ばれる。マウス型の触覚マウス（富士ゼロックス株式会社）[52] やペン型の PHANToM（Sensable 社）[53] のように、商用として実用化されているものも存在する。触覚マウスは、2次元リニアアクチュエータが搭載されたマウスである。凹凸感や振動、うねりなどを呈示し、画面上の図形や画像を触覚情報により擬似的に表現する。ペン型のデバイスである PHANToM では、VR 空間において、物体を突くとめり込み量に応じた反力が電動モータによって呈示される。なお、物体を持ち上げる際の重さなども把持部を介して感じることもできる。さらに、外骨格型とは異なり、個人差による調整や装着の手間を必要とせずに利用することができる。一方、把持型ディスプレイでは、3次元空間におけるポインティング作業において、効果器を把持した状態で上下方向に手を動かしたり、位置を保持したりしなければならない。そのため、長時間の操作において操作者に疲労が蓄積するという課題がある。

対象指向型は、VR 空間内における物体との接触で生じる反力を操作者の手のひらなど面に対して呈示する方法である。外骨格型および道具媒介型では点接

触に限定されることに対して、対象指向型は面接触を扱うために対象をより自然に知覚することが可能である。しかしながら、自在に変形を制御可能な物質は現在までに見つかっておらず、このような面接触による接触力呈示を実現することは難しい。そのため、近似的に接触力を面に呈示する方法として、アクチュエータアレイ [55] や空気圧 [56] を用いたディスプレイが提案されている。FEELEX は、直動アクチュエータをアレイ状に配置し、上下に駆動させることで、操作者の手に凹凸面を呈示する。空気圧を用いた方法では、バルーンを複数個用いることで、面を呈示するだけでなく、把持行動のような多方向からの接触も表現することができる。

(h) 触覚ディスプレイ [57–60]

触覚ディスプレイは、皮膚感覚を刺激することで触感を呈示する。触感呈示の対象となる触感要素は、表面テクスチャ感、硬軟感、温度感、粘着感など様々な要素がある。皮膚感覚受容器は皮膚の表面に広く高密度に分布しているので、適切に刺激するためには高度なアクチュエータ技術が必要となる。物体表面の凹凸形状や材質感など表面テクスチャ感を呈示するために、圧電素子、形状記憶合金、高分子アクチュエータ、電気刺激、超音波、静電アクチュエータ、振動モータなどが用いられている。硬軟感を呈示する方法としては、ダイラタント流体などを利用することで呈示面の柔らかさを変化させる方法と人の知覚特性を利用することで擬似的に柔らかさを呈示する方法がある。また、ダイラタント流体を利用することで、粘着感、硬さ感、粗さ感を呈示する試みも報告されている。温覚および冷覚を刺激するためには、ペルチェ素子などが用いられる。

圧電素子は、複数個用いることでピンを駆動し、振動刺激や分布圧覚の呈示を行うピンアレイ方式のディスプレイとして利用される。圧電素子は、機械的エネルギーと電氣的エネルギーを可逆的に変換することができる。圧電素子を用いたアクチュエータでは、電圧を与えることによって変位を生み出す用途で利用される。圧電素子は、電圧駆動による固体変形利用のために、高精度、高

速応答，小型で高密度配置が可能，構造がシンプルなどの特長がある．圧電アクチュエータ（piezoelectric actuator）は，ピエゾアクチュエータとも呼ばれ，積層型とバイモルフ型に分類される．積層型ピエゾアクチュエータは，大きな力を発生できるという特長があるが，ストロークが短い．

一方，バイモルフ型ピエゾアクチュエータは，発生力は小さいが，1[mm]程度の大きい変位を発生することができるという特長を持っている．そのため，バイモルフ型ピエゾアクチュエータを用いたピンアレイ型触覚ディスプレイは，レリーフのような凹凸感を指の表面に呈示することに有効である．なお，このような方式を用いたディスプレイを利用することで，操作者の支援を行うことを目指した研究が進められており，OPTACON（optical to tactile converter）[61]や点字ディスプレイのような点字情報端末機が開発されている．さらに，ピンアレイ型触覚ディスプレイをマウスに搭載することで，2次元のポインティング作業と同時にVR物体の表面テクスチャを呈示する研究が進められている [62, 63]．

形状記憶合金（Shape Memory Alloy，以下SMA）は，他のアクチュエータと比較しても高いエネルギー密度を有し，小型の素子でも大きな発生力と変位を生成できるという特長がある．そのため，圧電アクチュエータと同様にピンアレイ型触覚ディスプレイに利用される．SMAワイヤアクチュエータをアレイ状に配置したディスプレイでは，振動刺激を特定の条件で呈示することで触覚の高次知覚であるファントムセンセーション（Phantom Sensation, PS）や仮想運動（Apparent Movement, AM）を生起させることができることが報告されている [64]．PSとは，皮膚上の異なる二点を同時に一定以上の周波数で刺激すると，二点間における特定の部位に新たな刺激を感じる現象である．この現象を利用することで，少数の刺激点で刺激可能な領域を拡大させることができる．一方，AMとは，皮膚上の二点を立上がり位相付きで刺激した場合に，刺激が二点を結ぶ直線上を連続して移動するように感じる現象である．つまり，AMに

よってこれまで困難であった皮膚上を何かが移動したり、なぞられたりしている感覚を表現することができる。また、刺激における周波数を変化させることで、素材のテクスチャ感覚の呈示への応用も検討されている。

高分子アクチュエータは、化学的刺激や電氣的刺激による高分子素材の変形を利用したものである [65, 66]。化学アクチュエータ (chemical actuator) として、イオン導電性高分子ゲルである PFS (perfluorosulfonic acid) を用いた ICPF (Ionic Conducting Polymer Gel Film) が挙げられる。電圧を印加すると屈曲する性質を利用しており、アレイ状に配置することで、タオルやデニム生地など布地の触感を演出することができる。なお、アクチュエータの駆動周波数を変化させることで皮膚表面に与える刺激の方向を制御することができる。一方、電気駆動高分子 (Electroactive Polymer) アクチュエータとしては、誘電性エラストマーを用いたものが検討されている。誘電性エラストマーは、マクスウェル応力を利用して電気エネルギーを力学的エネルギーに変換する性質を持っており、電圧を印加すると膨張する。外部電場やクーロン力により活性化され、時間応答性、安定性、耐久性に優れている。しかし、1~10[kV] の高い駆動電圧が必要であるという問題もある。

電気刺激を用いた触覚ディスプレイでは、皮膚表面電極から電流を流し、皮膚下の神経を活動させる。操作者の指先に低周波の電気刺激を加えることで、指先に対して振動する感覚や一時的な衝撃を呈示することができる。電気触覚ディスプレイは、機械的な可動部を必要とせず、機械的な触覚ディスプレイと比較すると、薄型軽量、低消費電力という特長がある。そのため、タブレット端末の表面に設置し、触覚呈示を行うことで操作性の向上を目指したシステムへの応用も提案されている [67]。しかし、電気刺激によって現実に近い触刺激を生成することは難しく、感覚的順応への対処などの課題もある。

超音波を利用した触覚ディスプレイでは、超音波振動子アレイを用いた装置が提案されている [68]。離れた位置から手指に触覚刺激を呈示するために、非

拘束での操作が可能である．そのため，操作者に対する動作制約を軽減することができる．超音波振動子アレイの各振動子の位相を制御して超音波を集束させ，対象に刺激を呈示する．時間および空間解像度が高いという特長があり，非接触で 10[mN] 程度の力を発生させることができる．水面に軌跡を描くことも可能であり，柔軟あるいは軽量の物体とのインタラクションへの応用が検討されている．

静電アクチュエータを利用した触覚ディスプレイとして，薄膜金属ガラスやフィルムを用いたものが挙げられる [69, 70]．このアクチュエータでは，駆動の際に静電引力を利用する．電極を形成し，電圧を印加することで利用可能であるため，単純で比較的平面的な構造で構成できるので，半導体部品の微細加工技術を利用することでマイクロ化が容易である．したがって，MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を利用し，高密度に集積することができる．そのため，機械受容単位の分布密度に相当するアクチュエータアレイへの応用が期待される．

振動モータを利用した触覚ディスプレイでは，iFeel Mouse, iFeel MouseMan (Logitech 社) [71] が挙げられる．これらのデバイスは，振動のフィードバック機能が搭載されたマウスである．画面操作を行う際にマウスに内蔵されたモータにより，操作に応じた振動刺激を呈示する．しかし，現状として上述のマウス型の力触覚フィードバック機能搭載インタフェースは，ほとんど普及していない．これには，主に二つの要因が考えられる．第一に，呈示される力覚と触覚の範囲が狭いことが挙げられる．第二に，ポインティングの自由度が 2 自由度に限定されているために，利用範囲が PC 画面上のポインティングに限定されることが一因となっている．

ダイラタント流体を利用した触覚ディスプレイでは，物質の性質を用いることで触感を呈示する．ダイラタント流体は，外力によって硬化し，力を解くと流動性を獲得して液体のように振る舞う性質を有している．そのため，呈示面の



柔らかさを制御することによる硬軟感呈示として、流体を加振することで弾性を変化させる方法が提案されている [72]。また、複合的な感覚表現をするために、流体の構成成分のうち水のみを吸入出し、濃度を調整する方法が報告されている [73]。ユーザは、粒子のフィルタおよび水の吸入出機構を備えた装置を手に装着し、ダイラタント流が敷き詰められた水槽中で力触覚インタラクションを行う。この方法では、硬さ感だけでなく、粘着感や粗さ感を生成することが可能である。しかし、触感呈示は、水槽平面上に限定されており、3次元空間への拡張は実現されていない。

硬軟感の呈示では、指先と対象との接触面積を変化させることで柔らかさを呈示する手法も提案されている。対象表面が人間の指先より柔らかい場合には、対象物が指先に合わせて変形する。一方、対象表面の方が硬い場合には、皮膚の方が対象表面の形状に合わせて変形する。そこで、指先押下力を検出してゴム膜を貼ったシリンダ内の水量を制御することによって、指先接触面積を動的に制御する装置が報告されている [74]。物体と指が接触したときの接触面積を計算し、反力に応じてその接触面積を呈示することで、柔らかさを表現する。接触面積と力の関係だけで柔らかさを提示可能であることが実証されている。

温度感覚ディスプレイでは、光学式タッチパネルとペルチェ素子を利用することで画像と温冷感覚の連動したインタラクションを実現するシステムとして Thermoesthesia が提案されている [75]。ディスプレイ面が非常に大きいため複数のユーザが同時に利用できる特長がある。ペルチェ素子とは、熱電冷却素子を複数接続したものである。直流電流を流すことで、一方の面が冷却し、他方の面が加熱する。そのため、冷却、加熱面の切り替えを制御することができる。物体の温度感を呈示するために、指が物体に触れた際の温度変化をあらかじめ計測しておき、ペルチェ素子の温度をそれに即して制御する方法が提案されている [76]。物体接触時の皮膚温度変化パターンを指先に模擬することで、金属や木材のような材質感を呈示することが可能である。

以上のように、VR システムとの相互作用を実現するために、多種多様な構成素材や原理を利用した入力および出力インタフェースの研究開発が盛んに行われている。操作者の位置および姿勢、運動を計測する入力インタフェースは、いずれも一長一短があり、VR システムを構築するには用途に応じた設計が必要である。性別・年齢を問わず誰もが利用できる人間が使いやすく、人間にやさしいシステムを開発するためには、人間工学、認知科学、エルゴノミクスデザインなど人間を中心とした入力インタフェースの開発を進めていかなければならない。出力インタフェースは、特に視聴覚に対しては成熟度の高いディスプレイが実現されており、商用デバイスとして普及しているものも数多く存在する。しかしながら、それらのディスプレイと比較すると、その他の感覚に対応するものの完成度は高いとは言えないのが現状である。

また、近年の社会背景から、テレグジスタンスやリハビリテーションへの適用を視野に入れた VR への期待が高まっている。このようなシステムでは、環境との相互作用や物体操作が求められるために、環境や物体から受ける反力と物体に触れた触感の呈示が有効であると考えられる。触覚と力覚は、それぞれ皮膚と筋・腱の感覚器官からの感覚情報が脳連合野内で融合して生じる感覚である。したがって、人間の知覚・認知機構の観点からも明らかである。そのため、人間の感覚のうち特に力覚と触覚を同時に刺激することが可能なディスプレイが求められている。本研究の先行研究では、ピン・アレイ型の圧覚呈示装置をマスタ・マニピュレータに搭載した力覚と触覚の融合型ディスプレイ装置を開発した。この先行研究では、VR 空間におけるペグ挿し作業にこの装置を適用し、実験を行っている。この実験結果から、物体の操作において VR 物体を持つ／離す動作の瞬間に触覚の効果が大きく現れることを確認している [77]。しかし、力覚ディスプレイに比べて触覚ディスプレイの実現が困難であることから、力覚と触覚を同時に用いる VR についてはあまり議論されていない。本節で紹介したように、触覚ディスプレイに採用された構成素材および原理の数が多いことから、この分野の研究が盛んであることを示している。その反面として、現在までの触覚ディスプレイの完成度は必ずしも十分でないことを示唆している。そこで、適切な刺激を呈示可能な力覚・触覚の融合型ディスプレイを開発するために

は、ヒトの力覚および触覚に関する知見が必要である。次節では、新しい力覚・触覚の融合型ディスプレイの設計製作に先立ちヒトの力覚および触覚に関して生理・心理学的に明らかにされた知見についてまとめる。

#### 1.1.4 ヒトの力覚・触覚 [58, 59, 78]

ヒトは、物体に触れることで知覚できる力や触感の力覚・触覚情報によって外部環境を認識している。力覚は、深部感覚に含まれる感覚である。深部感覚の受容器は、筋肉、腱、関節に存在し、体内の情報を受容するため、固有受容器（proprioceptor）と呼ばれる。固有受容器には、筋紡錘（muscle spindles）、ゴルジ腱器官、関節受容器がある。力覚の知覚には、筋紡錘およびゴルジ腱器官が関与するものと推定されている。筋紡錘は、筋肉の収縮・伸長の程度や動きの情報を伝える受容器である。錘内筋の長さを調整することで、錘外筋の収縮および伸長に合わせて自己の長さを変え、それらの情報を知覚する。ゴルジ腱器官は、筋肉と腱の移行部に存在し、筋肉が収縮するときによく反応する。筋肉の伸長および収縮に対する反応は筋紡錘と腱器官で異なり、双方からの情報を得ることで深部情報を精密に伝える仕組みとなっている。一方、触感は、皮膚に刺激が与えられた際に、皮膚の変形や振動の情報を認識し、感覚として捉えることができる。ヒトの手は、触れたものの特徴を知覚する識別感覚系の機能が非常に優れている。皮膚の構造と皮膚機械受容器を **Figure 1.2** に示す。皮膚は無毛部と有毛部に分けられるが、ともに外側から内側に向かって表皮、真皮、皮下組織の3層からなる。皮膚感覚の受容器は、表皮と真皮の境界から皮下組織にかけて分布する。受容器の分布密度は、掌から指に向かって高くなるため、指先が最も敏感である。触覚的情報を捉える皮膚機械受容器は、マイスナー小体（Meissner's corpuscle）、メルケル触盤（Merkel's disk）、パチニ小体（Pacinian corpuscle）、ルフィニ終末（Ruffini ending）の4種類であり、すべて特殊構造を持つ。なお、機械受容器は、それぞれ主に担当している触感が異なっている。無毛部ではすべての受容器が存在することに対して、有毛部ではマイスナー小体が存在しないが、有毛受容器がある。

ヒトの触覚に関する機能を考える上で、皮膚機械受容器とそれと連なる神経線維を合わ

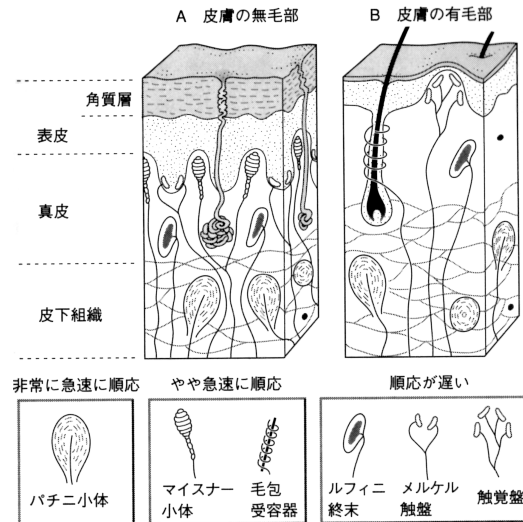


Figure 1.2: Tactile perceptron organs [78]

せてひとつの単位として捉え，機械受容単位（機械受容ユニット，mechanoreceptive unit）と呼ぶ．ヒトの無毛部の皮膚機械受容単位は，**Table 1.2** に示すように，受容野（receptive field）の形態と神経発射特性から4種類に分類される．それらは，速順応型単位（FA I: Fast Adapting Type I unit），速順応型単位（FA II: Fast Adapting Type II unit），遅順応型単位（SA I: Slowly Adapting Type I unit），遅順応型単位（SA II: Slowly Adapting Type II unit）と名付けられている．受容野とは，刺激が加えられた際に受容単位が神経発射する皮膚範囲である．FA IおよびSA Iは，小受容野で境界が鮮明である．一方，FA IIおよびSA IIは，大受容野で境界が不鮮明である．また，皮膚機械受容単位に対応する機械受容器的対応は明らかになっており，FA Iがマイスナー小体，FA IIがパチニ小体，SA Iがメルケル触盤，SA IIがルフィニ終末であるとされている．マイスナー小体は，指と物体の間に生じる滑りに対してすばやく応答する．メルケル触盤と比較すると，指の中に多く存在しており，四倍の感度を持っている．しかし，形の触感に関する情報については，メルケル触盤ほど正確に捉えることができない．パチニ小体は，他の機械受容器に比べて10～100倍ほど大きく，200～500[Hz]の高い振動周波数に応答する．触れている物体全体の振動に対して反応し，細かい凹凸形状の触感に応答する．なお，振幅が1[ $\mu$ m]以下の微細刺激でも信号を増幅することで検出することができる．メルケル触盤は，形の触感に関する

Table 1.2: Type of mechanoreceptor

	FA I	FA II	SA I	SA II
受容器	マイスナー小体	パチニ小体	メルケル触盤	ルフィニ終末
順応性	速い	速い	遅い	遅い
受容野	小受容野 鮮明な境界	大受容野 不鮮明な境界	小受容野 鮮明な境界	大受容野 不鮮明な境界
検出特徴	速度 空間パターン 皮膚曲率変化	加速度 振動	強度 空間パターン 皮膚曲率	皮膚の引っ張り

情報を伝える。凹凸のある形状や質感の触感に反応し、指先に触れている物体表面のエッジに対してよく応答する。メルケル触盤は、真皮と表皮の間に分布しており、皮膚表面から近いところに位置する。表皮と真皮の間は波構造となっており、指が対象物体に触れるとメルケル触盤が反応しやすくなっている。すなわち、皮膚が変形した際に力が加わりやすい部位にメルケル触盤が分布していることから、皮膚の構造は、凹凸感の触感が増幅されるメカニズムとなっていることが解明されている。なお、触っているものの曲率についての情報を捉えることができる。これらの識別において、触覚は視覚よりも優れた機能を持っている。また、硬軟感に対する知覚は、主にメルケル触盤からの信号により認識されることが報告されている [79]。ルフィニ終末は、皮膚の伸びに対して応答するといわれている。しかし、役割が明確ではなく、担当する触感の解明については研究段階にある。

触覚の分解能は、触2点閾（two-point threshold）の測定によって調査されている。触2点閾とは、2つの刺激が同時に与えられた際に、それを別々の刺激として知覚できる間隔の最小値のことである。身体の部位により異なるが、大体1～数10[mm]程度で、脳の体性感覚野で広いエリアを持つ部位ほど感度がよい。触2点閾は、手指や口唇、舌などで小さ

く 2～3[mm] であるが，上腕，背，大腿などでは大きく 15～30[mm] に達することが解明されている [80] ．

ヒトが感じる触感，触り方によっても変化することが知られている [81–83] ．皮膚に対する外部刺激に対する認識が受動的または能動的であるかによっても，知覚できる情報は量および質の両面で異なる．刺激を受動的に受け取る認識は，パッシブタッチ（受動的触知覚，passive touch）と呼ばれる．一方，手や指を動かして刺激を受け取る認識をアクティブタッチ（能動的触知覚，active touch）と呼ぶ．粗さの識別は，対象における表面の性質と動きの有無で決まるため，アクティブタッチとパッシブタッチによる知覚には差がないと考えられている．しかし，触対象の 3 次元形状認識（実体触知）において，アクティブタッチの方が認識精度が高いという報告がされている．精度が向上する理由として，アクティブタッチでは手指や腕を自由に動かして触覚情報を得ようとするので，皮膚感覚だけでなく深部感覚が関与するためであると考えられる．なお，物体の探索作業に関する実験では，指先皮膚の触覚に加えて，腕の深部感覚情報をフィードバックすることでアクティブタッチの方がパッシブタッチよりも探索時間が短縮されることが報告されている [84] ．つまり，アクティブタッチは探索効率に関して優位であることが示されている．

また，ヒトの触動作には特有の探索活動があることが解明されている．同じ対象に触れるとしても，テクスチャ，重さ，形状など調査する特性の違いによって手の動作が異なることが報告されている [85] ．それらの特徴は，**Figure 1.3** のように 6 種類に分類された．第一に，表面粗さの質感などテクスチャを調べる場合には，手を横に動かす動作が用いられる．第二に，硬軟感を調査する際には，手を押し付ける動作が見られる．第三に，冷温感を確かめるには，手を静止して接触させる動作が用いられる．第四に，重さ重さを調べるときには手で持ち上げる動作，第五として，全体の形や体積を調べるための包み込む動作，第六として，全体としての形や細部を知るために輪郭をなぞる動作がある．このように，ヒトは調査目的に応じて触り方を変えることで，情報の認識精度を高めている．

また，ヒトの触覚認識において，触覚の錯覚（触錯覚）という現象がある [86] ．触錯覚の研究において，Comb イリュージョンやベルベットハンドイリュージョン（Velvet Hand

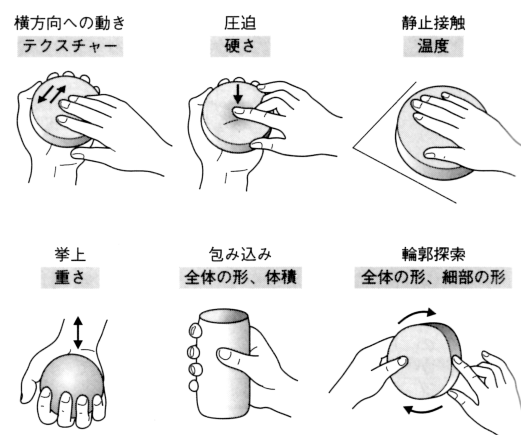


Figure 1.3: Exploratory procedures and associated object properties [78, 85]

Illusion, VHI) [87] , ラバーハンドイリュージョン (Rubber Hand Illusion, RHI) [88] , 疑似力触覚 (pseudo-haptics) [89] が報告されている. Comb イリュージョンおよび VHI は触刺激によって生じる錯覚である. 一方, RHI および疑似力触覚は, 視覚と体性感覚のモダリティ間相互作用によって生じる錯覚である.

Comb イリュージョンとは, 櫛の歯に指をあてた状態で, 櫛の歯をペンなどの先で擦ると, 歯は指に対してせん断刺激を与えているにもかかわらず, 指の表面に対して垂直方向の刺激として歯の先が飛び出しているように感じる錯覚である. ピン・アレイ形触覚ディスプレイによって触圧覚とともに振動を与えることで Comb イリュージョンによる触感を呈示できることが報告されている [90]. 一方, VHI とは, 両手で鋼線の金網を挟み両手をこすり合わせると本来存在しないベルベット生地のような布あるいは柔らかい紙のような感覚が生じる錯覚である. これらの触錯覚には, 皮膚に垂直に作用する圧覚に加えて, せん断方向の振動刺激が重要であることが解明されている. なお, 滑らかな物体表面の触感を呈示できる触覚ディスプレイの開発に向けて, VHI の機構を解明する研究が進められている [91].

RHI とは, 触覚の位置の錯覚と身体保持感の錯覚を引き起こす現象である. 以下に RHI を引き起こすための手順を示す. まず, 参加者自身の手 (リアルハンド) とゴムの手 (ラバーハンド) を机の上に並べて置く. この際に, リアルハンドを見えないように仕切りを

立てる．一方，ラバーハンドは参加者に見える位置に配置する．次に，参加者がラバーハンドを観察しているとき，リアルハンドとラバーハンドを同時に撫でたり触ったりすることで同期した感覚を与える．その結果，ラバーハンドに刺激を与えた際に，その様子を観察することで，空間的にラバーハンドの位置から触れられているように感じる．また，ラバーハンドが自分の手であるように感じる．RHI は，手や腕のリハビリテーションシステムへの応用も検討されている [92]．目標とする手の動作を視覚情報として呈示し，運動をイメージしながら追従させるつもりで手を動かす訓練を重ねることで，手の運動機能を回復させることが期待できる．疑似力触覚は，視覚情報によって疑似的な力覚・触覚を錯覚させる現象である．例えば，マウスを操作する際に，モニタ上のマウスポインタの移動速度を減少させると，操作者の手指や腕に移動方向の逆方向に抵抗を受けているような錯覚が生じる．このように，知覚する力および触覚情報は視覚情報によって影響を受けることが知られている．この錯覚現象によって，反力や凹凸を疑似的に呈示できることが確認されている．このことから，疑似力触覚を利用することで物理デバイスを用いずに力覚呈示を行うことが可能である．しかし，その知覚の大きさには個人差があり，大きな力の呈示が困難であるという課題がある．

### 1.1.5 力触覚ディスプレイに求められる機能と実現に向けた方針

これまでの議論から明らかなように，現代の情報化社会では，人間にやさしく，支援することができるヒューマン・インタフェースが求められている．しかし，現状で数多く見受けられるインタフェースは，人間が機械に合わせることを前提としたものがほとんどである．そのため，性別・年齢を問わず誰もが利用できるレベルには至らないと考えられる．そこで，人間を中心とした人間工学，エルゴノミクスデザイン，アフォーダンスに基づいた機器の設計が必要である．それに加えて，人間の感覚に適合した情報を呈示できる革新的インタフェース技術の発展が望まれる．また，ヒトの五感に刺激を的確に与えるインタフェースは，より正確で高臨場感を伴う作業を可能にする．そのため，五感ベースのヒューマン・インタフェースは，VR やテレイグジスタンス，リハビリテーションなど様々な分野



への適用が期待される。VRでは、力覚ディスプレイにより与える運動負荷や運動の種類を利用者の意思に従って調整でき、触覚ディスプレイにより皮膚とVR物体の接触により生じる感覚を疑似的に体験できるという特長がある。したがって、実世界と同様の自然な感覚、またはそれ以上の感覚を得ることにより高度な作業を可能にするには、力覚と触覚を同時に呈示できる新しいヒューマン・インタフェースの実現が必要であると考えられる。

力触覚ディスプレイに求められる機能について考える上で、操作性および呈示性能の両面について検討する必要がある。そこで、本節では、操作性および呈示性能それぞれに対して求められる機能と達成に向けた方針を示す。

操作性に関して必要な機能としては、3次元空間における操作、装置による拘束感の軽減、多自由度での物体触知、操作における疲労感の軽減が挙げられる。VR空間において作業を行うことを目的としたシステムでは、実空間と同じ3次元空間での操作が求められることは明らかである。そのため、マウスやタッチパネルのような2次元操作ではなく、3次元ポインティングとともに姿勢情報が入力可能な機構が求められる。なお、3次元位置および姿勢の入力に関して、力覚ディスプレイを入出力装置として利用することで装置の大型化を防ぐことができると考えられる。本研究では、把持型ディスプレイとリンク方式による位置および姿勢計測の特長を組み合わせた手法を提案する。力覚ディスプレイは三種類の手法に分類され、いずれも一長一短がある。外骨格型では、操作者に拘束感を与えるという短所が存在する。また、対象指向型では、制御の複雑化が考えられる。それに対して、把持型は、比較的簡単な機構で構成することができ、拘束感を感じずに操作を行うことが可能である。しかし、把持型ではポインティングの際に、効果器を把持した状態で上下運動をしたり、位置の保持をする必要があるため、長時間の操作において操作者に疲労が蓄積するという課題がある。そこで、2次元平面と鉛直方向における位置の入力をそれぞれ独立して行うことを提案する。2次元平面における位置情報は、リンク機構を有する平面マニピュレータによって獲得する。操作者は、マニピュレータの先端を把持して操作を行う。そのため、マニピュレータの各関節に搭載されたエンコーダの角度情報から順運動学計算を行うことで操作者の手の位置情報を算出できる。一方、鉛直方向の位置制御に

関しては、TrackPoint のように力を変位に置き換える手法を取り入れる．そのため、操作者の手は、マニピュレータによって支えられるので、ハンドレストに手を置くように操作できる．したがって、3次元 VR 空間の操作における疲労を軽減することができる．なお、アフォーダンスによる効果によって装置に対する前提知識を必要としない操作を可能とするために、把持部をマウスと類似した形状とする．マウスは PC 操作に一般的に利用されている装置であるため、アフォーダンスの効果が期待できる．また、物体の形状認識では多方向からの触診が有効であるため、多自由度による接触を可能とする必要がある．しかし、一般的な把持型ディスプレイでは、物体との接触が点接触となっている．また、他方式においても多自由度を実現するには、アクチュエータを増加する必要がある、機構の複雑化・大型化が懸念される．そこで、操作者の手の位置を表す VR 呈示面を  $z$  軸だけでなく  $x$  および  $y$  軸方向に回転させることで自由度の増加を実現する．この制御方法によって、アクチュエータを増加することなく、面接触による物体表面情報および形状の知覚が可能となる．

一方、呈示性能に関して必要な機能としては、物体との接触時に生じる接触力およびモーメント、物体表面の凹凸感、物体の 3次元形状、材質感、冷温感、硬軟感が挙げられる．本研究では、物体操作に焦点を当てているため、接触力およびモーメント、物体表面の凹凸感、物体の 3次元形状、硬軟感の呈示に着目する．接触力およびモーメントは、前述の平面マニピュレータによって手腕の筋・腱に呈示することが可能である．静力学計算によって接触力およびモーメントを計算し、マニピュレータの各関節に搭載したモータによって呈示する．そのため、他方式の力覚ディスプレイに比べて複雑な計算および機構を要せずに力覚呈示を行うことができる．また、ヒトは指の触覚を通して物体の触感を得るため、操作部に触覚ディスプレイを搭載する必要がある．本論文で紹介したように触覚ディスプレイに採用された構成素材および原理は多種多様であり、呈示可能な触感はそれぞれ異なる．しかし、用途に応じて呈示面を取り替えたり、複数の原理を組み合わせたりすることは、装置の大型化・複雑化を招き、実用的ではない．したがって、機構を変えることなく、複合的な感覚が呈示可能な触覚ディスプレイが求められている．ヒトの触覚に関する知見か

ら、凹凸感や形状、硬軟感の知覚にはメルケル触盤からの信号からの影響を強く受けることが解明されている。さらに、メルケル触盤は垂直方向の変形（圧）によく反応することが知られているため、ピン・アレイ型触覚ディスプレイによる刺激が有効であると考えられる。なお、ピン・アレイ型触覚ディスプレイにおける触知ピンの配置間隔を指先の触2点閾である2[mm]程度にすることで的確な刺激を呈示可能である。触2点閾に対応した刺激を呈示可能であることから、ピン・アレイ形触覚ディスプレイは他方式よりも優位であると考えられる。また、硬軟感は、触刺激のみで呈示することは困難であると考えられるため、疑似力触覚を同時に呈示する方法を提案する。疑似力触覚による力触覚呈示は、知覚の大きさには個人差があり、大きな力の呈示が困難であるという課題があるが、反力や凹凸を疑似的に呈示できることが確認されている。ヒトの知覚する力および触覚情報は視覚情報によって影響を受けることが知られているため、触知ピンによる触刺激と疑似力触覚を組み合わせることで双方の呈示能力を補完し、強調することが期待できる。物体の3次元形状の呈示については、触知ピンによる触刺激と前述のVR呈示面の制御方法によって多方向から触診することで実現することができる。そのため、アクチュエータを利用して呈示面を実際に回転させることなく、操作者に3次元形状を知覚させることができる。なお、多自由度の触診を実現すれば、物体の触診方法の汎用性を拡張することができる。ヒトは調査目的に応じて触り方を変えることが知られており、より自然な触診によって直感的な操作を可能とする。

## 1.2 本論文の目的

これまでの議論から分かるように、物体操作を伴うVRでは、視覚、力覚、触覚に適合した刺激を呈示することで操作者を支援するヒューマンフレンドリー・インタフェースが求められている。しかし、視覚および力覚ディスプレイに比べて触覚ディスプレイの実現が困難であることから、これらの感覚を融合したマルチモーダル・インタフェースについてはあまり議論されていない。なお、一般的な力触覚ディスプレイの研究開発では、3次元VR

空間での操作において、実世界に近い感覚を再現することに注目している。しかし、リアリティを追求するあまりに、操作によって生じる疲労感までもが再現されることが想定される。さらに、現状で数多く見受けられるインタフェースは、人間が装置に合わせることを前提としている。このようなインタフェースでは、操作者に拘束感や疲労感を与えてしまい、直観的な操作についても実現できないことから、人間にやさしいインタフェースとすることができない。そこで、本研究では、低拘束かつ低疲労であり、直観的な操作を可能とする人間にやさしいインタフェースの開発を目指している。さらに、力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイとすることで、モダリティ間相互作用によって認識および操作の両面における精度の向上が期待できる。

本研究の第一の目的として、低拘束かつ低疲労であり、力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイを開発する。本装置は、ディスプレイ装置、駆動回路、PCなどから構成する。ディスプレイ装置は平面3リンクマニピュレータおよび先端に搭載した分布圧覚ディスプレイから構成される。分布圧覚ディスプレイの下には圧力センサが搭載されている。2次元平面における位置情報は、力覚呈示装置として採用したマニピュレータの関節角度から、順運動学計算により取得する。マウスとは異なり、2次元のポインティングの他に操作部の回転の情報とVR環境の干渉も扱うことができる。なお、平面マニピュレータではあるが、鉛直方向のポインティングについて呈示部に加えられた圧力に比例してVR上の鉛直変位がVR環境に伝達されるので、3次元のポインティングが可能である。腕の重量が影響する鉛直方向の運動を指先の接触力による位置制御に置き換えることで、最小限のエネルギーで操作できる。操作者の手は、マニピュレータによって支えられるので、ハンドレストに手を置くように操作できる。したがって、3次元VR空間の操作における疲労を軽減することができる。さらに、操作部をマウスと類似した形状とすることで、前提知識を要しない直感的な操作を可能とする。

本装置では、指先とVR物体またはVR物体と環境が接触したときに生じる接触力・モーメントは、物理モデルおよび静力学計算により算出し、マニピュレータにより呈示される。利用者はディスプレイ装置の先端を把持して操作を行うため、装着型のインタフェースと

は異なり、拘束感を感じずに操作できる。また、VR 物体の凹凸の情報は、接触条件に応じて圧覚ディスプレイにより呈示される。VR 空間におけるペグの操作性について議論した先行研究に引き続いて、物体操作における力覚と触覚の融合呈示の有効性および表面の凹凸状態の呈示性能に与える影響についても検討を行うために、アレイ規模を  $4 \times 12 = 48$  に拡大した触覚ディスプレイ装置を新しく設計製作した。この触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので、指示指、中指、薬指の三本を載せることが可能である。これにより、指三本で対象を触ることが可能であるため、指一本で触るより自然な触診ができる。

第二の目的として、多自由度での接触を可能とすることで、操作者に 3 次元形状を知覚させるための制御方法を確立する。一般的な力触覚ディスプレイでは、物体との接触が点接触となっており、より自然な方法である面接触による触診の実現が課題となっている。また、従来の手法で、多自由度の触診を可能とするためには、アクチュエータを増加する必要がある、機構の複雑化・大型化が懸念される。そこで、本研究では、3 次元 VR 空間内でもより直観的な作業を可能にするために、VR 空間内において操作者の指先位置を表す VR 呈示面の姿勢を力感覚によって制御する。指の重心位置の移動情報を利用し、VR 呈示面の回転を  $z$  軸だけでなく、 $x$  および  $y$  軸方向の回転を加えて姿勢を制御する。VR 物体との接触面を調整できるので、操作者は曲率や表面の凹凸情報についてより微細な変化を知覚できる。この制御方法によって、アクチュエータを増加することなく、面接触による物体表面情報および形状の知覚が可能となる。

第三の目的として、硬軟感を表現するために、触覚ディスプレイによる触刺激と疑似力触覚を同時に呈示する方法を提案し、有効性を検証する。現在の触覚呈示における研究では、表面テクスチャ感について扱ったものが格段に多く、その他の触覚要素に関してはほとんど議論されていない。その理由として、硬軟感は触刺激のみで呈示することは困難であり、深部受容器と触覚受容器の両方に刺激を加えることが必要であるが、このような同時刺激の呈示は開発途上であったことが一因であると考えられる。また、自在に変形を制御可能な物質は現在まで見つかっていないため、アクチュエータのみで硬軟感を表現することは極めて難しい。そこで、触錯覚現象を利用することにより脳を騙すことで現実感を生じさ

せる戦略をとる。本研究では、触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示する。まず、触知ピンの最大ストロークを変化させる。それに加えて、ディスプレイ面への接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を VR 物体に VR 呈示面が接触した後に変化させる。このように、触知ピンによる触刺激と疑似力触覚を組み合わせることで、双方の呈示能力を補完し、強調することが期待できる。一連の研究の端緒として、疑似力触覚とハプティック・ディスプレイを組み合わせることによる硬さ感覚への影響を調査する。

第四の目的として、本研究で開発するディスプレイを評価するとともに、力触覚ディスプレイに対する評価方法の確立に向けて、心理物理実験を利用した方法を提案する。本研究では、前節で議論した力触覚ディスプレイに求められる機能の実現に対する達成度を評価するために、以下に示す 4 つの手順で研究を進める。第一に、接触力・モーメントおよび VR 物体表面の凹凸感の呈示性能を評価するために、物体の探索、触診、把持、移動、回転、反復動作など基本操作を含んでいる組立作業を模した VR 物体の整列作業を可能とするシステムを構築する。VR における力覚・触覚呈示の有効性を検証するために、VR 物体の並べ替え精度の比較実験を行う。第二に、3 次元空間において、直感的な操作を可能とするために、上述の高さ方向の位置制御に対して、適切な接触力-位置の関係を評価実験によって求める。VR 空間において、2 つの直方体の高さの識別精度を調査し、弁別閾を求める実験を実施する。そして、ディスプレイ面に対する接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数を検討する。第三に、多自由度での接触による球形状の認識精度に対する心理物理実験を実施する。提案する制御方法によって呈示可能な VR 物体の曲率の限界を調査するために、2 つの VR 球の直径の識別精度を求める。なお、物体形状を呈示する上で、触り方による認識精度の違いについて調査し、適した触診方法を検討する。第四に、硬軟感の呈示性能を評価するために、シェッフエの一対比較法、浦の変法を用いた球の硬さ識別に対する官能評価実験を行う。VR 空間において、各試料の硬さに対する評点をつけることで、各試料の位置付けと試料間の差を調査する。

### 1.3 本論文の構成

第2章では、接触力を鉛直方向変位に置き換えることによる物体操作の実現と力触覚呈示が物体操作の精度に与える影響について検討する．力覚・触覚融合呈示形ディスプレイを開発するとともに3次元空間におけるVR物体の整列作業を可能とするシステムの開発を行い、並べ替え精度の比較実験を行う．

第3章では、高さ方向の位置制御に対して、適切な接触力-位置の関係を求めるとともに、モーメントを回転角度情報に置き換えることによる触知方式を提案する．指の重心位置の移動情報を利用し、VR呈示面の回転に関する自由度を増加させる．提案する制御方法の有効性を検証するために、球の識別精度に関する心理物理実験を行う．また、提案した多自由度の触診によって、触り方の汎用性を拡張できる．そこで、触診方法が認識精度に及ぼす影響について検討するために、2つの触診方法における球識別精度を比較した．

第4章では、疑似力触覚と分布圧覚呈示が硬さ知覚へ及ぼす影響について検証する．触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示する手法を提案する．まず、触知ピンの最大ストロークを変化させる．それに加えて、VR物体にVR呈示面が接触した後に、ディスプレイ面への接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を変化させる．シェッフェの対比較法、浦の変法を用いてVR球の硬さに対する官能評価実験を行う．

第5章では、本論文の結論を述べる．

## 第 2 章 接触力を鉛直方向変位に置き換えることによる物体操作

### 2.1 緒 言

近年の電子技術・情報技術の発展により、今や PC や携帯電話などの各種情報機器は、社会生活に必要不可欠なものとなっている。しかし、技術発達による多機能化および高機能化に伴い、機器の操作は複雑になったため、人間とシステムを結び付け、支援を行うヒューマン・インタフェースの研究・開発がますます重要視されている。現状で数多く見受けられる人間が機械に合わせることを前提としたインタフェースでは、性別・年齢を問わず誰もが利用できるレベルには至らないために、人間が使いやすく、人間にやさしいインタフェースとして人間の五感に反応する革新的インタフェース技術の発展が望まれている。これに対して、ヒトの五感に刺激を的確に与えるインタフェースによれば、より正確で高臨場感を伴う作業を可能にする。そのため、五感ベースのヒューマン・インタフェースは、VR やトレイグジスタンス [93, 94] , リハビリテーション [92, 95, 96] など様々な分野への適用が期待される。

VR を用いた物体操作において、ヒトの五感に刺激を的確に与える感覚ディスプレイがキーパーツとなっている [97, 98] 。生理学的知見によれば、力覚と触覚については、皮膚と筋・腱の感覚器官からの感覚情報が脳連合野内で融合して生じている。それに加えて、VR 物体の操作には、物体から受ける反力と物体に触れた感覚の呈示が有効なため、五感のうち特に触覚と力覚の同時呈示が求められている [99, 100] 。力覚および触覚情報を利用した VR システムには、主に 2 つの特長がある。第一に、環境や物体との相互作用により生じる感覚を疑似体験できることが挙げられる。力触覚情報を用いた臨場感のある VR は、



設計・造形などの創造活動や教育・訓練などの学習活動において特に有用である。第二に、運動負荷や運動の種類を利用者の意思に従って調整できることが挙げられる。利用者の身体状態や嗜好に合わせて適切に調整することで、効果および意欲を向上させることが期待できる。したがって、実世界と同様の自然な感覚、またはそれ以上の感覚を得ることにより高度な作業を可能にするには、力覚と触覚を同時に呈示できる新しいヒューマン・インタフェースの実現が必要であると考えられる。そこで、皮膚表面に分布する皮膚機械受容器を刺激するために、高密度のアクチュエータ・アレイを構成できる小型アクチュエータが必要である。それに加えて、物体認識においては、広範囲かつ高解像度の触刺激を呈示可能な触覚ディスプレイが求められる。しかし、これまでに開発された触覚ディスプレイでは、これらの要件を同時に満たすことが困難である [55, 90, 100–102]。そのため、力覚と触覚を同時に呈示できる複合ディスプレイの開発事例は多くはない。

本研究の先行研究として、ピン・アレイ型の圧覚呈示装置をマスタ・マニピュレータに搭載した力覚と触覚の融合型ディスプレイ装置を試作した [103, 104]。この先行研究では、2次元 VR 空間におけるペグ挿し作業にこの装置を適用し、実験を行っている。実験結果として、VR 物体の操作において物体を持つ／離す動作の瞬間に触覚の効果が大きく現れることを明らかにしている。それに加えて、比較的大きなクリアランスの場合において、力覚と圧覚の複合呈示が有効であることが確認された。また、実世界でのペグ挿し作業は3次元空間で行われるが、この実験では2次元空間における作業に置き換えている。その効果として、手を上下方向に動かす必要がないために、操作者の疲労を軽減できるという知見が得られた。

本研究では、この低疲労という特長を3次元操作において実現するために、「2.5次元操作」という新たな概念を提案する。この操作では、2次元平面と鉛直方向における位置入力をそれぞれ独立して行う。2次元平面における位置情報は、リンク機構を有する平面マニピュレータによって獲得する。操作者は、マニピュレータの先端を把持して操作を行う。そのため、マニピュレータの各関節に搭載されたエンコーダの角度情報から順運動学計算を行うことで操作者の手の位置を算出できる。また、鉛直方向の位置制御に関しては、指

先の接触力を変位に置き換える手法を取り入れる．ディスプレイ面に対する指先の接触力は，操作部の下に搭載した圧力センサによって計測される．そのため，操作者の手は，マニピュレータによって支えられるので，ハンドレストに手を置くように操作できる．したがって，3次元VR空間の操作における疲労を軽減することができる．さらに，VR物体の操作における力覚と触覚の融合呈示の有効性及び表面の凹凸状態の呈示性能に与える影響についても検討を行うために，アレイ規模を  $4 \times 12 = 48$  に拡大した触覚ディスプレイ装置を新しく設計製作した．この触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので，指示指，中指，薬指の三本を載せることが可能である．これにより，指三本で対象を触ることができるので，指一本で触るより自然な触り方ができる．

人間がVR世界において操作をする上で，最も重要な作業はポインティング操作である．対象となる物体に触れ，操作をするためには，操作者の位置姿勢情報を的確に取得することが必要である．PCなど画面上の操作を行う場合には，2次元の情報を入力するためにマウスが主に用いられている．そのため，様々な機能を搭載したマウスの研究開発が行われている [71, 105]．その一つとして，マウス型の力触覚フィードバック機能を搭載インタフェースが挙げられる．しかしながら，このようなマウス型インタフェースは，ほとんど普及していないのが現状である．これには，主に二つの要因が考えられる．第一に，呈示される力覚と触覚の範囲が狭いことが挙げられる．第二に，ポインティングの自由度が2自由度に限定されるため，利用範囲がPC画面上のポインティングに限定されることが一因となっている．また，トレイグジスタンスやリハビリテーションに広く適用できるデバイスの実現のためには，感覚呈示の範囲が広く，高い自由度のあるインタフェースが必要である．そこで，本研究では，力覚呈示装置としてマニピュレータを用いることで，指先とVR物体またはVR物体と環境が接触した際に生じる接触力・モーメントを呈示する．操作部をマウスと類似した形状としているため，前提知識を必要としない直感的な操作ができる．

本研究では，皮膚と筋・腱の感覚器官に刺激を呈示可能な力覚・触覚融合呈示形2.5次元ディスプレイを開発し，VR空間での作業を支援するインタフェースおよびシステムの

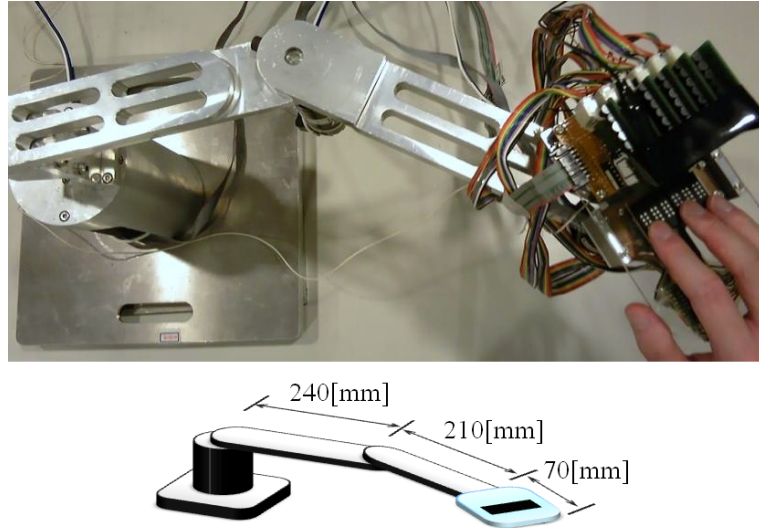


Figure 2.1: 2.5D-display generating combined tactile sensation and force

開発を目的としている．接触力・モーメントは，物理モデルおよび静力学計算により算出し，マニピュレータにより呈示される．また，VR 物体表面の凹凸の情報は，VR 物体との接触条件に応じて触覚ディスプレイにより呈示される．本研究では，接触力・モーメントおよび VR 物体表面の凹凸感の呈示性能を評価するために，物体の探索，触診，把持，移動，回転，反復動作など基本操作を含んでいる物体の整列作業を可能とする VR システムを構築する．そして，VR における力覚・触覚呈示の有効性を検証するために，VR 物体の並べ替え精度の比較実験を行う．

## 2.2 ディスプレイ装置

### 2.2.1 力覚触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイ

本研究で開発した触覚・力覚複合ディスプレイ装置システムとその構成をそれぞれ **Figure 2.1**, **Figure 2.2** に示す．本システムは，ディスプレイ装置，駆動回路，DIO ボード（Interface 社製，PCI-2466C），DA/AD 変換ボード（Interface 社製，PCI-3521），エンコーダカウンタボード（Interface 社製，PCI-6205C），PC（OS:WindowsXP）により構成され

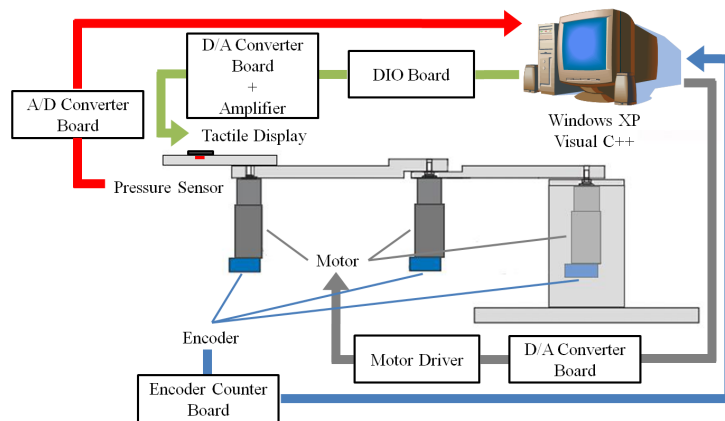


Figure 2.2: Schematic block diagram of compound display system

ている．ディスプレイ装置は，平面3リンクマニピュレータ型力覚ディスプレイおよびマニピュレータの先端に搭載した触覚ディスプレイから構成されている．なお，操作部をマウスと類似した形状としているため，前提知識を必要としない直感的な操作を可能とする．本システムでは，ポインティング操作および力覚・触覚の融合呈示における制御を以下の手順で行う．

#### 1. マニピュレータの姿勢及び手先位置情報の取得

マニピュレータの各関節に搭載されたエンコーダにより，エンコーダカウンタボードからの信号を取り込み，各関節の角度を取得する．取得した関節角度からマニピュレータの  $x - y$  軸方向の先端位置座標を求めることができる．

#### 2. 圧力センサによる力の取得

操作部の下に搭載した圧力センサにより，指先から加えられた力の取得を行う．取得した力に応じて VR 空間における  $z$  軸方向の位置情報の設定を行う．

#### 3. VR 空間における手先と環境との干渉の調査

手先位置情報に基づき，VR 空間における手先と VR 物体または VR 物体同士の接触状態，接触力及び指先における触覚情報の計算を行う．

#### 4. 力覚・触覚の融合呈示

算出された力覚・触覚情報よりマニピュレータの各関節に搭載したモータの出力トルク及び分布圧覚を求めることができる。計算結果に基づき、DA 変換ボード、モータドライバ、DIO ボードに信号を送ることにより力覚・触覚の融合呈示を行う。

本装置を用いたシステムでは、Microsoft 社の Visual C++および OpenGL を利用して開発を行った。OpenGL は、Silicon Graphics 社（現 SGI 社）の主導で開発されたグラフィックス・ライブラリ（Application Program Interface, API）である。ハードウェアや OS に依存しない特長があるため、汎用性が高い。

### 2.2.2 平面 3 リンクマニピュレータ形力覚ディスプレイ

2 次元空間における力覚呈示を行うマニピュレータ部を **Figure 2.2** に示す。本装置では平面 3 リンクマニピュレータを用いる。マニピュレータの各関節には DC モータとエンコーダが搭載されている。DC モータとエンコーダはそれぞれ maxon motor 社製の RE35（定格出力 90[W]）、HEDS5540（分解能：500 カウント／回転：4 通倍）を使用した。モータのギア比は、第 1 及び第 2 関節は 18:1、第 3 関節は 4.8:1 である。第 1 および第 2 関節の長さはそれぞれ 240 および 210[mm] である。したがって、第 3 関節には最大約 9[N] の力を発生することが可能となる。また、ベアリングとカップリングを利用することで、リンクの先端にかかる鉛直方向の力に対するたわみ剛性を向上させることができる。

### 2.2.3 分布圧覚呈示形触覚ディスプレイ

本研究で用いた触覚ディスプレイを **Figure 2.3** に示す。触覚ディスプレイには、分布圧覚呈示機構が搭載されている。分布圧覚呈示部には KGS 社の点字セル SC9 を使用した [106]。圧覚を呈示する触知ピンはバイモルフ型 piezo アクチュエータで駆動され、最大ピンストロークは 1[mm] である。SC9 の呈示面には、2 × 4 の触知ピンがマトリクス状に配置されている。本装置では、指示指、中指、薬指の三本を載せるために触知ピン・アレイ規模を

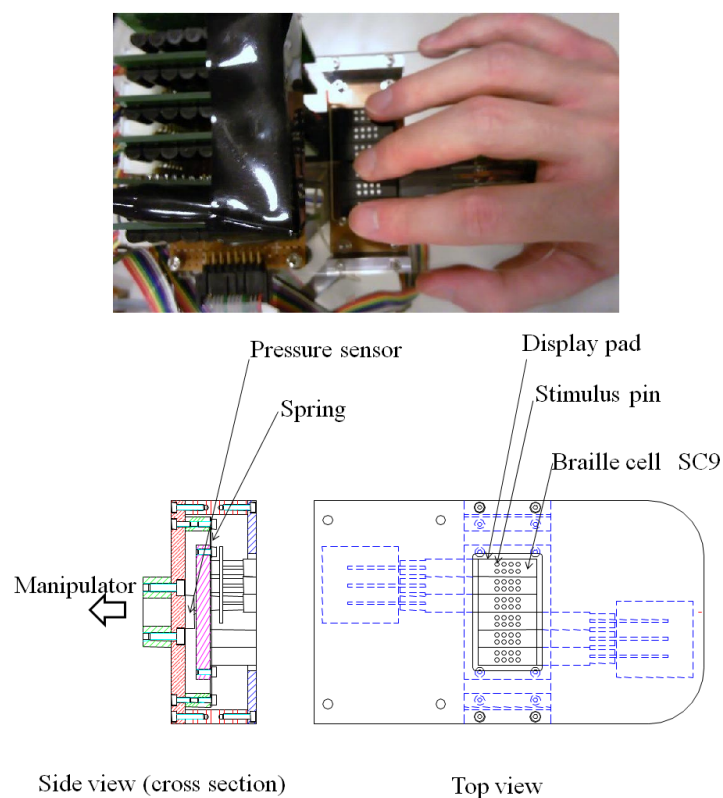


Figure 2.3: Tactile display

4 × 12とした．これにより，指三本で対象を触ることができるので，指一本で触るより自然な触り方ができる．そのため，VR 物体の触覚情報をより詳細に呈示することができる．

触覚ディスプレイは，次のような手順で制御される．まず，デジタル信号を DIO ボードに出力する．デジタル信号は，Texas Instruments 社製の OCTAL 8-BITDA コンバータ TLC5628CN に送信され，0～5[V] のアナログ信号に変換される．その信号は BOURNS ELECTRONICS 社製のチップ抵抗（680[kΩ]15[kΩ]）と ROHM 社製の高耐圧 NPN 型トランジスタ 2SC5161 で構成された増幅回路に送られ，0～200[V] のアナログ信号に変換される．このアナログ信号によりバイモルフ型ピエゾアクチュエータの制御を行い，ピンストロークは 0～1[mm] の幅を 256 階調で制御可能である．したがって，触知ピンにより詳細な触覚情報が呈示可能であり，指先の表面情報を的確に表現することができる．

## 2.2.4 VR 呈示面の鉛直方向における位置制御

CAD/CAM や遠隔操作のような物体操作を伴う VR では、物体から受ける反力と物体に触れた感覚の呈示が有効なため、力触覚呈示ができるハプティック・インタフェースが求められている。しかし、PHANToM [53] のような一般的な把持型ディスプレイでは、3次元空間におけるポインティング作業において、操作部を把持した状態で上下方向に手を動かしたり、位置を保持したりしなければならない。そのため、長時間の操作において、操作者に疲労が蓄積するという課題がある。

一方、ポインティング作業においては、IBM 社の TrackPoint のようにひずみゲージを用いて 2 次元情報を入力する方法が実用化されている。操作者は、指先で短い棒状のボタンに加えるせん断方向の圧力を調整することでマウスポインタを動かすことができる。この装置では、指先での小さい力で細かな作業をすることができるため、他のポインティング方法とは異なり、手や腕を大きく移動させる必要がない。本研究では、この特長を 3 次元操作において実現するために、鉛直方向の位置制御に対して、力を変位に置き換える手法を取り入れる。ディスプレイ面に対する指先の接触力は、操作部の下に搭載した圧力センサによって計測される。したがって、操作者は、2.5 次元操作によって 3 次元空間における物体操作が可能となる。

3 次元 VR 空間において、操作者の手の位置情報は、VR 呈示面によって表現される。**Figure 2.4** は、この鉛直方向の位置の制御方法を表している。初期状態では、VR 呈示面は VR 物体から上方に一定の距離を保っている。本研究では、最小限の力で鉛直方向の位置制御を可能とすることを想定しており、この距離を 8[mm] としている。操作者は、マウス型の操作部を把持して操作することで、VR 空間内で VR 呈示面を通して VR 物体の探索・操作ができる。操作者が指先に体重をかけることで、ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に、VR 呈示面は鉛直方向に移動する。すなわち、操作者は、圧力センサから取得した接触力の大きさに比例して高さ方向の位置を制御することができる。本研究では、接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す比例定数を 1.0[mm/N] としているが、用途に合わせて容易に調整することができる。この制御方法によって、操作者は最小

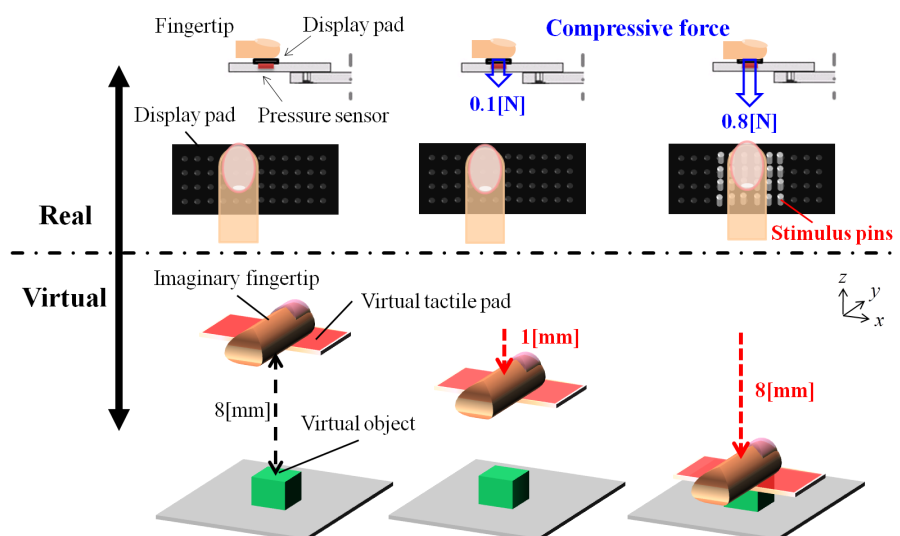


Figure 2.4: Altitude control

のエネルギーで3次元操作をすることが可能である。

## 2.3 呈示方法

### 2.3.1 VR 物体間に生じる接触力の計算

VR 空間において、操作者の指先と VR 物体または VR 物体と環境が接触したときに生じる接触力・モーメントは、物理モデルおよび静力学計算により算出される。本研究では、後述するように評価実験として、VR ブロックの整列作業を実施する。そのために、2 物体間における弾性-弾性接触の接触問題を扱う。本装置で用いるマニピュレータは、平面マニピュレータであるため、以下では2次元の定式化を行う。

本システムでは、簡単化のために、Figure 2.5 のように VR ブロックに対して5つの円柱を用いて近似した。VR ブロック同士が接触する際には、Figure 2.6 のように各ブロックを構成する円柱間における接触が生じる。接触による変位に応じた力を負荷することで、数値計算により VR ブロックの運動の制御を行う。接触力の力学計算では、物理モデルのばねモデルを利用する。そのため、物体に加わる変位から容易に接触力を求めることがで



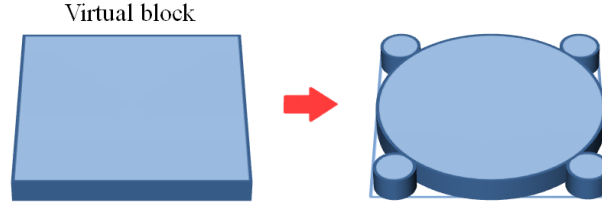


Figure 2.5: Approximation of virtual block

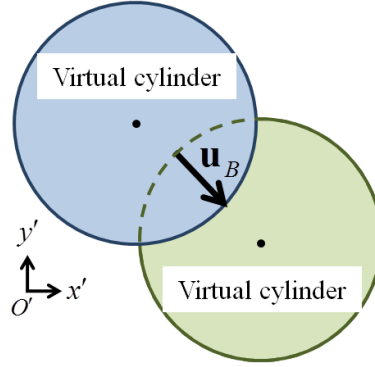


Figure 2.6: Contact between virtual cylinders

きる．なお，接触する物体間では，作用・反作用の法則（law of action and reaction）が適用される．したがって， $x-y$  平面において，VR ブロックに対する変位およびばね定数をそれぞれ  $\mathbf{u}_B$  および  $K_B$  とすると，反力  $\mathbf{f}_B$  は次式で計算できる．

$$\mathbf{f}_B = K_B \mathbf{u}_B \quad (2.1)$$

一方，本システムにおいて想定する VR 壁は，複数の直線で構成されているものとする．VR 壁と VR ブロックが接触する際には，**Figure 2.7** のようにブロックを構成する円柱との接触が生じる． $x-y$  平面において，VR ブロックに対する変位および VR 壁のばね定数をそれぞれ  $\mathbf{u}_W$  および  $K_W$  とすると，VR ブロックに負荷される反力  $\mathbf{f}_W$  は次式で計算される．

$$\mathbf{f}_W = K_W \mathbf{u}_W \quad (2.2)$$

また，VR ブロックには，移動する際に摩擦力が生じる．このシステムでは，VR ブロックの速度に応じた摩擦力を与えるために粘性摩擦力を利用した．ここで，VR ブロックの

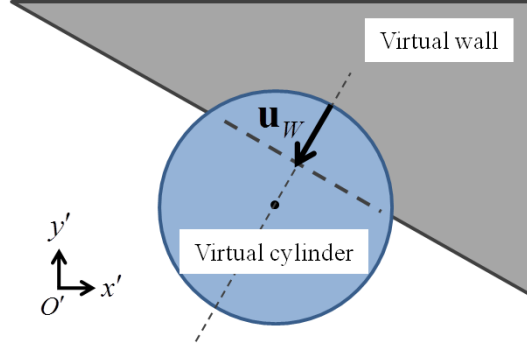


Figure 2.7: Contact between virtual cylinder and wall

個数を  $n$ , 注目する VR ブロックを  $\text{Block}_i$  とする ( $i = 0, \dots, n$ ). 他ブロックから  $\text{Block}_i$  に負荷される力を  $\mathbf{f}_i$ ,  $\text{Block}_i$  の速度を  $\mathbf{v}_i$ , 粘性摩擦係数を  $\mu$  とすると, 粘性摩擦力は  $\mu\mathbf{v}_i$  となる. すなわち,  $\text{Block}_i$  に加わる力  $\mathbf{F}_i$  は,

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{f}_i - \mu\mathbf{v}_i \quad (2.3)$$

となる. なお,  $\text{Block}_i$  の質量を  $m_i$  とすると, 運動方程式 (equation of motion) によって加速度  $\mathbf{a}_i$  を以下のように求めることができる.

$$\mathbf{a}_i = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i} \quad (2.4)$$

以上のように VR ブロックの加速度が求まるので, 数値計算を行うことで VR ブロックの位置を求めることができる. VR ブロックの位置に関する数値計算にはルンゲ・クッタ法におけるクッタ・シンプソンの方法 (1/3 法則) を用いた.

### 2.3.2 力覚呈示

本研究では, 力覚ディスプレイとして平面 3 リンクマニピュレータを用いた, 各関節で発生すべき関節トルクベクトル  $\boldsymbol{\tau}$  は, ヤコビアン  $\mathbf{J}$  と力-モーメントベクトル  $\mathbf{F}$  から, 静力学解析によって以下のように求めることができる.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (2.5)$$

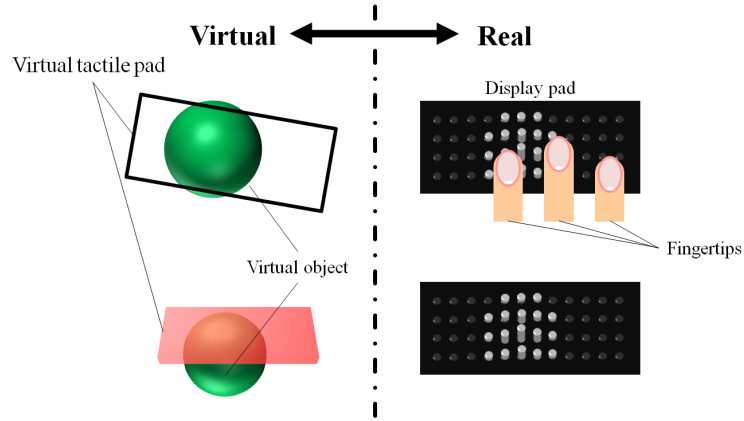


Figure 2.8: Surface of virtual objects

接触力  $\mathbf{F} = (F_x, F_y)$ , モーメント  $n = M_z$  とすると, 3 リンクマニピュレータにおける  $\tau$  と  $\mathbf{F}$  は, 次の  $3 \times 1$  列ベクトルとなる.

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

### 2.3.3 触覚呈示

操作者は, 三本の指を触覚ディスプレイ面に載せた状態で VR 空間における物体操作を行う. VR 物体表面の凹凸情報は, 触覚ディスプレイによって **Figure 2.8** のように呈示される. そのため, 操作者は, 指三本で対象を触ることができるので, 自然な触り方で知覚することが可能である. 初期状態では, 操作者の手先位置を表す VR 呈示面は VR 物体から上方に離れている. VR 呈示面と VR 物体が接触した際に, 触知ピンの上下動によって表面の凹凸情報が呈示される. 触知ピンの出力ピンストロークは, VR 呈示面における VR 物体へのめり込み量によって決定される. したがって, 操作者は, VR 物体の凹凸情報とともに高さ情報を知覚することができる.

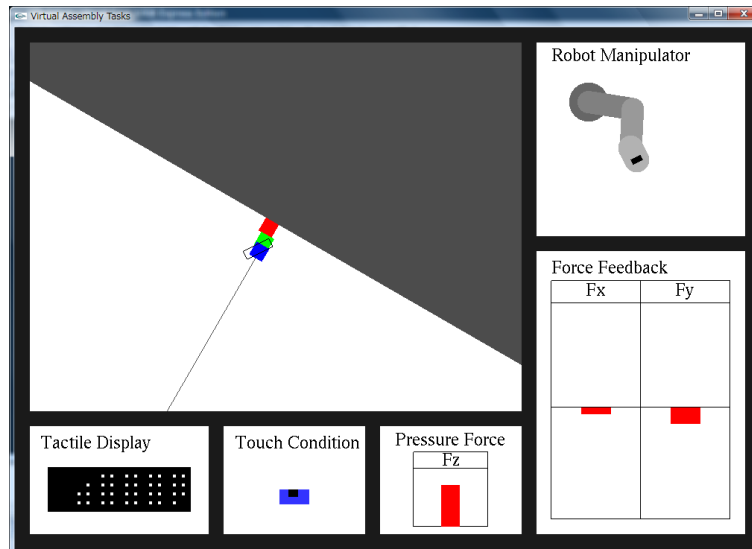


Figure 2.9: Virtual building tasks

## 2.4 実験方法

VRのリハビリテーション分野への応用として、簡易上肢機能検査 (Simple Test for Evaluating Hand Function, 以下STEF) [107] に関連した研究が報告されている。STEFは、上肢動作の素早さに関する運動機能を評価するために広く利用されている手法である。STEFでは、被験者は、ブロックを指定された位置にできるだけ素早く移動させる作業を行う。このような作業は、物体の触診、把持、移動、回転、反復動作などの基本操作を含んでいる。なお、これらの操作は、日常生活においても必要不可欠である。そこで、本研究では、本装置を用いることで、これらの操作を含むVRブロック整列作業に対して支援することができるVRシステムを開発した (Figure 2.9)。VRブロックと環境が接触した際に生じる接触力・モーメントおよびVRブロック表面の凹凸情報は、本装置によって呈示される。このシステムでは、力と圧覚刺激を以下の手順で行う。

1. マニピュレータのすべての関節角の値を読み取り、それらの値に基づいて、マニピュレータの姿勢を求める。
2. 操作者がブロックに触れるまで、操作者の腕への力と圧覚刺激が伝達しないように

Table 2.1: Main parameters and constants

Parameters and Constants	Value
Spring constant of virtual wall $K_W$	80[N/mm]
Spring constant of virtual blocks $K_B$	100[N/mm]
Width of virtual blocks	20[mm]
Height of virtual blocks	20[mm]
Depth of virtual blocks	2[mm]

モータと触覚ディスプレイを制御する。ブロックを把持していない限り、腕に力が伝達しない状態を継続する。

3. 操作者がブロックに触れると、ブロックの凹凸情報が触覚ディスプレイ上に生成される。呈示面とブロックの位置関係はマニピュレータの姿勢から計算できるので、触知ピンの出力分布が決定される。これにより、ブロックの形状を呈示することができる。
4. 操作者がブロックに触れている状態で、触覚ディスプレイの呈示面を押す力が一定以上であれば、ブロックを把持した状態であると設定する。それ以外では、ブロックを把持していない状態と設定する。
5. ブロックを把持した状態において、マニピュレータの姿勢に追従してブロックの移動や回転を行う。
6. ブロックを壁に沿わせて並べ替える作業を行う。
7. ブロックを移動させる場合には、ブロックと接地面との摩擦力が生じる。また、他ブロックや壁との接触力が生じる。この力およびモーメントを求め、計算結果に基づき、各関節に搭載したモータのトルク制御を行い、力覚を呈示する。

本研究では、VR における力覚・触覚の融合呈示が物体操作の精度に与える影響を検討するために、VR 物体の並べ替え精度についての比較実験を行う。被験者は、右利きの男

性6名（平均23.5歳，標準偏差：0.55歳）であり，被験者はPC画面を確認しながら実験を行う．本実験で用いる主なパラメータを表に示す．実験は，上述の手順(1)-(7)に基づいて実施される．3つのVRブロックを初期位置から壁の指定位置に沿わせて一列に積み重なるように整列させる作業を1試行とする．壁の傾斜角度は，30[deg]，60[deg]の2種類を用いる．被験者は，1試行を1分以内に行い，合計12試行の実験を実施する．実験における呈示条件として，力覚のみの呈示（force-only mode），力覚・触覚の融合呈示（combined mode）の2つの条件のもとで実験を行う．

## 2.5 実験結果と考察

### 2.5.1 評価尺度

物体操作における力覚・触覚融合呈示の有効性を検討するために，ブロックの整列精度によって作業に対する達成度を評価した．実験風景および評価実験における実験基準をそれぞれ **Figure 2.10** および **Figure 2.11** に示す．実験では，VRブロックの角度，位置座標に関する評価尺度を用いる． $E_{A_i}$ [deg] は，角度に関する誤差の大きさを表している．角度に関する評価尺度を以下に示す．

$$E_{A_1} = \mathbf{abs}(\theta - \alpha) \quad (2.7)$$

$$E_{A_2} = \mathbf{abs}(\alpha - \beta) \quad (2.8)$$

$$E_{A_3} = \mathbf{abs}(\beta - \gamma) \quad (2.9)$$

ここで， $\mathbf{abs}(\cdot)$  は，絶対値の計算を行う関数である． $E_{D_i}$ [mm] は，VRブロックの位置に関する誤差の大きさを表している．本実験における被験者6名の実験結果から，上述の評価基準によって力覚のみの呈示および力覚・触覚の融合呈示による整列精度を比較した．各被験者における実験結果の平均値を **Table 2.2**～**Table 2.7** に示す．

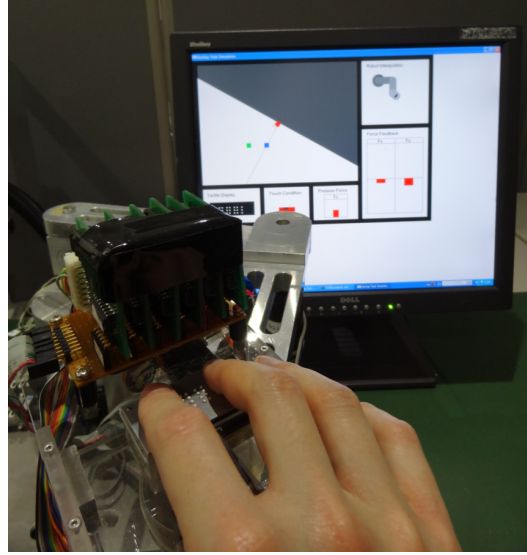


Figure 2.10: Scenario of experiments

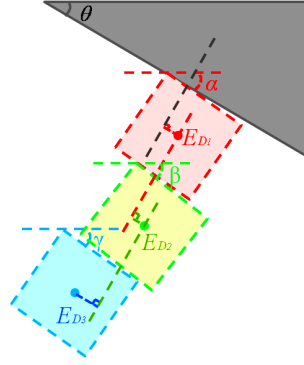


Figure 2.11: Definition of criteria

### 2.5.2 壁の傾斜角度 30[deg] における物体整列精度

物体の整列作業において、整列させる壁の傾斜角度が小さければ、比較的簡単な作業となる。これは、物体を積み重ねる際に、整列済みの物体に関する位置および姿勢がより把握し

Table 2.2: Average of experimental data(subject A)

	Wall[deg]	$E_{A_1}$ [deg]	$E_{A_2}$ [deg]	$E_{A_3}$ [deg]	$E_{D_1}$ [mm]	$E_{D_2}$ [mm]	$E_{D_3}$ [mm]
Force-only mode	30	5.04	1.90	1.00	1.75	0.91	1.25
	60	2.85	1.51	0.63	2.09	2.78	1.10
Combined mode	30	4.20	1.05	0.72	1.90	1.01	0.90
	60	2.53	1.31	1.44	1.21	1.10	0.90

Table 2.3: Average of experimental data(subject B)

	Wall[deg]	$E_{A_1}$ [deg]	$E_{A_2}$ [deg]	$E_{A_3}$ [deg]	$E_{D_1}$ [mm]	$E_{D_2}$ [mm]	$E_{D_3}$ [mm]
Force-only mode	30	2.17	1.47	0.14	1.22	1.04	0.74
	60	1.00	2.53	2.48	1.99	0.98	1.14
Combined mode	30	2.61	1.49	1.15	1.38	0.83	0.55
	60	1.60	2.13	0.90	1.77	1.39	0.84

Table 2.4: Average of experimental data(subject C)

	Wall[deg]	$E_{A_1}$ [deg]	$E_{A_2}$ [deg]	$E_{A_3}$ [deg]	$E_{D_1}$ [mm]	$E_{D_2}$ [mm]	$E_{D_3}$ [mm]
Force-only mode	30	1.62	1.13	0.81	0.74	0.66	0.93
	60	0.65	1.01	0.98	0.59	1.22	0.54
Combined mode	30	2.77	2.09	0.77	1.00	0.63	0.44
	60	1.29	2.10	0.66	0.80	0.23	0.75

やすくなるためである．本節では，壁の傾斜角度 30[deg] のときの整列作業に対する実験結果から議論を始める．各被験者に対する実験結果の平均値を示した **Table 2.2**~**Table 2.7** から力覚呈示のみと力覚・触覚融合呈示の 2 条件間における整列精度の比較を行う．被験者 A では，力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_1}$ ,  $E_{A_2}$ ,  $E_{A_3}$ ,  $E_{D_3}$  の 4 項目において整列誤差の値が小さいことが分かる．同様に，被験者 D では，力覚のみの呈示よ

Table 2.5: Average of experimental data(subject D)

	Wall[deg]	$E_{A_1}$ [deg]	$E_{A_2}$ [deg]	$E_{A_3}$ [deg]	$E_{D_1}$ [mm]	$E_{D_2}$ [mm]	$E_{D_3}$ [mm]
Force-only mode	30	1.19	0.84	1.54	2.02	0.85	0.51
	60	2.51	0.99	0.91	1.20	0.46	0.56
Combined mode	30	1.79	1.70	1.27	1.57	0.44	0.14
	60	1.06	1.67	0.91	1.70	1.32	0.48

Table 2.6: Average of experimental data(subject E)

	Wall[deg]	$E_{A_1}$ [deg]	$E_{A_2}$ [deg]	$E_{A_3}$ [deg]	$E_{D_1}$ [mm]	$E_{D_2}$ [mm]	$E_{D_3}$ [mm]
Force-only mode	30	6.17	1.71	6.45	3.08	1.24	1.59
	60	6.10	2.96	4.84	3.66	2.37	0.15
Combined mode	30	4.76	3.76	3.07	1.33	1.50	1.15
	60	1.32	2.12	4.19	2.31	0.88	0.97



Table 2.7: Average of experimental data(subject F)

	Wall[deg]	$E_{A_1}$ [deg]	$E_{A_2}$ [deg]	$E_{A_3}$ [deg]	$E_{D_1}$ [mm]	$E_{D_2}$ [mm]	$E_{D_3}$ [mm]
Force-only mode	30	4.57	1.66	3.81	2.17	1.65	2.50
	60	3.10	6.94	6.16	6.38	4.26	3.07
Combined mode	30	3.64	0.37	5.19	0.33	1.48	0.37
	60	4.13	4.80	5.83	1.44	2.24	2.31

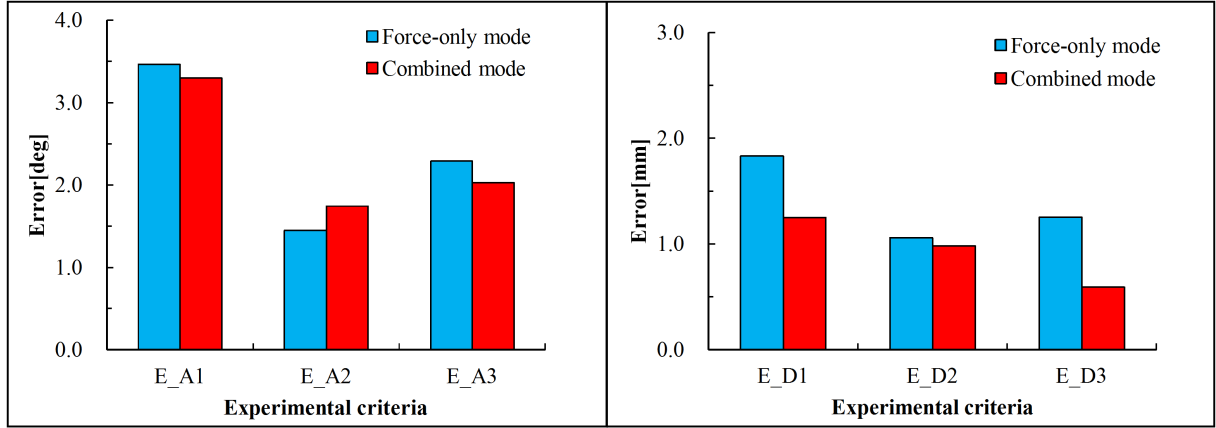


Figure 2.12: Average of all results (30[deg])

りも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_3}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_2}$ ,  $E_{D_3}$  の4項目において整列誤差の値が小さい。なお、被験者Eでは、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_1}$ ,  $E_{A_3}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_3}$  の4項目において整列誤差の値が小さい。さらに、被験者Fでは、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_1}$ ,  $E_{A_2}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_2}$ ,  $E_{D_3}$  の5項目において整列誤差の値が小さい。一方で、被験者BとCにおいて、力覚呈示のみよりも力覚・触覚融合呈示の方が小さくなった項目数は、3つ以下であった。

以上の検討から分かるように、被験者A, D, E, Fの4名に対する整列精度は、力覚・触覚融合呈示によって向上することが確認された。特に、被験者Aでは角度、被験者D, E, Fでは位置に関する調整能力が本装置による力覚・触覚融合呈示によって改善された。したがって、壁の傾斜角度30[deg]における物体操作では、被験者A, D, E, Fに対して、力覚・触覚の融合呈示がより精確な物体操作を可能にしたと言える。しかし、被験者BとCにおいては、力覚・触覚融合呈示によって整列精度が改善されたとは言えない。

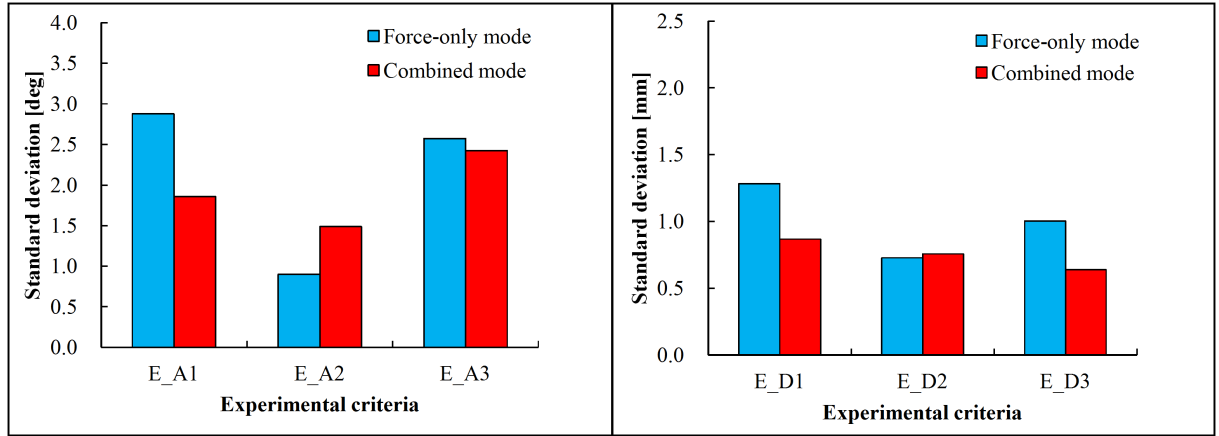


Figure 2.13: Standard deviation of all results (30[deg])

次に、壁の傾斜角度 30[deg] に対するすべての実験結果に対して  $F$  検定および  $t$  検定（両側検定，有意水準 5%）を実施することで，力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の 2 条件間における整列精度をより詳細に比較する．壁の傾斜角度 30[deg] に対するすべての実験結果の平均値および標準誤差をそれぞれ **Figure 2.12** および **Figure 2.13** に示す．**Figure 2.12** では，横軸が評価尺度，縦軸が平均値 [deg]（または [mm]）である．なお，**Figure 2.13** では，横軸が評価尺度，縦軸が標準偏差 [deg]（または [mm]）を表す．また， $F$  検定および  $t$  検定による解析結果を **Table 2.8** にまとめる． $F$  検定によれば， $E_{A_2}$  ( $F(17,17)=0.366$ ,  $P = 0.045 < 0.05$ ) 以外の項目では，力覚呈示のみと力覚・触覚融合呈示の 2 条件間における実験結果のばらつきに関しては有意差が見受けられなかった．一方， $t$  検定によって， $E_{A_2}$  ( $P = 0.024 < 0.05$ ) の項目において，力覚呈示のみと力覚・触覚融合呈示の 2 条件間における実験結果の平均値に有意差があることが確認された．したがって，検定結果から，2 条件間の整列精度に関して有意差があるとはいえないことを示唆している．この原因として，物体を整列する壁の傾斜角度が小さく，比較的簡単な作業であったために，大きな差が生じなかったと考えられる．また，**Figure 2.13** から，力覚・触覚融合呈示条件における位置に関する誤差の標準偏差  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_2}$ ,  $E_{D_3}$  について，誤差の値がほぼ等しいことが分かる．これは，力覚・触覚融合呈示条件下における整列作業では，物体を整列する順番は位置に関する誤差のばらつきに影響を与えないことを示している．

Table 2.8:  $F$ -test and  $t$ -test for experimental criteria (30[deg])

	$F$ -test		$t$ -test
	$F(17,17)$	$P$ value	$P$ value
$E_{A_1}$ [deg]	2.397	0.080	0.837
$E_{A_2}$ [deg]	0.366	0.045	0.484
$E_{A_3}$ [deg]	1.126	0.810	0.754
$E_{D_1}$ [mm]	2.185	0.117	0.120
$E_{D_2}$ [mm]	0.923	0.871	0.760
$E_{D_3}$ [mm]	2.472	0.070	0.024*

### 2.5.3 壁の傾斜角度 60[deg] における物体整列精度

壁の傾斜角度 60[deg] における物体の整列作業は、前節の条件と比較して、より難しい作業となる。前節と同様に、各被験者に対する実験結果の平均値を示した **Table 2.2**~**Table 2.7** から力覚呈示のみと力覚・触覚融合呈示の 2 条件間における整列精度の比較を行う。被験者 B では、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_2}$ ,  $E_{A_3}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_3}$  の 4 項目において整列誤差の値が小さいことが分かる。また、被験者 A では、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_1}$ ,  $E_{A_2}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_2}$ ,  $E_{D_3}$  の 5 項目において整列誤差の値が小さい。同様に、被験者 E では、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_1}$ ,  $E_{A_2}$ ,  $E_{A_3}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_2}$  の 5 項目において整列誤差の値が小さい。さらに、被験者 F では、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が  $E_{A_2}$ ,  $E_{A_3}$ ,  $E_{D_1}$ ,  $E_{D_2}$ ,  $E_{D_3}$  の 5 項目において整列誤差の値が小さい。一方で、被験者 C と D において、力覚呈示のみよりも力覚・触覚融合呈示の方が小さくなった項目数は、2 つのみであった。

以上の検討から分かるように、被験者 A, B, E, F の 4 名に対する整列精度は、力覚・触覚融合呈示によって向上することが確認された。特に、被験者 A, F では角度、被験者 E では位置に関する調整能力が本装置による力覚・触覚融合呈示によって改善された。したがって、壁の傾斜角度 60[deg] における物体操作では、被験者 A, B, E, F に対して、力覚・触覚の融合呈示がより精確な物体操作を可能にしたと言える。しかし、被験者 C および D に関しては、力覚・触覚融合呈示によって整列精度が改善されなかった。被験者 C は、他

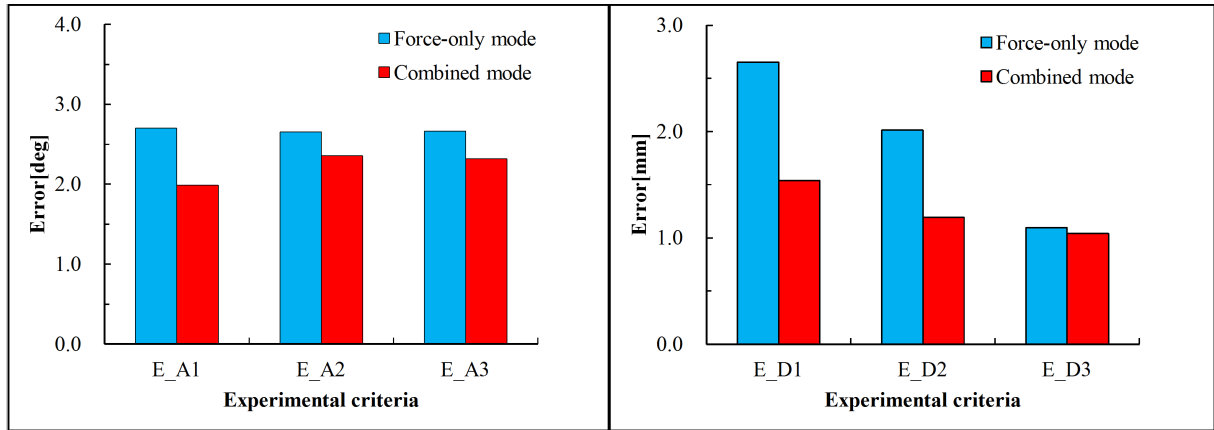


Figure 2.14: Average of all results (30[deg])

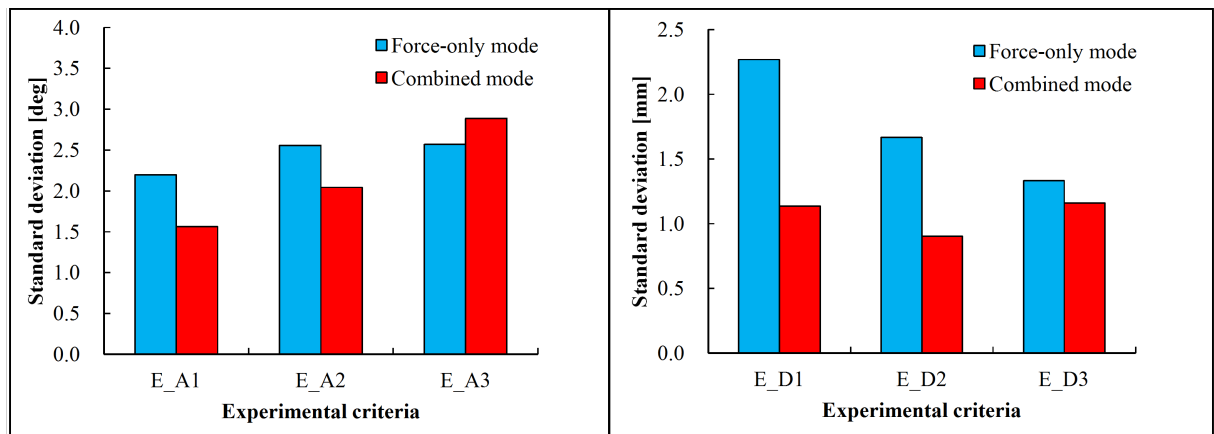


Figure 2.15: Standard deviation of all results (30[deg])

の被験者と比較すると、PC画面をより凝視していたために、視覚情報に頼った操作をする傾向が見受けられた。そのため、力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の2条件間の整列精度に差が出なかったと考えられる。

次に、壁の傾斜角度 60[deg] に対するすべての実験結果に対して  $F$  検定および  $t$  検定（両側検定，有意水準 5%）を実施することで、力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の2条件間における整列精度をより詳細に比較する。壁の傾斜角度 60[deg] に対するすべての実験結果の平均値および標準誤差をそれぞれ **Figure 2.14** および **Figure 2.15** に示す。 **Figure 2.14** では、横軸が評価尺度，縦軸が平均値 [deg]（または [mm]）である。なお， **Figure 2.15** では、横軸が評価尺度，縦軸が標準偏差 [deg]（または [mm]）を表す。また，  $F$  検定およ

び  $t$  検定による解析結果を **Table 2.9** にまとめる。  $t$  検定によれば、力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の 2 条件間の整列精度に有意差が見受けられなかった。しかし、  $F$  検定によれば、位置に関する誤差である  $E_{D_1}$  ( $F(17,17)=3.986$ ,  $P = 0.007 < 0.05$ ) および  $E_{D_2}$  ( $F(17,17)=3.407$ ,  $P = 0.016 < 0.05$ ) の項目において、力覚呈示のみと力覚・触覚融合呈示の 2 条件間における実験結果の分散に有意差があることが確認された。本実験では、整列する壁に物体が固定されないために、一列に並べる際に物体間で接触が生じると、整列済みの物体も移動する。そのため、最初に整列する物体を指定位置に留めることは難しい。しかし、力覚・触覚融合呈示条件の下での物体操作では、力覚のみの呈示条件と比較すると、最初に整列する物体の位置に関する誤差  $E_{D_1}$  の分散が小さくなることが分かる。そのため、力覚・触覚融合呈示は、より安定した物体移動を可能とする効果があると言える。

また、力覚・触覚融合呈示条件の下では、物体の位置および姿勢情報を接触力だけでなく、触覚情報から知覚できるので、物体間の接触を避けることができたと考えられる。また、心理物理学における弁別閾（differential threshold, 以下 DL）に相当する標準偏差が小さくなることが確認された。したがって、実験結果から、力覚・触覚融合呈示によって、被験者は僅かな変化を知覚可能であると言える。

本実験では、被験者は PC 画面を確認しながら実験を行った。力覚のみの呈示条件では、触覚によって物体を知覚することができないために、視覚情報を呈示しなければ作業をすることができない。すなわち、視覚情報を呈示しない条件における実験では、力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の 2 条件間による操作精度の差がより大きくなると考えられる。本実験において、操作者は画面上のカーソルを目で追っているにも関わらず力覚・触覚の融合呈示により操作の精確性・安定性が向上することを確認した。この実験事実から、CAD 等で精確なポインティングが求められる作業においても力覚・触覚融合呈示の採用により操作者の負担を軽減させることが可能であると考えられる。なお、感覚・運動機能が低下した操作者に対してより使いやすいヒューマン・インタフェースとしての利用が期待される。

Table 2.9:  $F$ -test and  $t$ -test for experimental criteria (60[deg])

	$F$ -test		$t$ -test
	$F(17,17)$	$P$ value	$P$ value
$E_{A_1}$ [deg]	1.977	0.170	0.270
$E_{A_2}$ [deg]	1.567	0.363	0.698
$E_{A_3}$ [deg]	0.791	0.634	0.708
$E_{D_1}$ [mm]	3.986	0.007*	0.075
$E_{D_2}$ [mm]	3.407	0.016*	0.078
$E_{D_3}$ [mm]	1.320	0.574	0.898

## 2.6 結 言

本研究では、人間にやさしい革新的なヒューマン・インタフェースの確立を目指して、皮膚と筋・腱の感覚器官に刺激を与えることのできる力覚・触覚融合形2.5次元ディスプレイを開発した。本装置は、平面3リンクマニピュレータおよび先端に搭載した4x12のピン・アレイ形触覚ディスプレイから構成される。触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので、指三本で対象を触ることができる。そのため、指一本で触るより自然な触り方が可能であり、VR物体の形状をより詳細に知覚できる。それに加えて、低疲労の3次元操作を可能とするために、「2.5次元操作」という新たな概念を提案した。この方法では、2次元平面と鉛直方向における位置入力をそれぞれ独立して行う。腕の重量が影響する鉛直方向の運動を指先の接触力による位置制御に置き換える手法を取り入れることで、最小限のエネルギーでの操作を実現した。さらに、操作部をマウスと類似した形状とすることで、前提知識を要しない直感的な操作を可能とした。

本装置による力覚・触覚融合呈示の有効性を検証するために、評価実験を実施した。被験者は、力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の2条件においてVR物体の整列作業を行った。実験において、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が整列精度が向上することを確認した。力覚のみの呈示条件の下では、操作者の手とVR物体間の位置を詳細に把握することができないために、力覚のみの呈示では精確な整列作業は行うことができなかったと考えられる。一方で、力覚・触覚融合呈示条件の下では、安定した整列作業を可

能とした。

今後の予定としては、本装置を用いたシステムの応用を行い、人間の支援を行うより実用的なシステムへと発展させることができると考えられる。本装置の有する広い触覚呈示面を活用することで、VR 表面上に配置された凹凸形状の相互関係を理解することが容易になると考えられる。したがって、VR 表面をなぞって理解したり、表面上に配置された物体を操作する作業に適している。なお、対象を触って操作する作業は、手の機能を回復するためのリハビリテーションに役立つことが期待できる。特に、手の運動に同期して触覚ディスプレイにより振動触覚を呈示することによりその効果を促進させる方法 [108] に発展できる可能性がある。したがって、本装置を福祉分野に適用することで、リハビリテーション支援を可能にすることが期待できる。また、本研究において提案した 2.5 次元操作では、操作者の指先位置情報を表す VR 呈示面の回転は  $z$  軸回転のみに限定されていた。しかし、物体の形状認識では多方向からの触診が有効であるため、多自由度による接触を可能とする必要がある。そこで、次章の研究において、2.5 次元ディスプレイによる 3 次元空間内の操作の汎用性を拡張する。操作者の指の重心位置によって VR 呈示面の  $x$  および  $y$  軸回転を加えて姿勢を制御する方法を提案する。

## 第3章 モーメントを回転角度情報に置き換えることによる 触知方式

### 3.1 緒言

VR 物体の操作において、物体から受ける反力と物体に触れた感覚の呈示が有効であるため、VR やテレグジスタンスでは、視聴覚情報に加えて、力触覚情報の呈示が求められている。その実現のために、マウス型 [109, 110]，遭遇型 [24, 111]，装着型 [112–114]，把持型 [114, 115] など多種多様なハプティック・ディスプレイの研究開発が行われている。しかし、PHANToM のような一般的なハプティック・ディスプレイでは、3次元空間におけるポインティング作業において、操作部を把持した状態で手を動かしたり、位置を保持したりしなければならない。それが原因となって、長時間の操作において、操作者に疲労が蓄積するという課題が生じている。

前章の研究において、人間にやさしい革新的なヒューマン・インタフェースの確立を目指して、皮膚と筋・腱の感覚器官に刺激を与えることのできる力覚・触覚融合形 2.5 次元ディスプレイを開発した。本装置は、平面 3 リンクマニピュレータおよび先端に搭載した 4x12 のピン・アレイ形触覚ディスプレイから構成される。触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので、指三本で対象を触ることができる。そのため、指一本で触るより自然な触り方が可能である。それに加えて、低疲労の 3 次元操作を可能とするために、「2.5 次元操作」という新たな概念を提案した。この方法では、2 次元平面と鉛直方向における位置入力をそれぞれ独立して行う。腕の重量が影響する鉛直方向の運動を指先の接触力による位置制御に置き換える手法を取り入れることで、最小限のエネルギーでの操作を実現した。さらに、操作部をマウスと類似した形状とすることで、前提知識を要しない直感的な操作を



可能とした．前章では，このディスプレイ装置の有効性を検証するために VR 物体の整列作業に対する評価実験を行った．その結果，力覚と触覚を同時呈示することで，整列した VR 物体の位置・姿勢誤差が低減したことから，精確で安定した操作を可能にすることを確認できた．

本研究では，前章の継続の研究として，2.5 次元の操作によって，3 次元空間内でより直観的な作業を可能にすることを目的としている．まず，VR 空間内において操作者の指先位置を表す VR 呈示面の姿勢を力感覚によって制御する．それに加えて，上述の高さ方向の位置制御に対して，適切な接触力-位置の関係を求める．さらに，ディスプレイ装置の物体把握における有効性を検証する．前章では，操作者の指先位置情報を表す VR 呈示面の回転は  $z$  軸回転のみに限定されていた．そこで，操作者の指の重心位置によって VR 呈示面の  $x$  および  $y$  軸回転を加えて姿勢を制御する方法を提案する．これによれば，接触面を調整できるので，操作者は曲率や表面の凹凸情報についてより微細な変化を知覚できる．重心位置情報は，触覚ディスプレイの下に 3 つの圧力センサを搭載することで，各センサの位置および計測された力の大きさの関係から求められる．また，VR 呈示面は各圧力センサに加わる合力の大きさに比例して下方向に移動する．

開発したディスプレイ装置およびシステムの有効性を検証するために，3 つの評価実験を実施した．第一に，VR 呈示面の姿勢の安定した操作を実現するために，推定値の誤差を計測し，重心位置推定の精度を評価した．第二に，3 次元空間におけるポインティングについて直感的な操作を可能とするために，ディスプレイ面に対する接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数を求めた．第三に，本システムを用いて VR 物体操作を行うソフトウェア構築に活用する目的から，呈示可能な VR 物体の曲率の限界を調査した．なお，2 つの触診方法における球識別精度を比較することで，触診方法が認識精度に及ぼす影響について調査するとともに，本装置に適した触診方法について検討する．

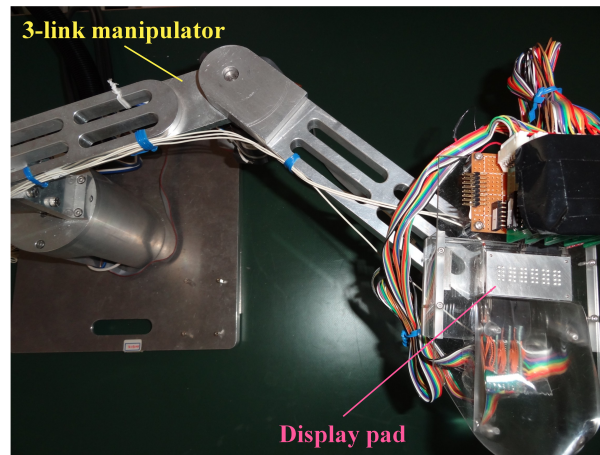


Figure 3.1: Advanced 2.5D haptic display generating combined tactile and force sensations

## 3.2 ディスプレイ装置

### 3.2.1 力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイ

これまでに設計製作したディスプレイ装置を基本として、力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイを開発した (Figure 3.1). ディスプレイ装置は、平面 3 リンクマニピュレータおよび先端に搭載した 4x12 のピン・アレイ形触覚ディスプレイから構成される. 本装置では、Figure 3.2 に示すように、触覚ディスプレイの下に 3 つの圧力センサを搭載している. 触覚ディスプレイは、点字セル (KGS 社製、型式:SC9) で構成されており、バイモルフ形 PZT アクチュエータにより各触知ピンは最大 1[mm] の上下動が可能である. 触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので、指示指、中指、薬指の三本を載せることが可能である. これにより、指三本で対象を触ることができるので、指一本で触るより自然な触り方ができる. また、操作部をマウスと類似した形状にすることで、前提知識を必要とせずに操作ができる. さらに、本研究では、操作部に対してマウスの立体形状を再現することで、マウスと同様の操作感を実現した (Figure 3.3).

本システムでは、VR 空間における操作者の指先位置は VR 呈示面として次のような手順で制御される. 水平方向の位置情報は、マニピュレータの順運動学計算より求められるが、水平リンク構造であるためにこのままでは 3 次元の操作ができない. しかし、前述の

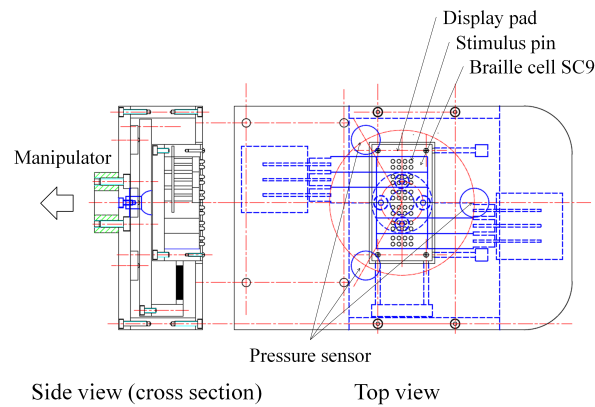


Figure 3.2: Structure of handle part

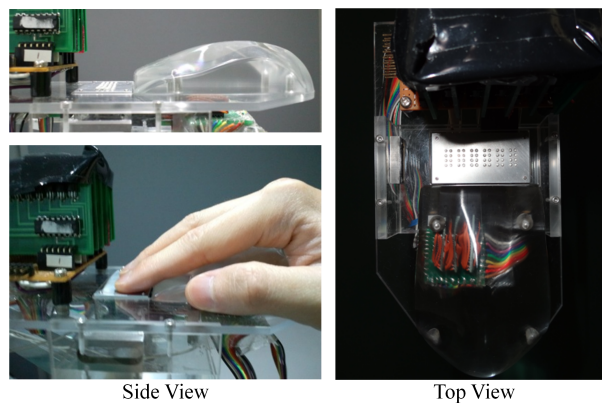


Figure 3.3: Handle part of 2.5 haptic display

圧力センサから取得したディスプレイ面に対する接触力の合力の大きさに比例して高さ方向の位置を制御する．この制御方法は，IBM 社の ThinkPad に搭載されている TrackPoint に似ている．したがって，本装置は，2.5 次元の操作に関わらず，3 次元空間におけるポインティングが可能である．この呈示装置には，PHANToM などの 3 次元の装置とは異なり，手を浮かして上下方向に動かす必要がない．さらに，操作者の手は，マニピュレータによって支えられるので，ハンドレストに手を置くように操作できる．そのため，3 次元 VR 空間の操作における疲労を軽減することができる．

VR 空間において，指先と VR 物体または VR 物体と環境が接触したときに生じる接触力・モーメントは，物理モデルおよび静力学計算により算出し，マニピュレータにより呈示される．また，VR 物体表面の凹凸情報は，VR 物体との接触条件に応じて触覚ディスプレイ

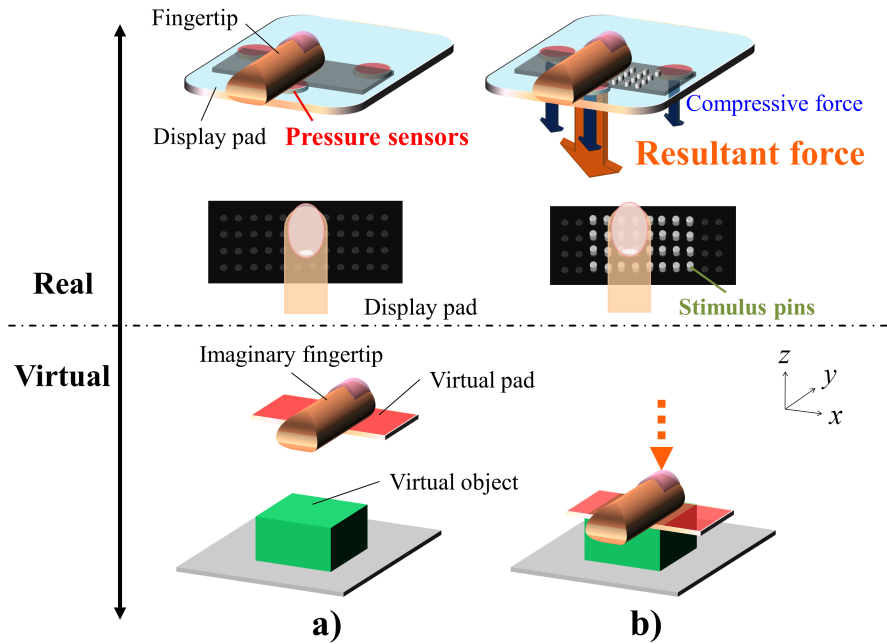


Figure 3.4: Altitude control using three pressure sensors

レイにより呈示される。

### 3.2.2 VR 呈示面の鉛直方向における位置制御

VR空間内において，VR 呈示面の高さ方向の位置は，ディスプレイ面に対する接触力の合力の大きさに比例して，下方向に移動する．**Figure 3.4** は，高さ位置の制御方法を表している．初期状態では，VR 呈示面はVR 物体から上方に一定の距離を保っている (**Figure 3.4a**)．操作者は，マウスに類似した形状のエンドエフェクタを把持して操作することで，VR 空間内で VR 呈示面を通して VR 物体の探索・操作ができる．操作者の指先に体重をかけることで，ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に，VR 呈示面は鉛直方向に移動する．VR 呈示面に加わる接触力は，3つの圧力センサにより計測されるので，合力の大きさに比例して鉛直下方向に移動する (**Figure 3.4b**)．VR 呈示面と VR 物体が接触した際に，触知ピンの上下動によって表面の凹凸情報が呈示される．したがって，操作者は，最小のエネルギーでの操作によって，VR 物体の高さとともに表面情報を知覚できる．

### 3.2.3 VR 呈示面の姿勢制御

皮膚に対する外部刺激に対する認識が受動的または能動的であるかによって、ヒトが触知できる情報は量および質の両面で異なることが知られている。刺激を受動的に受ける認識は、パッシブタッチと呼ばれる。また、手や指を動かして刺激をアクティブタッチと呼ぶ。物体認識に関する研究では、アクティブタッチとパッシブタッチによる知覚精度の検証が行われている [81, 82, 116]。触対象の3次元形状認識（実態触知）において、アクティブタッチの方が認識精度が高いことが知られている。さらに、アクティブタッチは、パッシブタッチと比較すると、探索効率に関して優位であることが報告されている。アクティブタッチによる3次元形状の触知を実現するためには、多自由度での接触を可能とする必要がある。しかし、前章のディスプレイでは、操作者の指先位置情報を表すVR呈示面の回転は $z$ 軸回転のみに限定されていたため、接触面が平面に限定されていた。そこで、本システムでは、操作者の指先の重心位置によってVR呈示面の $x$ および $y$ 軸を中心とした回転を制御する。VR物体との接触面を変化させることで、操作者は最小のエネルギーでの操作によって曲率や表面の凹凸情報をより精確に把握することができる。

本装置では、ディスプレイ面に加わる接触力は、触覚ディスプレイの下に搭載された3つの圧力センサによって計測される。圧力センサは、**Figure 3.5**のように同一円周上に配置されており、円とディスプレイ面の中心は一致している。したがって、重心位置 $[x_G, y_G]^T$ は各圧力センサの位置 $(x_i, y_i)$ および計測値 $F_i$ から以下のように推定できる( $i = 1, \dots, 3$ )。

$$[x_G, y_G]^T = \left[ \frac{\sum_{i=1}^3 (F_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^3 F_i}, \frac{\sum_{i=1}^3 (F_i \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^3 F_i} \right]^T \quad (3.1)$$

**Figure 3.6** は、VR呈示面の姿勢制御の原理を表している。VR呈示面の $x$ および $y$ 軸を中心とした回転は、次のように制御される。初期状態では、VR呈示面は $x$ - $y$ 平面に対して水平の状態を保持している。操作者が指先でディスプレイ面に接触力を加えた状態で指先の重心を水平方向に移動させた際に、VR呈示面を $x$ および $y$ 軸中心に回転させる。 $x$ お

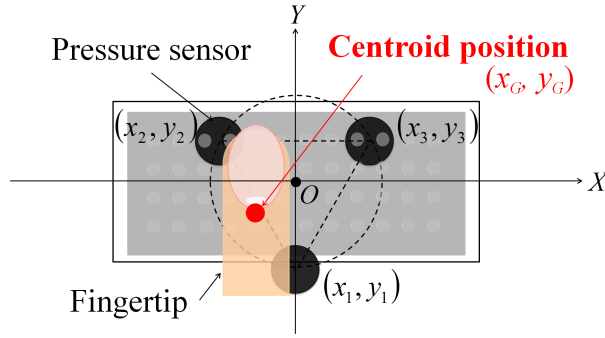


Figure 3.5: Centroid estimation

よび  $y$  軸中心の回転角度は、それぞれ  $y$  軸、 $x$  軸方向における重心位置のディスプレイ面中心からの距離に比例して増加する．VR 呈示面の姿勢は、オイラー角  $(\phi, \theta, \psi)$  によって連続的に制御される (**Figure 3.7**)． $z$  軸を中心とした回転角度  $\phi$  は、マニピュレータの各関節角度から求めることができる．一方で、 $x$  軸および  $y$  軸を中心とした回転角度  $\theta$  および  $\psi$  は、以下のように求められる．

$$\theta = K_{\theta} \cdot y_G \quad (3.2)$$

$$\psi = K_{\psi} \cdot x_G \quad (3.3)$$

なお、回転行列  $R$  は、以下のように計算される．

$$R = \begin{bmatrix} C_{\phi}C_{\theta} & -S_{\phi}C_{\psi} + C_{\phi}S_{\theta}S_{\psi} & S_{\phi}S_{\psi} + C_{\phi}S_{\theta}C_{\psi} \\ S_{\phi}C_{\theta} & C_{\phi}C_{\psi} + S_{\phi}S_{\theta}S_{\psi} & -C_{\phi}S_{\psi} + S_{\phi}S_{\theta}C_{\psi} \\ -S_{\theta} & C_{\theta}S_{\psi} & C_{\theta}C_{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ここで、

$$C_{\phi} = \cos \phi, C_{\theta} = \cos \theta, C_{\psi} = \cos \psi \quad (3.5)$$

$$S_{\phi} = \sin \phi, S_{\theta} = \sin \theta, S_{\psi} = \sin \psi \quad (3.6)$$

本研究では、 $\theta$  および  $\psi$  に対する変化量  $K_{\theta}$  および  $K_{\psi}$  を  $2.0[\text{deg}/\text{mm}]$  としたが、用途や目的に応じて容易に調整することができる．したがって、操作者は、ディスプレイ面に対する指先の接触力の方向を変えるだけで、VR 呈示面の姿勢を制御できるので、精密な触覚情報に基づいた作業が可能である．

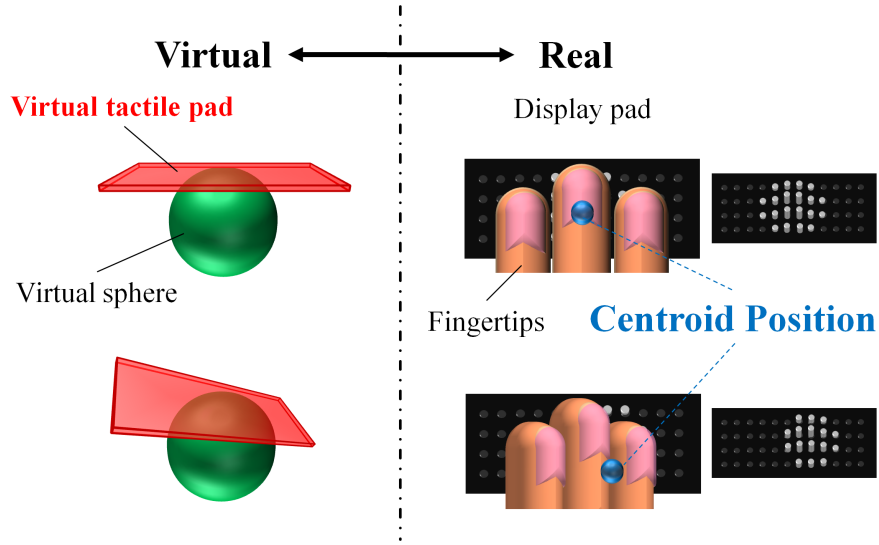


Figure 3.6: Orientation control

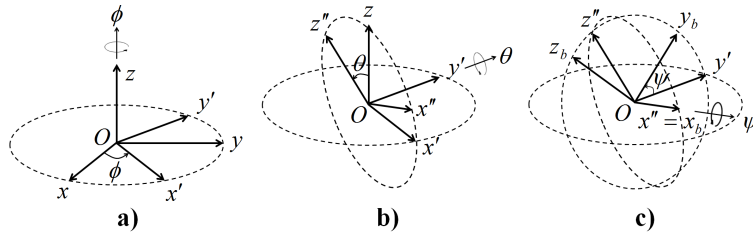


Figure 3.7: Consecutive rotations using roll-pitch-yaw angles

### 3.3 実験方法

#### 3.3.1 重心位置推定検証実験

VR 呈示面の姿勢の信頼性のある操作を実現するためには、指の重心位置推定の精度と安定性が重要である。予備実験において、操作者の指が触覚呈示面上にある状態では、重心位置を推定可能であることを確認している。そこで、本実験では、触覚呈示面上における目標値と推定値の誤差を計測することで、重心位置推定の精度を評価する。Figure 3.8 に示すように、細い棒状のピンによって、各触知ピンに対して垂直方向の接触力を加えた際の重心位置を測定した。目標値として 1 行目と 6 列目の触知ピンを選定した。

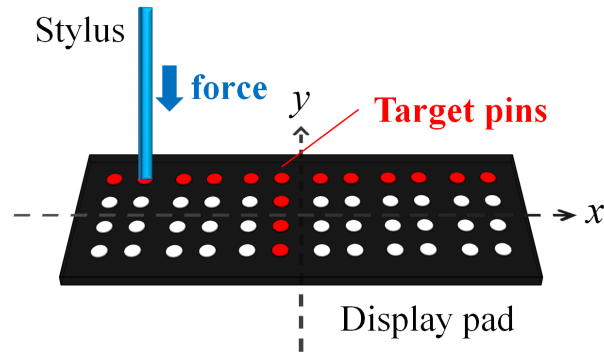


Figure 3.8: Verification of centroid estimation

### 3.3.2 高さ識別実験

本装置では、鉛直方向の位置制御に関して、指先の接触力を変位に置き換える手法を取り入れている．そのため、最適な接触力-位置の関係を求めることができれば、3次元空間におけるポインティングについて直感的な操作が可能となると考えられる．本実験では、ディスプレイ面に対する接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数を心理物理実験によって求める [117]．次の手順に従って、VR 空間における2つの直方体の高さの識別精度を調査した．

1. 初期状態では、VR 呈示面は、直方体から上方に 16[mm] 離れた状態を保っている．
2. 操作者が指先に体重をかけて、ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に、VR 呈示面は鉛直方向に移動する．比例定数は、2.5, 3.5, 5.0, 10.0, 20.0[mm/N] を採用した．
3. 標準の直方体の高さ（標準刺激）を確認する．本実験では、縦横 20[mm] 高さ 8[mm] の直方体を用いた（**Figure 3.9a**）．
4. 比較対象の直方体の高さ（比較刺激）を調べる（**Figure 3.9b**）．本実験では、高さ 2, 4, 6, 10, 12, 14[mm] の直方体を選定した．
5. VR 呈示面と直方体が接触すると、触知ピンの上下動によって表面情報が呈示されるので、被験者は直方体の高さを知覚できる（図 **Figure 3.9c**）．



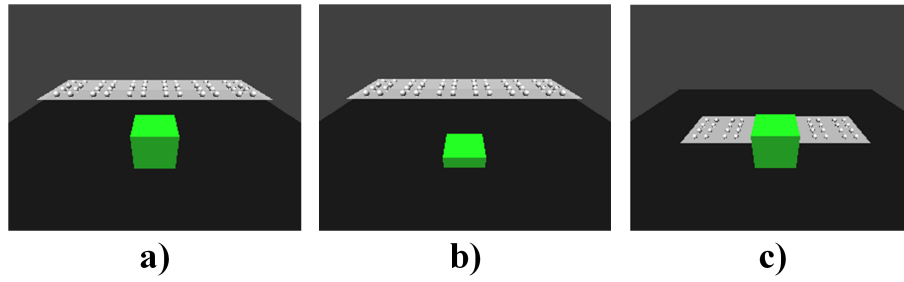


Figure 3.9: Height discrimination experiment

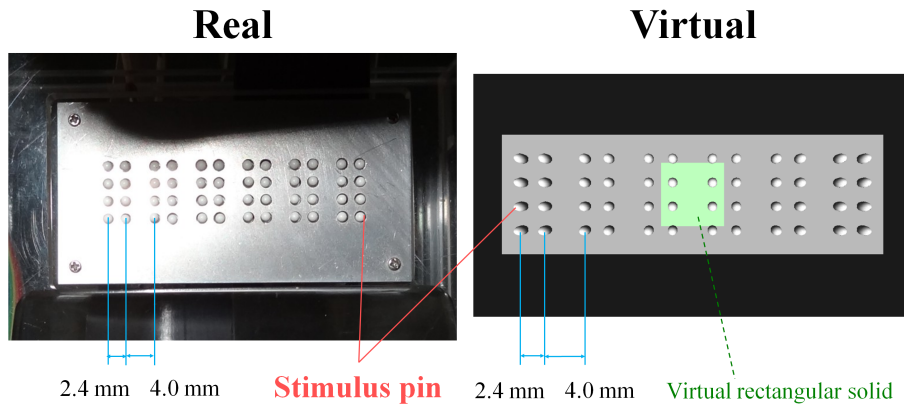


Figure 3.10: Setup for height discrimination experiment

6. 標準刺激および比較刺激とした2つの直方体の高さを比較する．被験者は、より高いと知覚した直方体について回答する．
7. 同じ標準の直方体に対して比較対象の直方体をランダムな順序で計10回呈示する．この試行は、比例定数毎に行われる．

本実験では、VR直方体の高さに対する弁別閾を求めるために恒常法を採用した．弁別閾は、次の手順で測定する．まず、被験者が標準刺激に対して比較刺激の方が大きいと知覚した判断確率 $p$ を求める．次に、判断確率 $p = 0.75(H_{p=0.75})$ と $p = 0.5(H_{p=0.5})$ に相当する比較刺激の差である上弁別閾を求める．同様に、判断確率 $p = 0.5(H_{p=0.5})$ と $p = 0.25(H_{p=0.25})$ に相当する比較刺激の差である下弁別閾を求める．そして、上弁別閾と下弁別閾の平均値を計算することで弁別閾 $\Delta H$ を算出することができる．

被験者は右利きの男性 5 名（平均 24 歳）であり，被験者に VR 空間に関する視覚情報を与えずに実験を実施する．なお，VR 呈示面は，縦 12.0[mm] 横 38.4[mm] 高さ 1.0[mm] であり，**Figure 3.10** のように実世界の触覚ディスプレイ面およびピンの位置情報と対応している．触知ピンのストロークは，VR 呈示面における VR 直方体のめり込み量によって決定される．そのため，被験者は，触知ピンの上下動によって VR 直方体の高さを知覚できる．

### 3.3.3 球の直径識別実験

本研究では，VR 空間内において操作者の指先位置を表す VR 呈示面の姿勢を力感覚によって制御する方法を提案した．本実験では，提案する制御方法の有効性を検証するとともに呈示可能な VR 物体の曲率の限界を調査する．それに加えて，2 つの触診方法における球識別精度を比較することで，触診方法が認識精度に及ぼす影響について調査するとともに，本装置に適した触診方法について検討する．上述の実験と同様に，恒常法を採用し，2 つの VR 球の直径に対する弁別閾を求める．弁別閾が十分に小さければ，本装置によって呈示される刺激の変化が微細に判別可能であることを検証できる．次の手順に従って，球の直径に対する識別精度を求めた．

1. 初期状態では，VR 呈示面は，直方体から上方に 5mm 離れた状態を保っている．
2. 操作者の指先に体重をかけることで，ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に，VR 呈示面は鉛直方向に移動する．比例定数は，3.5[mm/N] を採用した．
3. 標準球の 3 次元形状を確認する．標準球として，直径 15, 30, 45, 60[mm] の球の中から一つが選択される．
4. 比較対象の球の直径を調べる．本実験では，直径 15, 30, 45, 60[mm] の標準球に対して，それぞれ直径 9~21, 24~36, 39~51, 54~66 の範囲における比較球を選定した．
5. VR 呈示面と直方体が接触した際に，触知ピンの上下動によって表面の凹凸情報が呈示されるので，被験者は球の曲率を知覚できる (**Figure 3.11**)．

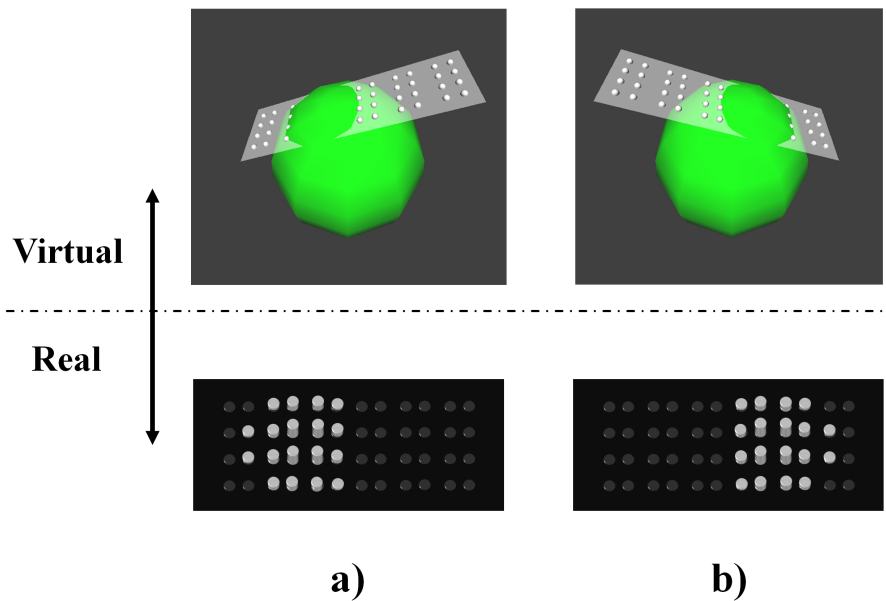
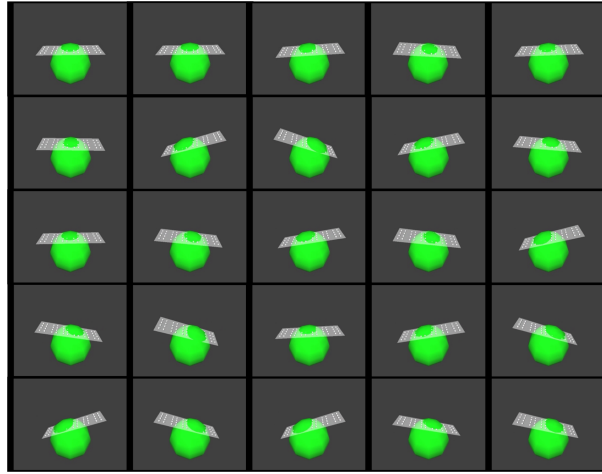


Figure 3.11: Pin protrusion distribution on display pad during sphere discrimination

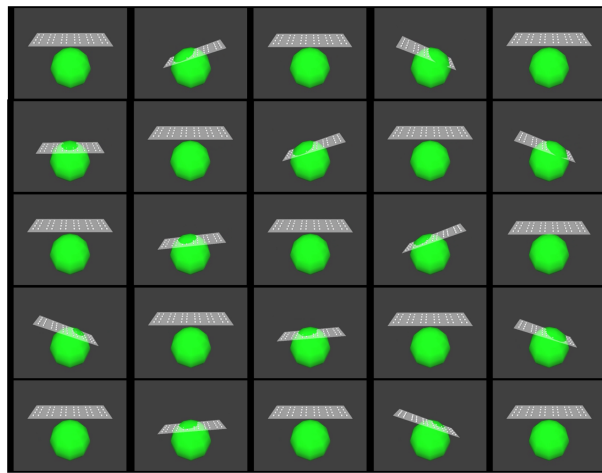
6. 標準球および比較球とした2つの球の直径を比較する．被験者は，より大きいと知覚した球について回答する．
7. 同じ標準の球に対して比較対象の球をランダムな順序で計10回呈示した．この試行は，触診方法毎に行われる．

本実験では，上述の実験と同様の手順によってVR球の直径に対する弁別閾  $\Delta D$  を求めた．被験者は右利きの男性6名（平均24歳）であり，被験者にVR空間に関する視覚情報を与えずに実験を実施する．触知ピンのストロークは，VR呈示面におけるVR球のめり込み量によって決定される．そのため，被験者は，触知ピンの上下動によってVR球の曲率を知覚できる．VR物体との接触面を調整できるので，操作者は曲率や表面の凹凸情報についてより微細な変化を知覚できる．

なお，本実験では，本装置に適した触診方法について検討するために，球を撫で回す方法と球の表面を反復するように軽く触れる方法による球識別精度を比較する（**Figure 3.12**）．ヒトの触動作には，特有の探索活動があり，調査する特性の違いによって手の動作が異なることが知られている（**Figure 1.3**）．撫で回す触知方法は，圧迫と輪郭探索を組み合わせ



(a) Pressing and rubbing



(b) Slight tapping

Figure 3.12: Stop-motion photographs for two models

た動作であり，物体の硬さおよび全体形状を把握することに適していると考えられる．また，表面を反復するように軽く触れる触知方法は，圧迫の反復動作であり，硬さ知覚に有効であることが想定される．

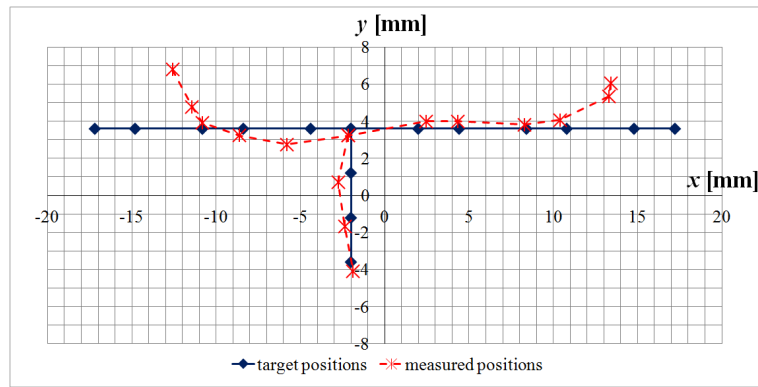


Figure 3.13: Measurement precision for centroid estimation

## 3.4 実験結果と考察

### 3.4.1 重心位置推定検証実験

重心位置推定の精度と安定性を検証するために、各目標値に対する推定値を計測した。Figure 3.13 に各測定値の平均値を示す。目標値と測定値の誤差は、ディスプレイ面の中心に近づくにつれて小さくなっている。一方、中心から離れるにつれて、精度が低下している。これは、装置に固定されているためにディスプレイ面を大きく傾けることができないことが原因であると考えられる。しかし、操作者はディスプレイ面に3本の指を載せた状態で操作を行うので、指の重心位置がディスプレイ面の中心から大きく離れることはほとんどない。

実験結果から、ディスプレイ面の中心付近における重心位置推定の安定性が確認された。したがって、操作者はVR呈示面の姿勢を自然に制御できるので、VR空間において直感的な操作が可能となる。

### 3.4.2 高さ識別実験

ディスプレイ面に対する接触力とVR呈示面の高さ情報の関係を表す適切な比例定数を求めるために、各被験者に対する弁別閾  $\Delta H$  を測定した。Figure 3.14 に各比例定数に対

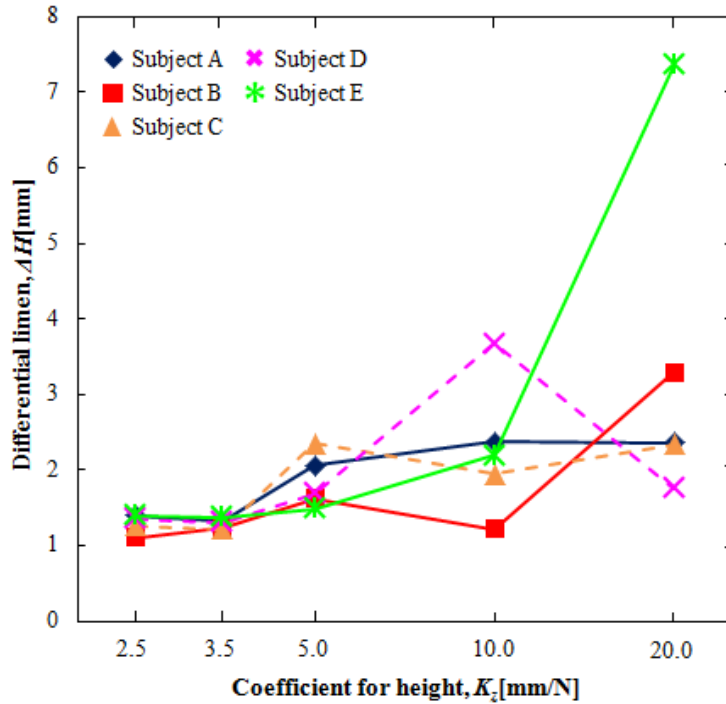
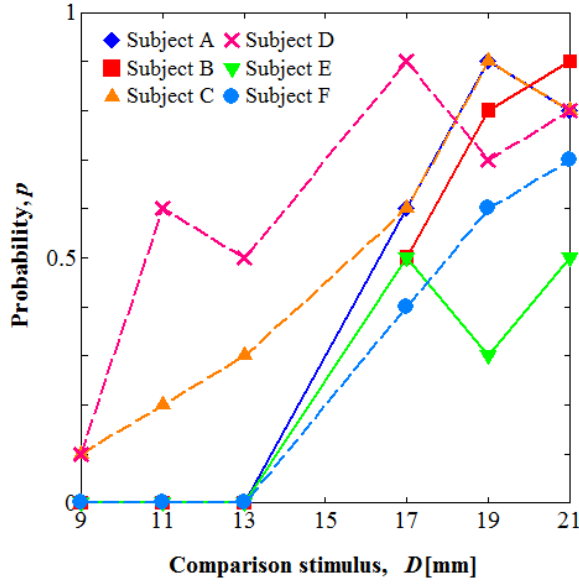


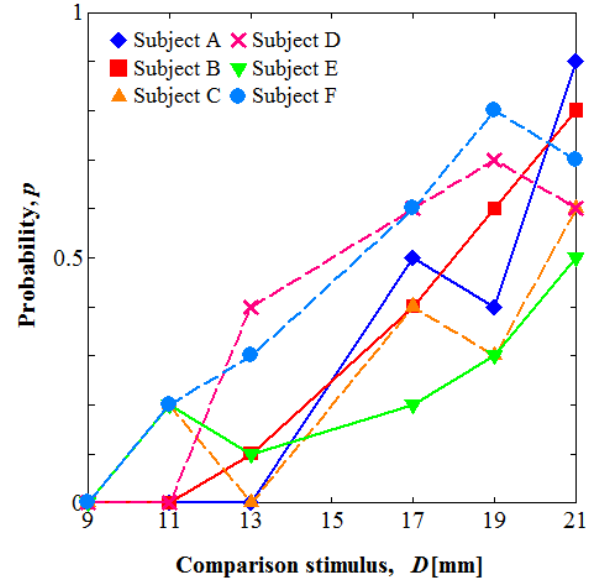
Figure 3.14: Relationship between proportionality constant and DL for each subject

する被験者の弁別閾を示す．図中における横軸は，ディスプレイ面に対する接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す比例定数 [mm/N] を表す．また，縦軸は，各比例定数に対する被験者の弁別閾 [mm] である．スミルノフ・グラブス検定 (Smirnov-Grubbs outlier test, 有意水準 5%) によれば，比例定数が 20[mm/N] の際の弁別閾について，被験者 E と他の被験者間に有意差があり，外れ値であることが確認された．被験者 A, C, D, E の弁別閾は，比例定数が 3.5[mm/N] のときに最小となった．一方，被験者 B の弁別閾は，比例定数が 2.5[mm/N] のときに最小となった．しかし，被験者 B の弁別閾は，比例定数が 3.5[mm/N] の場合においても十分に小さかった．

これらの実験結果から，比例定数が減少するにつれて弁別閾が 1[mm] 周辺の十分に小さい値に収束することが分かる．したがって，ディスプレイ面に対する接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数は 3.5[mm/N] であることが分かった．



(a) Pressing and rubbing

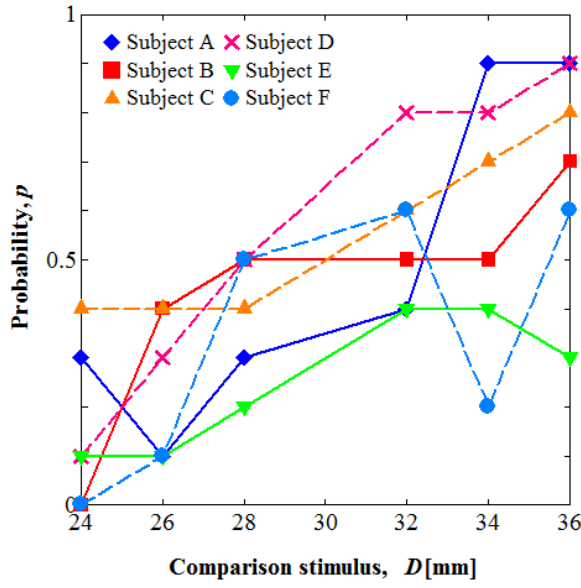


(b) Slight tapping

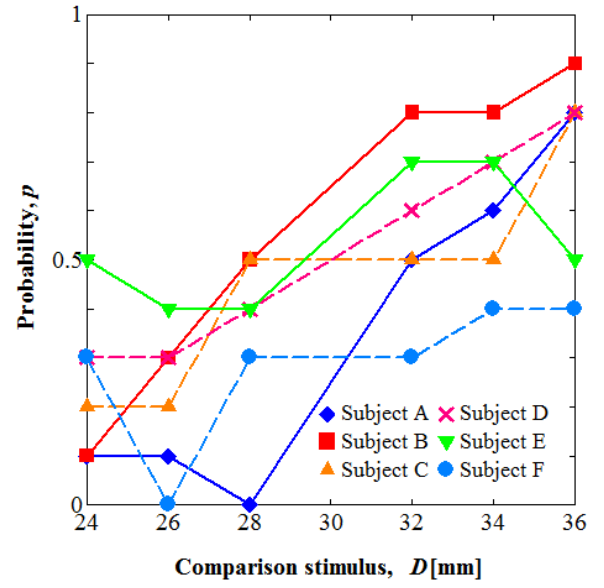
Figure 3.15: Relationship between probability and size felt compared with 15-mm standard sphere

### 3.4.3 球の直径識別実験

VR 球の直径の識別精度を評価尺度として本装置の呈示性能を評価した．それに加えて，本装置に適した触診方法について検討するために，球を撫で回す方法と球の表面を反復するように軽く触れる方法による球識別精度を比較した．各被験者が標準球に対して比較球の直径の方が大きいと知覚した判断確率  $p$  を **Figure 3.15**～**Figure 3.18** に示す．図中における横軸は，各標準球に対する比較球の直径 [mm] である．また，縦軸は，各触診方法において，標準球に対して比較球の方が大きいと知覚した判断確率を表す．本実験において，直径 30[mm] の標準球に対しては，直径 24～36 の球を比較球とした．そのため，直径が最大の比較球では，**Figure 3.19** のように直径が VR 呈示面における横幅の長さとはほぼ等しくなる．直径 15, 30, 45, 60[mm] の標準球に対する各被験者の弁別閾  $\Delta D$  をそれぞれ **Table 3.1**～**Table 3.4** にまとめた．弁別閾  $\Delta D$  と標準刺激  $D$  の比はウェーバー比を表している．ウェーバーの法則によれば， $\Delta D/D$  が一定という関係が成り立つ．

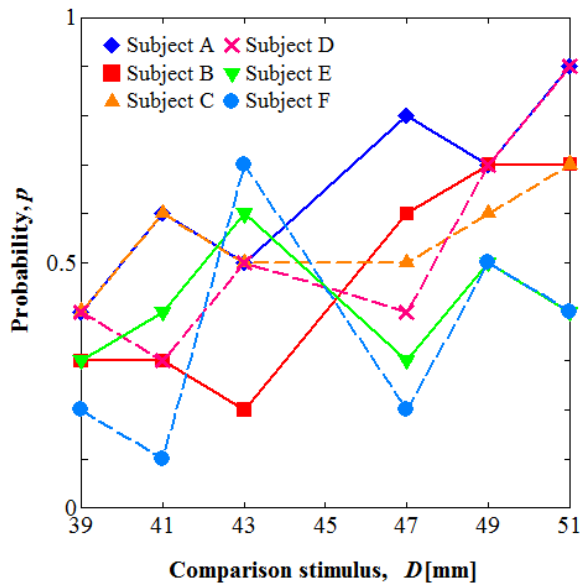


(a) Pressing and rubbing

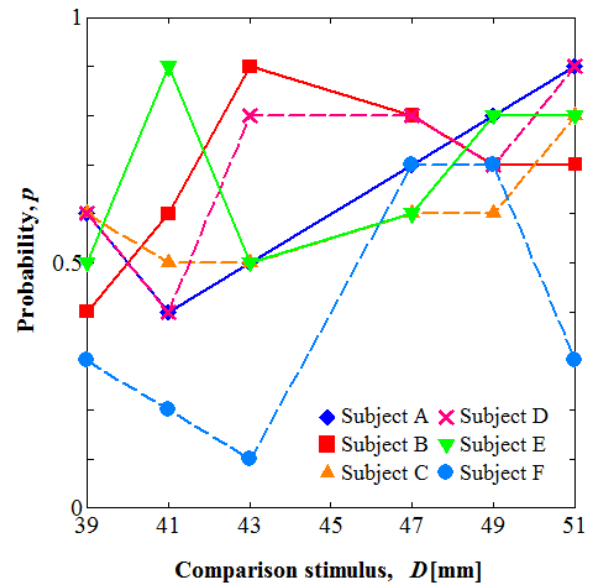


(b) Slight tapping

Figure 3.16: Relationship between probability and size felt compared with 30-mm standard sphere



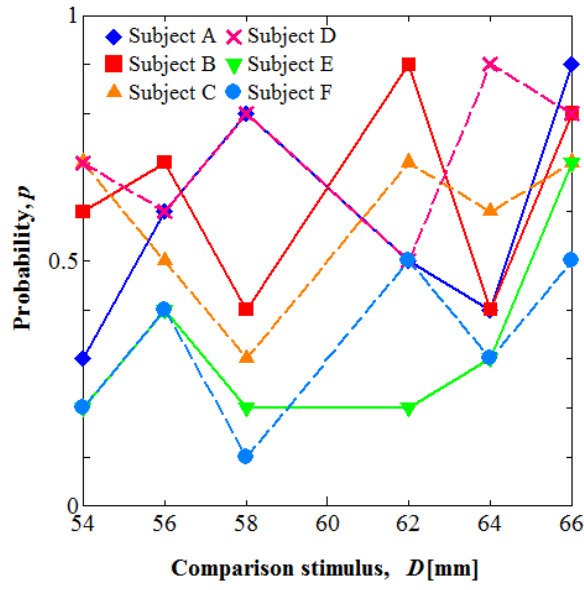
(a) Pressing and rubbing



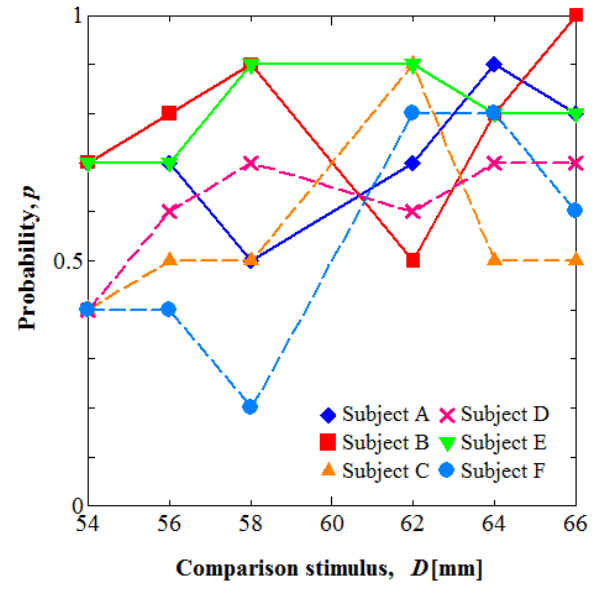
(b) Slight tapping

Figure 3.17: Relationship between probability and size felt compared with 45-mm standard sphere





(a) Pressing and rubbing



(b) Slight tapping

Figure 3.18: Relationship between probability and size felt compared with 60-mm standard sphere

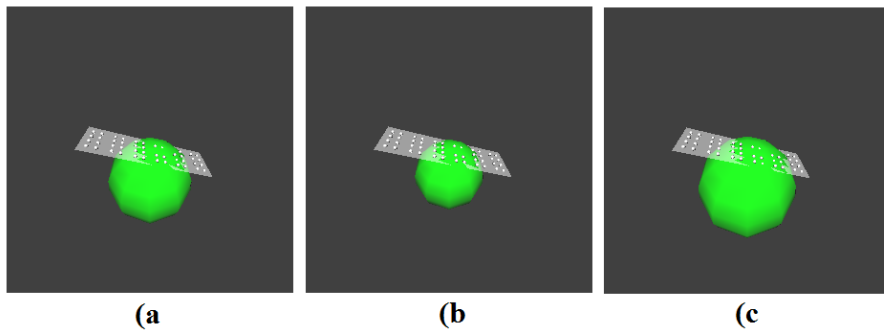


Figure 3.19: Standard and comparison spheres; a) standard sphere of 30-mm diameter, b) the smallest and c) the largest comparison spheres

Table 3.1: Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 15[\text{mm}]$ )

(a) Pressing and rubbing

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	1.6	1.6	3.3	4.6	2.2	1.9
$\Delta D/D$	0.11	0.10	0.22	0.31	0.14	0.12

(b) Slight tapping

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	1.7	1.9	2.8	2.1	3.7	2.5
$\Delta D/D$	0.12	0.13	0.19	0.14	0.24	0.17

Table 3.2: Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 30[\text{mm}]$ )

(a) Pressing and rubbing

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	3.5	3.3	7.1	3.4	7.7	3.4
$\Delta D/D$	0.11	0.12	0.24	0.11	0.26	0.11

(b) Slight tapping

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	3.0	3.4	5.6	5.6	16.2	5.8
$\Delta D/D$	0.10	0.11	0.19	0.19	0.54	0.19

Table 3.3: Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 45[\text{mm}]$ )

(a) Pressing and rubbing

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	6.3	6.0	16.2	5.9	69.7	12.8
$\Delta D/D$	0.14	0.13	0.36	0.13	1.55	0.28

(b) Slight tapping

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	6.5	15.5	15.0	8.1	19.9	8.3
$\Delta D/D$	0.14	0.34	0.33	0.18	0.44	0.18

Table 3.4: Sensation threshold for size of virtual sphere ( $D = 60[\text{mm}]$ )

## (a) Pressing and rubbing

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	10.6	21.7	24.3	17.4	10.6	11.6
$\Delta D/D$	0.18	0.36	0.40	0.29	0.18	0.19

## (b) Slight tapping

Subjects	A	B	C	D	E	F
$\Delta D[\text{mm}]$	4.1	5.9	18.5	14.5	23.8	7.0
$\Delta D/D$	0.07	0.10	0.31	0.24	0.40	0.12

実験結果について議論する前に、各被験者の実験結果に対してスミルノフ・グラブス検定（有意水準5%）を実施した。検定によれば、直径30および45[mm]の標準球に対して撫で回す触知方法における弁別閾について、被験者Eと他の被験者間に有意差があり、外れ値であることが確認された。被験者Eは球に一瞬触れただけで球の大きさを調べていた。VR物体の形状把握において注意深く探索することが必要不可欠であるので、実験の考察では被験者Eによる実験結果は除外した。被験者Eを除いた各被験者の弁別閾および弁別閾の平均値をそれぞれ **Figure 3.20** および **Figure 3.21** に図示する。

まず、実験によって求めたウェーバー比  $\Delta D/D$  から、ディスプレイの呈示性能および本装置に適した触診方法についての議論を始める。**Figure 3.21**における弁別閾からウェーバー比を算出すると、すべての条件において  $\Delta D/D = 0.1 \sim 0.3$  となる。したがって、被験者の弁別閾およびウェーバー比が小さいことから、本装置が呈示する触刺激によって、操作者は微細な球の曲率を知覚可能であることを確認した。また、直径45および60[mm]の標準球に対する試行では、球の直径がVR呈示面よりも大きい状態で触診を行っている。そのため、対象よりも小さな触覚呈示面であっても、球の直径を適切に識別可能であることが分かった。

次に、本実験によって算出した各標準球における弁別閾に対して、 $F$  検定および  $t$  検定（両側検定、有意水準5%）を実施することで、球を撫で回す方法と球の表面を反復するように軽く触れる方法の2条件間における識別精度をより詳細に比較する。 $F$  検定および  $t$  検

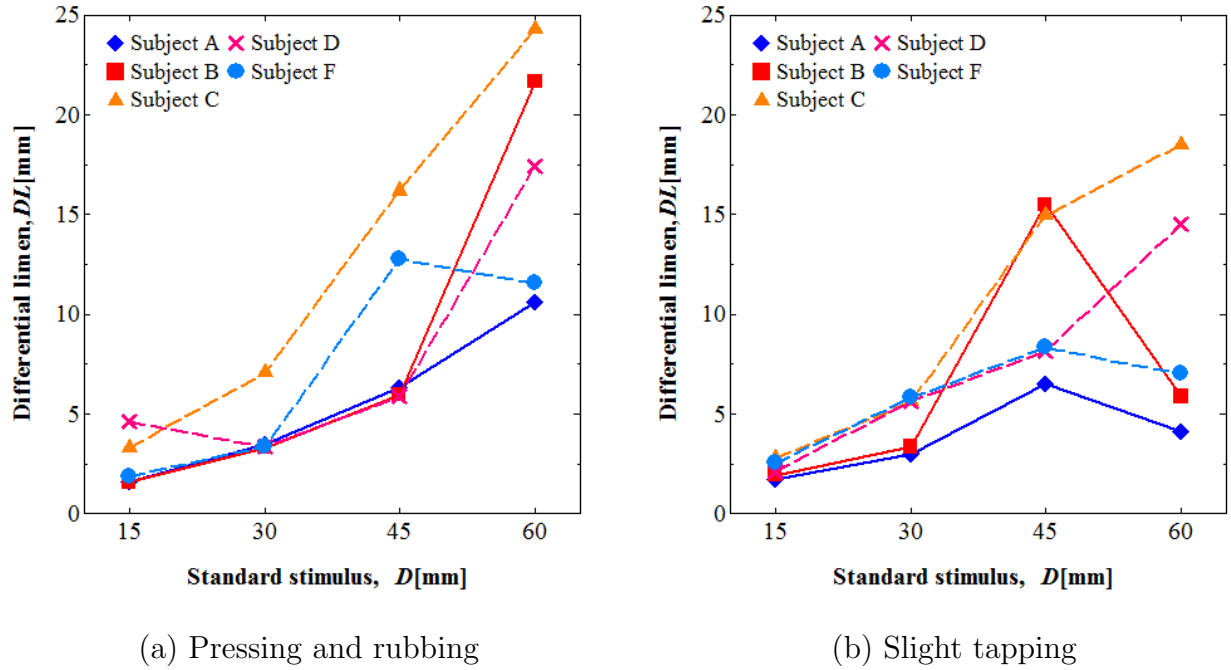


Figure 3.20: Variation in DL of virtual sphere diameter under different standard diameter

定による解析結果を **Table 3.5** に示す． $F$  検定によれば，直径 15[mm] の標準球に対する試行 ( $F(4,4) = 9.52$ ,  $P = 0.03 < 0.05$ ) において，2 条件間における弁別閾のばらつきに有意差があることが確認された．なお，球の表面を反復するように軽く触れる方法は，球を撫で回す方法よりも弁別閾のばらつきが減少している．したがって，球の表面を反復するように軽く触れる方法は，球を撫で回す方法よりも安定した触診が可能である．一方， $t$  検定によって，直径 60[mm] の標準球に対する試行 ( $P = 0.05 \leq 0.05$ ) において，2 条件間における弁別閾の平均値に有意差があることが分かった．なお，球の表面を反復するように軽く触れる方法は，球を撫で回す方法よりも弁別閾の平均値が減少している．したがって，球の表面を反復するように軽く触れる方法は，球を撫で回す方法よりも，曲率や表面の凹凸情報について微細な変化を知覚できる．以上の実験結果から，呈示する VR 球の直径が比較的小さい場合または大きい場合における球識別に対して，球の表面を反復するように軽く触れる方法は，球を撫で回す方法よりも有効であると言える．また，球の表面を反復するように軽く触れる触知方法は，圧迫の反復動作であり，硬さを調べる際に用いられる触動作である．そのため，触診方法を指定することで，調査する特性が硬さのみに限

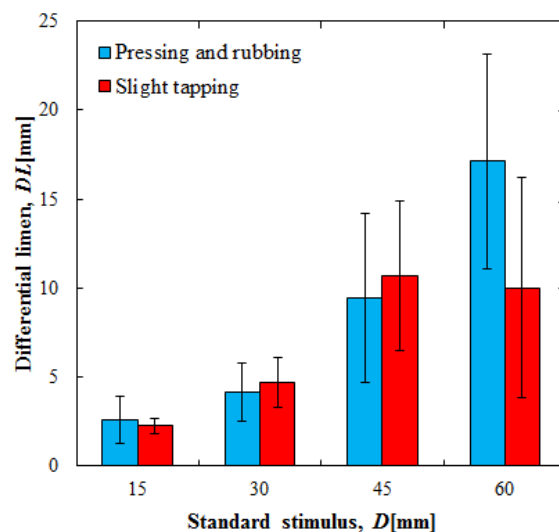


Figure 3.21: Dependence of DL on method of touching

Table 3.5:  $F$ -test and  $t$ -test for differential limens

Standard stimulus $D$ [mm]	$F$ -test		$t$ -test
	$F(4,4)$	$P$ value	$P$ value
15[mm]	9.52	0.03*	0.29
30[mm]	1.42	0.37	0.29
45[mm]	1.126	0.41	0.33
60[mm]	2.185	0.48	0.05*

定されたために，識別精度が向上したと考えられる．

### 3.5 結 言

著者らは，人間にやさしい革新的なヒューマン・インタフェースの確立を目指して，皮膚と筋・腱の感覚器官に刺激を与えることのできる力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイの研究開発を進めている．本研究では，2.5 次元ディスプレイによる 3 次元空間内の操作の汎用性を拡張した．前章では，操作者の指先位置情報を表す VR 呈示面の回転は  $z$  軸回転のみに限定されていたが，操作者の指の重心位置によって VR 呈示面の  $x$  および  $y$

軸回転を加えて姿勢を制御する方法を提案した。重心位置は、触覚ディスプレイの下に搭載した3つの圧力センサによって取得されるディスプレイ面に対する接触力から推定した。VR物体との接触面を調整できるので、操作者は曲率や表面の凹凸情報についてより微細な変化を知覚できる。したがって、最小のエネルギーによって操作可能なため、3次元空間内の操作における疲労を軽減することができる。

開発したディスプレイ装置およびシステムの有効性を検証するために、3つの評価実験を実施した。まず、VR呈示面の姿勢の安定した操作を実現するために、推定値の誤差を計測し、重心位置推定の精度を評価した。実験結果から、ディスプレイ面の中心付近における重心位置推定の安定性を確認した。したがって、操作者はVR呈示面の姿勢を自然に制御できるので、VR空間において直観的な操作が可能となる。

次に、2つのVR直方体の高さの識別精度を調査し、弁別閾を求める実験を実施した。そして、ディスプレイ面に対する接触力とVR呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数は $3.5[\text{mm}/\text{N}]$ であることが分かった。

また、呈示可能なVR物体の曲率の限界を調査するために、2つのVR球の直径の識別精度を求めた。それに加えて、本装置に適した触診方法について検討するために、球を撫で回す方法と球の表面を反復するように軽く触れる方法による球識別精度を比較した。実験結果から、各被験者の弁別閾が小さいことから、本装置は触覚による物体の認識に有効であることを確認した。したがって、操作者は本装置によって微細な球の曲率を知覚することができる。また、呈示するVR球の直径が比較的小さい場合または大きい場合における球識別に対して、球の表面を反復するように軽く触れる方法は、球を撫で回す方法よりも有効であることを確認した。

本研究の心理物理実験では、被験者にVR空間に関する視覚情報を与えないにも関わらず、被験者はVR空間の微細な変化を認識することができた。したがって、本装置による感覚情報の呈示によって、視覚情報に頼る傾向のある情報機器の操作において操作者の負担を軽減させることが可能であると考えられる。さらに、本装置は視覚情報を触覚情報で代行する感覚代行システム [118, 119] への発展が期待できる。

## 第 4 章 疑似力触覚と分布圧覚呈示が硬さ知覚へ及ぼす影響

### 4.1 緒 言

テレイグジスタンスに用いられる力触覚呈示システムは、遠隔地あるいは VR 空間におけるヒトと物体間に生じる相互作用を表現することで、高い臨場感を提供することが可能である。このようなシステムでは、対象物体の物質特性に応じた巧みな操作が必要である。ヒトの手は、触れたものの特徴を知覚する識別感覚系の機能が非常に優れている。特に、触知覚特性の中でも硬さ感覚は、物体に触れることで直感的に違いが知覚できる。そのため、VR において、硬さ感覚を呈示できるハプティック・ディスプレイの研究開発が進められている [120–123]。

硬軟感を呈示する方法としては、ダイラタント流体などを利用することで、呈示面の柔らかさを変化させる方法とヒトの知覚特性を利用することで疑似的に柔らかさを呈示する方法がある。しかし、硬軟感は、主に機械受容器のメルケル触盤 (SA I) からの信号により認識されるため [79]，高密度の分布圧覚呈示装置による皮膚への刺激が有効であると考えられる。その実現のためには、高度なアクチュエータ技術が必要とされるが、既存のアクチュエータのみで硬軟感を表現することは極めて難しい。

一方、硬さ感覚は、触覚だけでなく、視覚からの影響を強く受けることが知られている [89, 124]。この視覚情報が硬さに及ぼす効果を活用し、疑似的に力覚・触覚を錯覚させる疑似力触覚 (pseudo-haptics) [89] の研究が進められている。この錯覚現象では、反力や凹凸を疑似的に呈示できることが確認されている。このことから、疑似力触覚を利用することで物理デバイスを用いずに力覚呈示を行うことが可能である。しかし、その知覚の大きさには個人差があり、大きな力の呈示が困難であるという課題がある。

本研究では、疑似力触覚と著者らが開発した力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイによる触覚呈示を組み合わせることで、物体の硬さを呈示する方法を提案する。これによれば、双方の呈示能力を補完し、強調することが期待できる。本装置には、操作部の下には圧力センサが搭載されており、ディスプレイ面に加える力を検出できるので、操作者は加える力加減を調節することによって高さ方向の情報を入力する。そのため、VR 物体の表面を反復するように軽く触れる触知方法を用いることができる。この触知方法は、圧迫の反復動作であり、硬さ知覚に有効であると考えられる (**Figure 1.3**)。また、本装置では、触知ピンによる触刺激とともに物体形状を呈示できるため、他の手法よりも優位である。本研究では、触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示する。まず、触知ピンの最大ストロークを変化させる。それに加えて、ディスプレイ面への接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を VR 物体に VR 呈示面が接触した後に変化させる。一連の研究の端緒として、疑似力触覚とハプティック・ディスプレイを組み合わせることによる硬さ感覚への影響を調査するために、シェッフェの一対比較法、浦の変法 [125] を用いた VR 球の硬さ識別に関する心理物理実験を行った。

## 4.2 ディスプレイ装置

### 4.2.1 力覚・触覚融合形 2.5 次元ディスプレイ

2.5 次元ディスプレイ装置は、平面 3 リンクマニピュレータおよび先端に搭載したピン・アレイ形触覚ディスプレイから構成される (**Figure 3.1**)。触覚ディスプレイは、4x12 のアレイ規模を実現するために 6 つの点字セル (KGS 社製、型式:SC9) で構成されている。各触知ピンは、バイモルフ形 PZT アクチュエータにより最大 1mm の上下動が可能である。触覚ディスプレイの呈示面に指示指、中指、薬指の三本を載せて対象を触ることができるので、指一本で触るより自然な触り方ができる。なお、操作部はマウスと類似した形状であり、前提知識を必要とせずに操作ができる。



## 4.2.2 VR 呈示面の鉛直方向における位置制御

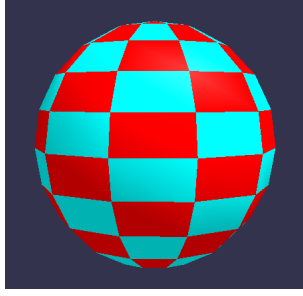
VR 空間内において、VR 呈示面の高さ方向の位置は、ディスプレイ面に対する接触力の大きさに比例して、下方向に移動する。前章では、接触力と VR 呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数  $c$  は、 $3.5[\text{mm}/\text{N}]$  であることが実験的に求められた。VR 呈示面の鉛直方向における位置制御は、前章と同様に行われる (**Figure 3.4**)。初期状態では、VR 呈示面は VR 物体から上方に一定の距離を保っている。操作者は、操作部を把持して操作することで、VR 空間内で VR 呈示面を通して VR 物体の探索・操作ができる。操作者の指先に体重をかけることで、ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に、VR 呈示面は鉛直方向に移動する。この呈示装置では、PHANTOM [53] などの 3 次元の装置とは異なり、手を浮かして上下方向に動かす必要がない。そのため、本呈示装置には 3 次元 VR 空間の操作における疲労を軽減することができるという特長がある。

## 4.3 呈示方法

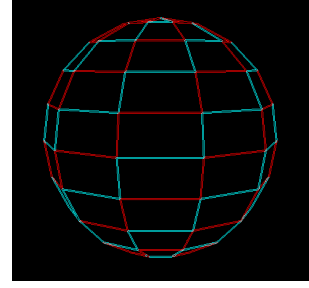
### 4.3.1 VR 物体の構造

物体の変形シミュレーションにおいて多く利用される FEM (finite element model) や FDM (finite difference model) は、精確な結果を提供するが、処理時間がかかるために、実時間の相互作用性を達成することが困難である [126]。そこで、本研究では、バネ・質点・ダンパ系 (mass-spring-damper model) を想定し、変位に伴って変形する VR 球を作成した (**Figure 4.1**) [127]。本モデル化では、VR 球は比較的簡単な構造で構成されるので、処理時間を軽減することが可能である。

VR 球を構成する質点は、隣接する質点とバネおよびダンパによって結合されている。**Figure 4.1b** における線分は、バネおよびダンパを表している。なお、線分の交点および球の中心に質点が配置されている。VR 呈示面と質点間の接触によって質点の移動が生じた際に、質点間のバネが自然長から変化する。そこで、バネの復元力およびダンパによる



(a) Virtual sphere



(b) Structure of virtual sphere

Figure 4.1: Virtual deformable sphere

減衰力が質点に加わる．以上のバネ・質点・ダンパ系の運動を運動方程式で表すと，質点の加速度を含む微分方程式となる．この微分方程式にオイラー法のような数値解法を適用することによって質点の位置を算出する．

#### 4.3.2 硬さ呈示

本研究の心理物理実験において，VR 球を構成するバネおよびダンパ係数は一定である (Table 4.1)．Figure 4.2 は，硬さ呈示の手法を示している．初期状態では，VR 呈示面は VR 球から上方に一定の距離を保っている (Figure 4.2a)．操作者の指先に体重をかけることで，ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に，VR 呈示面は鉛直方向に移動する．VR 呈示面は，VR 球に接触するまで，鉛直方向に  $c$  ( $= 3.5[\text{mm}/\text{N}]$ ) の割合で下方方向に移動する (Figure 4.2b)．VR 呈示面と VR 球が接触した後ディスプレイ面への接触力と高さ方向についての位置の関係を表す比例定数を  $c$  から  $c_{\text{mater}}$  に変化させる (Figure 4.2c, d)．比例定数  $c_{\text{mater}}$  が小さくなると，VR 呈示面を下方方向に動かしにくくなるため，操作者は VR 球に対して硬さをより感じる．なお，操作者は VR 球の形状を触知ピンの上下動により知覚できる．したがって，操作者が受ける硬さ感覚は，疑似力触覚による視覚情報と圧力分布として与えられる触覚情報によって強調される．

Table 4.1: Main parameters and constants of virtual deformable sphere

Parameters and constants	Value
Diameter of virtual sphere	40[mm]
Mass of particle	0.05[kg]
Spring constant	50[N/mm]
Damper coefficient	0.5[N·s/m]
Total number of particles	93

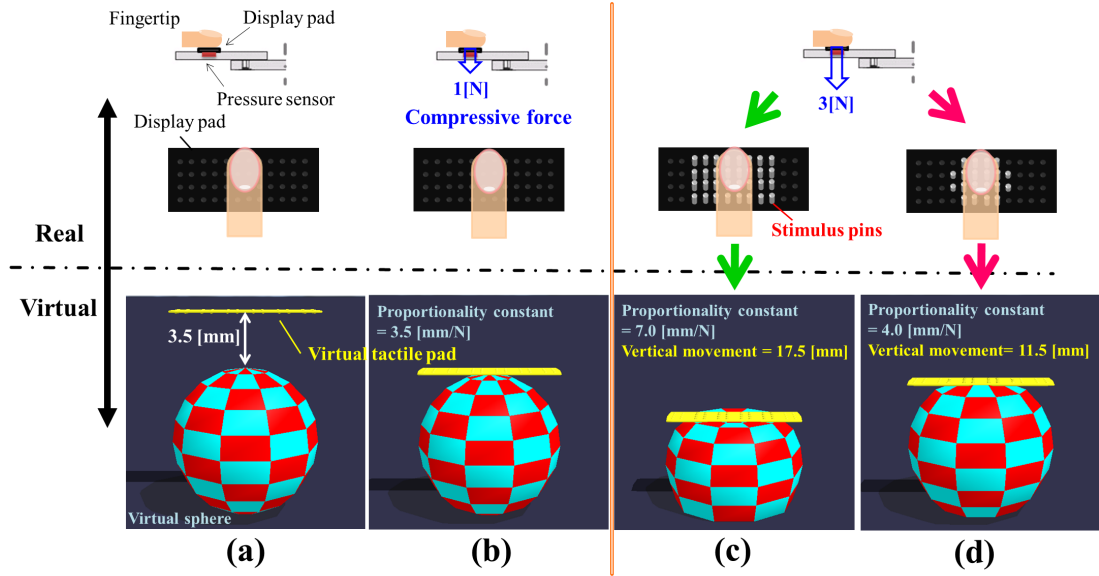


Figure 4.2: Stiffness presentation

#### 4.4 評価実験

本研究では、疑似力触覚と著者らが開発した力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイによる触覚呈示を組み合わせることで、物体の硬さを呈示する方法を提案した。本実験では、提案手法の有効性を検証するとともに硬さ知覚への影響を調査する。VR 球における硬さ感覚の調査をするために、9 種の試料を用意した。VR 球を構成するバネおよびダンパの係数は一定であるが、触知ピンの最大ストローク  $s_{max}$  および比例定数  $c_{mater}$  の大きさを変えることで、9 種類の VR 球を作成した (Table 4.2)。本実験では、VR 球の硬さに対する評価を行うために、シェッフェの対比較法、浦の変法を採用した。被験者は、次の手順に従って各試料を比較する。

Table 4.2: Sample of virtual sphere

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$
Max. pin stroke, $s_{max}$ [mm]	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
Coefficient [mm/N]	1.0	4.0	7.0	1.0	4.0	7.0	1.0	4.0	7.0

1. 評価対象となる VR 球が9種の試料 (**Table 4.2**) から一対 ( $\alpha_i, \alpha_j$ ) がランダムに選ばれる.
2. 被験者は, 試料  $\alpha_i$  に対して硬さを調査する.
3. 初期状態では, VR 呈示面は, VR 球から上方に 3.5[mm] 離れた状態を保っている.
4. 操作者の指先に体重をかけることで, ディスプレイ面に対して垂直方向に接触力を加えた際に, VR 呈示面は鉛直方向に移動する.
5. VR 呈示面は, VR 球に接触するまで, 鉛直方向に  $c$  ( $= 3.5[\text{mm}/\text{N}]$ ) の割合で下方向に移動する.
6. VR 呈示面と VR 球が接触した後ディスプレイ面への接触力と高さ方向についての位置の関係を表す比例定数を  $c$  から各試料の  $c_{mater}$  に変化させる.
7. VR 球の表面情報は, 触知ピンの上下動によって呈示されるので, 被験者は VR 球の形状を知覚できる. なお, 触知ピンのストロークは, 各試料の  $s_{max}$  を上限とする.
8. 試料  $\alpha_j$  に対して, 同様に硬さ調査する.
9. 試料  $\alpha_j$  を基準にした際の試料  $\alpha_i$  に対する硬さを-2~+2の5段階で評価する (5件法, **Table 4.3**).
10. 各被験者は, すべての組み合わせと両方の順序の対を1回ずつ比較する ( ${}_9P_2=72$ 回).

本実験における被験者は, 右利きの男性9名 (平均24歳, 標準偏差1.0歳) である. 各試料の硬さに関する評価結果を **Figure 4.3** および **Figure 4.4** に示す. 図中における横軸

Table 4.3: Sample of virtual sphere

評価	点数
$A_i$ が $A_j$ に比べて非常に硬いと知覚したとき	2
$A_i$ が $A_j$ に比べて硬いと知覚したとき	1
$A_i$ が $A_j$ と同じ硬さと知覚したとき	0
$A_i$ が $A_j$ に比べて柔らかいと知覚したとき	-1
$A_i$ が $A_j$ に比べて非常に柔らかいと知覚したとき	-2

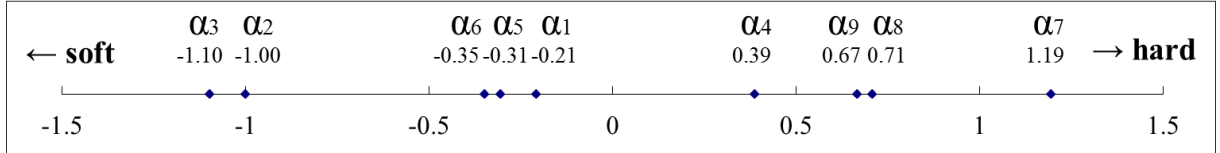


Figure 4.3: Scaling results of Group 1

は，各試料の硬さに関する評点を表す．被験者は，触覚呈示の有無により，2つのグループに分類された．

1. グループ1（4名）：触覚呈示がある場合，VR球を柔らかく感じる．
2. グループ2（5名）：触覚呈示のある場合，VR球を硬く感じる．

**Figure 4.3** はグループ1の被験者による各試料の位置付けを示している．本研究では，2組の試料毎の主効果の差が，求めたヤードスティック  $Y$  よりも大きければ，その試料の間に有意水準5%の有意差があることになる．グループ1におけるヤードスティックは， $Y=0.31$ であった．したがって，9種の試料における硬さは， $\alpha_3 \cdot \alpha_2 < \alpha_6 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_1 < \alpha_4 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_8 < \alpha_7$ であると統計的に結論付けられた．すなわち，グループ1の被験者は，触知ピンの最大ストロークが大きくなるにつれて，VR球を柔らかく感じている．上で示したグループ1の被

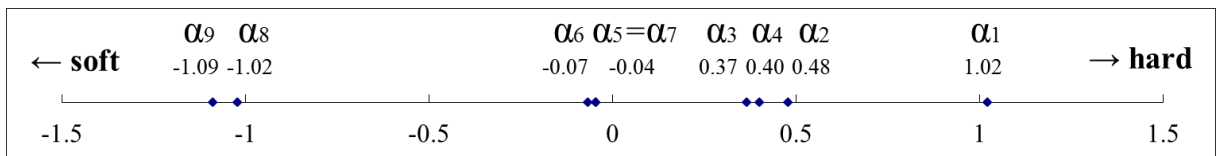


Figure 4.4: Scaling results of Group 2

験者の実験結果は、指に対する接触力面積が大きくなると柔らかく感じるという硬さ知覚の研究報告 [121] と一致する。Figure 4.4 はグループ 2 の被験者による各試料の位置付けを示している。グループ 2 におけるヤードスティックは、 $Y = 0.34$  であった。したがって、9 種の試料における硬さは、 $\alpha_9 \cdot \alpha_8 < \alpha_6 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_7 < \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_2 < \alpha_1$  であると統計的に結論付けられた。つまり、グループ 2 の被験者は、グループ 1 とは反対に、触知ピンの最大ストロークが大きくなるにつれて、VR 球を硬く感じている。グループ 2 の被験者は、ディスプレイ面に加える接触力に集中したために、触知ピンによる指への接触力を感じることができなかったと考えられる。したがって、触知ピンによる刺激強度を強くすることにより、柔らかさの感覚を呈示できると考えられる。このように、被験者は 2 つのグループに分類されたが、接触力と高さ位置の関係を表す比例定数が小さくなるにつれて、VR 球をより硬くなるとすべての被験者が評価している。以上の検討によって、接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を変化させることにより VR 物体の硬さを呈示できることを示せた。

## 4.5 結 言

本研究では、疑似力触覚と著者らが開発した力覚・触覚融合呈示形 2.5 次元ディスプレイによる触覚呈示を組み合わせることで、物体の硬さを呈示する方法を提案した。触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示する。まず、触知ピンの最大ストロークを変化させた。それに加えて、VR 物体に VR 呈示面が接触した後に、ディスプレイ面への接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を  $c$  から  $c_{mater}$  変化した。開発したディスプレイ装置およびシステムの有効性を検証するために、シェッフェの対比較法、浦の変法を用いた心理物理実験を実施した。被験者は、試料の VR 物体に対して硬さを評価した。被験者は、触覚呈示の感じ方によって 2 つのグループに分類された。しかし、接触力と高さ位置の関係を表す比例定数が小さくなるにつれて、VR 球をより硬くなるとすべての被験者が評価した。今後は、呈示可能な VR 物体の硬さの範囲を拡大するために、接触力と高さ位置の関係を表す比例定数と硬さ感覚の関係を調査していく予定である。

## 第5章 結 論

物体操作を伴う VR では、視覚、力覚、触覚に適合した刺激を呈示することで操作者を支援するヒューマンフレンドリー・インタフェースが求められている。しかし、現状として、これらの感覚を融合したマルチモーダル・インタフェースについてはあまり議論されていない。さらに、一般的なハプティック・インタフェースでは、操作者に拘束感や疲労感を与えてしまうとともに、直観的な操作についても実現できないという問題もある。そこで、本研究では、低拘束かつ低疲労であり、直観的な操作を可能とする人間にやさしいインタフェースを開発した。このインタフェースは、力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイであるため、モダリティ間相互作用によって認識および操作の両面における精度の向上を可能とした。

本研究の第一の目的として、低拘束かつ低疲労であり、力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイを開発することとした。低疲労の3次元操作を可能とするために、「2.5次元操作」という新たな概念を提案した。腕の重量が影響する鉛直方向の運動を指先の接触力による位置制御に置き換える手法を提案することで、最小限のエネルギーでの操作を実現した。さらに、操作部をマウスと類似した形状とすることで、前提知識を要しない直感的な操作を可能とした。

第二の目的として、多自由度での接触を可能とすることで、操作者に3次元形状を知覚させるための制御方法を確立することとした。一般的な力触覚ディスプレイでは、物体との接触が点接触となっており、より自然な方法である面接触による触診の実現が課題となっている。そこで、本研究では、3次元 VR 空間内でより直観的な作業を可能にするために、VR 空間内において操作者の指先位置を表す VR 呈示面の姿勢を力感覚によって制御する手法を提案した。これによれば、接触面を調整できるので、操作者は曲率や表面の凹凸情

報についてより微細な変化の知覚を可能とした。

第三の目的として、硬軟感を表現するために、触覚ディスプレイによる触刺激と疑似力触覚を同時に呈示する方法を提案し、有効性を検証することとした。現在の触覚呈示における研究では、表面テクスチャ感について扱ったものが格段に多く、その他の触覚要素に関してはほとんど議論されていない。そこで、触錯覚現象を利用することにより脳を騙すことで現実感を生じさせる戦略をとった。本研究では、触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示した。触知ピンによる触刺激と疑似力触覚を組み合わせることで、双方の呈示能力を補完し、強調することを可能とした。

第四の目的として、本研究で開発するディスプレイを評価するとともに、力触覚ディスプレイに対する評価方法の確立に向けて、心理物理実験を利用した方法を提案することとした。第一に、VRにおける力覚・触覚呈示の有効性を検証するために、VR物体の整列精度に関する比較実験を行った。第二に、3次元空間における直感的な操作の達成度を評価するために、直方体の高さの識別精度を調査し、弁別閾を求める実験を実施した。第三に、多自由度での接触によって呈示可能なVR物体の曲率の限界を調査するために、2つのVR球の直径の識別精度を求めた。なお、物体形状を呈示する上で、触り方による認識精度の違いについて調査し、適した触診方法を検討した。第四に、硬軟感の呈示性能を評価するために、シェッフェの一对比較法、浦の変法を用いた球の硬さ識別に対する官能評価実験を行った。

本文の内容を以下に総括する。

第1章では、本論文が対象とする関連研究の歴史的背景・状況、本研究の意義・目的など本論文のあらましを述べた。

第2章では、人間にやさしい革新的なヒューマン・インタフェースの確立を目指して、皮膚と筋・腱の感覚器官に刺激を与えることのできる力覚・触覚融合形2.5次元ディスプレイを開発した。本装置は、平面3リンクマニピュレータおよび先端に搭載した4x12のピン・アレイ形触覚ディスプレイから構成される。触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので、指三本で対象を触ることができる。それに加えて、接触力を鉛直方向変位に置き換えるこ



とによる物体操作の実現と力触覚呈示が物体操作の精度に与える影響について検討するために評価実験を行った．力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の2条件におけるVR物体の整列精度を比較した．実験において，力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が整列精度が向上することを確認した．力覚のみの呈示条件の下では，操作者の手とVR物体間の位置を詳細に把握することができないために，力覚のみの呈示では精確な整列作業は行うことができなかったと考えられる．一方で，力覚・触覚融合呈示条件の下では，安定した整列作業を可能とした．

第3章では，高さ方向の位置制御に対して，適切な接触力-位置の関係を求めるとともに，モーメントを回転角度情報に置き換えることによる触知方式を提案した．まず，VR呈示面の姿勢の安定した操作を実現するために，推定値の誤差を計測し，重心位置推定の精度を評価した．実験結果から，ディスプレイ面の中心付近における重心位置推定の安定性を確認した．したがって，VR呈示面の姿勢を自然に制御できるので，VR空間において直観的な操作を可能とした．次に，2つのVR直方体の高さの識別精度を調査し，弁別閾を求める実験を実施した．そして，ディスプレイ面に対する接触力とVR呈示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数は $3.5[\text{mm}/\text{N}]$ であることが分かった．また，指の重心位置の移動情報を利用し，VR呈示面の回転に関する自由度を増加させる手法によって呈示可能なVR物体の曲率の限界を調査した．それに加えて，本装置に適した触診方法について検討するために，球を撫で回す方法と球の表面を反復するように軽く触れる方法による球識別精度を比較した．実験結果から，各被験者の弁別閾が小さいことから，本装置は触覚による物体の認識に有効であることを確認した．したがって，操作者は本装置によって微細な球の曲率を表現することを可能とした．なお，呈示するVR球の直径が比較的小さい場合または大きい場合における球識別に対して，球の表面を反復するように軽く触れる方法は，球を撫で回す方法よりも有効であることを確認した．

第4章では，疑似力触覚と分布圧覚呈示が硬さ知覚へ及ぼす影響について検証した．触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示する手法を提案した．まず，触知ピンの最大ストロークを変化させる．それに加えて，VR物体にVR呈示面が接触した

後に、ディスプレイ面への接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を変化させた。提案手法の有効性を検証するために、シェッフェの対比較法、浦の変法を用いてVR球の硬さに対する官能評価実験を行った。被験者は、試料のVR物体に対して硬さを評価した。被験者は、触覚呈示の感じ方によって2つのグループに分類された。しかし、接触力と高さ位置の関係を表す比例定数が小さくなるにつれて、VR球をより硬くなるとすべての被験者が評価した。そのため、提案手法によって硬さを表現可能であることを確認した。

今後の予定としては、本装置を用いたシステムの応用を行い、人間の支援を行うことから実用的なシステムへと発展させることを目指す。本装置の有する広い触覚呈示面を活用することで、VR表面上に配置された凹凸形状の相互関係を理解することが容易になると考えられる。したがって、VR表面をなぞって理解したり、表面上に配置された物体を操作する作業に適している。対象を触って操作する作業は、手の機能を回復するためのリハビリテーションに役立つことが期待できる。

なお、球の直径や直方体の高さ識別実験では、被験者にVR空間に関する視覚情報を与えないにも関わらず、被験者はVR空間の微細な変化を認識することができた。したがって、本装置による感覚情報の呈示によって、視覚情報に頼る傾向のある情報機器の操作において操作者の負担を軽減させることが可能であると考えられる。さらに、本装置は視覚情報を触覚情報で代行する感覚代行システムへの発展も期待できる。

また、本装置による力覚・触覚・疑似力触覚の呈示によれば、インターネットショッピングや学習ソフトウェアにおいても、力触覚情報による確認ができるので取引の促進や学習効果の向上が期待できる。

以上のように、本研究で提案した装置および制御方法によりVRを高度化する研究は応用範囲が広い。したがって、上で例示した研究以外にも種々の後続研究が期待される。

## 参考文献

- [1] J. J. Gibson, “The Ecological Approach to Visual Perception”, *Houghton Mifflin*, 1979.
- [2] “平成 23 年度情報通信白書”, 2011.
- [3] “平成 24 年度通信利用動向調査”, 2013.
- [4] “高齢社会白書平成 25 年度版”, 2013.
- [5] “日本の将来推計人口, 人口ピラミッドの推移”, 国立社会保障・人口問題研究所, 2012.
- [6] 木村 文彦, “高齢者による生産活動の支援”, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 11, 2007.
- [7] 横井 孝志, “加齢による身体機能の変化”, 日本機械学会誌, Vol. 108, pp. 379 – 382, 2005.
- [8] 綿貫 啓一, “バーチャルリアリティ技術による匠の技の伝承と人材育成”, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 1, 2006.
- [9] 舘 暲, 佐藤 誠, 廣瀬 通孝, “バーチャルリアリティ学”, 日本バーチャルリアリティ学会, 2011.
- [10] D. Jonassen and M. Driscoll, “Handbook of Research on Educational Communications and Technology”, *Routledge*, 2013.
- [11] T. Mazuryk and M. Gervautz, “Virtual Reality History, Applications, Technology and Future”, *Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, Austria*, 1996.

- [12] I. Sutherland, “A Head Mounted Three Dimensional Display”, *Proc. of Fall Joint Computer Conference*, pp. 757–764, 1968.
- [13] F. P. Brooks Jr., M. Ouh-Young, J. J. Batter, and P. J. Kilpatrick, “Project GROPE–Haptic Displays for Scientific Visualization”, *Proc. of the 17th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 177–185, 1990.
- [14] 鳴海 拓志, 谷川 智洋, 梶波 崇, 廣瀬 通孝, “メタクッキー：感覚間相互作用を用いた味覚ディスプレイの検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 579–588, 2010.
- [15] 矢入 聡, 岩谷 幸雄, 鈴木 陽一, “聴覚ディスプレイ”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 10, pp. 1427 – 1430, 2007.
- [16] 中本 高道, “嗅覚ディスプレイ”, フレグランスジャーナル社, 2008.
- [17] M. W. Krueger, T. Gionfriddo, and K. Hinrichsen, “VIDEOPLACE–An Artificial Reality”, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 35–40, 1985.
- [18] 中津 良平, “アーティスティックな要素を取り入れたバーチャルリアリティ技術–アートと工学の融合をめざして–”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 1, No. 1, pp. 1–9, 1996.
- [19] K. Höök, P. Sengers, and G. Andersson, “Sense and Sensibility: Evaluation and Interactive Art”, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 241–248, 2003.
- [20] D. W. F. van Krevelen and R. Poelman, “A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations”, *International Journal of virtual Reality*, Vol. 9, No. 2, pp. 1–20, 2010.

- [21] T. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama, “Mixed Reality: Future Dreams Seen at the Border between Real and Virtual Worlds”, *Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 64–70, 2001.
- [22] S. S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries, and W. Robinett, “Virtual Environment Display System”, *ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, pp. 1–11, 1986.
- [23] R. A. Bolt, “Put-that-there: Voice and Gesture at the Graphics Interface”, *Proc. of the 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 262–270, 1980.
- [24] K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami, and S. Tachi, “Haptic Telexistence”, *Proc. of SIGGRAPH '07ACM SIGGRAPH 2007emerging technique*, 2007.
- [25] M. A. Teitel, “The Eyephone: A Head-Mounted Stereo Display”, *Proc. SPIE 1256, Stereoscopic Displays and Applications*, 1990.
- [26] A. L. Harvill, C. Blanchard, W. Smithers, Y. Harvill, A. Coffman, “From DataGlove to Datasuit”, *Proc. of COMPCON Spring '88: the 33rd IEEE Computer Society International Conference*, pp. 536–538, 1988.
- [27] 町田 和雄, “宇宙におけるバーチャルリアリティ”, *計測と制御*, Vol. 43, No. 2, pp. 127–132, 2004.
- [28] M. A. Diftler, J. S. Mehling, M. E. Abdallah, N. A. Radford, L. B. Bridgewater, A. M. Sanders, R. S. Askew, D. M. Linn, J. D. Yamakoshi, F. A. Permenter, B. K. Hargrave, R. Platt, R. T. Savely, and R. O. Ambrose, “Robonaut 2—The First Humanoid Robot in Space”, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2178–2183, 2011.

- [29] U. T. Jankvist and B. Toldbod, “Mars Exploration Rover–Mathematics and People behind the Mission–”, *The Montana Mathematics Enthusiast (TMME)*, Vol. 4, No. 2, pp. 154–173, 2007.
- [30] 服部 麻木, 高津 光洋, 鈴木 直樹, “バーチャルリアリティ技術の医学応用”, 体力科学, Vol. 48, pp. 519–526, 1999.
- [31] 吉永 崇, 宮崎 航, 菅野 悠樹, 梶田 晃司, “医用超音波画像を用いた臓器の3次元情報可視化AR/VRインタフェースの開発と遠隔診断医療への応用”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 109–116, 2011.
- [32] 鈴木 直樹, 服部 麻木, 江積 剛, 熊野 宜弘, 池本 明夫, 足立 吉隆, 高津 光洋, “触覚を伴った手術作業が可能なバーチャル手術システムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 4, pp. 237–243, 1998.
- [33] 橋爪 誠, “ロボット手術”, 日外会誌, Vol. 106, No. 11, pp. 689–693, 2005.
- [34] 川崎 晴久, 木村 宏樹, 伊藤 聡, 西本 裕, 林 浩之, 栄枝 裕文, “手指リハビリテーション支援システムの研究”, 日本機械学会論文集, Vol. 72, No. 720, pp. 2568–2573, 2006.
- [35] 小俣 昌樹, 堀内 沙織, 今宮 淳美, 茅 暁陽, “生体情報によるアウェアネス検出のための五感刺激と生体情報との関係の分析”, 日本バーチャルリアリティ論文誌, Vol. 15, No. 14, pp. 553–562, 2010.
- [36] M. Uejo, H. H. Huang, Y. Seki, J. H. Lee, and K. Kawagoe, “Measuring User Performance in the Interaction with a Virtual Ballroom Dance Instructor”, *Proc. of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI 2012)*, 2012.
- [37] 矢野 博明, 中島 陽介, 田中 直樹, 斉藤 秀之, 岩田 洋夫, “歩行感覚提示装置を用いた臨床実験用歩行リハビリテーションシステムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 455–462, 2009.

- [38] 山海 嘉之, 川村 祐一郎, 岡村 純平, 李 秀雄, “筋電位を用いた歩行支援のための外骨格パワーアシストシステム HAL-1 に関する研究”, 日本機械学会講演論文集, No. 3, pp. 269–270, 2000.
- [39] M. T. Schultheis and A. A. Rizzo, “The Application of Virtual Reality Technology in Rehabilitation”, *Rehabilitation Psychology*, Vol. 46, No. 3, pp. 296–311, 2001.
- [40] 苗村 健, “バーチャルリアリティ技術の最新動向”, 電気学会誌, Vol. 124, No. 6, pp. 353–356, 2004.
- [41] 岡田 謙一, 西田 正吾, 葛岡 英明, “ヒューマンコンピュータインタラクション”, オーム社, 2002.
- [42] “次世代ヒューマンインタフェース開発最前線”, エヌ・ティー・エス, 2013.
- [43] 日本バーチャルリアリティ学会, VR 心理学研究委員会, “だまされる脳-バーチャルリアリティと知覚心理学入門-”, 講談社, 2006.
- [44] 酒井 一泰, 柳井 謙一, 西井 克昌, “シート内蔵車載心電センサの開発”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 94–12, pp. 11–14, 2012.
- [45] 長谷川 良平, “脳波による意思伝達装置の開発-実用的福祉機器としての BMI の歩み-”, 電気学会誌, Vol. 131, No. 4, pp. 235–238, 2011.
- [46] S. Nakagawara, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, and I. Kawabuchi, “An Encounter-Type Multi-Fingured Master Hand Using Circuitous Joints”, *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2667–2672, 2005.
- [47] 西田 佳史, 相澤 洋志, 堀 俊夫, 柿倉 正義, “超音波式 3 次元タグを用いた人の日常活動の頑健な計測-冗長なセンサ情報に基づくロバスト位置推定-”, 第 20 回日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 2002.

- [48] T. Ikai, M. Ohka, and H. Yussuf, “Behavior Control of Robot by Human Finger Direction”, *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 784–791, 2012.
- [49] 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎, “前庭感覚インタフェース技術の理論と応用”, *情報処理学会論文誌*, Vol. 48, No. 3, pp. 1326–1335, 2007.
- [50] 都甲 潔, “味覚センサの開発”, *表面科学*, Vol. 27, No. 1, pp. 34–38, 2006.
- [51] 岩田 洋夫, “体性感覚呈示技術”, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 31, No. 2, 2007.
- [52] 坂巻 克己, 塚本 一之, 竹内 伸, “指先誘導方式による触覚マウス”, *情報処理学会インタラクシオン 2001 予稿集*, 2001.
- [53] PHANToM: <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm>
- [54] S. Nagakawa, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, and I. Kawabuchi, “An Encounter-Type Multi-Fingured Master Hand Using Circuitous Joints”, *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2667–2672, 2005.
- [55] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, R. Kawamura, “Project FEELEX; Adding Haptic Surface to Graphics”, *Proc. of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2001)*, pp. 469–476, 2001.
- [56] 圓崎 祐貴, 矢野 博明, 岩田 洋夫, “直動アクチュエータと空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ “Volflex+” の開発”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 16, No. 3, pp. 327–334.
- [57] 山本 晃生, “触覚ディスプレイの研究動向”, *計測と制御*, Vol. 43, No. 2, pp. 122 – 126, 2004.
- [58] 下条 誠, 前野 隆司, 篠田 裕之, 佐野 明人, “触覚認識メカニズムと応用技術—触覚センサ・触覚ディスプレイ—”, *サイエンス&テクノロジー*, 2010.



- [59] 仲谷 正史, 笥 康明, 白土 寛和, “触感をつくる—<<テクタイル>>という考え方—”, 岩波書店, 2011.
- [60] 大岡 昌博, “触覚ディスプレイ装置におけるアクチュエータ技術”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 758–761, 2003.
- [61] J. C. Bliss, M. H. Katcher, C. H. Rogers, and R. P. Shepard, “Optical-to-Tactile Image Conversion for the Blind”, *IEEE Transaction on Man-Machine Systems*, Vol. 11, 1970.
- [62] 渡辺 哲也, 久米 祐一郎, 伊福部 達, “触覚マウスによる図形情報の識別”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 54, No. 6, pp. 840–847, 2000.
- [63] 大岡 昌博, 毛利 行宏, 杉浦 徳宏, 三矢 保永, 古賀 浩嗣, “分布圧覚ディスプレイ装置による仮想形状呈示”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 674, pp. 2970–2976, 2002.
- [64] 水上 陽介, 内田 啓治, 澤田 秀之, “糸状形状記憶合金の振動を利用した高次知覚生起による触覚呈示”, 情報学会論文誌, Vol. 48, No. 12, pp. 3739–3749, 2007.
- [65] 金藤 敬一, “高分子科学最近の進歩”, 高分子, Vol. 55, No. 12, pp. 956–960, 2006.
- [66] 鄭 祐尚, 都井 裕, “誘電性エラストマーアクチュエータの超粘弾性挙動の有限要素解析”, 生産研究, Vol. 62, No. 3, pp. 271–274, 2010.
- [67] 衛藤 春菜, 的場 やすし, 佐藤 俊樹, 福地 健太郎, 小池 英樹, 梶本 裕之, “指先への電気刺激により触覚呈示を行うタッチディスプレイ技術”, 情報処理学会インタラクシオン 2012, pp. 105–112, 2012.
- [68] 星 貴之, “非接触インストラクションのための小型超音波収束装置”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 600–601, 2012.

- [69] 鈴森 康一, “静電アクチュエータ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 342–346, 1997.
- [70] 秦 誠一, 加藤 友和, 福重 孝志, 下河辺 明, “集積化円すいばねマイクロアクチュエータ”, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 3, pp. 438–442., 2003.
- [71] iFeel MouseMan: <http://www.logitech.com>
- [72] 嵯峨 智, 出口 光一郎, “ダイラタント流体を利用した触覚ディスプレイの検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2009.
- [73] 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 徳井 隆博, 末竹 哲也, 井村 誠孝, 黒田 嘉宏, 大城 理, “Haptic Canvas: ダイラタント流体を用いた力触覚の生成と調合”, 芸術科学会論文誌, Vol. 10, . 4, pp. 204–214, 2011.
- [74] 池田 義明, 藤田 欣也, “指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 2, pp. 187–194, 2004.
- [75] K. Kushiya, S. Sasada, M. Inose, R. Yokomatsu, K. Fujita, T. Kitazawa, and M. Tamura, “Thermoesthesia”, *Proc. of ACM SIGGRAPH 2006*, pp. 71, 2006.
- [76] 井野 秀一, 泉 隆, 高橋 誠, 伊福部 達, “物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質触覚ディスプレイ方式の提案”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 345–351, 1994.
- [77] 大岡 昌博, 加藤 圭太郎, 藤原 健洋, 三矢 保永, “圧覚と力覚の複合ディスプレイ装置の試作”, 電気学会論文誌, Vol.126, No.4, pp. 150–157, 2006.
- [78] 山口 創, “皮膚感覚の不思議”, 講談社, 2006.
- [79] M.A. Srinivasan and R.H. LaMotte, “Tactual Discrimination of Softness: Abilities and Mechanisms”, *Somesthesia and the Neurobiology of the Somatosensory Cortex*, pp. 123–135, 1996.

- [80] J. C. Stevens and K. K. Choo, “Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span”, *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 13, pp. 153–166, 1996.
- [81] J. Gibson, “Observations on active touch”, *Psychological Review*, Vol. 69, pp. 447–491, 1962.
- [82] S. Lederman, “The Perception of Surface Roughness by Active and Passive Touch”, *Bulletin of the Psychonomic Society*, Vol. 18, pp. 253–255, 1981. .
- [83] 岩村 吉晃, “能動的触知（アクティヴタッチ）の生理学”, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 31, No. 4, 2007.
- [84] C. E. Chapman, “Active Versus Passive Touch: Factors Influencing the Transmission of Somatosensory Cortex”, *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, Vol. 72, No. 5, pp. 558–570, 1994.
- [85] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, “The Hand as a Perceptual System”, *In K. J. Connolly (Ed.) The Psychobiology of the Hand*, Cambridge University Press, pp. 16–35, 1998.
- [86] S. J. Lederman and L. A. Jones, “Tactile and Haptic Illusions”, *IEEE Transaction on Haptics*, Vol. 4, pp. 273–294, 2011.
- [87] H. Mochiyama, A. Sano, N. Takesue, R. Kikuuwe, K. Fujita, S. Fukuda, K. Marui, and H. Fujimoto, “Haptic Illusions Induced by Moving Line Stimuli”, *Proc. of the First Joint of 2005 Eurohaptics Conference and 2005 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2005.
- [88] 本間 元康, “ラバーハンドイリュージョン：その現象と広がり”, *認知科学*, Vol. 17, No. 4, pp. 761–770, 2010.

- [89] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet, “Pseudo-haptic Feedback: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback”, *Proc. of Virtual Reality Conference*, pp. 83–90, 2000.
- [90] Q. Wang and V. Hayward, “Compact, Portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Transducer Device Based on Lateral Skin Deformation”, *2006 Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems*, pp. 66–72, 2006.
- [91] N. Rajaei, M. Ohka, T. Miyaoka, H. Yussof, A. K. Makhtar, and S. N. Basir, “Investigation of VHI Affected by the Density of Mechanoreceptive Units for Virtual Sensation”, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 6, No. 4, 2013.
- [92] D. Perez-Marcos, M. Slater, and M. V. Sanchez-Vives, “Inducing a Virtual Hand Ownership Illusion through a Brain-Computer Interface”, *NeuroReport*, Vol. 20, No. 6, pp. 589–594, 2009.
- [93] S. Tachi, “Real-time Remote Robotics – Toward Networked Telexistence”, *IEEE Transaction on Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 6, pp. 6–9, 1998.
- [94] R. Tadakuma, Y. Asahara, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, “Development of anthropomorphic multi-D.O.F master-slave arm for mutual telexistence”, *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11, No. 6, pp. 626–636, 2005.
- [95] D. Jack, R. Boian, A. S. Merians, M. Tremaine, G. C. Burdea, S. V. Adamovich, M. Recce, and H. Poizner, “Virtual Reality-Enhanced Stroke Rehabilitation”, *IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 308–318, 2001.

- [96] A. Bardorfer, M. Munih, A. Zupan, and A. Primožič, “Upper Limb Motion Analysis Using Haptic Interface”, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 253–260, 2001.
- [97] M. Ohka, Y. Kawabe, C. Abdullah, R. Nader, H. B. Yussof, and T. Miyaoka, “Investigation Velvet Hand Illusion Using Psychophysics and FEM Analysis”, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 488–503, 2010.
- [98] M. Ohka, N. Hoshikawa, J. Wada, and H. B. Yussof, “Two Methodologies Toward Artificial Tactile Affordance System in Robotics”, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 466–478, 2010.
- [99] Y. Tsumali, T. Ohgi, and A. Niiyama, “A Spherical Haptic Interface with Unlimited Workspace”, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 376–388.
- [100] M. Shimojo, M. Shinohara, and Y. Fukui, “Human Shape Recognition Performance for 3-D Tactile Display”, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Systems and Humans*, Vol. 29, No. 6, pp. 632–644, 1999.
- [101] S. D. Laycock and A. M. Day, “Recent Developments and Applications of Haptic Devices”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 22, No. 2, pp. 117–132, 2003.
- [102] A. Frisoli, M. Solazzi, F. Salsedo, and M. Bergamasco, “A Fingertip Haptic Display for Improving Curvature Discrimination”, *Presence, Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 17, No. 6, pp. 550–561, 2008.
- [103] M. Ohka, H. Koga, Y. Mori, T. Sugiura, T. Miyaoka, and Y. Mitsuya, “Figure and Texture Presentation Capabilities of a Tactile Mouse Equipped with a Display Pad of Stimulus Pins”, *Robotica*, Vol. 25, No. 4, pp. 451–460, 2007.

- [104] M. Ohka, K. Kato, T. Fujiwara, Y. Mitsuya, and T. Miyaoka, “Presentation Capability of Compound Displays for Pressure and Force”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 2, No. 1, pp. 24–36, 2008.
- [105] Arc Touch mouse: <http://www.microsoft.com/hardware/ja-jp/p/arc-touch-mouse>
- [106] Braille Cells: <http://www.kgs-jpn.co.jp>
- [107] T. Kaneko and T. Muraki, “Development and Standardization of the Hand Function Test”, *Bulletin of Allied Medical Sciences Kobe*, Vol. 6, pp. 49–54, 1990.
- [108] K. Kawahira, “Devising Innovative Rehabilitation to improve Hemiplegia: The Theory and Techniques Used to Strengthen Neuronal Circuits of the Injured Motor Tracts”, *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, Vol. 47, No. 5, pp. 315–319, 2010.
- [109] M. Akamatsu and S. Sato, “A Multi-Modal Mouse with Tactile and Force Feedback”, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 40, pp. 443–453, 1994.
- [110] G. Yang, K. Kyung, Y. Jeong, and D. Kwon, “Novel Haptic Mouse System for Holistic Haptic Display and Potential of Vibrotactile Stimulation”, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*, pp. 1980–1985, 2005.
- [111] H. Kawasaki, Y. Doi, S. Koide, T. Endo, and T. Mouri, “Hand Haptic Interface Incorporating 1D Finger Pad and 3D Fingertip Force Display Devices”, *Proc. of 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1869–1874, 2010.
- [112] 大道 武生, 樋口 優, 大西 献, “極限作業ロボットマニピュレータの設計法に関する研究（その2）—低拘束多本指マニピュレータの設計法—”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 16, No. 7, pp. 942–950, 1998.

- [113] Y. Shiokawa, A. Tazo, M. Konyo, and T. Maeno, “Hybrid Display of Roughness, Softness and Friction Senses of Haptics”, *Proc. of the 18th International Conference of Artificial Reality and Teleexistence (ICAT)*, pp. 72–79, 2008.
- [114] M. McLaughlin, G. Sukhatme, W. Peng, W. Zhu, and J. Parks, “Performance and Co-presence in Heterogeneous Haptic Collaboration”, *Proc. of the 11th Symposium Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, pp. 285–291, 2003.
- [115] H. Yao, V. Hayward, and R. E. Ellis, “A Tactile Enhancement Instrument for Minimally Invasive Surgery”, *Computer Aided Surgery*, Vol. 10, pp. 233–239, 2005.
- [116] H. Dostmohamed and V. Hayward, “Trajectory of Contact Region on the Fingertip Gives the Illusion of Haptic Shape”, *Experimental Brain Research*, Vol. 164, pp. 387–394, 2005.
- [117] G.A. Gescheider, “Psychophysics: the Fundamentals”, *Lawrence Erlbaum Associates*, 1997.
- [118] M. Shinohara, Y. Shimizu, and A. Mochizuki, “Three-Dimensional Tactile Display for the Blind”, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 6, pp. 249–256, 1998.
- [119] S. Wall and S. Brewster, “Sensory Substitution Using Tactile Pin Arrays: Human Factors, Technology, and Applications”, *Signal Processing*, Vol. 86, pp. 3674–3695, 2006.
- [120] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky, and J. T. Dennerlein, “Reality-based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 245–252, 2001.

- [121] K. Fujita and H. Ohmori, “A New Softness Display Interface by Dynamic Fingertip Contact Area Control”, *Proc. of 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, pp. 78–82, 2001.
- [122] A. Bicchi, E. P. Scilingo, and D. De Rossi, “Haptic Discrimination of Softness in Teleoperation : The Role of the Contact Area Spread Rate”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 5, pp. 496–504, 2000.
- [123] S. Saga and K. Deguchi, “Dilatant Fluid Based Tactile Display—Basic Concept—”, *IEEE Haptics Symposium 2010*, pp. 309–312, 2010.
- [124] W.C. Wu, C. Rasdogam, and M.A. Srinivasan, “Visual, Haptic, and Bimodal Perception of Size and Stiffness in Virtual Environments”, *Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, pp. 19–26, 1999.
- [125] S. Ura, “An Analysis of a Paired Comparison Experiment, Quality Control”, *Journal of JUSE*, Vol. 16, pp. 78–80, 1959.
- [126] Y. F. Bai, D. M. Xu, L. H. Mao, J. J. Guo, and H. Z. Fu, “FEM/FDM-Joint Simulation for Transport Phenomena in Directionally Solidifying Shaped TiAl Casting under Electromagnetic Field”, *The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ) International*, Vol. 44, No. 7, pp. 1173–1179, 2004.
- [127] L. Cooper and S. Maddock, “Preventing Collapse within Mass-spring-damper Models of Deformable Objects”, *Proc. on 5th International Conference of Central Europe on Computer Graphics and Visualization (WSCG’ 97)*, pp. 70 — 78, 1997.



## 謝辞

本論文は，名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻複雑系計算論講座において，同複雑系科学専攻教授 大岡昌博先生の御指導のもとに行った研究をまとめたものです。

本研究を行うにあたり，長期にわたり御指導とご鞭撻を賜りました大岡昌博先生に対し，謹んで感謝の意を表します。副査を担当していただいた名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻複雑系計算論講座教授 渡邊崇先生および同准教授 鈴木泰博先生には心より厚く御礼申し上げます。また，本研究にご支援いただいた公益財団法人堀科学芸術振興財団に対し，御礼申し上げます。

最後に，本研究を進めるにあたりご協力いただいた大岡研究室の諸氏，常に支えてくれた家族に心から感謝いたします。