

Title	情報キオスクのための，力覚を用いた情報提示手法の提案と実装
Author(s)	柿田， 充弘
Citation	
Issue Date	2004-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/496
Rights	
Description	Supervisor: 杉山 公造，知識科学研究科，修士

修 士 論 文

情報キオスクのための， 力覚を用いた情報提示手法の提案と実装

指導教官 杉山公造 教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識システム基礎学専攻

250018 柿田 充弘

審査委員： 杉山 公造 教授（主査）

Ho Tu Bao 教授

宮田 一乗 教授

下嶋 篤 助教授

2004 年 2 月

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 美術館・博物館とIT	2
1.3 目的	5
1.4 構成	5
第 2 章 情報キオスクと力覚情報	7
2.1 情報キオスクとは	7
2.2 情報キオスクとマルチモーダルインタフェース	10
2.3 触覚・力覚提示装置について	12
2.3.1 触覚と力覚	12
2.3.2 PHANToM (ファントム)	13
2.3.3 SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality)	14
2.3.4 CyberGrasp	15
2.3.5 FEELEX	16
2.3.6 Actuated Workbench	17
2.3.7 Tactile Driver	18
2.3.8 Proactive Desk	19
2.4 力覚提示装置と情報キオスク	21
第 3 章 力覚を付加した情報キオスクの提案	23
3.1 デザインコンセプト	23
3.2 適用場面	25
3.2.1 館内の案内用	26
3.2.2 展示物の解説用	26
3.3 要求される機能	27
3.4 設計ポリシー	28
3.5 実装例	29

3.5.1	概念の触知化	30
3.5.2	物理現象の体感学習	33
3.5.3	仮想拘束力による作業（操作）支援	35
3.5.4	情報のパーソナル化	36
3.6	考察	36
第 4 章	Proactive Deskの力覚特性	38
4.1	Proactive Deskの仕様	39
4.2	Proactive Deskの力覚特性	43
4.3	Proactive Deskの応答特性	49
4.3.1	入力(A)：PSDによるLEDの位置追跡	50
4.3.2	処理(B)：力のレンダリング	51
4.3.3	出力(C)：LIMによる力覚の提示	52
4.4	応答特性に関する計測結果の評価	55
4.5	考察	56
第 5 章	結論	57
5.1	本研究の成果	58
5.2	今後の展望	59
謝辞		61
参考文献		62
発表論文		64

図 目 次

図 1.1	国立民族学博物館の情報キオスク画面	3
図 1.2	今後、美術館・博物館に求めるものについて	4
図 2.1	公共施設における情報キオスクのイメージ図	8
図 2.2	PHANToM	14
図 2.3	SPIDAR-8	15
図 2.4	CyberGrasp.....	16
図 2.5	FEELEX	17
図 2.6	Actuated Workbench	18
図 2.7	Tactile Driver.....	19
図 2.8	Proactive Deskの全体図.....	20
図 2.9	Proactive Deskの力覚提示面と画像投影面.....	21
図 3.1	視覚による情報提示	24
図 3.2	触覚による情報提示	25
図 3.3	第三者を誘導するコンテンツ	25
図 3.4	展示解説用情報キオスクを設置した際のイメージ図.....	27
図 3.5	本提案のマップ	30
図 3.6	星座線を触覚情報として体験できるアプリケーション	32
図 3.7	星座線とマウスの当たり判定モデル図.....	32
図 3.8	気圧の変化と雲の動きを分割したアプリケーション	34
図 3.9	メッシュ内の風の向きの決定方法	34
図 4.1	Proactive Deskのシステム構成図.....	39
図 4.2	リニア誘導モータの動作原理	40
図 4.3	2DOFリニア誘導モータ	40
図 4.4	ペンデバイス型，マウス型Forcer	41

図 4.5	Proactive Deskの光学装置.....	432
図 4.6	実験の概略図.....	44
図 4.7	並進力とアルミ板(100 × 100mm).....	46
図 4.8	並進力とアルミ板(100 × 200mm).....	46
図 4.9	並進力と銅板(100 × 100mm).....	47
図 4.10	並進力と銅板(100 × 200mm)	47
図 4.11	二次導体の厚みと並進力の最大値の変化.....	48
図 4.12	二次導体の厚みと単位質量あたりの並進力の変化	48
図 4.13	入力部の計測に関する実験の様子.....	50
図 4.14	PSD による光点追跡の過渡応答時間.....	51
図 4.15	出力部の計測の様子	52
図 4.16	素材の違いに対する過渡応答時間.....	53
図 4.17	二次導体の厚みに対する過渡応答時間.....	54
図 4.18	駆動周波数に対する過渡応答時間.....	55

表 目 次

表 2.1	触覚・力覚提示装置の比較表.....	22
表 4.1	計測に用いた二次導体の種類.....	43

第 1 章

序 論

1.1 背景

情報化社会の進展に伴い，個人における情報処理機器の活用がなお一層浸透し，国民一人一人の日常生活において情報処理機器は必要不可欠な手段となりつつある．日本政府では，e-Japan 重点計画-2003 の中で，情報処理機器の操作に慣れない人間が取り残され，情報化社会の恩恵を受けることができないデジタル・デバイドの是正を唱えており，その中でも年齢・身体的な条件の克服として，年齢，身体的な条件により情報通信技術の利用機会及び活用能力の格差が生じないように，地方公共団体等における施設のバリアフリー化によって誰もが公共施設を利用できること，障害者や高齢者，子ども等に配慮した情報提供等の仕組みや情報通信関連機器・システム等の開発を推進している．つまり，現在の情報システムの状況下において，身体的機能損失，認知能力の低下，知識，スキル等，利用者の人間特性に関係なく，誰もが容易に利用できるようにすること（アクセシビリティ）は，極めて重要となっている．[1]

通商産業省（当時．現在の経済産業省）では，2000 年に障害者・高齢者等情報処理機器アクセシビリティ指針を定めている．文中では，ディスプレイやプリンタの代替として，以下の項目をあげている．

- A) 画面の任意の位置に表示される文書情報及び電子メール等の文字情報を読み上げることができるようにする音声読み上げ機能，
- B) 画面に表示される文字情報を出力する点字プリンタを提供する点字プリンタ
- C) 画面に表示される文字情報を点字で表示する点字ディスプレイ

D) 画像情報をそのまま凹凸形態に変換して提示する触覚ディスプレイ

これらの4項目を提供する事で、情報処理機器のアクセシビリティ向上の一つとしている。

情報処理機器のアクセシビリティ向上に関して、ユーザがあるタスクにおける操作が難しく、情報処理機器からの何かしらの支援が必要な時、従来の視聴覚情報のみでは、押すべきボタンの方向へ矢印による指示がでる、もしくはボタンの周囲の色がチカチカとフラッシュ表示するなどの視覚的な惹きつけを提示するか、音声で「○○のボタンを押して下さい」などのナビゲートを行う。この状況を力覚情報で支援する場合、利用者の腕や指をボタンの上に運んで、利用者の動きを直接ボタンの上に持っていく操作支援方法などが期待できる。

特に、このような操作支援は、公共機関の情報キオスクにこそ求められているのが現状である。役所、美術館、博物館などの公共機関は不特定多数の利用者が来る反面、その誰もが情報処理機器に精通しているわけではなく、子供から高齢者まで幅広い年齢層の利用が予想される。また、公共施設における利用者は、その施設に来る事自体が初めてのケースが多く、情報キオスクの操作に関しても同様に初めて操作するものばかりになる。そのため、誰もが簡単に利用でき、欲しい情報を受け取ることのできる情報キオスクの実現が必要である。

1.2 美術館・博物館とIT

前節で述べたような、利用者の層が幅広く、その場所における情報キオスクを利用するのが初めての状況が多い所に設置されている情報キオスクを調査するために、筆者は、2003年の夏頃からいくつかの博物館・美術館へ行ってきた。調査内容は、実際の情報キオスク端末の設置方法、情報提示内容に関してであった。その中の代表的なものとして、大阪府吹田市にある国立民族学博物館は、ビデオ端末が10数台、携帯型の情報端末機器を貸し出す、展示スペースに設置された情報キオスク端末の設置など、日本においてIT化の進んでいる博物館である。図1.1は実際の民族学博物館におけるビデオ端末の画面である。利用者はトラックボールを用いて、端末を操作するのだが、画面の説明を見ながら、機器の操作を行わなければならない。また、一つの画

面に複数の情報が提示されている。

次に，東京都台東区にある東京国立博物館は，立地条件の良さもあり多くの来場者がいるが，館内の IT 化に関しては，全く進んでいないのが現状である．展示物横の解説文に関しては，小さい文字で書かれた解説板のみであり，来場者は解説板の前に立ち，それを注視して読む形態となっている．

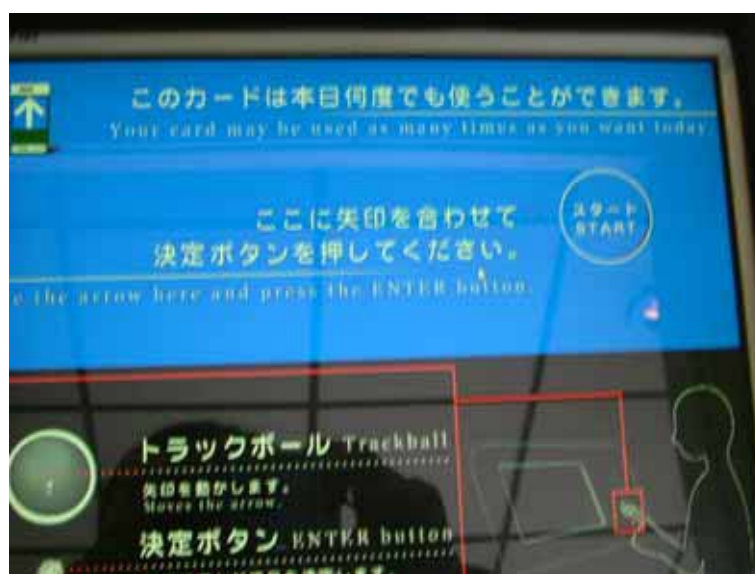


図 1.1 国立民族学博物館の情報キオスク画面（著者撮影）

現在，日本人の美術館・博物館離れが指摘されており，寺島は[2]の中で（調査サンプル 300 人（10 代以下・20 代・30 代・40 代・50 代・60 代以上の各年齢層のユーザ 50 サンプルずつ）），過去 1 年以内に「（美術館・博物館を）まったく利用しなかった」というユーザは 34%との報告がある．この調査によると，20 代の層のユーザのほぼ半数が「まったく利用しなかった」と回答しており，若い世代での美術館・博物館離れが浮き彫りとなっている．

また，この調査では，美術館・博物館を利用しなかったユーザの理由も合わせて調査をしており，「近くに施設がないから」が 65%と最も多く，次いで「展示物・イベント等に魅力を感じないから」が 43%，「展示物・イベント等に関する情報が入ってこないから」が 34%といった結果となっている．第 1 の理由に関しては，地理的な条

件が考慮されつつも、第 2, 3 の理由は日本における美術館・博物館のコンテンツの脆弱さを露呈していると考えても良い。

寺島は、文献[2]の中で、今後「美術館・博物館に求めるもの」としての調査も行っており、「各美術館・博物館の独自の視点での展示物・イベントの実施」が 45%と最も多く、次いで「CG・シミュレータ機能等、IT 技術を取り入れた展示の工夫」が 43%、「手で触れられる・実演等の展示の工夫」が 42%、「市民のニーズに基づく展示物・イベント等の実施」が 41%といった結果となっており、美術館・博物館における IT 技術の活用は比較的ニーズが大きいと読み取れる。加えて、「展示物・イベント等に関する情報発信の拡充」も上記に次いで多く挙げられていたとの報告がある。これらの調査結果をまとめたものが、図 1.2になる。さらに、バーチャルリアリティ展示・シミュレータ機能を付加した展示等、IT を活用した展示手法に関する問いについても、概ね肯定的な反応が見られた。特に 10 代、20 代の若年層においては、他の年齢層と比べ、高い利用意向がみられた、との報告が示されている。

寺島のアンケートからみても、美術館・博物館に IT 機器を導入し、従来にはない情報提示をすることは、美術館・博物館の利用者増大には何らかのかたちで貢献できるのではないかと推察される。

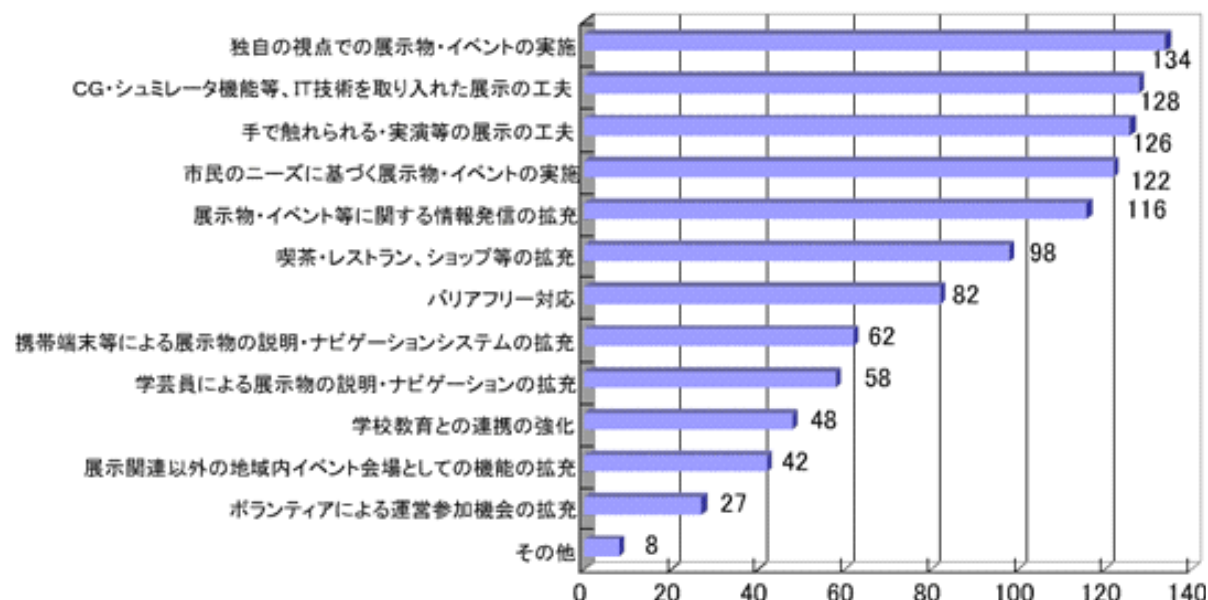


図 1.2 今後、美術館・博物館に求めるものについて[2]より引用)

1.3 目的

現在，情報キオスクをはじめとする情報処理機器で利用されている入出力インタフェースに着目すると，電子情報に対する操作の認知に視覚情報を主に利用するものが多い．こうした電子情報は，目で見える場合には，ディスプレイが平面であるならば，平面としてしか見ることはできない．表示されている画像を 3D で表示させることもできるが，実際に触ったりしてその凹凸感を感じることはできない．寺島の調査でわかるように，見るだけでなく，物体に触ることで疑似体験ができることを利用者は博物館・美術館の情報キオスクが注目を浴びている．本研究では，画面上にある凸凹感をユーザに提示するため，触覚情報に着目した．また，現在は触覚だけでなくユーザの腕や指を直接操作するような力覚情報も提示できる装置が研究されており，この力覚提示も視野に入れていく．

ここで触覚の定義を記しておく．触覚は皮膚感覚と深部感覚の 2 種類に分類できる．皮膚感覚のみの刺激を与える触覚デバイスをタクタイルディスプレイと呼ぶ．深部感覚に刺激を与える触覚デバイスをフォースディスプレイと呼ぶ．後者のフォースディスプレイのことを一般に力覚ディスプレイと呼んでいる．バーチャルリアリティ（VR）の分野では 1970 年頃から，人間の指先や皮膚表面に情報提示を可能とした触覚ディスプレイの研究が盛んに行われていた．また，90 年代より PHANTOM を始め，人間の指や腕など操作者の動きを直接操作できる深部感覚に着目した，力覚ディスプレイの研究がいくつか進められている．

本研究では，力覚情報を付加した情報提示の状況を公共機関における情報キオスク端末について対象とし，情報キオスクの設置場所についても，美術館や博物館などのようなエンターテインメント性，学習効果など様々な情報を利用者に提供する場面を想定する．同時に，美術館・博物館の展示物のサポートの役割を担う情報キオスクに焦点もあて提案と実装を行う．

1.4 構成

本論文は，序章としての本章を含め，5 つの章によって構成される．

第 2 章では，力覚提示装置の動向として，関連研究を紹介し，その中で本研究の実

装に用いる Proactive Desk の位置づけを明確にする．

第 3 章では，情報キオスクに触力覚情報を付加した際に，どのような情報提示ができるかについていくつかの提案を行う．

第 4 章では，Proactive Desk の力覚特性について計測を行い，その特性を元に 3 章の提案を実装したことに関して著述する．

最後に，第 5 章で本研究において示した研究成果をまとめるとともに，今後の研究の課題，将来の展望について述べる．

第 2 章

情報キオスクと力覚情報

2.1 情報キオスクとは

元々キオスク（KIOSK）は、公園の売店のような簡易建築物のことを言うが、情報キオスクとは公共施設や街頭などに置かれる情報端末を指す。情報キオスクのイメージを図 2.1 に示す。最近、コンビニエンスストアでのチケット予約や航空会社の自動チェックインサービスなどに利用が拡大している。一方、電子政府・電子自治体では、役所に出向かなくても自宅や勤務先のパソコンから行政情報を入手し、行政サービスを受けることが可能になるといわれているが、パソコンを持っていない住民は、こうしたメリットを享受できないなどの問題がある。そこで現在、注目されているのが情報キオスクである。行政部門でも、公民館、美術館、博物館などの公共施設に情報キオスクを設置し、行政情報や行政サービス、展示物の解説や映像の提供を開始する地方自治体や公共施設が増えている。



図 2.1 公共施設における情報キオスクのイメージ図
(<http://www.jice.or.jp/itschiiki-j/top/areas/17-e.html> より転写)

現在の情報キオスクはタッチパネルを用いる形式や、従来のデスクトップ PC 環境の延長であるマウスやトラックボールを用いる形式がそのほとんどである。これらの入力インタフェースは従来のコンピュータ環境である GUI (グラフィカル・ユーザ・インタフェース) を想定しているため、画面上に表示されているマウスポインタの操作方法の違いでしかない。これらのインタフェースは、問題点も多く、ユーザにとって必ずしも使いやすいとは言えないと考えられる。

沼田は文献[3]で、マウスと机上にプロジェクタを投影した環境においてユーザが指で机上の投影面を選択する二つの入力方法で、ランダムに表示される任意の 9 つのボタンを押す総入力時間を測定して入力速度の比較を行った。結果、指を用いた方式の方が、指による入力方式がマウスよりも優れているとの報告がある。マウスの場合カーソルをボタンの上まで持って行き、カーソルがボタンの上に来たことを確認した上でスイッチを押す必要がある。これは操作が 2 段階に分かれてしまっていることを示している。カーソルを目で追うことにしても、画面の解像度が上がればそれだけカーソルは見失いやすくなる。画面上のどこにカーソルがあるかを調べるために、マウスを適当に揺すってみたりする行為はよくあることであるが、何か別の作業を平行して行っているときにはこれが顕著に現れる、との報告がある。

それに対し指そのものを入力デバイスとして用いる場合には、画面上の目標に対して直接入力すれば良いので、作業の始動の段階でもたつことがないとの報告がある。

以上のことをまとめると、視覚座標と指の入力座標が一致しているタッチパネルの方が直感的な操作と言った点では優れていると考えられる。マウスは、カーソル常に目で追う間接指定であるためユーザの認知的負荷があることが考えられる。画面に対して直接入力を行うタッチパネルは画面上全体のワークスペースの自由度が高く、操作に必要となるスペースも最低限で良いなどの利点がある。マウスやトラックボールなどの道具を必要としないことから、事前の機器に対する訓練の必要性が低くなり、その場ですぐに使え、使えなくてもほんの少しの慣れを要するだけで操作ができると考えられる。

タッチパネルの欠点は、指が画面に触れた瞬間に入力を受けつけてしまう land-on 方式がほとんどである。Shneiderman らは指を画面から離す点を入力位置とする take-off 方式の方が、ポインティング時間が短く、誤りも少ないことを指摘している[4]。この方式ならば、間違ったボタンを押してしまったことに画面に指を当ててから気付いたとしても、指をボタンから何も表示のない場所に画面に指を触れさせたまま移動させ、その後離せば間違い自体は回避できる。だが、ボタンが密集してしまっている画面だと、空白に指を持っていくまでに指が浮いてしまう可能性もあり、またこの操作自体が直感的であるとは言いがたい。これが機械式のボタンであるならば、指がボタンに触れた瞬間に入力が成立することはなく、必ずボタンを押し込むまでの押ししろが存在する。これによって、タッチパネルに比べ入力が猶予があることになる。

機械式のボタンは確かに入力の認知として有用であるが、画面などに表示されたボタンに比べその位置を移動させることが非常に困難である。ディスプレイの周りにボタンを配置し、画面にボタンのラベルの代わりに機能内容を表示することでボタンの機能を動的に変更することはできるが、位置自体を変更できたわけではない。ディスプレイ上にボタンを表示させる場合には、画面上の任意の位置にボタンを表示させることができ、ボタンの上にも機能内容に合わせたラベルを任意に表示することができる。このように、ディスプレイ上に触覚情報を呈示できれば、画像情報に触覚情報を付加し、使用者が操作する時にその情報に合わせてなんらかの方法でフィードバックすることで操作の認知の助けや、視覚情報に触覚情報を合わせたマルチモーダルなシステムの構築を可能にする。これはより直感的な操作感で認知的負荷を最小限にとど

めることができる考える。

2.2 情報キオスクと

マルチモーダルインタフェース

様々な公共機関で情報キオスクの設置が置かれ、利用者は従来の紙媒体では享受できなかった情報を受けることが可能になった。しかし、情報キオスクの操作に慣れない人間が取り残され、情報化社会の恩恵を受けられない「デジタル・デバイド」の恐れが指摘されている。現在、家電機器のインタフェースはスイッチやリモコンを用いた選択方式、情報処理機器のインタフェースはキーボード/マウスによる GUI (Graphical User Interface) が主流である。しかし将来は、様々な場所で情報処理機器が導入される可能性もあるため、誰もが簡単に利用できる新しいユーザインタフェースの開発が望まれている。この問題は、近い将来の問題ではなく現実にも起こっている。特に、コンピュータに不慣れな人間が公共の情報キオスクを利用するためには、現在 PC 環境で使用されている入出力操作方法であるキーボード、マウスやモニターによる画面出力に慣れる必要がある。そのため、従来の入出力方式に代わる新しい入力デバイスや情報提示方法が求められている。そこで現在、情報キオスクなどの情報機器への入力に関して、身振りや音声などの人間が持つ自然な動作による直観的に操作方法を理解することのできる入力システムであるマルチモーダルインタフェースが注目されている。

マルチモーダルインタフェースという用語はもともと心理学用語であるモダリティに由来する。モダリティとは、人間が情報伝達を行う際の様態、より分かり易く言えば伝達手段を指し、コミュニケーションチャネルとほぼ同義である[5]。我々人間同士がコミュニケーションを行う際には音声による言語だけでなく、表情、身振り・手振り、視線など様々なモダリティ(チャネル)を同時並行的に用いて円滑な対話を実現している。マルチモーダルインタフェースの背景は、この人間同士のコミュニケーション手段をマンマシンインタフェースに応用しようという発想である。人類がその歴史とともに長く使っている情報伝達手段をマンマシンインタフェースに応用することにより、訓練が要らない、誰にでも使い易い次世代のユーザインタフェースとな

り得ることが期待されるため、多くの研究機関で開発が行われている。このようにマルチモーダルインタフェースは複数のモダリティを利用したインタフェースであるが、厳密な定義（どのモダリティを組み合わせるか）はない。一般的には音声言語を中心とし、更に身振り・手振り（ジェスチャ）を併用するものが多い。またユーザインタフェースであるからにはマシンとのインタラクション（相互作用）を行うものであり、伝達方向は：

- A) ユーザからマシン（入力系）
- B) マシンからユーザ（出力系）

の2系統が存在する。通常、マルチモーダルインタフェースという場合は、入力系を前提とすることが多いが、出力系に関してもマルチモーダルな機能を応用することができる。その場合は、インタフェース部分に人間に似せた擬人化されたキャラクタを置き、ユーザにこの擬人化キャラクタと対話をさせながら所定のタスクを達成させる形態のものが多い。これによりインタフェースに対する親近感や対話の現実感が高まることが期待される。

これらの背景から現在、マルチモーダルインタフェースの研究が盛んに行われている。例えば、吉岡らは住所入力というタスクをマウスやキーボードと音声認識とを組み合わせることにより入力に要する時間が少なくなるという結果を得ている[6]。ネットワーク上の情報はますます多種多様化しており、それらは多くの人間が利用すべき共有財産である。手軽に情報を入手したり発信したりできるシステムは老人や身体的な理由で外出が難しい人間にこそ積極的に利用されるべきサービスであり、その環境を整えることは情報社会において社会的弱者を作り出さないためにも重要である。さらに進んだ研究として、記号や音声といった情報と表情や身振りなどの情報から機械が自動的に意図を抽出し、それによってコンピュータと人間間のコミュニケーションをもっと自然なものにしようとする流れがある。

谷内田は部屋の機能を統合化し、人間がこれをジェスチャや音声などのマルチモーダルな入力で自然に操作できる新しい操作系の概念を打ち出している[7]。

速水は被験者に質問をしたり、大きさや方向を示すジェスチャを行っている場面を画像と音声で記録したり、マルチモーダルインタフェース対話システムのデータベ-

ス作りをしている[8]。

機械を意識することなく操作し、その向こう側の人間と自然なコミュニケーションをすることができるようにするのが現在のインタフェースの目標と言える。マルチモーダルインタフェースを実現させるために必要な人体の各部分の検出手法、ジェスチャの認識手法は過去に数多く研究されている。

代表的なものでは[9]が存在するが、通常のカメラから得られる動画像から肌色領域を利用して検出する手法を用いた場合、照明などの条件の色相変化により認識に影響が出るために実環境での使用は難しい。

松本は色相情報を使わず、複眼のカメラによって3次元情報を得ることで高度な顔・視線の認識を行っている[10]。

入力に関する研究は数多くあるが、人間への出力に関しては、ディスプレイによる画面出力や、スピーカーからの音声出力が主である。一方、音声認識や音声合成そのため、視覚障害がある人にはとても使いにくい機器になっていたり、健常者への眼の負担も懸念される。そこで、研究レベルや製品レベルでも新しい情報提示の試みとして、触覚情報が注目を浴びている。特に、ゲームの分野では古くからゲームコントローラが画面内のアクションによって振動する、携帯電話においても着信を音声ではなく、触覚提示に知らせるなど、触覚情報が取り入れられている。また、情報キオスクなどで多く用いられているタッチパネルを用いた方式では、物理的なボタンと違い指で感じるフィードバックが乏しく、押された画面上のボタンを光らせる（視覚的フィードバック）、音を発生させる（聴覚的フィードバック）などにより操作感を補ってきた。しかし、先の視覚障害の問題だけでなく、公共施設における情報キオスクにおいて、Poupyrevらが指摘するように、視覚的フィードバックは触覚に比べて認知が遅い[11]。また、Fukumotoらが指摘するように、聴覚的フィードバックは騒々しい環境ではよく聞こえないなどの問題が指摘されている[12]。

2.3 触覚・力覚提示装置について

2.3.1 触覚と力覚

本研究では、先のマルチモーダルインタフェースの観点を踏襲しつつ、利用者への出力部分に触覚情報を用いて、情報キオスクのインタフェース向上と新しい情報提示

について期待する．

我々が日常，触覚とよんでいる感覚は，生理学等の専門領域では体性感覚と呼ばれている．体性感覚は皮膚感覚と深部感覚の 2 種類に分けることができる[13]．皮膚感覚は触圧覚・温覚・冷覚・痛覚，深部感覚は運動覚・位置覚・深部圧覚・深部痛覚がそれぞれ分類されている．深部圧覚の分類の詳細を以下に示す．

- A) 位置覚は，四肢，舌，眼球などが能動的または受動的にとった相対位置を認知する感覚である．
- B) 運動覚は，身体の諸部分が能動的または受動的に運動していることに関する感覚であり，四肢の関節において特に明瞭である．
- C) 深部圧覚は，物を押したり引いたりするときの抵抗覚と，物を持つときの重力によって生ずる重量覚がある．

計算機により人工的に合成された現実世界を目指すバーチャルリアリティの分野において触覚提示という場合，先の皮膚感覚と深部感覚に対する刺激を合成することを意味している．皮膚感覚と深部感覚の刺激は，その方式が大きく異なる．皮膚感覚のみの刺激を与える触覚デバイスをタクティルディスプレイと一般的に呼び，狭義の触覚提示はこちらをさす．一方，深部感覚に刺激を与える触覚デバイスをフォースディスプレイと呼ばれ，フォースディスプレイのことを一般に力覚ディスプレイと呼んでいる．現在，仮想空間内で深部感覚を提示する様々な力覚提示ディスプレイが開発されている．初期のものは部屋を占拠するほど巨大なもので，ユーザインタフェースの観点からかけ離れたものであった．1989 年に PC のデスクトップ用に想定した小型の力覚提示装置が研究され，デスクトップ・フォースディスプレイの概念が提案された．現在は，ユーザインタフェース装置向けにアームやワイヤ，モータを用いた様々な力覚ディスプレイが研究開発されており，力覚フィードバックを実現する力覚ディスプレイの方法にはいくつかあり，その代表的な物を紹介する．

2.3.2 PHANToM (ファントム) [14]

1993 年，マサチューセッツ工科大学 A I 研究所の Thomas Massie と Kenneth Salisbury により開発された PHANToM は，6 自由度の入力，3 自由度の出力を実現できる．当

時では、達成できなかった忠実な触感覚を実現し、世界中の研究者が利用している。PHANToM はデスクトップ上で使えるデバイスで、マウスと同じ要領で使い、コンピュータ内部で作られた仮想オブジェクトに触れることができる。PHANToM はユーザの指先の動きを計測し、その場所に外的な力を加えてある硬さや柔らかさのある物体に触れているような触覚情報を作り出すことができる。原理として、指先の三次元座標がエンコーダによって計測され、その x 、 y 、 z 位置に対して計算された力を制御モータが加える。制御モータからのトルクは軽量の結合部に巻かれたワイヤを經由して伝えられる。この結合部の先に三自由度をもつパッシブ・ジンバルがある。このジンバルはそれぞれ無抵抗の回転軸 3 個が一ヶ所で接合されており、そこにはトルクがかからない。そのために純粋な反力が返される。さらにこのジンバル機構の工夫でユーザは自由に指先の角度を変える事ができる。ハードウェアの小型化により卓上で使用でき脱着が容易である反面、駆動機関にロボットアームのような多関節機構を用いているため装置の自重が大きいという問題を持つ。また、力覚の提示できる部位が一台に一つであるため、複数の装置を設置して多点にすることは、装置が大掛かりとなり、かつ装置間の干渉により操作空間が狭くなる問題点もある。



図 2.2 PHANToM (<http://www.sensable.com/>より転写)

2.3.3 SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality) [15]

東京工業大学の佐藤が1989年に開発したSPIDARは、立方体のフレームの四隅からそれぞれ糸が中央にある指先キャップに繋がっている。四隅にはそれぞれDCモータとロータリーエンコーダの付いたプーリーがあり、糸はこれに巻きつけられている。

エンコーダにより，糸の長さが測定され，モータにより糸に張力が加えられる．使用者は，指先をキャップにはめ込んで操作をする．4本の糸の長さから，時々刻々の指先の3次元位置が計測できる．4本の糸の張力を制御することにより，指先に任意の力を提示することができる．

現在，両手の複数への指への力覚提示が可能なSPIDAR-8まで研究されている[15]．指先につけるキャップの数は8個（親指から薬指），各キャップにはそれぞれ3本の糸がつけられ，直方体のフレームには，合わせて24本の糸が取り付けられている．糸の干渉を避けるために，3本の糸で力覚提示を行っているが，その反面，複数の作用点を設けた場合に糸の干渉を生じる問題を持つ．

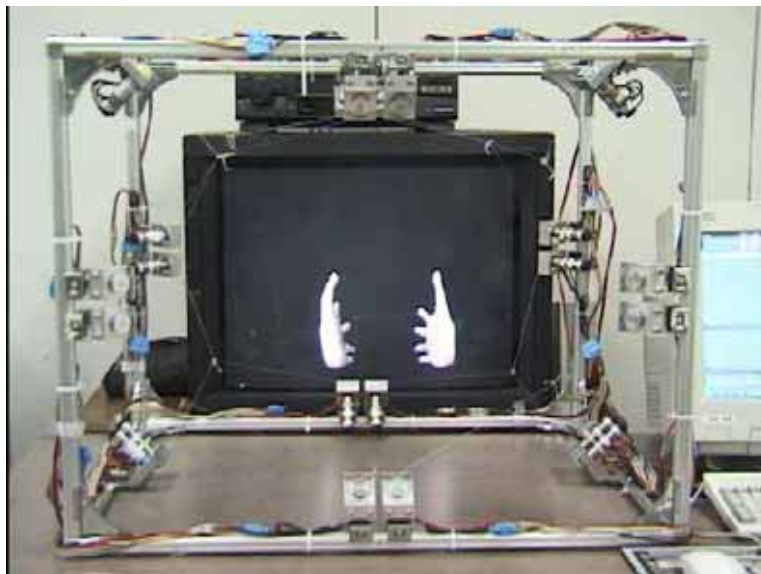


図 2.3 SPIDAR-8 ([15]より転写)

2.3.4 CyberGrasp[16]

CyberGrasp は物体握ることに特化して開発された触覚デバイスである．このデバイスは手にグローブをはめるように装着し，仮想空間内の物を触ったり握ったりすることができる．手と指に装置を装着し，手に対しての指の位置が入力される．反力は各指にそれぞれ提示され，これによって物を握る動作を再現している．しかし，脱着が煩雑であり，人間の手に直接力覚伝達機構を装着するため，重くて操作性が落ちる，装置が大掛かりになる等の問題点がある．



図 2.4 CyberGrasp (<http://www.immersion.com/>より転写)

2.3.5 FEELEX [17]

筑波大学の岩田らが開発している FEELEX は ,ピンディスプレイ方式の触覚提示方法を用いることで ,三次元形状と硬さを表現できる装置を開発している .この方式は ,プロジェクタによって映像が投影された机に丸い穴を開け ,穴の中に上下に稼動するピンが机の下から出している .そのむき出し状態のピンの上にスポンジや柔らかい布をあて ,ユーザはその布の上に手を置き ,布の下で上下するピンの動きを感じて ,触覚情報を手に入れる .非装着でありながら ,仮想物体の形状を体験できる利点がある .しかし ,再現できる形状がピンの解像度に依存していること ,ユーザに対して ,触覚情報は提示できるが ,力覚情報が提示できないなどの問題点がある .



図 2.5 FEELEX ([17]より転写)

2.3.6 Actuated Workbench [19]

1997 年から、マサチューセッツ工科大学のメディアラボで石井が提唱している、Tangible Bits と呼ばれるデジタル情報を触覚で探知できるインタフェースについて研究している。特に、1998 年に発表された PSyBench[18]では、先の岩田と同じように机の上にプロジェクタで投影したコンピュータの画面の環境を用意し、机の下に電磁石を取り付けた XY ステージを設け、机の上に置いた物体の底部にも磁石を配置し、これによってデスクトップ環境の演算結果を実世界の物体の動きに反映する手法を用いている。また、2002 年に発表された Actuated Workbench[19]は、PSyBench の概念を踏襲し、XY ステージの下に電磁石方式ではなく、2 自由度のリニアパルスモータを机の下に設置している。モータのコイルから発生する磁界の量を調節することで、机の上にある物体を操作する。しかし、この方式は机の上で動かす物体に電磁石を付けておく必要がある。また、ユーザがその物体を持った際に、ユーザの手を動かすほどの大きな力を発生させることができないという問題点がある。



図 2.6 Actuated Workbench[19]より転写)

2.3.7 Tactile Driver [20]

星野が 2002 年に発表した Tactile Driver は、従来型のタッチパネルの裏側にモータ駆動を仕込むことで画面上のボタンの押し込み具合などユーザへの触覚フィードバックを実現している。しかし、本装置では画面上の押し込み具合などしか表現できず、強い力を発生させることはできない。



図 2.7 Tactile Driver ([20]より転写)

2.3.8 Proactive Desk [21]

本システムは Wellner により提案された Digital Desk の概念を拡張させたものである。Digital Desk では、机の上に置かれた物体をカメラや位置センサなどを用いて取得、解析し、デジタル化した情報をコンピュータに入力する。取り込まれた情報はコンピュータにて処理され、その結果は頭上に設置されたプロジェクタから机の上へ投影される映像として実世界に出力される。

Proactive Desk ではこれにさらに物理的な情報の出力チャネルを付加する。本システムにおける物理的な情報を生成する仕組みとしては、リニア誘導モータ (Linear Induction Motor: LIM) を用いている。机の下にこの LIM のコイル・コア部分を設置し、机の上に銅やアルミの金属板を置く。ユーザはこの金属板の上に手を載せるだけで、力覚情報を得ることができる。

Proactive Desk の利点は、岩田の FEELEX と同様、力の発生機構の部分を机の下に隠蔽することができる。つまり、利用者に見えるのはキャンバスと同一の色に塗られた金属板だけである。これは、頭上から投影されるコンピュータの映像を阻害するものが少ないことを意味し、利用者は通常のタブレットを扱うかのように机の上での操作

が行える．しかし，Proactive Desk では，机上の一つの物体にのみ力覚情報を提示できないため，複数の物体や多人数が同時に力覚を享受することができない問題点がある．



図 2.8 Proactive Desk の全体図

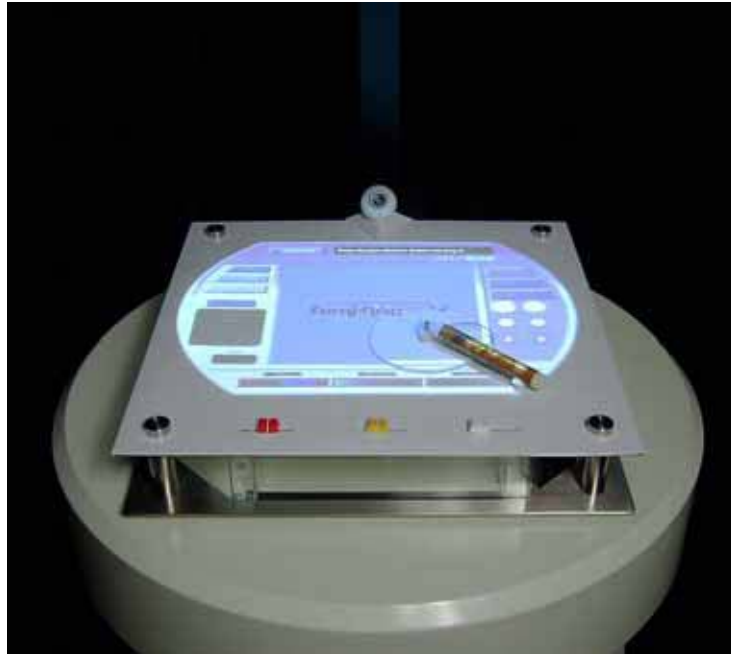


図 2.9 Proactive Desk の力覚提示面と画像投影面

2.4 力覚提示装置と情報キオスク

前節で現在 ,研究開発されている主な触覚 ,力覚提示装置を紹介した .本研究では ,情報キオスクに力覚情報を付加する際 ,これらの力覚提示装置を利用して行う .そのため ,情報キオスクに求められる誰もが無理なく使えるユーザインタフェースの必要がある .入力インタフェースの設計に当って重要な要素は ,操作性と操作感である .操作性が悪いと作業の効率に響くことになり ,操作感が良くなければ長時間の作業に支障が出る .[22]で佐伯は ,道具が使用者の「主」であってはいけないと書いている .計算機を「道具」として考え ,主従関係をつけるとする .主は、使用者（ユーザ）であり ,従は計算機であると考えべきである .何よりもまず ,技術の産物としての道具（計算機）は ,すべて人間にとって使いやすく ,親しみやすく ,身体に「馴染みやすい」ものであるべきだと考えられる .入力インタフェースを考える場合 ,その定義から人間と計算機 ,ここでは情報キオスクであるが ,この2つをつなげる役割をもつ .まさに道具として使いやすく ,親しみやすく ,馴染みやすい ,直感的な操作感を持つことを望まれる .

本研究では次の条件を「入力インタフェースの設計指針」としてあげる．

- A) 入力インタフェースは使用者が何かの作業を達成しようとするとき，その達成を支援する手段として有効に機能しなければならない．
- B) 使用者が「使っている」という意識をもたさずに作業そのものに集中できるものでなければならない．
- C) 使用者が入力インタフェースを使用するにあたって「探さなければならないこと」，「覚えておかななければならないこと」，「推論しなければならないこと」をできる限り少なくする．

前節で取り上げた力覚提示装置をユーザインタフェースとして用いる際の特性（応答速度，パワー，自由度）と，上記の項目（拘束度，大きさ，操作感）に当てはめると，以下の表 2.1となる．

表 2.1 触覚・力覚提示装置の比較表

	応答 (msec)	パワー (N)	自由度	拘束度	形態	操作感
PHANToM	1	6.4	6	小	小	低
SPIDAR-8	0.3	6.6	26	大	大	低
Cyber Grasp	-	12	22	大	大	低
FEELEX	7	-	-	小	大	高
Actuated Workbench	-	-	2	小	中	高
Tactile Driver	10	0	-	小	中	高
Proactive Desk	30	12	2	小	中	高

(- は不明)

情報キオスクに求められる直感的な操作性を考慮すると，操作感の低い，提示装置による機器の拘束度が大きいものは，条件と合致しないことが考えられる．次章では，力覚情報を付加する場面や情報提示を具体的にし，これらの装置の比較表と照らし合わせながら，どの提示装置を本研究における情報キオスクに用いるか検討する．

第 3 章

力 覚 を 付 加 し た

情 報 キ オ ス ク の 提 案

3.1 デザインコンセプト

力覚提示装置による情報提示を行うことで、従来の視聴覚情報では表現できないユーザへの情報提示を視野に入れる。1996年に、力覚提示装置を用いたアプリケーションとして、ユーザ間における書道教示システムがある[23]。この研究背景として、人間の繊細な動きに代表される技と呼ばれるものは、文字などの形式的な表現に変換することが難しく、他人にその動きを伝えるのが困難であると言われている。そこで、バーチャルリアリティの分野では、力覚提示装置による人間の動きの記録、保存、再生を行う研究によって、人間の動きを形式化せずにデジタルデータのまま、第三者へ表現が可能となる。つまり、何かしらの力覚や触覚情報を再現することで、ユーザは視聴覚のみでは体験できなかった、新しい情報を得ることができる。

また、我々人間がある物質を視覚的に認識するときは、ある物質が可視光を反射することによって、その存在を示している。このような状況下では、図 3.1のように人間は視覚的に物を判断してからその物質を触り、物質のザラザラ感や表面上の触覚情報を認識する。昨今、バーチャルリアリティの分野で力覚や触覚情報を提示できる技術が発展し、視聴覚ではなく、触覚情報で物体の存在を認識することが可能となっている。ただ、この視覚から触覚への物質認識の順序は現実の世界においても、テレビのバラエティー番組などでは、その順序を逆にするために、目隠しした状態で食材の味覚を判断する、珍種の動物に代表される普段は嫌がられる物質を触って判断するなど、

視覚以外の感覚を用いた情報提示が古くから行われている。このような番組を見る限り、テレビ内での体験者は、図 3.2のように、その物資をすぐに判断することができず、様々な想像を膨らませて、その物質がいったい何であるかを考えている。触覚情報においてこのような状況を考えた場合、人間はその物質を視覚で判断できる場合に平気で触れる物でも、視覚がない場合には、人間は一種の恐怖感を持ちながらその物質に触れることが多い。

視覚ではすぐに判断できる物質でも、触覚から入ることで、その物質が何であるかを探ることができ、人間の物質に対するアプローチ手法の変化が期待できる。また、図 3.3のような複数のグループで一つの情報キオスクを利用している場合、一人だけが触覚と視覚の情報を享受することができ、他の人は視覚情報のみしか享受できない。しかし、この状況は一人の人間が体験できる新たな情報を、他の人も体験したい、触れてみたいという欲求をかきたてられる可能性を持っている。日経デザイン 2001 年 12 月号では、「広がる感触の世界」という題で、触覚に関する特集を組んでいる。この頃、ジュースやビールの缶の表面に凸凹やくぼみをつけることで、内容物の冷たさや、高級感などを手で触ることで表現している。これらは、目でわかるものではなく、実際に手にとってこそ、その情報価値が現われるものである。本研究における情報キオスクでも、触ることでその価値がわかるような、みなが触りたくするような情報提示を考えていく。

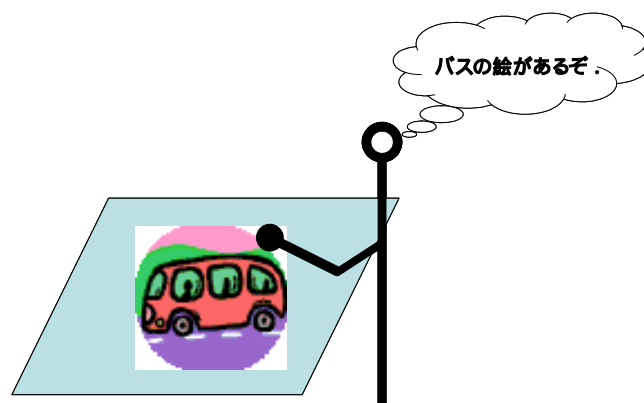


図 3.1 視覚による情報提示

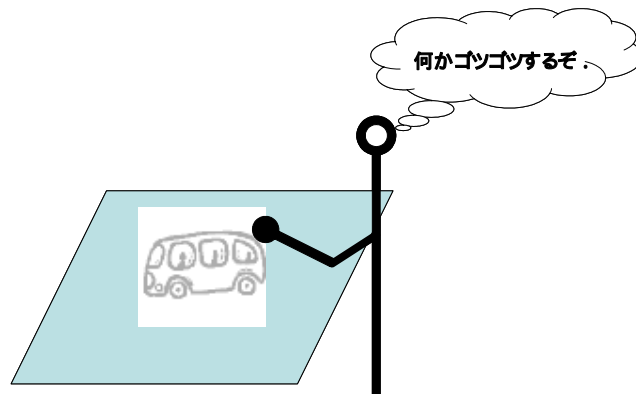


図 3.2 触覚による情報提示

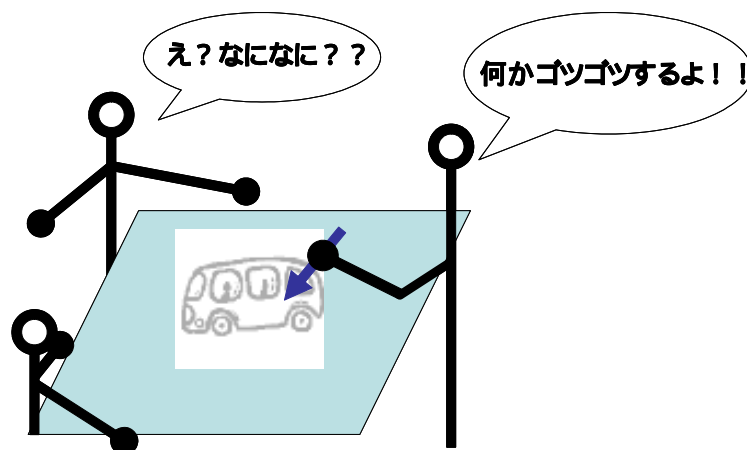


図 3.3 第三者を誘導するコンテンツ

3.2 適用場面

博物館・美術館における従来の情報キオスクの設置場所は、館内入り口にある館内の案内用が一つ、もう一つは展示物の横にある解説用である。本研究では、これらの先行事例を踏襲し、それぞれについて力覚情報を付加した情報キオスク端末について提案を行う。博物館・美術館の性質をまとめると、お年寄りから子供まで様々な来場者が来ることが予想される、また、日常生活ではなかなか体験できない事や、教科書

に載っていないようなことを学習する場であることが考えられる。また、その展示物に対する知識のバックグラウンドも様々であるため、個々人に合わせた情報提供が必要になる。じっくりと学びたい場合などでは、ブース形式のような情報キオスクにおいて、個人用端末などが求められるが、館内のホールや展示物の近くにある情報キオスクでは、多人数が同時に見ることが出来るような表示形式が求められる。

3.2.1 館内の案内用

従来の館内案内用情報キオスクでは、紙のパンフレットによる館内全体図の様式で、どこに何があるかなどが、大まかに書かれているものが多い。来場者の多くは、パンフレットを見ながら、それを頼りに館内を歩くのがほとんどである。館内の経路が単純で規模の小さい博物館であれば、紙のパンフレットだけで事は足りるが、ループル美術館や大英博物館など、規模の大きいものでは、紙のパンフレットだけでは利用者の要求を全て満たせるとは考えにくい。

大きい美術館・博物館において、時間の限られた利用者が効率よく館内を回するためには、コンシェルジェのような館内を適切にナビゲートしてくれる機能が必要となってくる。現在の情報処理機器は多くのデータを高速に処理できるため、利用者が情報キオスクに対して、「○○」と「××」に興味があると入力すれば、それに適した経路を提供することも可能と考えられる。

3.2.2 展示物の解説用

博物館・美術館に来る人は何かしらの知的好奇心を満たすためにやってくると考えた場合、来館者はある自分の興味のあるテーマを十分に理解でき、自分が知りたかったことに答えてくれて、且つ思わぬ発見があり、もっと知りたいことには調べる術を提示してくれ、それらをイライラするほどの時間をかけずに、できるだけ容易に得られることが望ましい。また、何か自分の能力に挑まれるような知的挑戦に出会いたいとも思っており、歯ごたえのない教科書的な解説や子供だましの体験装置などには、たとえわかりやすくても拒否反応を示してしまうという面ももっている。

つまり、美術館・博物館における展示解説用の情報キオスクは、わかりやすさと難しさの絶妙なバランスが大切になってくると考えられる。現在、博物館展示で得られる情報は、立ったままの来館者に対する情報提供という前提があるため、結果的にそ

のテーマの背景を理解していない素人には難しく，玄人には歯ごたえのない情報となっている．これは，立って流し読みをするくらいのスタンスで解説を作っていることが考えられる．これを改善するためには，とりあえずわかりやすいテーマ設定と明確なメッセージをシンプルな解説によって提示していくと同時に，段階的に詳細な情報へたどり着けるシステムを用意し，場合によっては展示室に椅子を配置するなどの「疲れない」工夫が必要になってくる．要するに博物館の情報化（インテリジェント化）である．（図 3.4）

日本において，情報キオスクによる展示解説の有効性は，日本人の対面コミュニケーションにおける特性にも合致していると考えられる．日本人は西洋人に比べると，初対面の人間に対してオープンになれず，一種の気後れ，恥ずかしさなどの抵抗感を感じてしまう傾向がある．このような背景からも，情報キオスクの有効性は確認できると考えられる．

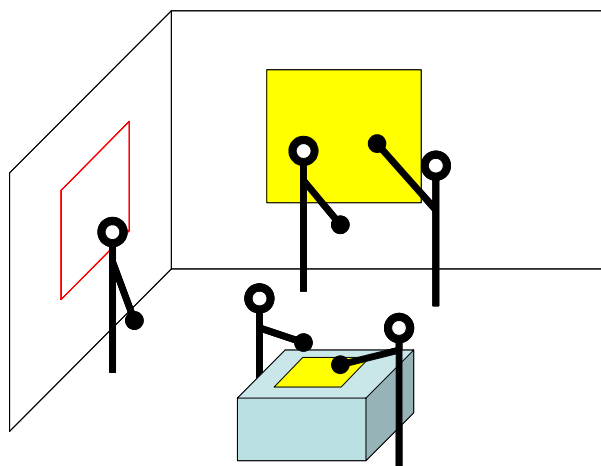


図 3.4 展示解説用情報キオスクを設置した際のイメージ図

3.3 要求される機能

情報キオスクに力覚情報を付加するには，前章や前節までにあげた力覚提示手法をすべて満たす環境の存在が必要である．まとめると以下ようになる．

- A) 利用者にとって、操作機器に対する拘束感が低い。
- B) 複数人が同時にディスプレイを眺めることができる。
- C) 人間の腕を操作できるような強い力覚提示が可能。
- D) エンターテインメント性。

A)について解説すると、日頃から情報処理機器との接点がない人にとって、装置が大掛かりになる、見た目が仰々しくなるなどが原因で、拒否反応を起こす人もいる。そのため、できるだけ利用者には見た目なシンプルな構造の方が良い。

B)について述べると、来場者は単独ではなく、グループによる利用も考えられる。また、コスト面、設置の条件を考えると、たくさんの情報キオスクを置くよりも、一台の情報キオスクを複数人で共有した方が良いと考えられる。

C)の必要性として、利用者が操作に悩んでいる際には、システム側からの操作支援も必要であると考えられる。また、利用者は情報キオスクのほとんどを指で操作しているため、その指に対して直接情報提示ができる仕組みが求められる。

最後に、D)について述べると、情報キオスクは人に使ってもらって、始めて効果を発揮するため、ユーザが陳腐に感じないようなエンターテインメント性の高い機能も求められる。

また、第2章で触れたように、情報処理機器のアクセシビリティ向上のためにマルチモーダルインタフェースの研究が行われている。音声認識、画像認識などにおいて認識精度の問題点はいくつか残っているが、人間の動きや発話など普段の動く状況を入力として用いているスタイルは、マウスなどの入力装置を使うよりも人間になじみやすく、取り入れられる要素がある場合は、今後の情報提示の参考として導入を考えることができる。

3.4 設計ポリシー

現在研究開発されている力覚提示装置と、前節で述べた機能を最大公約数で満たす力覚提示装置として、本研究は Proactive Desk を採用する。2.4 節で述べたように、Proactive Desk はユーザ側からは、従来のタブレット PC におけるペンデバイスなどを

操作するのと、何ら違和感なく操作できる。なお、現在の Proactive Desk は同時に一人のユーザにしか力覚情報を提示することができないため、多人数には視聴覚の情報を提示し、デバイスを握っている一人にのみ力覚情報を付加する。本研究における設計において、力覚提示環境は全て Proactive Desk の中に組み込み、ユーザ側が必要とする GUI 環境は PC 側で実行を行っている。

本研究で実装するアプリケーションは、従来の GUI 環境を踏襲しながらも、視聴覚の情報に力覚情報を付加する形態を取る。これは、博物館・美術館における情報キオスク端末の仕様として、多人数のユーザが同時に情報を享受できることを想定している。力覚情報が他の視聴覚情報と大きく違う点は、ユーザの能動的な動作に対して情報提示が行われる。言い換えると、人体と外界との物理的な相互作用があって力覚情報を享受できる。そのため、力覚情報を享受していない他のユーザが、本研究で実装したキオスクに誘導されるような設計を目指す。

3.5 実装例

本節では、実際に情報キオスクに力覚情報を付加して、どのような情報提示が可能かを提案する。その第一段階として、3.2で示した情報キオスクのそれぞれの適用場面でどのような情報提示が可能であるか、図 3.5 本提案のマップにまとめた。

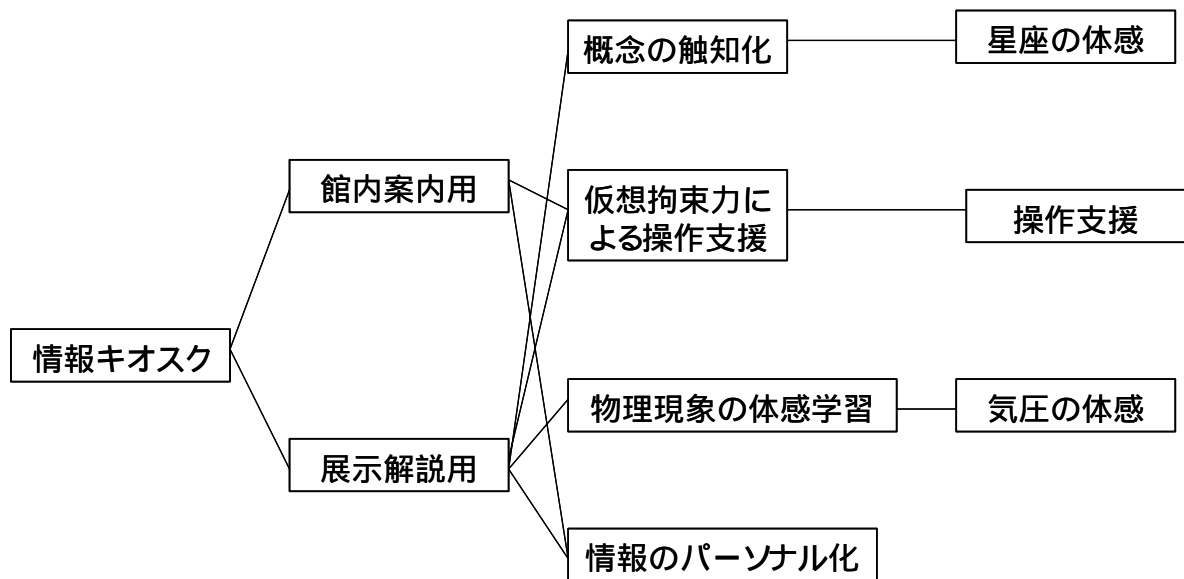


図 3.5 本提案のマップ

また，提案したもののいくつかを実装し，Proactive Desk 上で実際に情報提示を行う．その提案を，力覚情報を付加した情報キオスクのプロトタイプとする．以下の節で，提案の具体例と実装例を示す．

なお，本実装で作成したプログラムは全て Boland C++ Builder5 を用いて実装した．開発環境は，Windows2000 上でプログラムを組み，実際の運用は Windows xp 上で行った．

3.5.1 概念の触知化

文字情報や膨大なデータ情報を見やすくするために，グラフや表などにして視覚的にその情報をより見やすくする手法がある．また，これら以外にも普段は目に見えない，人間の思考パターンや，対人関係などを図や表などにして視覚的に表現することも行われている．さらに，野間らは人間の思考概念図にバネモデルを用い，力覚装置を用いて触覚情報としてユーザが体験でき，操作する研究を行っている．紙の上では体験できないバネモデルの力を体験することで，新しい発想が生まれるかの支援を行っている．

このように，従来は眼に見えず，我々人間が便宜上などの理由で視覚的に表示した

ものを力覚など視覚とは違う多感覚による情報提示によって、新しい物事の捉え方ができるのはと仮定する。二次元平面に触覚情報を組み込むことで、ユーザは実際に画面を触っているかのような操作感覚を享受できる。このように、何か物に触れることは、触れた物体に機械的な変化を発生させるだけでなく、局所的ながら多次元の情報ユーザに提示する双方向性の高い行為と考えられる。

本研究では、この概念事例を星座について考える。プラネタリウムや天文学を博物館において、星座や星に関する展示がいくつかある。元来、空に数え切れないほどある星の中から、古代の人たちが星の特徴点を見つけ出し、神話や伝説などの登場人物におきかえて、あてはめたものである。そこには、古代の人間たちによる概念などが含まれている。本実装では、この概念を触覚情報とし、古代人が数多くある星の数々から、ある複数の星を選択し線で結んだのかを想像する場所を提供しようとする。しかし、いきなり星の絵を渡され、「○○座を作ってください」と言われても難易度が高いなどの問題点もあるため、触覚情報によって星座線を触知化して利用者に気づきを与えるものである。

視覚的に線を表示すれば、何ら面白みもなく絵本などで十分であるが、星座線を触覚情報としてディスプレイに埋め込むことで、ユーザは何か気づきそれが、何であるかを考えることを支援するものである。

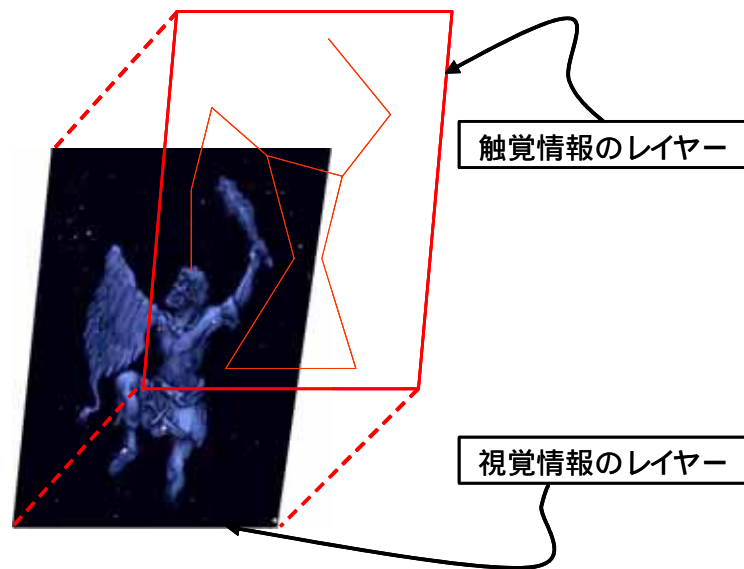


図 3.6 星座線を触覚情報として体験できるアプリケーション

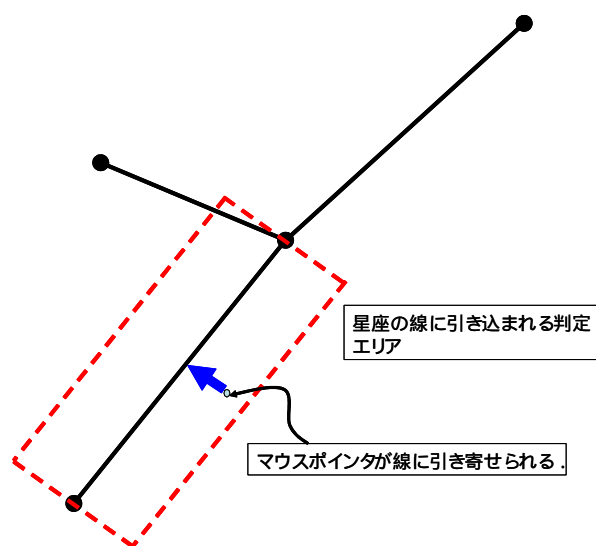


図 3.7 星座線とマウスの当たり判定モデル図

本実装での初期状態において、利用者はディスプレイの中に星しか見えない。しかし、ディスプレイの上で Forcer を動かすと、あらかじめ触覚情報を埋め込んでおいた部分で、段差のような情報を享受できる。このとき、埋め込んでおいた線に Forcer

が近づくと、星座に引っ張られるような力を提示し、星座線が周りの部分に比べるとくぼんだ形状の力を発生させている。つまり、ユーザはキャンバスの中にいくつもの溝（＝星座線）を見つけることができ、その溝をつなぎ合わせることで、星座を考えていく。また、星が表示されているだけでは、星座線を見つけるのが困難な場合には、図のように星座の絵柄を表示させることもできる。最後までわからなかった人には、正解として、実際の星座線をディスプレイに描画するような実装を行っている。

3.5.2 物理現象の体感学習

世の中にある様々な自然物理現象は、その全てが視聴覚で表現できるわけではなく、その再現方法が限られているものもある。また、自然現象一つとっても、それが単一の動きであることは少なく、様々な要素が絡みあって作用しているものがほとんどである。本実装で取り上げたテーマは、日本上空の気象・天気図である。テレビなどで天気図や雲の動き、気圧の変化など様々な気象に関する情報を視覚的に提示してくれる。しかし、それらはそれぞれが相互的に作用し影響しあっているのだが、視覚的にまとめて表示すると画面が複雑になるため、別々に表示している。

本実装では、視覚で一つの情報を、触覚でもう一つの情報を提示してみる。また、普段は視覚的にしか見ることができない地球上の雲や風の動きもシミュレートし、触覚情報で体験することも可能である。本実装における狙いは、自然現象の力としてあるが、人間がその力を体験することが困難な状況を模擬する状況、二つ以上の自然現象がありそれらが相互に作用しているが、視覚的には片一方のみしか提示できない状況などに、触覚情報を取り入れてそれぞれの問題点を解決することである。特に、後者の方は、視覚情報と触覚情報が実際の自然界では相互に作用していることから、ある事象の原因がより具体的にわかることを期待する。

本研究では、衛星による雲の動きを視覚表示し、気圧の天気図を触覚情報で提示することにした。

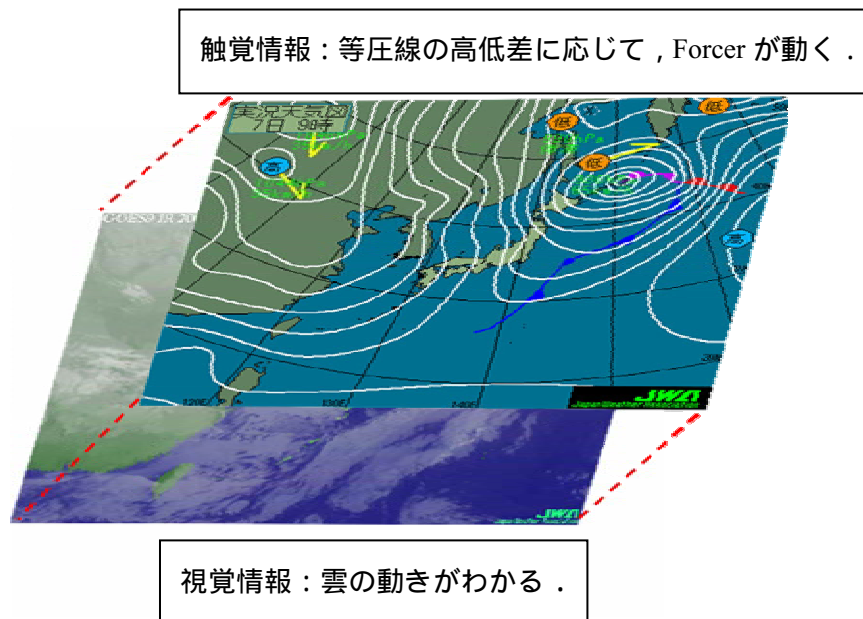


図 3.8 気圧の変化と雲の動きを分割したアプリケーション

小学校の理科の授業で習ったように，風は気圧の高低差によって吹いている．つまり，等圧線の変化を導くために，まず画面上にある高気圧を抽出し，等圧線の気圧値を求める．等圧線は一つが 4hPa であるため，一つの高気圧からそれぞれの等圧線の値はすぐに求めることができる．風の方角に関しては，天気図を縦 4，横 6 の 24 個のメッシュに区切り，一つのメッシュにおける風の方角を図 3.9 のように求めた．

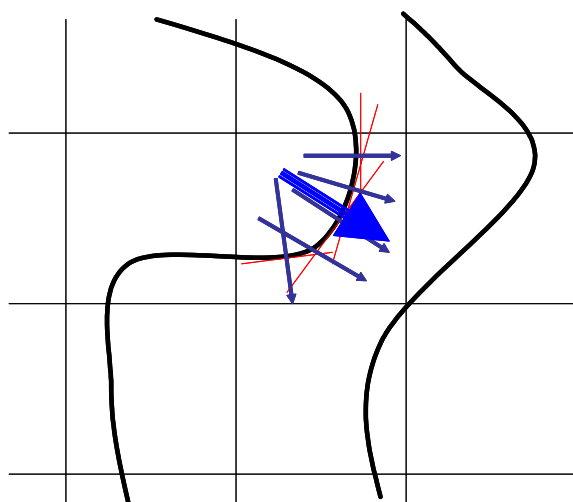


図 3.9 メッシュ内の風の方角の決定方法

メッシュの中にある等圧線に、5つの接線を引く。それぞれの接線に直行する矢印を等圧線の高い方から低い方に向かって引く。その矢印の合成成分をそのメッシュにおける風の強さ（＝ユーザへの力覚提示）としている。これを24メッシュすべてに適用し、一つの画像での力の生成としている。

本実装では、視覚情報である雲の動きが30msec間隔で更新しており、それに合わせて触覚情報である等圧線図も更新している。これにより、視覚情報はパラパラ漫画のように一連の雲の流れがきちんと生成され、見た目が違和感なく、情報提示ができています。

3.5.3 仮想拘束力による作業（操作）支援

Proactive Desk ではユーザの腕を直接操作するような強い力を生成することができる。本提案では、その力覚を利用したユーザの操作支援を試みる。従来の視聴覚情報は、その提示手法がユーザの動きとは無関係な場所で提示されることがある。従来のコンピュータ環境を例にとると、ユーザがあるタスク中に次に押すべきボタンを悩んでいるとき、聴覚情報で「○○のボタンは画面右上にあります」や、視覚情報で目当てのボタンを点滅させユーザの興味をひきつけるなどがある。しかし、この情報提示では、その音や表示を見落としてしまう場合もある。また、従来のコンピュータ環境でユーザは、マウスなどのデバイスを使って操作をしている。ユーザインタフェースの観点から、入力ではマウスを用いているが、出力はディスプレイ表示やスピーカーからの音声と言う、入力と出力が一致していない問題点がある。

本提案では、この入力と出力のバランスの不一致がユーザインタフェースの改善につながると着目し、ユーザの動かすマウス（本研究では、Forcer）に直接情報提示をする。先のボタンの場所を知らせる状況では、マウスの位置を実際のボタンの上まで持っていくことが考えられる。Proactive Desk のように視覚座標と入力座標が一致している環境では、マウスのポインタだけがボタンの上に動き、入力デバイスが動かない状況では、人間の認知特性に大きく影響する恐れがあり、ユーザインタフェースがより悪くなる可能性も考えられる。つまり、本提案で意図することは、ディスプレイ上のポインタの動きに合わせて、Forcer を動かすことで、ユーザへの作業（操作）支援を行う。

3.5.4 情報のパーソナル化

触覚情報は、何かしらのユーザの能動的な動作に対して提示されるものであるため、触覚提示デバイスなりを操作している人だけしか、情報が伝わらない。しかし言い換えると、その人だけにしかわからない秘密な情報を伝えることも可能である。特に、視覚情報は、画面が一瞬で過ぎ去ることもあり、見逃してしまう状況も考えられる。また、聴覚情報は視覚情報と同様に聞き逃しの状況があるのと、周囲の雑音や騒音などの環境に大きく左右される一面がある。また、スピーカーから音が出るため、不特定多数の利用者に情報が届き、状況によっては恥ずかしい思いをする場合もある。たとえば、ユーザがディスプレイ上で操作に迷っているときに、システム側から、視覚的に「ボタンがフラッシュして知らせる」、聴覚的に「〇〇のボタンは、右上にあります」と音声合成で読み上げるなどがある。しかし、これらの提示方法は第三者にもわかってしまうため、情報が筒抜けになる可能性が考えられる。

しかし、触覚情報において、ユーザに押して欲しいボタンに Forcer を動かすような力覚提示は、ユーザのみが動かされていることに気づき、第三者は Forcer が動いていることしかわからない状況が作り出せると期待できる。博物館・美術館などの公共機関において、自分以外の多くは他人である場合が多く、日本人の性質上なるべく事を立てずに済ませてしまおうと考えている場合には、第三者に気づかれないような力覚を用いた情報提示は有効であると考えられる。

3.6 考察

博物館・美術館をケースに、力覚情報を付加した情報キオスクでどのような情報提示ができるかを提案し、そのいくつかを実装した。

概念の触知化における星座のアプリケーションでは、暗闇に光る星々の中で金属板に取り付けたペンデバイスを動かすと、画面上に凸凹な感覚を受ける。今回のように目には見えない溝を作ることで、その溝をつなぎ合わせ、それを頭の中で再構築して、その溝の形が何をしているかを想像してもらう。視覚に頼りすぎた頭を新しくする意味で、このような情報提示も今後期待できるのではと推察する。

山下は、視覚障害者と目隠しをした健常者で、アンモナイトの化石の触察の実験を

行っている[26]．普段から視覚情報がほとんどない視覚障害者は，物に対する扱い方や，表現方法が健常者と違っており，教育に携わる人から新しい発見の可能性がある．との報告がある．このように，普段は眼に見えるものを隠蔽することで，新規な発想力が生まれる可能性も考えられる．

次の物理現象の体験は，身の回りにある物理現象をシミュレートすることで，自然の世界における様々な物理法則を肌で感じてもらうことを視野に入れている．また，今回の気象天気図のアプリケーションのように，同時に複数の自然現象が起こっており，視覚における情報提示に限界があるとき，複数の中の一つを触覚・力覚情報として提示することも可能であると期待している．

三つめの操作支援では，利用者が横一直線の線を引きたい時に，手の動きが上下にぶれないよう力覚情報を付加することで，握っているペンデバイスの動きを制御することができる．また，Proactive Desk では数 N の力をユーザに提示することができるため，情報キオスクの意図する方向にユーザの腕や，金属板の上に何かしらの物体を載せたものを制御することが可能となる．つまり，実物体を用いたエージェント機能が期待できる．

第 4 章

Proactive Desk の力覚特性

前章での実装に用いた力覚提示装置である Proactive Desk は、リニア誘導モータを力覚提示装置に用いた試作機であるため、そのユーザインタフェースとしての特性が明らかになっていない。この特性を明らかにすることで、先の提案と実装が少しでも早く具現化できる可能性を視野に入れる。

Proactive Desk のマウスのクリックに相当する入力部分から、金属板に力が出るまでの出力部分の構成は図 4.1 になる。図中の (A) は、従来の PC におけるマウスなど入力に関する処理部分になっており、(B) は、入力信号を元に演算処理を行う部分、(C) は、PC 内での演算結果より、ディスプレイへの画面出力とインバータへの力覚提示の出力を行う部分としている。

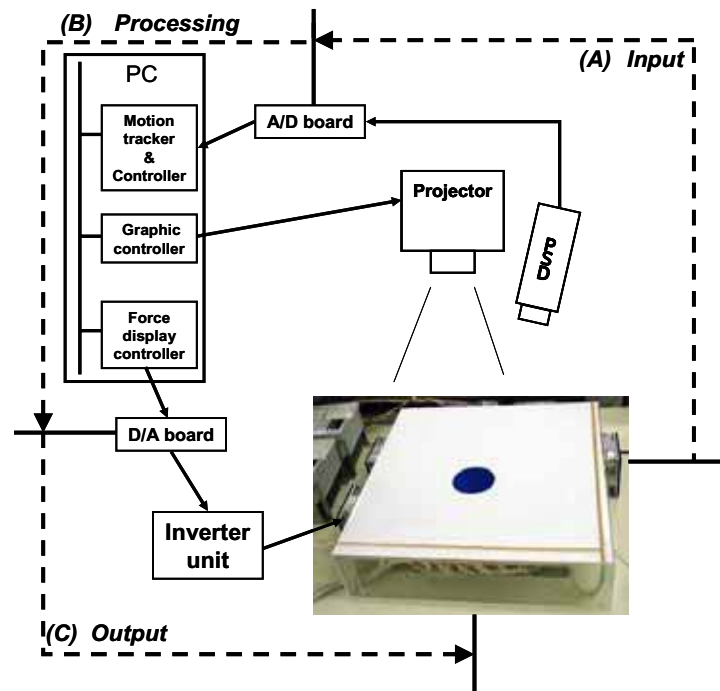


図 4.1 Proactive Desk のシステム構成図

4.1 Proactive Desk の仕様

本研究で力覚提示装置として用いる Proactive Desk とは，デジタルな世界と物理的なインタラクションを行うためのシステムである．力覚情報を提示するための仕組みとして，本システムではリニア誘導モータ（LIM: Linear Induction Motor）を用いている．図 4.2に 1 次元の LIM の基本的な動作原理を示す．本システムでは大平らにより提案されている 2 組の LIM のコアを直交するように配置する方式（図 4.3 2DOF リニア誘導モータ）により，机の下に 2 自由度を持つ LIM を構築し，机上の非磁性体の導体（以下，Forcer と呼ぶ）に対して 2 次元任意方向に駆動させる力を発生させる．

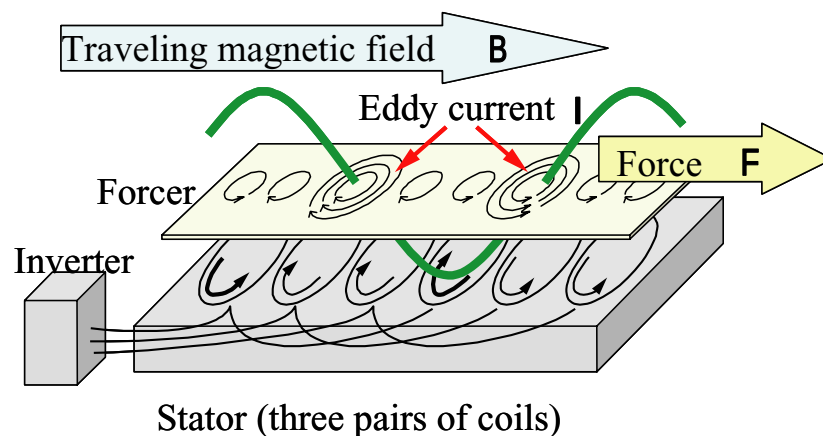


図 4.2 リニア誘導モータの動作原理¹



図 4.3 2DOF リニア誘導モータ

¹一般にLIMは広く使われている回転型モータを切り開き、直線状に引き伸ばしたもので、一次側のコイル(Stator)と二次導体(Forcer)で構成されている。一次側に三相のコイルを複数並べ、三相交流を印可すると、コイルを並べた方向に進行磁界(Traveling magnetic field) B が発生する。その結果、二次側となる導体上には、この磁界を妨げる方向に磁界を発生させる渦電流(Eddy current) I が励起される。この渦電流に対して進行磁界 B が作用し、フレミング左手の法則により二次側導体に並進力(Force) F が生じる。

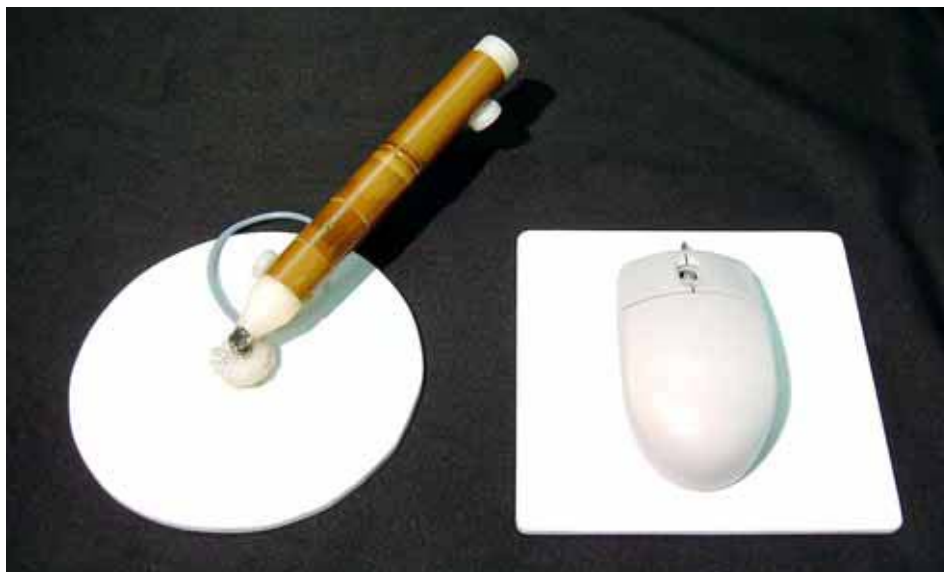


図 4.4 ペンデバイス型，マウス型 Forcer

さらに，Proactive Desk ではこれを入出力装置として用いるために，Forcer の位置を追跡しフィードバック処理を行う必要がある．本システムの利点は，力の発生機構の主要な部分を机の下に隠蔽することができ，ユーザ側からは，ただの金属板とマウスやペンデバイスとなるため，見た目がシンプルになっていることである（図 4.4）．この利点を損なわないために，リンクなどの構造は用いずに実装する必要がある．従来のタブレット PC は，精度の高い位置情報を検出できるが，電磁誘導による位置検出方式を用いているため，LIM から発生する進行磁界と干渉して，正確な位置を検出することができない．そこで，本システムでは，光学的な位置検出を試みる．Forcer の上に赤外線発光ダイオード（IR-LED）を取り付けて，この IR-LED の光を位置検出素子（PSD：Position Sensitive Detector）にて検出する．これにより，机上の任意地点への Forcer の位置制御や，特定箇所における任意量の力の発生などの制御を行う．なお，机上へはプロジェクタにより映像も投影されるため，位置検出用の光に IR-LED を用いているため，PSD 側に可視光カットフィルタ，プロジェクタ側に赤外線光カットフィルタを取り付けた（図 4.5）．

PSD により検出された IR-LED の位置情報は，20kHz の周波数で X，Y の座標値でアナログ信号として出力できる．なお，本システムにおけるボタンのクリック判定は，

Forcer 上に簡単な回路を作り，ボタンを押すと 2kHz の周期で IR-LED を数回点滅させている．PSD は位置検出以外に，光点の点滅情報も取得できるため，PSD から出力された点滅に関する信号だけを，位置情報とは別にマイクロコントローラ(Microchip 製 PIC 16F84)で処理する．

メインの処理部分は汎用の PC を用いており，プロジェクタへの画面出力に関する演算と，力覚の指令値を算出する演算を行っている．PC から出力された力覚生成に関する指令値は，D/A コンバータでアナログ信号に変換される．その信号が，インバータを制御することで，LIM に電流を印可し，Forcer に力が発生する．なお，本システムで用いたインバータは，AC モータ用汎用インバータ（三菱電機製 FREQROL-A024 容量：2.4kW 電源：三相 200V 交流）である．

次節では，情報キオスクとして Proactive Desk を用いるために，その力覚提示装置として用いるために，その特性を様々な面より把握しておく必要がある．そこで，ユーザへ提示可能な力，具体的には Forcer の素材に影響される定常的な発生力の強度特性を計測する．次に，Proactive Desk における過渡応答の特性を得るために，入力部分である PSD による Forcer の位置検出から，出力部分である力覚提示までの過渡応答時間を計測する．

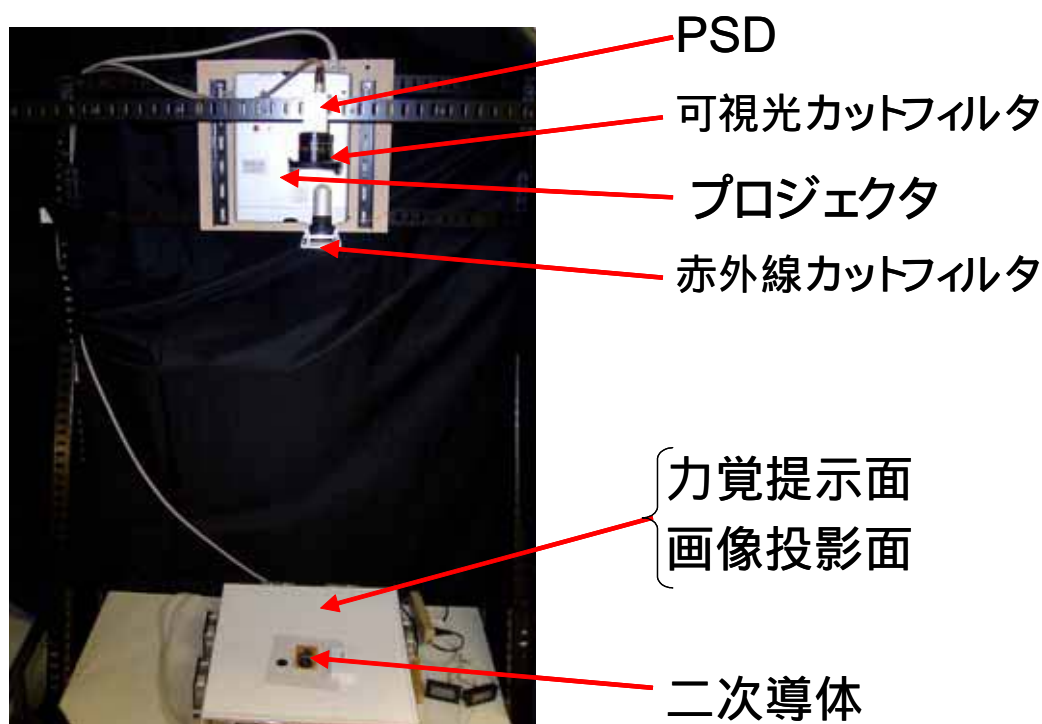


図 4.5 Proactive Desk の光学装置

4.2 Proactive Desk の力覚特性

Proactive Desk で用いている LIM は，二次導体内に誘導される渦電流と磁界強度の積で並進力が得られるため，二次導体の厚みが並進力の発生に大きく影響する．そこで本計測では，二次導体の特性（厚み，面積，素材）を変えて，本システムにおける定常的な並進力の強度特性について計測をした．

Proactive Desk における LIM の二次導体は，非磁性で導電性の物質が必要である．鉄板などの磁性体を二次導体として用いると，磁束回路としての効率は上がるが，LIM では一次側の鉄心コアが電磁石として鉄板を吸着する事で，鉄板と机の間の摩擦が増大し，並進駆動ができなくなる．そのため，磁性のある物質は二次導体にできない．非磁性体の二次導体として，アルミ板，銅板，真鍮などが挙げられる．しかし，真鍮は導体内の内部抵抗が高いため，導体内に並進力を発生させるのに十分な渦電流が流れ難い．真鍮は並進力の発生が弱い事ため，強度特性を探る本計測の目的と適さ

ない事から用いず，本計測においては，表 4.1に示すアルミ板と，銅板を用いた．

表 4.1 計測に用いた二次導体の種類

Material	Size	Thickness
Al	100 × 100	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0
	100 × 200	1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0
Cu	100 × 100	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0
	100 × 200	1.0, 1.5, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0

(単位は全て mm)

本計測を行う環境と手順に関して，野間らの報告からコイルと二次導体の距離が並進力の発生に大きく影響を受ける実験結果を得ている[24]．そこで，本計測においても，出力される並進力が大きい上側に配置してあるコイルを用いた．二次導体の並進力を計測するために，二次導体に糸を貼り付け，糸を滑車に介して力センサ（株式会社イマダ製 DPS-5 最大 49N まで計測可能）に接続して行った．実験の様子は図 4.6 実験の概略図になる．計測の値は，並進力の定常応答が大きい 3Hz から 20Hz の区間では 0.5Hz 単位で，それ以降は 5Hz 刻みで，120Hz まで取得した．

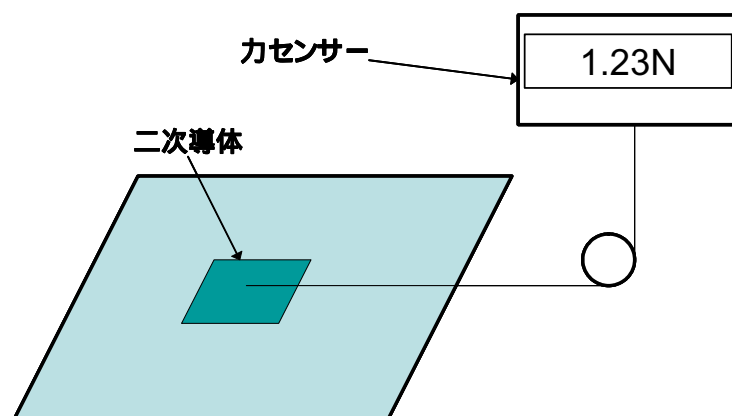


図 4.6 実験の概略図

計測の種別は ,二次導体の大きさを統一し ,徐々に厚みを大きくして図にまとめた .
同素材 ,同サイズにおける二次導体の厚みと並進力の関係を ,グラフにすると以下の
図 4.7 , 4.8 , 4.9 , 4.10 になる .

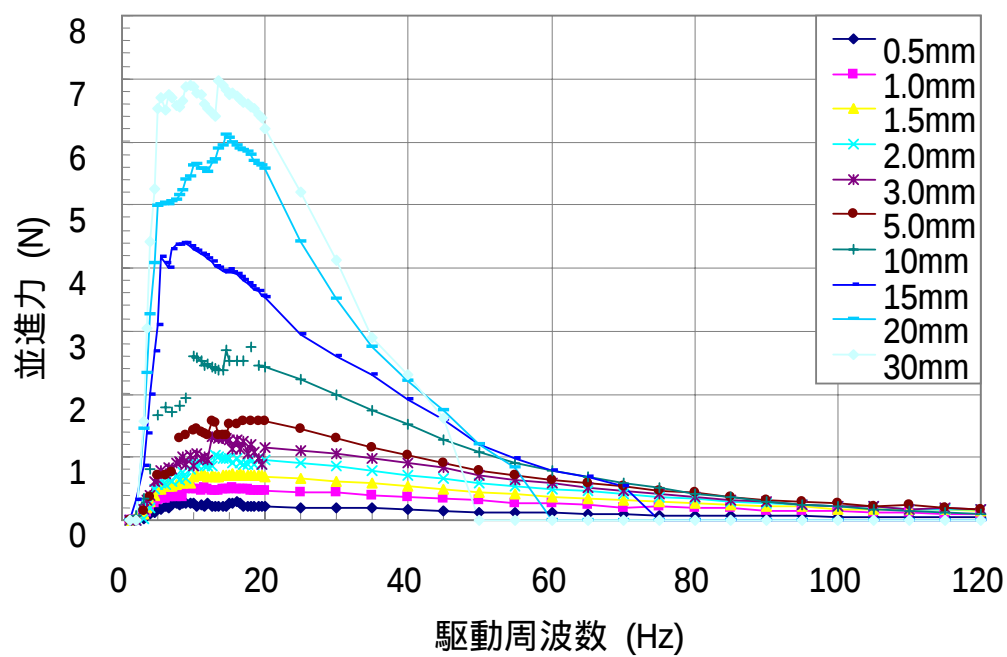


図 4.7 並進力とアルミ板(100 × 100mm)

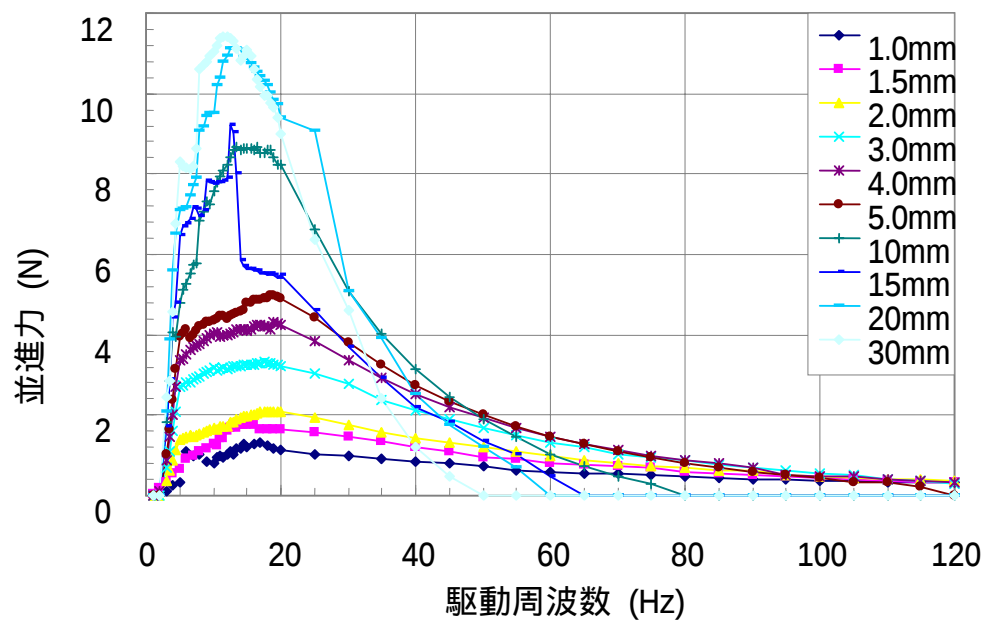


図 4.8 並進力とアルミ板(100 × 200mm)

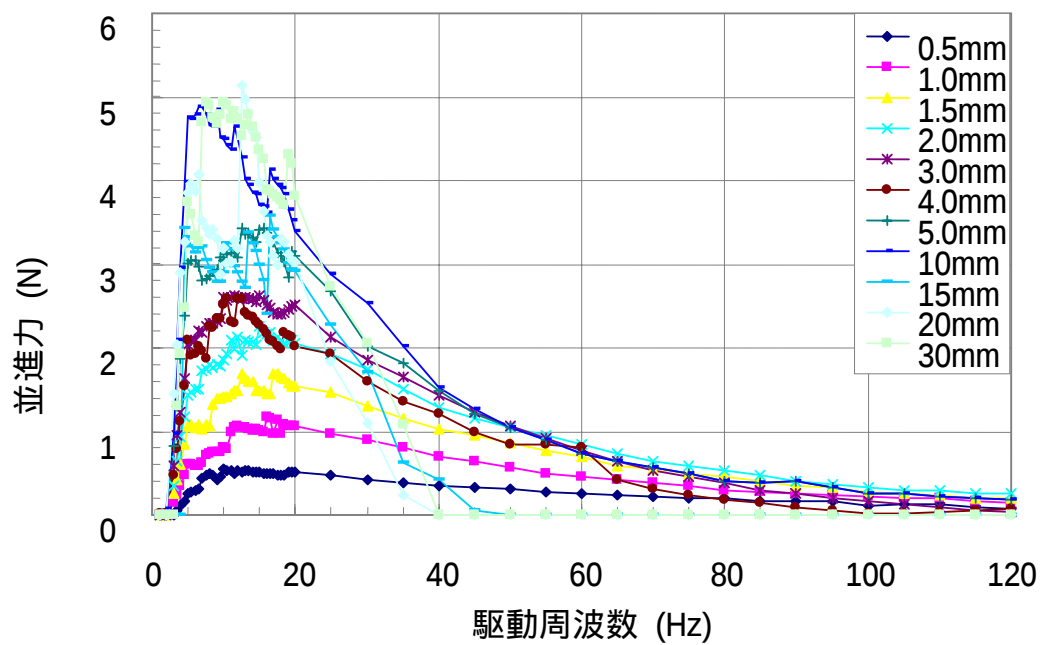


図 4.9 並進力と銅板(100 × 100mm)

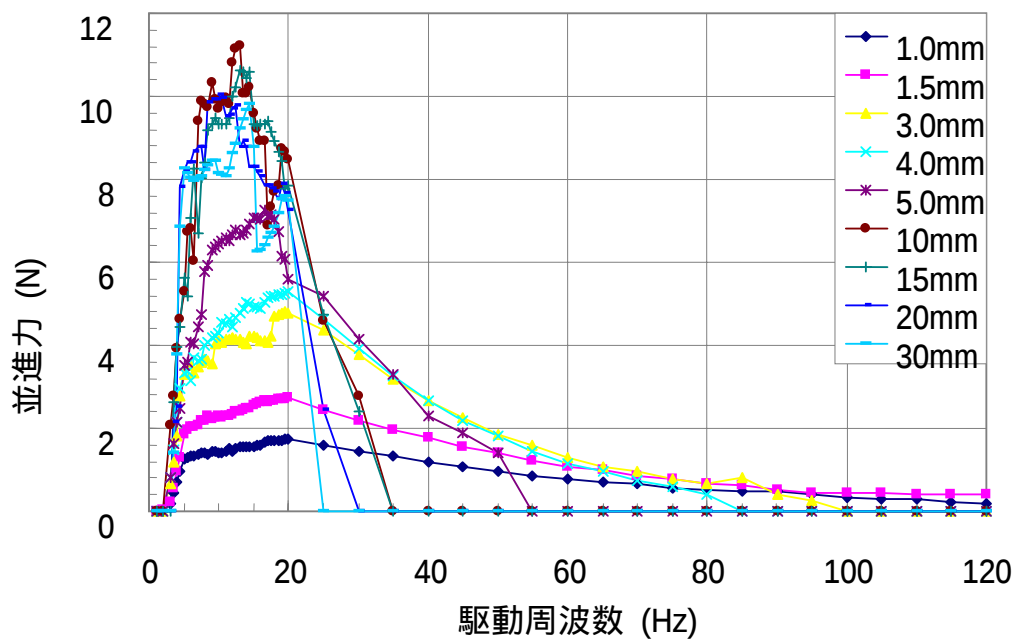


図 4.10 並進力と銅板(100 × 200mm)

定常応答での計測で得た値から，それぞれの二次導体における並進力の最大値を図 4.11 に示す．図 4.11 の縦軸は，各条件での並進力の最大値を示し，横軸に二次導体の厚みを取った．

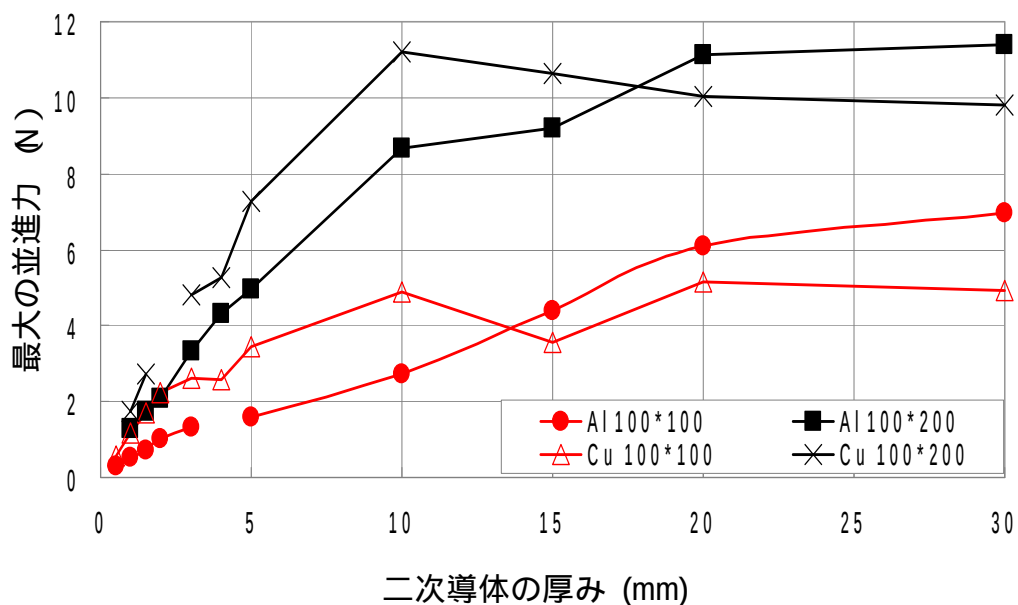


図 4.11 二次導体の厚みと並進力の最大値の変化

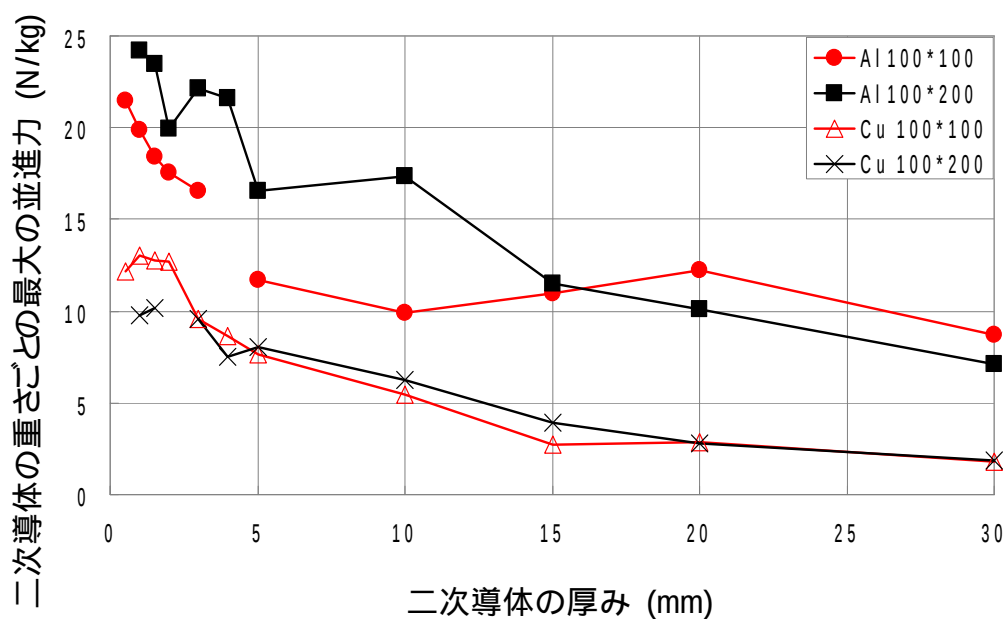


図 4.12 二次導体の厚みと単位質量あたりの並進力の変化

計測の結果，アルミ板，銅板共に厚みが大きくなるに従い，並進力の最大値も大きくなっていった．しかし，ある一定以上の厚みになると，並進力の最大値が飽和する結果が見られた．飽和した際の値は，面積が $100 \times 200\text{mm}$ のアルミ板では厚みが 20.0mm ，銅板では厚みが 10.0mm の付近で見られた．

これらより，本システムでは，約 11N の力覚提示が可能である事がわかった．これは，一般的な力覚提示装置である PHANTOM の力覚特性である 3N と比較して，高い出力が達成された．並進力の飽和に関して，文献[24]より，二次導体の厚みが増すにつれ導体内部の渦電流の密度が小さくなるという報告がある．さらに，厚みが大きくなる事で，二次導体の質量も大きくなる事から，導体を動かすだけの並進力を発生する事が難しく，並進力の飽和が起こったと考えられる．

そこで，並進力の最大値が，二次導体の慣性質量に対して，どの程度の加速度が作用可能であるかを確認するために，図 4.11 での各二次導体における並進力の最大値を，それぞれの二次導体の質量で除した結果を図 4.12 に示す．ここでの縦軸は，二次導体に作用可能な加速度を意味する．横軸は二次導体の厚みを取った．

算出の結果，二次導体の単位質量における並進力の最大値は，面積が $100 \times 200\text{mm}$ ，厚みが 1.0mm のアルミ板で $24(\text{N/kg})$ であった．また，導体の質量が軽いアルミ板の方が，並進力の発生に要する加速度がいずれの厚みにおいても，銅板より高い事がわかった．

したがって，二次導体をユーザインタフェースとして用いるためには，力覚提示の状況を考慮して設計する事が考えられる．しかし，薄い二次導体では，発生する並進力が弱いため，二次導体上に手や物体を置いた時，その質量を補償するだけの力覚提示ができない．そこで，ユーザへの大きな力覚提示が必要である状況においては， 10.0mm 程度の厚みのある銅板などを用いる．また，十分な応答が必要な時は，アルミ板を二次導体として使う事が考えられる．

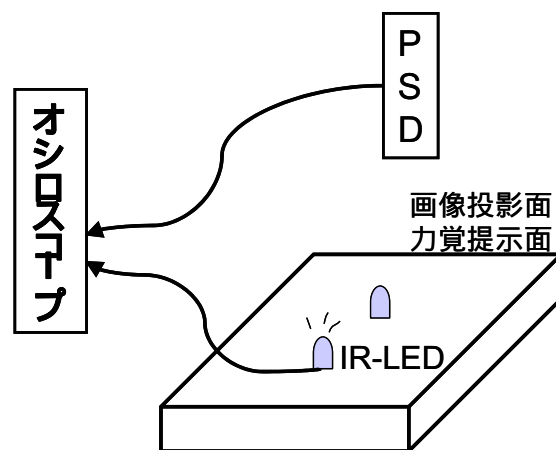
4.3 Proactive Desk の応答特性

本節の目的は，ユーザインタフェースの特性として，もう一つ重要な応答特性について調べる．そのため，Proactive Desk における過渡応答を，入力部分である二次導体の位置検出から，出力部分である力覚提示までの過渡応答時間を計測する事である．

そこで、システム全体の力覚提示に関する過渡応答時間を探るため、システムを図__の二次導体の位置情報の入力部(A)、PC による力覚提示の処理部(B)、LIM による二次導体への力覚提示の出力部(C)の三つの構成に分割して計測を行った。

4.3.1 入力(A)：PSD による LED の位置追跡

Proactive Desk における入力部分の過渡応答時間の計測方法として、Proactive Desk における位置検出の入力部に関する構成である IR-LED を LIM 上に二つ置き、スイッチを押す事で IR-LED の点灯が切り替わる仕組みを作った。これにより、LIM 上を IR-LED が移動するモデル化をした。一つの IR-LED の電圧変化をオシロスコープ (Tektronix 製 TDS3014B) で計測しておく。PSD は、光点の位置情報を XY 座標の座標値でアナログ信号として出力できるため、IR-LED の位置情報の一つをオシロスコープで取得した。先の IR-LED の電圧変化と PSD から出力された位置情報の一つの情報の変化を比較して、過渡応答により発生する差分を Proactive Desk の入力部分における応答が安定した所とした。実験の様子を図 4.13 入力部の計測に関する実験の様子、実際の波形を図 4.14 に示す。



光学的なスイッチングを模擬した。

図 4.13 入力部の計測に関する実験の様子

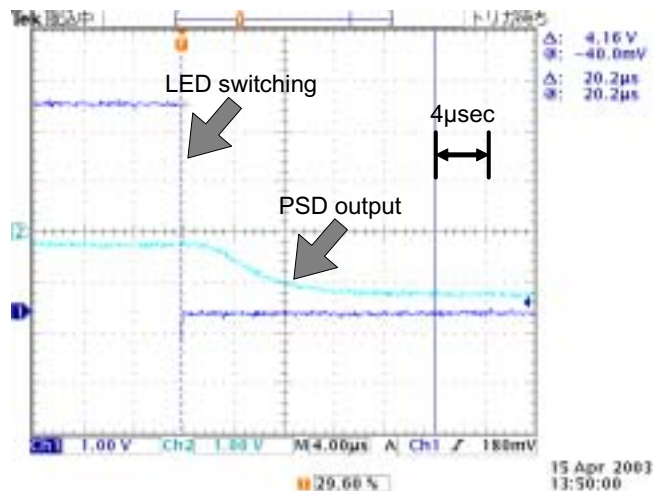


図 4.14 PSD による光点追跡の過渡応答時間

計測の結果，約 $12\mu\text{sec}$ のあたりで PSD からの応答が安定した．これは，後述する PC の力覚生成のループ処理を 1kHz で行っている事から，入力部における過渡応答時間は無視できるほどの非常に小さい時間であると考えられる．

4.3.2 処理(B)：力のレンダリング

PC 内での処理に要する時間(図 1(B))は，入力である PSD からの位置やボタンのクリック情報を A/D コンバータにより変換する時間，それを基に力のレンダリングを行う時間，さらに計算結果を D/A コンバータにて変換し出力するまでの時間の和となる．ここで，A/D，D/A コンバータにおける変換時間はそれぞれ $5, 10\mu\text{sec}$ と他の処理に比べると十分小さい事が既知である．すなわち，ここに要する処理時間は残りの力のレンダリングに必要な計算時間に左右されることになる．

本システムにて実行するアプリケーションではここでの処理時間が 1ms 以内に収まるように設計する．これにより一般的な力覚提示装置である PHANToM と同様の設計指針である 1kHz 程度の更新速度を実現している．例えば，比較的計算量の多い処理である映像のレンダリング処理については別 CPU にて処理することにより，速い更新速度が求められる力覚提示に必要な処理と切り離す．

4.3.3 出力(C) : LIM による力覚の提示

計測は，D/A コンバータからの指令値の変化をトリガとし，机上に固定した二次導体に並進力が発生するまでの所要時間の計測を行った．二次導体に作用する力を計測する手法は，前節と同じ力センサを用いた．実験の様子は，図 4.15 になる．以下，素材，厚み，駆動周波数を実験条件として計測を行った．



図 4.15 出力部の計測の様子

まず，二次導体の素材と厚みの違いによって過渡応答時間の変化を計測した．計測は文献[5]で，並進力の最大出力が出るインバータの駆動周波数が 15Hz 付近で観察されているため，本計測においても 15Hz で設定した．本計測で用意した二次導体は，面積が 100×200mm で，厚さ 3.0mm，10.0mm のアルミ板，厚さ 3.0mm，10.0mm の銅板の計 4 つである．それぞれ同じ条件下で 10 回の計測を行いその平均時間を得た．

結果を図 4.16 に示す．図 4.16 の縦軸は，応答時間の平均を取り，横軸には用意した二次導体の部材を示した．誤差棒は標本偏差を示している．結果に対し t 検定における危険率 5% で有意差が Al 10.0mm と Cu 3.0mm の組み合わせ以外で見られた．

素材の違いによる応答時間が変化する原因として，二次導体の磁気抵抗率が考えられる．アルミ板より磁気抵抗率の低い銅板では，導体の内部での磁束密度が大きくなるため，導体内での磁気抵抗が大きくなる．そのため，導体内部にできる磁気回路の影響で，並進力を発生させるだけの十分な渦電流が流れるまで時間がかかると考えられる．

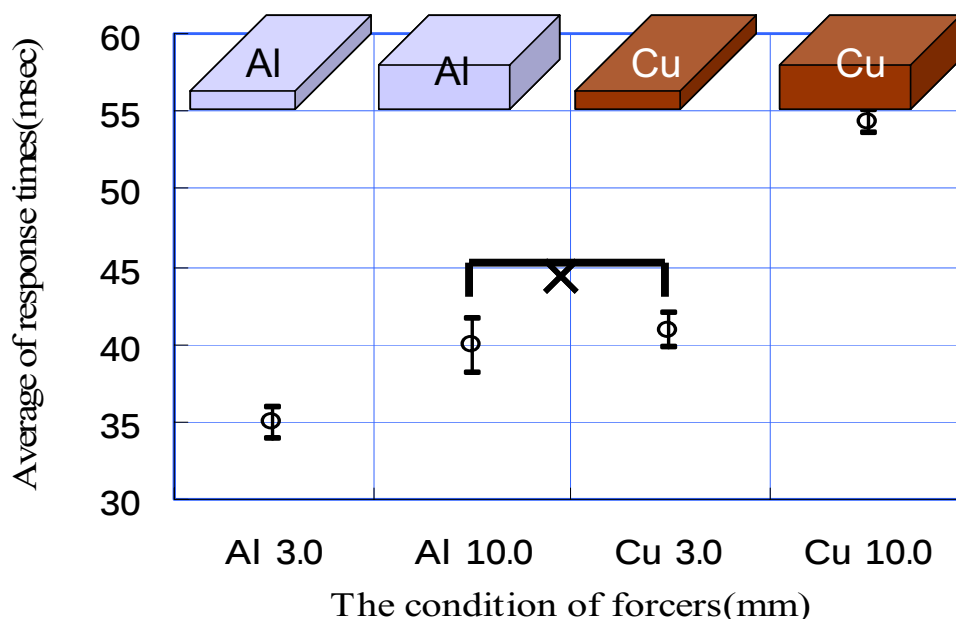


図 4.16 素材の違に対する過渡応答時間

さらに、より詳しく厚みの違いによる影響を探るために計測をした。用意した二次導体は、面積 100×200mm で、厚みが 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 20.0mm のアルミ板を用いた。他の計測条件は前節と同じで、それぞれ 10 回の計測を行いその平均値を得た。

計測の結果を図 4.17に示す。縦軸は、図 4.16と同じく、応答時間の平均であり、横軸に二次導体の厚みを取った。結果に対し t 検定の危険率 5%で、2.0mm と 3.0mm、3.0mm と 5.0mm の間で有意差が見られなかった。

二次導体の中を流れる渦電流は、二次導体の厚みが大きくなると渦電流の密度は小さくなる事がわかっている[24]。また、前節と同じように、厚みが大きくなるほど導体の磁束密度が大きくなるため、導体に磁気抵抗ができる事も考えられる。そのため、二次導体に並進力を作用させるための十分な量の渦電流が、導体内を流れるまで時間がかかると考えられる。

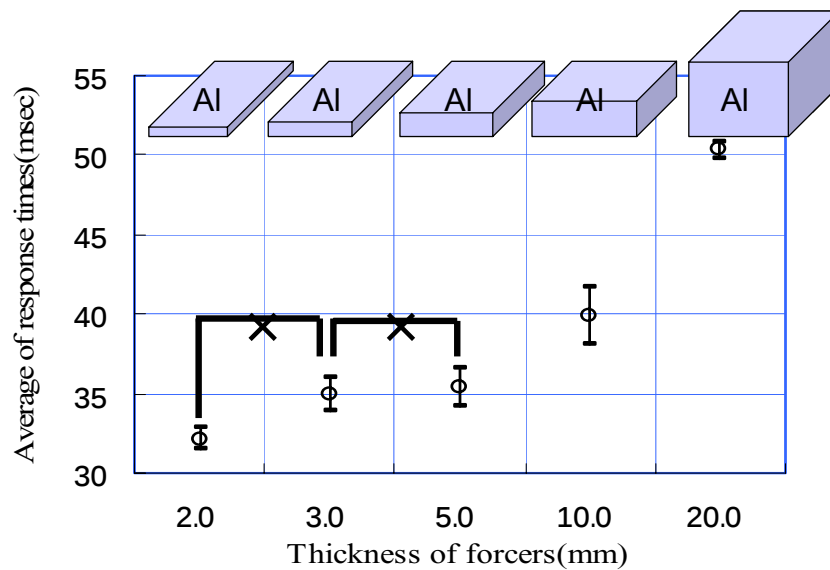


図 4.17 二次導体の厚みに対する過渡応答時間

最後に，LIM の一次側動作条件が応答時間に影響するかを探るために，インバータの駆動周波数を変えて，計測を行った．

ここでは，二次導体に面積 $100 \times 200 \text{ mm}$ ，厚みが 3.0 mm のアルミ板を用い，インバータの駆動周波数を $5, 8, 12, 15 \text{ Hz}$ で計測を行った．計測は，前節と同様にそれぞれ 10 回の計測を行いその平均値を得た．

計測の結果を図 4.18 に示す．図 4.18 の縦軸は前節と同じであり，横軸にインバータの駆動周波数を取った．計測結果を基に t 検定を行ったところ， 8 Hz と 12 Hz でのみ危険率 5% で有意差が得られた．インバータ制御による駆動周波数の変化が過渡応答時間に影響している事がわかった．特に $5\text{--}8 \text{ Hz}$ と $12\text{--}15 \text{ Hz}$ の二群に分かれ，大きい並進力が発生される高い周波数帯域の方に遅延が得られた．

文献[24]より，導体内に流れる磁界の浸透深さは，駆動周波数の影響を受ける報告を得ている．そのため，高い周波数においては，並進力を発生させるための十分な磁界が導体内部まで浸透し難い事が考えられる．

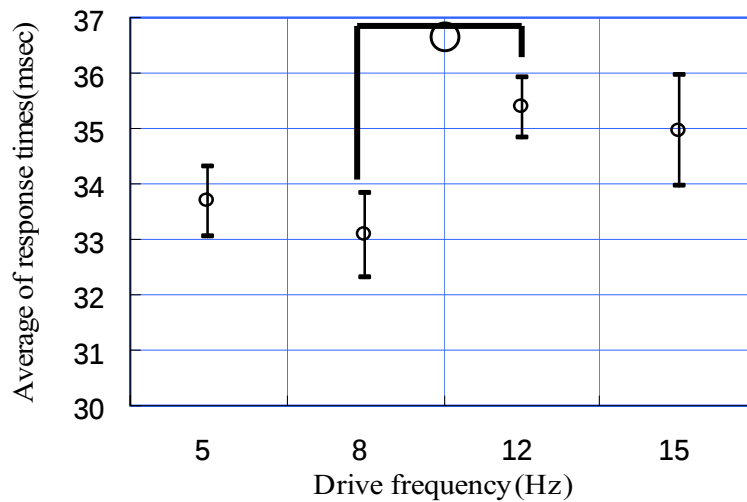


図 4.18 駆動周波数に対する過渡応答時間

これらの結果をまとめると以下のことが導かれる。

1. 二次導体内のうず電流が大きくなると、導体の磁界が流れにくくなる。
2. 二次導体の厚みが深くなるほど、導体内部に磁界が浸透しにくくなる。
3. 駆動周波数が高くなると、導体内の電気インピーダンスが増加し、うず電流が流れにくくなる。

4.4 応答特性に関する計測結果の評価

Proactive Desk 全体の時間特性に関して、システム全体の過渡応答における、入力から出力までの所要時間を計測した。結果、その応答のほとんどは出力にかかっている。LIM の特性によって、32msec から 55msec の所要時間が得られた。これは、汎用の力覚提示装置である PHANTOM が 1msec 以内での時間特性を達成していることから、本システムの時間特性に関して改善すべき箇所がある事を示している。今後の Proactive Desk の設計指針として、出力部分である LIM の磁界発生構造であるコア、コイル、インバータを個別に検討する必要がある。

4.5 考察

本章では、力覚情報を付加した情報キオスクに Proactive Desk を用いるため、まずその力覚提示装置をユーザインタフェース機器として用いる際に、どのような特性があるかを調べた。

一つは、ユーザへ力覚提示を行う際の二次導体の定常的な発生力の強度特性についてである。結果、厚みを大きくするほど発生力の強度特性が強くなり、最大で 11N 程度の発生力が確認できた。しかし、銅板で厚みが 10.0mm、アルミ板で 20.0mm を越ええると、発生力が約 11N で飽和する事がわかった。また、厚みのある導体自体の慣性補償のために、出力の大部分を使う必要がある。したがって、力覚提示を行う状況に応じて、強い並進力の強度特性を必要とするアプリケーションでは、厚みのある銅板を二次導体として使い、高い応答性が要求されるアプリケーションでは、アルミ板を用いるなど、力覚提示の状況に応じて、二次導体の特性を考慮する事が考えられる。次に、システム全体の、位置制御の入力部分から力覚提示までの出力部分の過渡応答時間を得るために計測した。システム全体の過渡応答時間は、LIM の特性によって、32msec から 55msec であった。この原因は、出力部である LIM の応答時間が大きく影響している。また、二次導体の素材、駆動周波数など、LIM の条件が変わる事で、応答時間が変化する結果を得た。原因として、導体内の磁気回路の抵抗が LIM の応答特性に影響していると考えられる。

しかし、本システムの利点として、机上に広く安定した力を生成できること、力覚提示に関する主要素を机の下に置くことでユーザ側からは見た目がシンプルなことがある。

第 5 章

結 論

本研究は、博物館・美術館などをモデルに、力覚情報を付加した情報キオスクを用いた際に、どのような情報を館内利用者に提案できるかを論じ、実際に3つの提案に対してプロトタイプを実装した。

まず、美術館・博物館の現状を紹介し、そこに情報キオスクがどのように貢献できるかを論じた。また、現在の日本における高齢化問題と照らし合わせて、情報キオスクのユーザインタフェースの状況をマルチモーダルインタフェースの観点から、概観した。結果、画面出力、音声合成・認識による研究は盛んに行われているが、触覚情報、特に人間の深部感覚に情報提示をする力覚情報を取り入れた研究はあまりないのが現状であった。

次に、情報キオスクに力覚情報を付加するために、現在ある力覚提示装置を紹介し、それぞれの利点などをまとめた。結果、大人数で同時に見ることができ、ユーザへの拘束感が少ない状態で力覚提示ができる Proactive Desk を本研究で扱う情報キオスク端末の機器として用いた。

実際に力覚情報を付加した際に、どのような情報をユーザに提示できるか、概念の触知化、物理現象の体感学習、仮想拘束力による作業（操作）支援、情報のパーソナル化、以上4つの情報提示について提案をし、実際に三つの実装を行った。

最後に、情報キオスクで Proactive Desk を用いるために、そのユーザインタフェースとしての特性を調べ、どれだけの力を提示することができるか、また、入力から出力までの応答時間はどうなっているのかを計測した。

本章では、これらの成果と今後の展望について述べる。

5.1 本研究の成果

本研究により，Proactive Desk のユーザインタフェース特性が明らかになった．現在，様々な力覚提示装置があるが，その中のいくつかは現在も研究中であり，現在のPCのように様々な場所で普及するには至っていない．その原因として，力覚提示装置のハードウェア上の問題もさることながら，ソフトウェアなどコンテンツに関しても，効果的なアプリケーションが必要であると考えられる．

本研究では，美術館・博物館における情報キオスクに力覚を付加した場合，1．どんな場所で，2．どういった人を対象に，3．どのような情報提示ができるかを提案したものである．一つ目の場所に関しては，博物館・美術館の入り口に置かれる館内案内用，展示物の近くに設置される展示解説用が考えられる．館内案内用は，その建物に来るほとんどの人が訪れる場所であり，博物館・美術館に入って最初に出会う場所である．展示解説用は，解説対象となる展示物と同じフロアに置き，展示物と情報キオスクを交互に見るようなスタイルが望ましいと考えられる．

二つ目の人に関しては，博物館・美術館の性質上，子供からお年寄りまで幅広い年齢層の利用が見込まれる．そのため，情報処理機器に不慣れな人も慣れた人もいるため，誰もが直感的に操作できる情報キオスクが求められる．また，来場者は単独で来るわけではなく，複数人のグループで来ることもあるため，独立したブースのようにしきるのではなく，館内案内用，展示解説用それぞれに関しても，複数人が同時に情報を享受できる仕様であることが望まれる．

最後に三つ目に関しては，概念の触知化，物理現象の体験，操作支援では，情報のパーソナル化などが挙げられる．人間の思考など，言葉や視覚的に表現できないものを触覚情報として提示することも一つの手段であると考えられる．物理現象の体感学習では，普段身近に起こっていないながら，その現象が極小，極大のどちらかで人間には感じるできないものを，コンピュータ上でシミュレートし，触覚・力覚情報として提示することが考えられる．操作支援に関しては，ユーザがディスプレイの上で次の動作に悩んでいるときに，ユーザの腕を情報キオスクが直接動かすことで，ユーザに次の行動への気づきを与えることが考えられる．最後の情報のパーソナル化は，触覚情報を感じることができるのは，触覚を伝える機器を持っている人だけであるため，携帯のバイブレーションのように周囲には気づかれず，その使用者本人にのみ情

報が伝達できる．この事は，利用者が何かしらの操作に誤った際でも，周囲の人には気疲れず，自分にだけわかることから情報の守秘性も考えられる．

次に，本研究で用いた力覚提示装置である Proactive Desk のユーザインタフェース特性を計測し，本システムが情報キオスクとして用いることができるかを探った．

一つは，ユーザへ力覚提示を行う際の二次導体の定常的な発生力の強度特性についてである．結果，厚みを大きくするほど発生力の強度特性が強くなり，最大で 11N 程度の発生力が確認できた．しかし，銅板で厚みが 10.0mm，アルミ板で 20.0mm を越ええると，発生力が約 11N で飽和する事がわかった．また，厚みのある導体自体の慣性補償のために，出力の大部分を使う必要がある．したがって，力覚提示を行う状況に応じて，強い並進力の強度特性を必要とするアプリケーションでは，厚みのある銅板を二次導体として用い，高い応答性が要求されるアプリケーションでは，アルミ板を用いるなど，力覚提示の状況に応じて，二次導体の特性を考慮する事が考えられる．

次に，システム全体の，位置制御の入力部分から力覚提示までの出力部分の過渡応答時間を得るために計測した．システム全体の過渡応答時間は，LIM の特性によって，32msec から 55msec であった．この原因は，出力部である LIM の応答時間が大きく影響している．また，二次導体の素材，駆動周波数など，LIM の条件が変わる事で，応答時間が変化する結果を得た．原因として，導体内の磁気回路の抵抗が LIM の応答特性に影響していると考えられる．

しかし，本システムの利点として，机上に広く安定した力を生成できること，力覚提示に関する主要素を机の下に置くことでユーザ側からは見た目がシンプルなことがある．本研究では，この利点を活かして研究を遂行した．

本研究における提案は，情報キオスクをケースに，力覚を付加した際のアプリケーションを提示したが，これは一つのプロトタイプでしかなく，様々なケースでそれぞれに適した力覚情報を提示するアプリケーションがあると考えられる．この提案が，今後の力覚提示アプリケーションの一つの指針として，貢献できれば幸いである．

5.2 今後の展望

本論文の現状は，力覚提示装置を用いて，力覚情報を情報キオスクに付加した際にどのような情報提示ができるかを探った段階である．したがって，今後の一番の課題

としては、客観的な手法の評価を行い、本研究で提案したモデルがユーザにどれくらい認識できるか、妥当であるかを確認しなければならない。

また、本研究で力覚提示装置として利用した Proactive Desk 以外の特性を活かした実装を行うことで、より力覚情報が効果的に提示できる可能性が考えられる。

謝 辞

本研究は多くの方のご協力のもとに成り立っています。まず、ご多忙の中、貴重な時間を割いて丁寧親切な御指導、御鞭撻と格別のご配慮を賜りました、指導教官の北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 知識構造論講座の杉山公造教授には大変お世話になりました。ここに深く感謝の意を示します。

有益なご指導やご助言を多く頂戴しました同講座の下嶋篤助教授、副テーマの指導教官であった西本一志助教授に深く感謝いたします。

本研究は、(株)ATR メディア情報科学研究所における学外実習生時におこないました。まず、研究の機会を与えて頂いた、同研究所 第三研究室長 鉄谷信二博士、京都工芸繊維大学 繊維学部 デザイン経営工学科 宮里勉教授に感謝致します。また、同研究所において大変お世話になった野間春生博士、柳田康幸博士、吉田俊介博士に深く感謝致します。

本研究内における実装にご助力頂いた(株)SCCの西城守氏に深く感謝致します。

また忙しい中、実験や助言その他様々な面で協力してくださった(株)ATRメディア情報科学研究所第三研究室的皆さん、知識構造論講座の皆さんに心より感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 情報処理機器・ソフトウェア開発者のためのアクセシビリティ指針解説書，電子情報技術産業協会，2002.3．
- [2] 寺島，「美術館・博物館の IT 化」，
<http://japan.internet.com/research/20020422/print1.html>
- [3] 沼田，触覚提示が可能なペン型入力インタフェースに関する研究，筑波大学大学院博士課程 システム情報工学研究科修士論文，2002．
- [4] Shneiderman B et al，Improving the accuracy of touch screens an experimental of three strategies，Proceeding. of CHI'88，pp. 27-32 (1988)．
- [5] シャープ技報，マルチモーダルインタフェース，第 77 号・2000 年 8 月．
- [6] 吉岡 他，音声認識機能を含むマルチモーダルインタフェースをもつ住所入力システムの開発と評価，電子情報通信学会論文誌，J80-D- No. 5，pp. 1007-1015 (1997)．
- [7] 谷内田，顔とジェスチャの認識% システム制御情報学会論文誌，Vol. 44，No. 3，pp. 97-101 (2000)．
- [8] 速水 他，身振りと言話のマルチモーダルデータベース，信学技報 PRMU97-95，pp. 1-8 (1997)．
- [9] 湯浅 他，マルチモーダル対話ベースに基づく音声と身振りの認識系統合モデル，情報処理学会論文誌，Vol. 37 No. 6，pp. 1049-1060 (1996)．
- [10] 松本 他，リアルタイム顔トラッキングシステム，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '99 講演論文集 No.99-9，(1999)．
- [11] I, Poupyrev et al. TouchEngine，A Tactile Display for Handheld Devices，CHI'2002 Ext. Abstracts 2002 ACM，pp. 644-645．
- [12] Fukumoto, M et al，ActiveClick: TactileFeedback for Touch Panels，CHI'2001 Ext.

- Abstracts 2002 ACM , pp. 121-122 .
- [13]館 監修, 佐藤 編, 「バーチャルリアリティの基礎 2 人工現実感の設計」, 培風館, 2000 .
- [14]SensAble Technologies, Inc , PHANToM , <http://www.sensable.com/>
- [15]S. Walairacht et al , Modeling Virtual Hand with Haptic Interface Device , The Ninth International Conference on Artificial Reality and Tele-existence , pp. 233-236 .
- [16]Immersion Corporation , CyberGrasp , <http://www.immersion.com/>
- [17]H. Iwata et al , FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics , Proceeding of SIGGRAPH2001 .
- [18]Brave, S et al , Tangible interfaces for remote collaboration and communication , Proceeding of ACM Computer Supported Cooperative Work '98 , pp. 169-178 .
- [19]Pangaro, G et al , The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces , Proceeding of ACM Symposium on User Interface Software and Technology '02 , pp. 181-190 .
- [20]星野 他 , Tactile Driver: 触感を忠実に再現するタッチパネルシステム , WISS2002 .
- [21]Noma, H et al , The Proactive Desk: A New Force Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor , IEEE VR2003 , pp. 217-224 .
- [22]佐伯, 「新・コンピュータと教育」岩波親書, 岩波書店, (1997) .
- [23]正守 他, 力覚を用いた遠隔書道教示システム, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, pp. 217-220 (1999) .
- [24]野間 他, 二次元リニアモータによるバーチャルデスクトップ用の力覚提示装置の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌第7回論文集, pp. 507-510 , 2002 .
- [25]野間 他, Haptic Interface による思考支援システム, 第13回ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.11-16 (1997) .
- [26]山下 他, アンモナイトを利用した化石の触覚実験とその地球科学教育学的意義, 神奈川県立博物館研究報告(自然科学) No. 30 , pp. 41-47 (2001) .

発 表 論 文

第一著者

- [1] 柿田充弘，柳田康幸，鉄谷信二：背中への分布型振動触覚を用いた文字情報の提示，2003 年電子情報通信学会総合大会講演論文集，A-16-23，p.318 (2003.3) .
- [2] 柿田充弘，吉田俊介，野間春生，鉄谷信二：二次元リニア誘導モータの特性に基づいた Proactive Desk の設計に関する考察，ヒューマンインタフェース学会研究報告集，Vol.5，No.3，pp.83-88 (2003.6) .

第一著者以外

- [1] 吉田俊介，柿田充弘，野間春生，鉄谷信二：Proactive Desk: 力覚提示が可能なデスクトップ操作環境，インタラクシオン 2003，情報処理学会，JPSJ Symposium Series Vol.2003, No.7，pp.211-212 (2003) .
- [2] Shunsuke Yoshida，Mitsuhiro Kakita，Haruo Noma，Nobuji Tetsutani，Jun Kurumisawa：Sumi-Nagashi，Proceeding of SIGGRAPH2003，Emerging Technology .
- [3] 吉田俊介，柿田充弘，野間春生，鉄谷信二：Proactive Desk の実装と応用 - 流れる絵画「Sumi-Nagashi」の体験 -，日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会論文集，pp.3-6, (2003.9) .
- [4] Yasuyuki Yanagida，Mitsuhiro Kakita，Robert W. Lindeman，Yuichiro Kume，Nobuji Tetsutani：Vibrotactile Letter Reading Using a Low-Resolution Tactor Array，Proceedings of 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptics Symposium 2004)，March 2004 .