

2009年度 卒業論文

# 視触覚融合タッチパネル

2010年2月15日

大阪大学 基礎工学部  
システム科学科 生物工学コース  
繁田 悠

主査: \_\_\_\_\_ 日付: \_\_\_\_\_

副査: \_\_\_\_\_ 日付: \_\_\_\_\_



# 概要

人工的に現実感を作り出す技術を VR(Virtual Reality) と呼ぶが、既存の体性感覚提示デバイスは、物体を指で押した場合の、接触面積と反力の変化によって生じる硬さを提示することや、ヘッドマウントディスプレイなどを使用せずに、映像提示空間と力触覚提示空間を一致させることは困難とされている。

本研究では、映像の提示部と押し込んだ時の硬さを表現する力覚の提示部を一体化した視触覚融合タッチパネルを開発した。ユーザが映像提示タッチパネルに触れ、押し込んだ場合に、押し込んだ力に応じて接触面積を変化させることによって硬さを提示する。指先の接触面積と反力の関係は、接触面積が決定すれば反力が決定するが、タッチパネル表面の張力を変化させることで等しい反力の時に様々な接触面積に変化させる。

全体のシステムは、力覚提示可能なディスプレイの上に触覚提示可能なゴムシートを置き、遮蔽の生じない背面投影方式を用い、ディスプレイの背面側にプロジェクタを配置することで構成した。また、力覚生成、及び触覚生成にはモータを用い、それぞれディスプレイとモータ、透明柔軟ゴムシートとモータを糸で接続した。映像を背面投影可能な環境で、指の位置検出と接触面積を獲得するために、FTIR(Frustrated Total Internal Reflection) 方式で赤外線の反射をカメラで計測し、2 値化、ラベリング処理を行い、中心座標と表面積を計算した。

検証では、仮想物体の硬さを提示するために、反力の生成は PWM(Pulse Width Modulation) 制御によって提示できることを確認した。また、触覚を提示するディスプレイ表面の剛性の変化は、モータで透明柔軟ゴムシートに張力を加えることで実現可能であることを確認した。

キーワード：人工現実感, 力触覚提示, FTIR, PWM

# Abstract

VR(Virtual Reality) is the technology to allow human to perceive realistic environment. It is difficult for existing haptic devices to let users perceive that is determined not only by force but also a contact area between a finger and an object when pushing the object. It is difficult to unit visual and haptic presentation spaces at the same time without a head mounted display and so on.

In this study, the hardness presentation display which unified visual and haptic presentation spaces was developed. While a user touches and pushes the visual presentation display, the contact area between a fingertip and display changes. Hardness was presented by controlling a contact area depending on the contact force. The contact area of the fingertip relates to the force. Controlling the tension of surface of the visual display changes the contact area.

In the whole system, the rubber sheet that enabled to present the tactile was putted on the display that the force presentation was possible and reflected a picture by back projection method from the bottom of the display. The FTIR(Frustrated Total Internal Reflection), which measures reflected infrared light by a camera, was applied to get position and the contact area of the finger. The image processing procedures, binarization, labelling, were applied to calculate center coordinate and contact area. Pulling the display by PWM control of motors generated reaction force. Controlling the tension of transparent flexible rubber sheet enabled a user to perceive hardness of a virtual object.

Keywords: Virtual reality, Haptic display, FTIR, PWM





# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	力触覚の人工現実感技術	2
2.1	視覚と力触覚	2
2.2	感覚提示	3
2.3	硬さ提示	5
第3章	視触覚提示システム	7
3.1	視触覚提示システムの構成	7
3.2	力覚提示装置の制作	9
3.3	触覚提示装置の制作	14
3.4	映像提示装置の制作	18
第4章	実装システムと結果	23
4.1	実装システムの構成	23
4.2	システムの実装環境	28
4.3	結果と考察	29
第5章	まとめ	36
	謝辞	37
	参考文献	38

# 目 次

2.1	人間の硬さの認識モデル [18]	2
2.2	力覚提示デバイス	3
2.3	力触覚提示デバイス	3
2.4	視触覚融合デバイス	4
2.5	視触覚提示デバイス	4
2.6	物体との接触時における物体と指先の変形	5
2.7	力覚提示	5
2.8	力触覚提示	5
2.9	本研究における力触覚提示	6
3.1	システムの構成	7
3.2	システムの外観イメージ	8
3.3	力覚提示システム	9
3.4	動摩擦力	10
3.5	シリアル通信とパラレル通信	11
3.6	力覚提示部のモータの駆動回路	11
3.7	ロータリエンコーダの回路	12
3.8	パルス出力	13
3.9	デューティ比	13
3.10	電流-デューティ比特性	14
3.11	システム図	15
3.12	ゴムシートの変形	16
3.13	触覚提示部のモータの駆動回路	17
3.14	電流-デューティ比特性	17
3.15	接触面積-押下力特性	18
3.16	光の屈折	19
3.17	FTIR による指先接触位置検出 [25]	19
3.18	カメラとディスプレイの構造	20
3.19	ラベリング領域の中心座標	20
3.20	提示する映像のイメージ	21
3.21	プログラムの流れ	22
4.1	視触覚融合タッチパネルシステム	23

4.2	力覚提示システム . . . . .	24
4.3	触覚提示システム . . . . .	24
4.4	実装した回路 . . . . .	25
4.5	シリアルインタフェース . . . . .	25
4.6	映像覚提示システム . . . . .	26
4.7	アクリルパネル . . . . .	27
4.8	赤外化カメラ . . . . .	27
4.9	プロジェクタ . . . . .	27
4.10	押下力を固定した時の張力と接触面積の関係 . . . . .	30
4.11	張力と傾き、切片の関係式 . . . . .	31
4.12	3N の押下力を加えた時の張力と接触面積の関係 . . . . .	31
4.13	位置、及び接触面積の計測 . . . . .	32
4.14	提示映像 . . . . .	33
4.15	投影映像 . . . . .	34

# 表 目 次

3.1 駆動回路の機能 . . . . .	12
3.2 回転方向 . . . . .	13
4.1 コンピュータの仕様 . . . . .	28
4.2 使用道具 . . . . .	28
4.3 設定したパラメータ . . . . .	29
4.4 計測及び計算したパラメータ . . . . .	29

# 第1章 はじめに

ヒトは目で捉えた物体に直接触ることで、物体の物理的性質を知覚する。特に、ヒトが物体を押し込むといった操作においては、対象物体の変形によって得られる視覚、対象物体の変形により指先の接触面積が変化することによって得られる触覚、対象物体から指先に働く反力によって得られる力覚などの情報によって物体の物理的性質は知覚される [1]-[3]。

計算機環境において、目で映像を見て直接触るという操作は、操作空間と映像提示空間が一致している必要があるため、入力装置として一般的であるキーボードやマウスでは行なえない。また、映像提示装置と入力装置が一体化していない場合、装置全体として大型化する傾向にある。タッチパネルは表示装置と位置入力装置を組み合わせ、画面上の表示を押すことで機器を操作することが可能である。しかし一方で、タッチパネルは押しボタンに比べ、力触覚情報が少ないため誤動作の問題がある [4]。

ディスプレイに押しボタンの感覚を提示することや手術のシミュレーションなどの医療訓練において患者の疾患部を直接触ることは難しい。直接提示することが困難、または不可能な環境情報をヒトに擬似的に知覚させる技術としてVR(Virtual Reality)が存在する。VRは近年急速に成長を続ける技術であり [5]、力触覚を刺激するデバイスも開発されてきている [6]-[11]。VRにおいて人工的な現実感を高めるためには、体験可能な仮想空間の構築、五感のいずれか、または複数に働きかけて得られる没入感、対象者の位置や動作に対する感覚へのフィードバック、対象者が世界に働きかけることができる対話性などの構成要素が重要となる [12]。

力覚と触覚を統合した力触覚提示デバイスには、手が仮想物体に接触する面に力触覚提示を行なう対象指向型のデバイス [13] や、外骨格型のデバイスにピンマトリックス型ディスプレイや接触面積制御を行なう触覚ディスプレイを統合したデバイス [14],[15] などが存在する。しかし、力覚提示デバイスの構造状、目で捉えて触るという動作に例えられる、力触覚情報の統合的提示に加え、視覚情報空間と力触覚提示空間を一致して提示することには課題が残る。一方で、目で見て操作の行なえる視覚空間と力触覚提示空間を一致させたタッチパネルに力触覚を統合したデバイスには、タッチパネルを振動板として振動覚を提示するハプティックパネル [16] や、タッチパネルをソレノイドモータが上下させることで、力覚情報を提示する視触覚ディスプレイ [17] が存在するが提示できる力覚や触覚に限られるといった課題がある。

本研究では、映像空間と力触覚提示空間の一致した、硬さを提示する視触覚融合タッチパネルを開発することを目的とする。物体から指への反力を表現する対象指向型力覚提示デバイスに物体の表面形状の変形による指の接触面積の増加を表現する触覚提示デバイスを統合することで様々な物体の硬さを表現可能な力触覚提示デバイスを開発し、映像の背面投影によって仮想物体の映像提示空間と力触覚提示空間を一致させて提示することを可能にする。

## 第2章 力触覚の人工現実感技術

本章では、視覚と力触覚、従来のデバイスについて述べる。

### 2.1 視覚と力触覚

ヒトが外界を感知するための感覚機能は、視覚、聴覚、体性感覚、味覚、嗅覚の五つの感覚に分けられる。さらに、体性感覚は、触覚、温覚、冷覚、痛覚などの皮膚感覚と、位置覚、運動覚、抵抗覚、重量覚などの深部感覚に分類される。ヒトが指で物体を押し込む操作について考えてみると、指で押し込むことによる対象物体の変形から得られる視覚情報と対象物体から指先に働く体性感覚情報が重要となる。押し込み操作における物体の硬さの認知のみについて考えると、温覚や冷覚といった体性感覚は考慮しなくてよい。物体に指先で触れた場合にヒトが感じる物体の硬さの認知は、佐々木らによると図 2.1 のモデルによって仮定できる [18]。対象物体を触る力に関する情報（力知覚）は、腱紡錘などの固有感覚受容器から生じる筋収縮力情報と指先圧受容器の発火頻度の増加から得られる。対象物体の変形に関する情報（変形知覚）は、固有感覚受容器から得られる指先位置の変化、物体に指先が埋没することにより発火する圧受容器数が変化することで生じる接触面積の変化、視覚によって捉えられる物体の変形、及び指先位置の変化の四つから得られる。

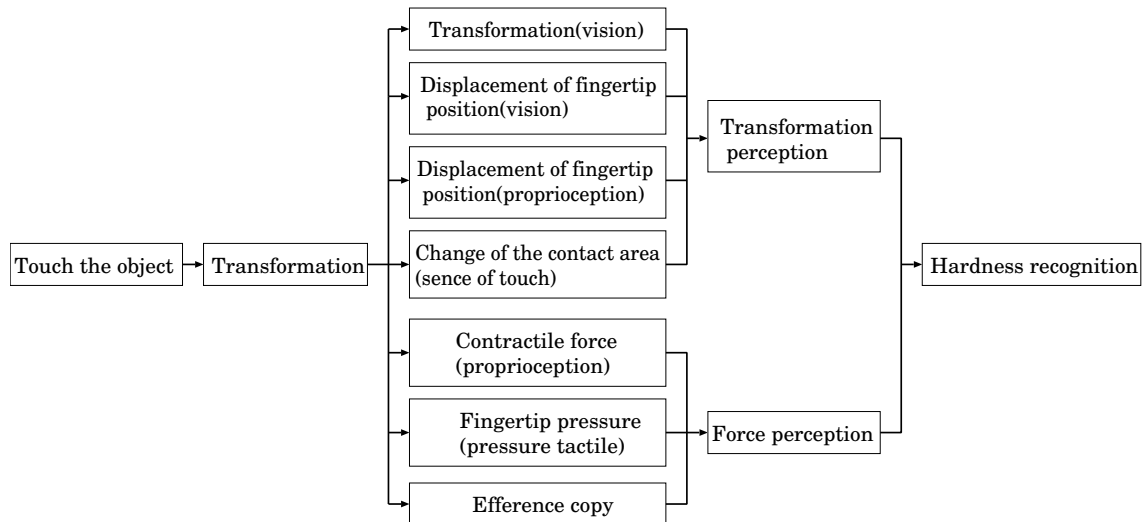


図 2.1: 人間の硬さの認識モデル [18]

対象物体の変形における力触覚情報は、筋収縮力と指先圧から力覚情報が得られ、指先位置の変化と接触面積の変化から触覚情報が得られ、物体の変形と指先位置の変化によって視覚情報が得られる。従って、視覚情報と力触覚情報を融合することによって物体の硬さを認知している。

## 2.2 感覚提示

### 2.2.1 力触覚提示

操作空間と映像提示空間の一致を考えない場合、これまでに様々な力触覚提示デバイスが開発されている。代表的なものとして、図 2.2 に示すような仮想物体をつかんだ感触を提示することができる外骨格型の CyberGrasp[19]、ペン等の把持部を媒介にして力覚提示を行なう道具媒介型の PHANToM[20] などの力覚提示デバイスが存在する。



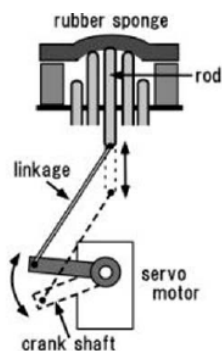
(a) CyberGrasp[19]



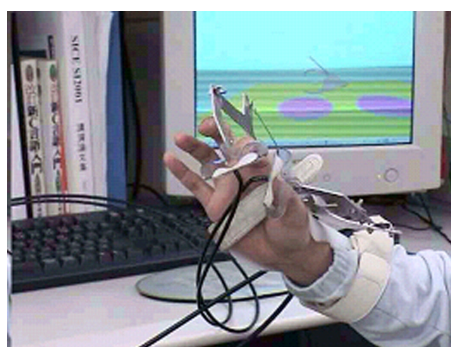
(b) PHANToM[20]

図 2.2: 力覚提示デバイス

一方、図 2.3 に示すような、仮想物体に接触する面に力触覚提示を行なう対象指向型の FEELEX[13] や、外骨格型のデバイスに接触面積制御を行なうディスプレイを統合したデバイス [15] などの力覚と触覚を融合して提示するデバイスも存在する。



(a) FEELEX[13]



(b) 外骨格型デバイス [15]

図 2.3: 力触覚提示デバイス

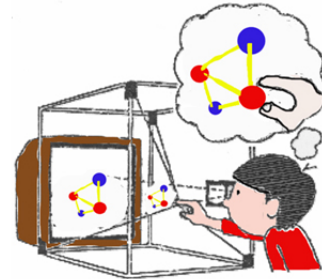


## 2.2.2 視触覚提示

視覚提示空間と力触覚提示空間を一致させた力触覚提示デバイスとしては、図 2.4 に示すモータで糸を引くことによって力覚を提示する SPIDAR[22] が存在する。SPIDAR は糸を使用するためデバイスの奥に配置したモニタ画像を遮蔽することなく力覚提示することが可能である。



(a)SPIDAR[21]



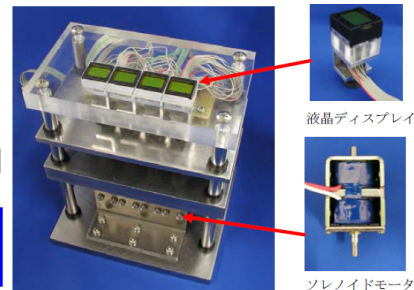
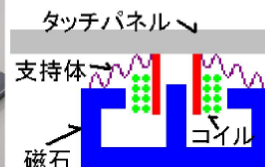
(b)SPIDAR イメージ [22]

図 2.4: 視触覚融合デバイス

視覚提示空間と力触覚提示空間を完全に一致させた力触覚提示デバイスとしては、図 2.5 に示すタッチパネルに触覚提示デバイスを融合した触覚提示タッチパネルが存在する。ハプティックパネル [16] はタッチパネルを振動板とする電動型スピーカーのような構造になっており、視覚情報に加えて、振動の触覚情報を提示している。一方、視触覚ディスプレイ [17] はタッチパネルをソレノイドモータが上下させることで、力覚情報を提示している。



(a) ハプティックパネル [16]



(b) 視触覚ディスプレイ [17]

図 2.5: 視触覚提示デバイス

## 2.3 硬さ提示

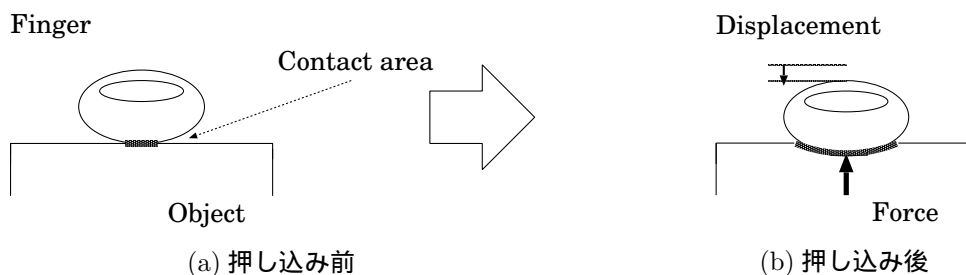


図 2.6: 物体との接触時における物体と指先の変形

対象物体を指先が押し込むと、図 2.6 に示すように対象物体の変形により指先位置、及び指先の接触面積が変化し、対象物体から指先へ反力が生じる。

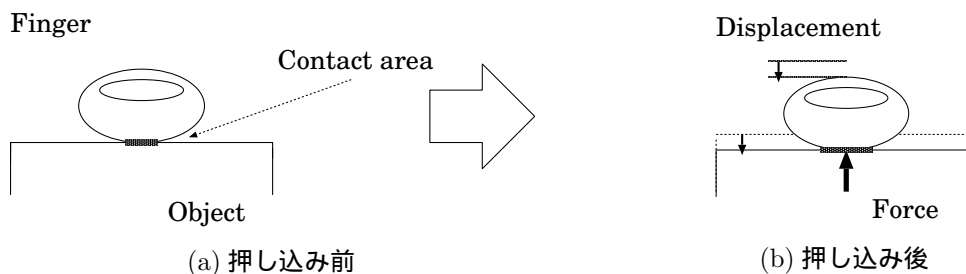


図 2.7: 力覚提示

CyberGrasp[19] や、PHANToM[20] などの従来の力覚提示デバイスによる硬さの提示は、図 2.7 に示すように位置の変化と指先への反力のみであり、接触面積の変化は表現されていない。

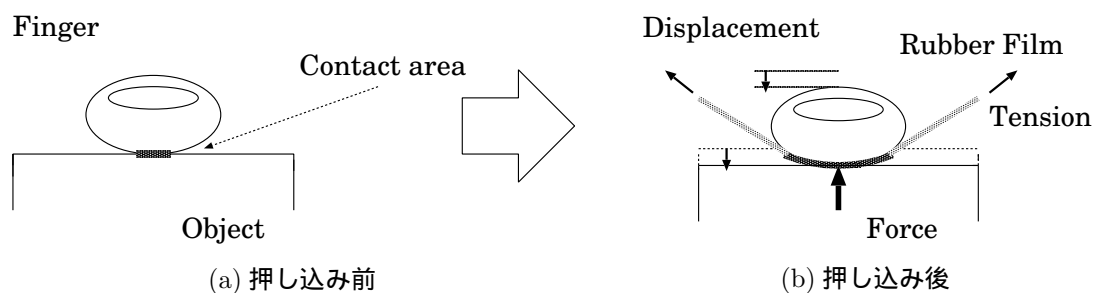


図 2.8: 力触覚提示

FEELEX[13] は、提示部の真下に小型モータによって駆動する棒をアレイ状に配置する構造であり、提示できる力触覚は棒の太さに依存する。骨格型のデバイスに接触面積制御を行なうディスプレイを統合した力触覚提示デバイスは、図 2.8 に示すように、指先の押下力に応じて指先の接触面積をゴム膜などで動的に制御することで、指の物体への埋没を提示しているが、ゴム膜と指の接触面積は球体と球体が接触した時の物体の曲率から求めるヘルツ理論により求めており、接触面積を直接計測することや映像提示空間と力触覚提示空間を一致させることは困難である。また、視覚と触覚を融合した柔軟シートを用いた触覚ディスプレイも存在するが、シートを斜め上に引き上げる力のみで押下力は提示できていない [23]。

映像提示空間と力触覚提示空間が一致したデバイスであるハプティックパネル [16] は、パネルを指先が押し込む感覚を振動によって表現しているが、押し込んだ感覚が提示できているとは言い難い。SPIDAR[22] や視触覚ディスプレイ [17] は、図 2.7 に示すように位置の変化と指先への反力のみであり、接触面積の変化は表現されていないことや、ディスプレイが分割されている問題点がある。

本研究では、図 2.9 に示すように、アクリル板と赤外線的全反射の性質を利用した接触位置検出方法である FTIR(Frustrated Total Internal Reflection) 方式 [24] のタッチパネルの上に柔軟ゴムシートを置き、指の接触面に対して水平方向に張力を加えることで、図 2.7 のような指先位置の変化と反力提示に加えて、接触面積の変化を表現する。

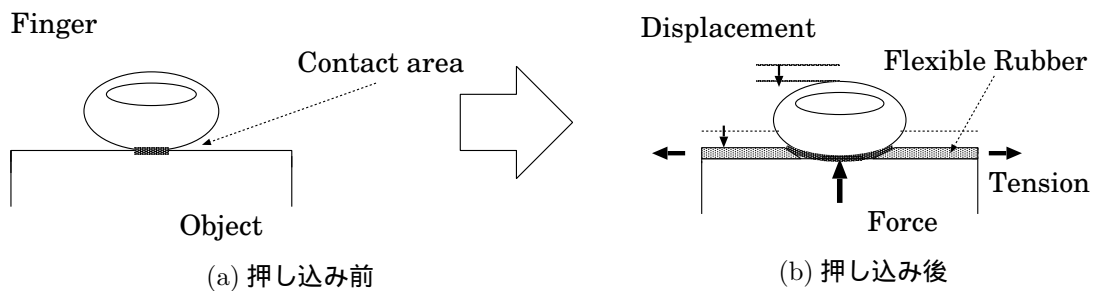


図 2.9: 本研究における力触覚提示

# 第3章 視触覚提示システム

本章では、制作した力覚提示部、触覚提示部、映像提示部について述べる。

## 3.1 視触覚提示システムの構成

本研究では、仮想物体の視覚情報と硬さに関する力触覚情報を融合して提示することを目的とした視触覚融合タッチパネルの制作を行なう。接触面積と反力を制御することで硬さを提示する。図 3.1 にシステムの構成、図 3.2 にシステムの外観イメージを示す。システムは、指先に反力を与える力覚提示部、指先の接触面積を変化させる触覚提示部、仮想物体が変形する映像提示部によって構成される。

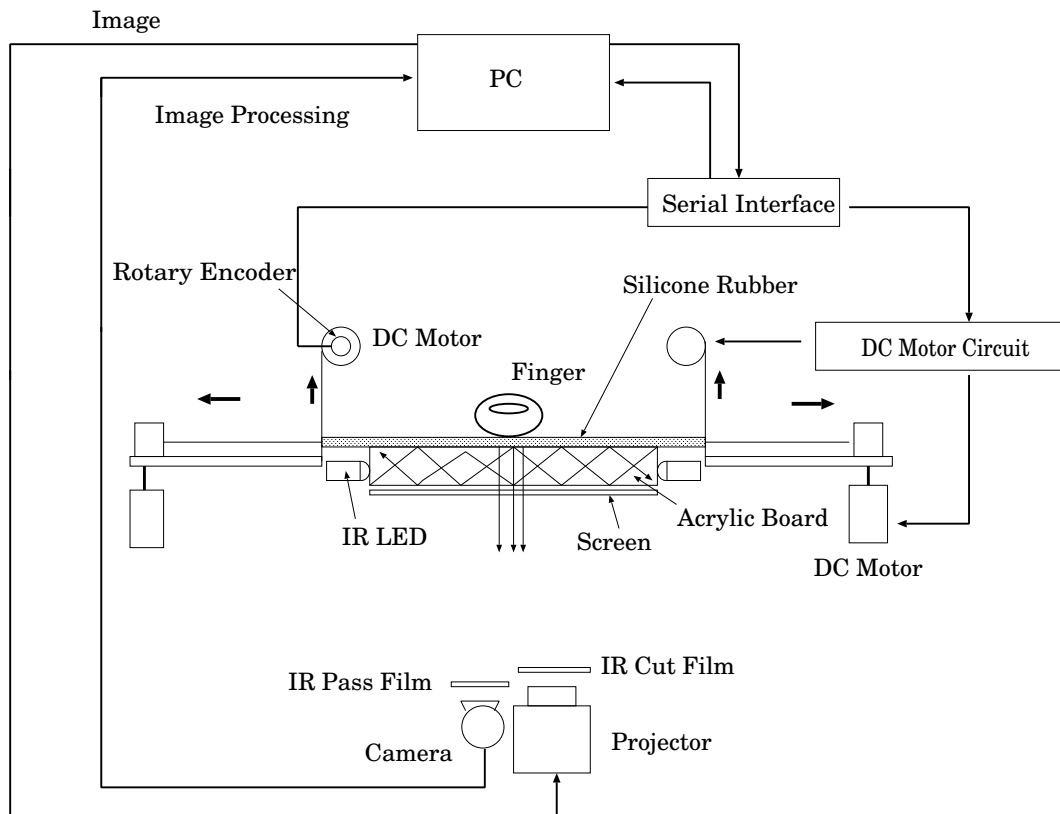


図 3.1: システムの構成

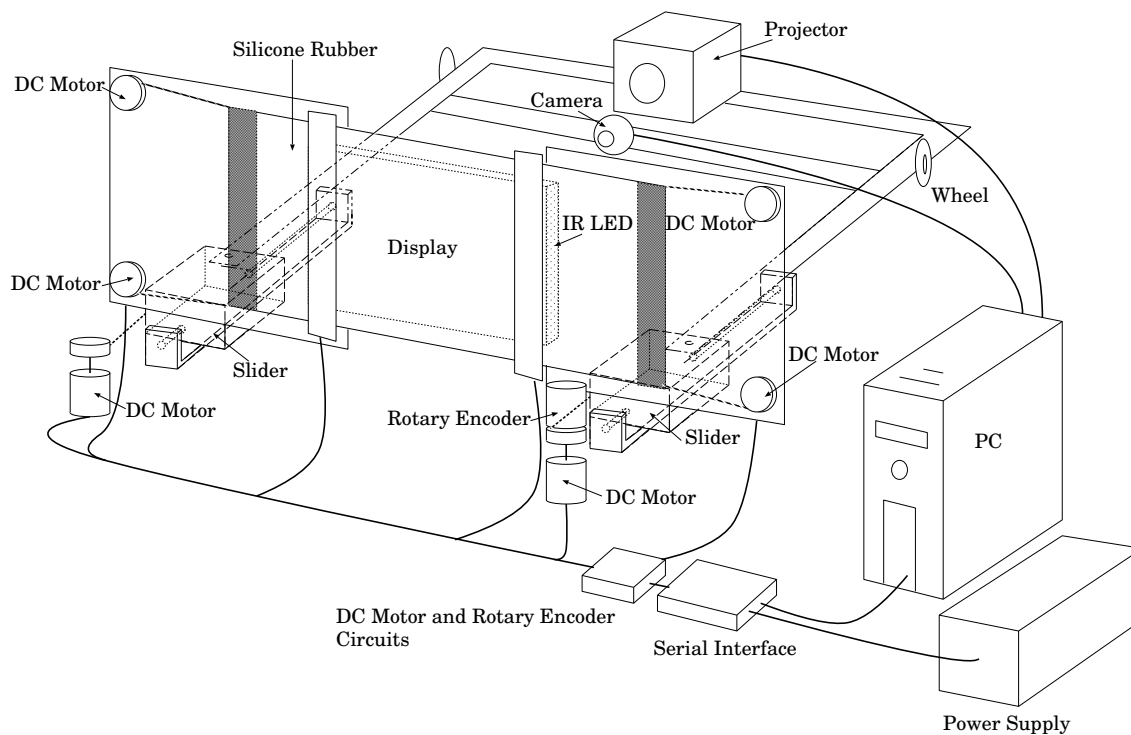


図 3.2: システムの外観イメージ

システムにおいて PC へ送られる入力、IR(Infrared Rays) 透過フィルムを装着したカメラによって得られた画像とシリアルインタフェースより得られるロータリーコーダの値であり、PC からの出力は、プロジェクタに送られる映像と、インタフェースに送られるモータ制御の値となる。映像及び力触覚を提示するディスプレイ部分は、シリコンゴムシート、赤外線 LED を側面にアレイ状に配置したアクリルパネル、背面投影スクリーンによって構成される。ディスプレイに平行な方向に付いた二つのモータがディスプレイを引くことで力覚を提示し、ディスプレイに垂直な方向に付いた四つのモータが、シリコンゴムシートを引くことで触覚を提示する。3.2 節から 3.4 節においてそれぞれ、力覚提示部、触覚提示部、映像提示部の説明をする。

## 3.2 力覚提示装置の制作

### 3.2.1 力覚提示部の構造

ディスプレイとモータを糸で接続し、モータが回転することによって、ディスプレイが手前方向に運動するように設計を行なう。図 3.3 にモータ、ディスプレイ、スライダを設置した様子を示す。物体の変位を計測するためのロータリエンコーダは、ディスプレイを駆動するモータの一つに設置する。

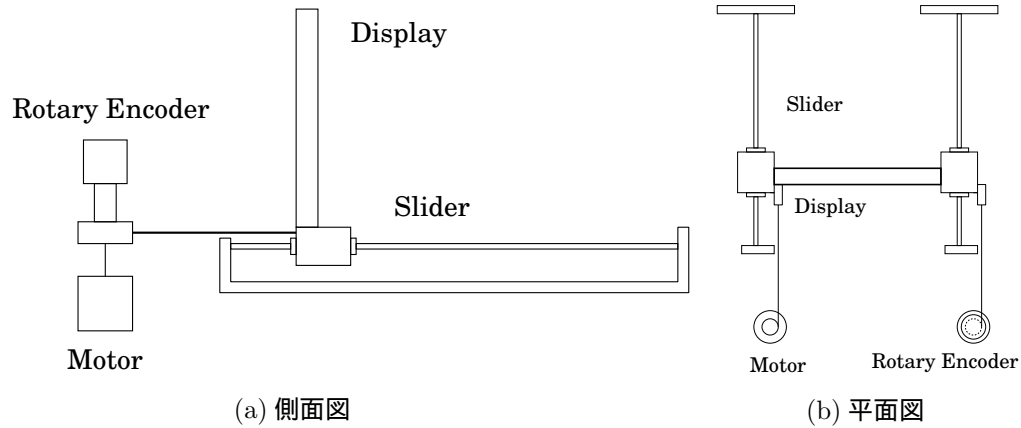


図 3.3: 力覚提示システム

### 3.2.2 力覚提示

指先でディスプレイを押し込んだ時に、ロータリエンコーダにより、回転数  $n$  が得られる。ロータリエンコーダの一回転の分解能を  $N_0$ 、モータが糸を巻く回転軸部分の半径を  $r$  として、ディスプレイの押し込まれた距離  $\Delta x$  を求める。

$$\Delta x = 2\pi r \frac{n}{N_0} \quad (3.1)$$

計測された距離  $\Delta x$  から、フックの法則により指に加える反力  $F_m$  を求める。

$$F_m = k\Delta x \quad (3.2)$$

ばね定数  $k$  は、対象物の厚み  $d$  と断面積  $S$  と物体のヤング率  $E$  が与えられれば計算可能である [15]。

$$k = E \frac{S}{d} \quad (3.3)$$

ディスプレイを押し込む操作置いて、スライダの動摩擦力  $f_1$  は無視できない。図 3.4(a) に示すように、ディスプレイ全体を  $\theta$  傾けた時の動摩擦力  $f_1$  は、ディスプレイの質量を  $m$ 、重力加速度を  $g$ 、スライダの動摩擦係数を  $\mu$  とすると、式 (3.4) のようになる。

$$f_1 = \mu mg \cos \theta \quad (3.4)$$

動摩擦力を傾斜によって相殺し、押し込み時に動摩擦力が指に働かないようする時の傾斜角  $\theta$  は、式 (3.5) を満たす。

$$f_1 = mg \sin \theta \quad (3.5)$$

従って、押し込む時にモータに式 (3.7) の力を加えることで、距離に対する指に加わる力  $F$  が決定する。

$$F_m = F + \mu mg \sin \theta - f_1 \quad (3.6)$$

$$= F \quad (3.7)$$

一方、指を引き戻す時は、モータに式 (3.9) の力を加えることで、距離に対する指にかかる力  $F$  を一意に決める。引き戻しの判定はロータリエンコーダが逆回転した時とする。

$$F_m = F + \mu mg \sin \theta + f_1 \quad (3.8)$$

$$= F + 2mg \sin \theta \quad (3.9)$$

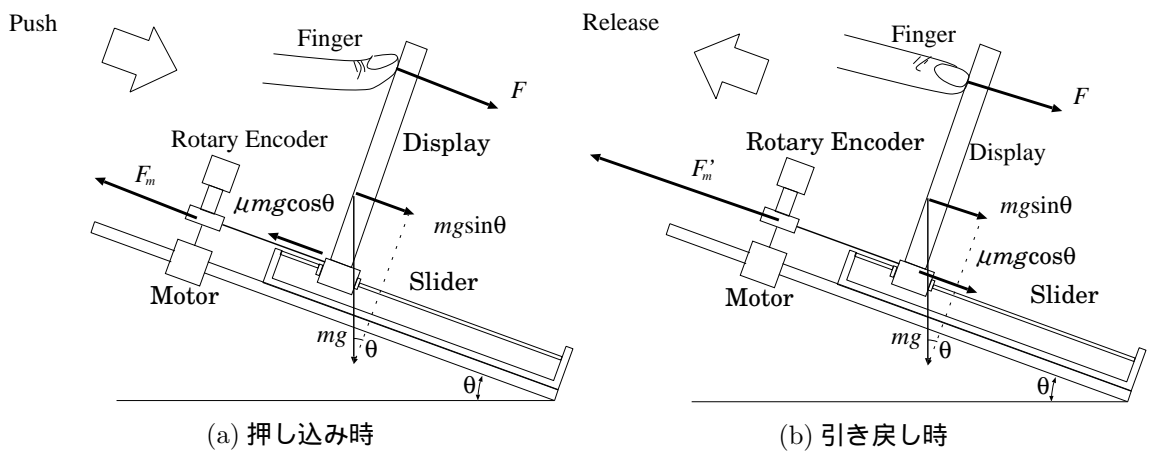


図 3.4: 動摩擦力

### 3.2.3 PC からの信号入出力

PC から外部ハードウェア、及び外部ハードウェアから PC に通信を行う方法は、シリアル通信とパラレル通信と二つに大別できる。図 3.5 に示すように、シリアル通信では、一つの信号線を用い一度に 1 ビットずつ、逐次的にデータを伝送する。一方で、パラレル通信では、複数の信号線で同時に複数のデータを伝送する。同じ周波数で転送できるデータ量はパラレル通信の方がシリアル通信よりも多いように思われるが、実際にはシリアルリンクの方がパラレルリンクよりも高クロック化が容易であり、高データ転送レートを容易に実現できる。従って、本研究では、シリアル通信を用いることにした。

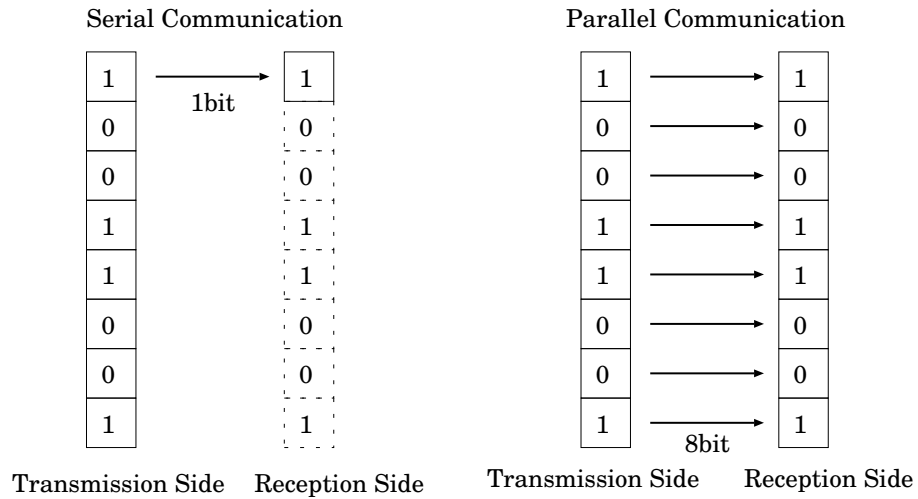


図 3.5: シリアル通信とパラレル通信

### 3.2.4 力覚提示回路とモータ制御

### 3.2.5 モータの駆動回路

本研究で用いたモータの駆動回路図を、図 3.6 に示す。V1 は外部電源に接続し、IN1,IN2 はシリアルインターフェースの入力ピンに接続する。表 3.1 に駆動回路を用いたモータの制御方法を示す。入力がある場合を H(Hgih)、ない場合を L(Low) とする。デバイスの構造上、手前方向のみに反力を与えるので、モータは逆回転するが、実際に駆動するのは、正回転と静止のみである。

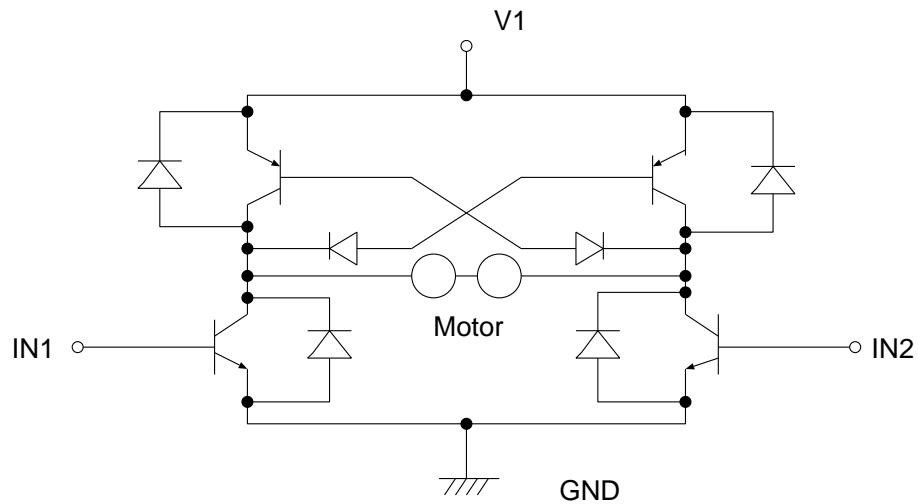


図 3.6: 力覚提示部のモータの駆動回路



表 3.1: 駆動回路の機能

IN1	IN2	モード
L	L	静止
H	L	正回転
L	H	逆回転
H	H	静止

一つのモータが糸を引く力を  $f_m$ 、モータのトルクを  $T_m$ 、電流を  $I$ 、傾きを  $a_i$ 、切片を  $b_i$  とするとモータのトルクと電流特性より式 (3.10) が求まる。

$$T_m = a_i I + b_i \quad (3.10)$$

モータが糸を巻く回転軸部分の半径  $r$  とトルク  $T_m$  から  $f_m$  を求める。

$$f_m = \frac{T_m}{r} \quad (3.11)$$

指に加える反力  $F_m$  は、図 3.6 に示す直列につながれた 2 個のモータが糸を引くことによって生じさせる。従って式 (3.12) が求まる。

$$F_m = 2f_m \quad (3.12)$$

以上の式より、反力  $F_m$  と電流  $I$  の関係式 (3.13) が求まる。

$$F_m = \frac{2a_i}{r} I + \frac{2b_i}{r} \quad (3.13)$$

### 3.2.6 ロータリエンコーダの回路

本研究で用いた 2 相のロータリエンコーダの回路図は図 3.7 のようになる。V2 はシリアルインターフェースの電源に接続し、IN3, IN4 はシリアルインターフェースの入力ピンに接続する。

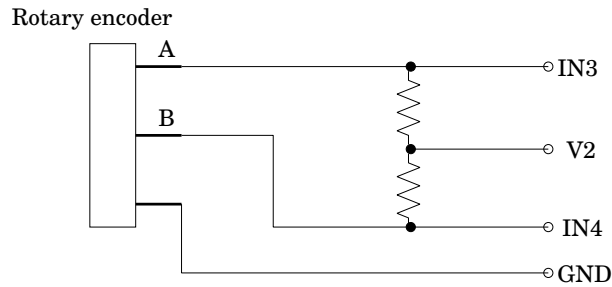


図 3.7: ロータリエンコーダの回路

ロータリエンコーダからは、回転に合わせて図 3.8 に示す A 相と B 相のパルスが出力される。二つのパルスは位相に差が生じる出力されるように作られており、正回転と逆回転で、出力タイミングを逆の関係にしてある。つまり、一つのパルスにおいて、表 3.2 に示す 4 状態が A 相と B 相についてあるので、合わせて 8 つの値の変化を得ることができる。

本研究では、A 相や B 相が、H から L または L から H に変化するときの、IN3 と IN4 の値によって回転方向を一意に決定した。

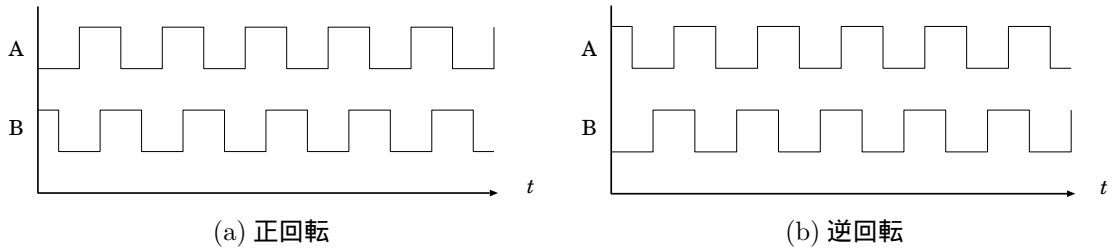


図 3.8: パルス出力

表 3.2: 回転方向

IN3	IN4	回転方向
H	H	逆回転
H	L	正回転
L	H	正回転
L	L	逆回転

IN3	IN4	回転方向
H	H	正回転
H	L	逆回転
L	H	逆回転
L	L	正回転

### 3.2.7 モータの制御

モータの制御は図 3.9 に示すような PWM(Pulse Width Modulation) 制御を用いた。PWM とは、パルス波のデューティ比を変化させることで変調する手法である。周期  $T$  に対して、シリアルインターフェースの入力電源が ON になっている時間を  $t$  とすると、デューティ比  $D$  は式 (3.14) のようになる。 $D$  を変化させることで、電流流通率を変化させモータのトルクが変化し、反力を制御することが可能となる。

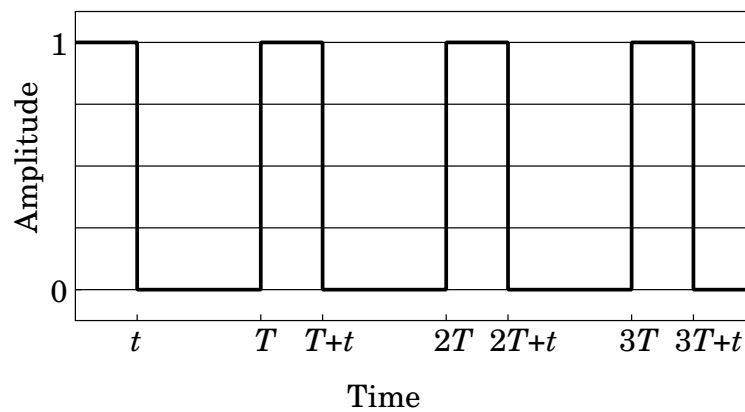


図 3.9: デューティ比

$$D = \frac{t}{T} \tag{3.14}$$

定電圧を与えた時のデューティ比と電流の関係は、図 3.10 に示した実測により得られた。電流とデューティ比の関係を線形近似によって求める。

$$I = a_d D + b_d \tag{3.15}$$

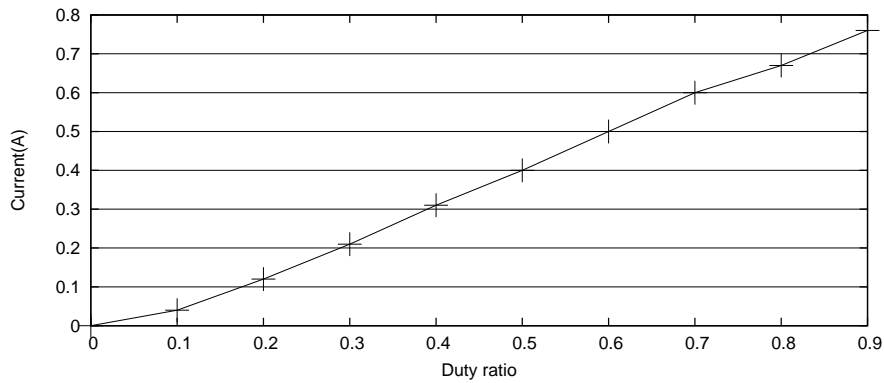


図 3.10: 電流-デューティ比特性

式 (3.13) と式 (3.15) より、デューティ比と反力の関係式 (3.16) が得られる。

$$F_m = \frac{2a_i a_d}{r} D + \frac{2a_i b_d + 2b_i}{r} \quad (3.16)$$

従って、シリアルインターフェースのデューティ比を制御することで指に加わる反力を変化させることが可能となる。

### 3.3 触覚提示装置の制作

#### 3.3.1 触覚提示部の構造

図 3.11 に示すように、対象物体に指先が接触している部分に張力を加えることで、対象物体の表面の硬さを変える。のようにモータを用いてシリコンゴムシートに張力を加えた。シリコンゴムシートは粘着力が高いためディスプレイと密着すると伸縮させることが困難となる。粘着を防ぐために、使用時はゴムシートのディスプレイ側を水で濡らし、粘着力を小さくした。

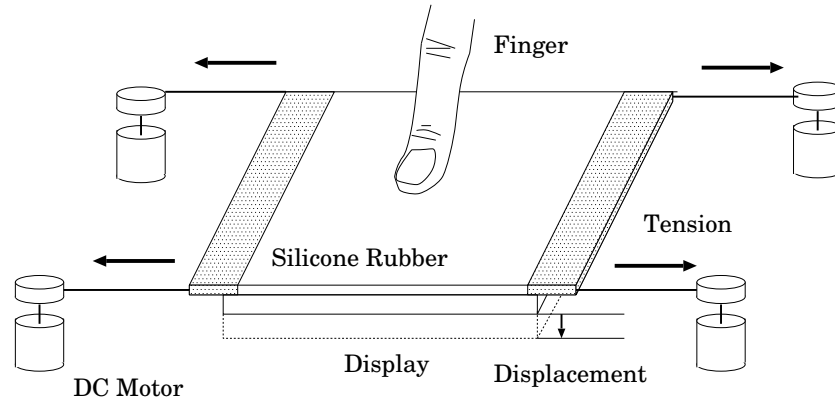


図 3.11: システム図

### 3.3.2 触覚提示

### 3.3.3 触覚提示の原理

図 3.12 に示すように、縦  $L$ 、横  $L$ 、高さ  $h$  のゴムシートを弾性物体とし、ゴムシートは十分薄く、高さ  $h$  は変位しないと仮定する。図 3.12(b) に示すように、ユーザが  $x$  軸方向に力  $F_u$  を加えた時、 $x$  軸方向の変位を  $\Delta L$ 、 $y$  軸方向の変位を  $\Delta l$  とおくと、ゴムシートのヤング率  $E$  は、式 (3.17) のように表される。

$$E = \frac{\frac{F_u}{hL}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (3.17)$$

次に、図 3.12(d) に示すように、デバイスから  $x$  軸方向に力  $F_d$  を加えられた状態のゴムシートに、ユーザがさらに力  $F_u$  を加えた場合を考える。ゴムシートのポアソン比を  $\nu$  とすると、 $y$  軸方向の変位  $\Delta l$  は、式 (3.18) のように表される。

$$\Delta l = 2\nu\Delta L \quad (3.18)$$

従って、ゴムシートの見かけのヤング率を  $E'$  とすると、式 (3.19) で求めることができる。

$$E' = \frac{\frac{F_d + F_u}{h(L - 2\nu\Delta L)}}{\frac{\Delta L}{L + \Delta L}} \quad (3.19)$$

$\Delta L^2$  が十分小さいとして見かけのヤング率  $E'$  を本来のヤング率  $E$  を用いて表すと、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{\frac{F_d + F_u}{h(L - 2\nu\Delta L)}}{\frac{\Delta L}{L + \Delta L}} \\ &= \frac{F_d(L + \Delta L) + F_u(L + \Delta L)}{h\Delta LL - 2h\nu\Delta L^2} \\ &> E + \frac{F_d}{h\Delta L} + \frac{F_d + F_u}{hL} \end{aligned} \quad (3.20)$$

となり、 $E'$  が  $E$  より大きくなるため、ゴムシートに張力を加えることで物体の表面の硬さを擬似的に大きくすることが可能である。また、実際は  $x$  軸方向にデバイスが力を加えるほど、微小ではあるがゴムシートの厚み  $h$  が減少し、指先の埋没可能な領域が減少する。見かけのヤング率の増加と指先の埋没可能領域の減少によって、指先がデバイス表面に等しい力で触れる時、ゴムシートに張力を加えことで接触面積を減少させることができる。

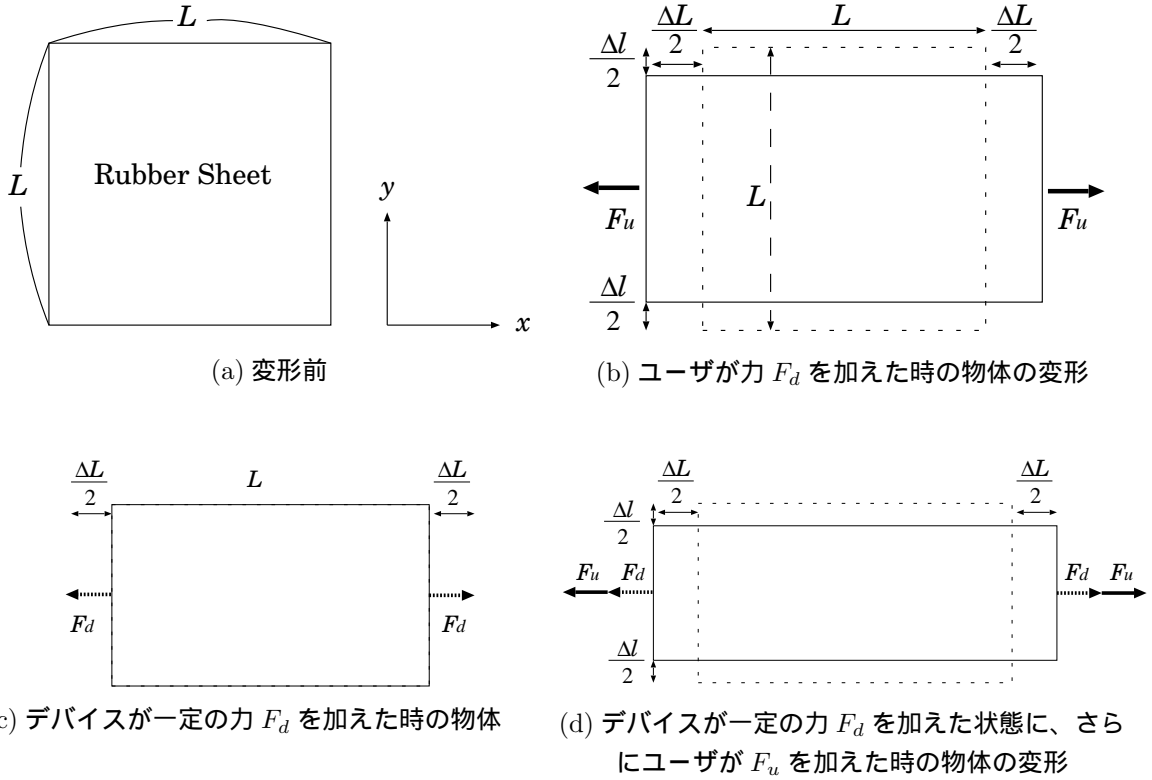


図 3.12: ゴムシートの変形

### 3.3.4 触覚提示の手法

力覚提示と同様にモータを制御することによってシリコンゴムシートに張力を加えた。モータは、図 3.13 のような駆動回路となる。V は外部電源に接続し、IN1,IN2 はシリアルインターフェースの入力ピンに接続する。駆動回路、及びモータの制御は力覚提示部と同じ手法を用いる。

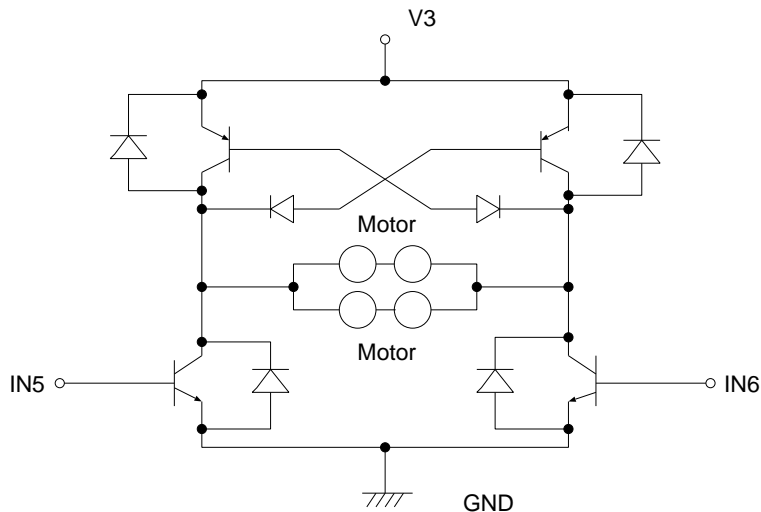


図 3.13: 触覚提示部のモータの駆動回路

実測により得られた定電圧を与えた時の電流とデューティ比の関係を図 3.14 に示す。電流とデュー

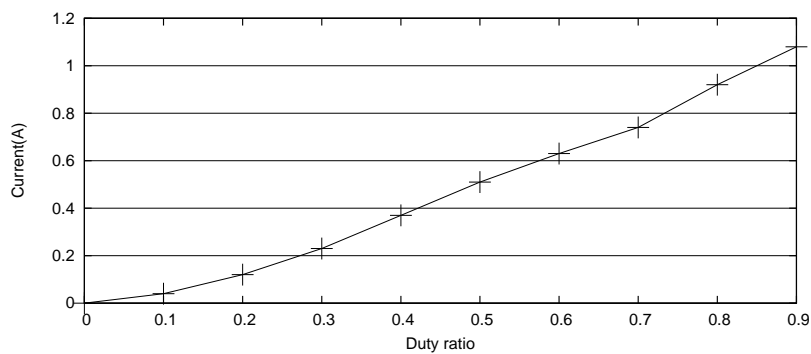


図 3.14: 電流-デューティ比特性

ティ比を線形近似によって求めると式 (3.21) のようになる。

$$I = a_d D + b_d \tag{3.21}$$

### 3.3.5 力触覚提示の特性

池田らによる張力  $T$  と接触面積  $S$  と押下力 (反力)  $F$  の近似モデル [15] を用いると、図 3.15 に示した実測により得られた、張力 0-16[N] の時の、押下力  $F$  と接触面積  $S$  の関係は、式 (3.22) のように近似できる。

$$S = a \log F + b \quad (3.22)$$

式 (3.22) は、張力  $T$  によって傾き  $a$ 、切片  $b$  が異なるため、 $a$  と  $b$  の関係を、係数  $x_a, x_b, y_a, y_b$  を用いて式 (3.23), (3.24) のように近似する。

$$a = x_a T + y_a \quad (3.23)$$

$$b = x_b T + y_b \quad (3.24)$$

以上の式から、 $S, T, F$  の関係式は式 (3.25) となる。

$$S = (x_a T + y_a) \log F + (x_b T + y_b) \quad (3.25)$$

以上の式を用いて、張力を変化させることで接触面積を制御する。

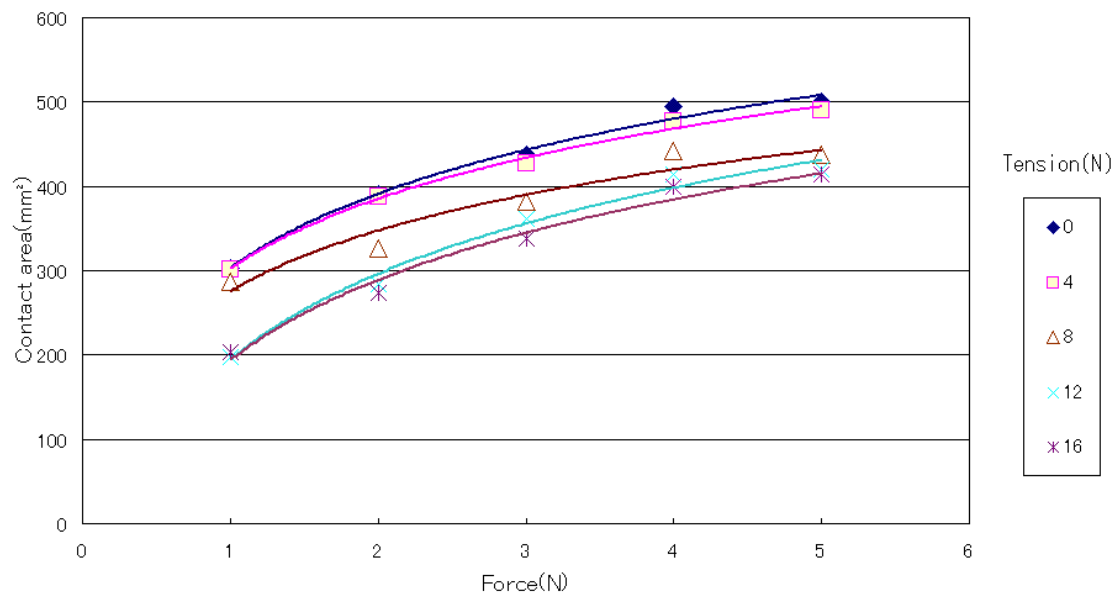


図 3.15: 接触面積-押下力特性

## 3.4 映像提示装置の制作

### 3.4.1 FTIR による位置と接触面積計測

図 3.16 に示すように、赤外線 LED の赤外光をアクリルパネルに入射させた時の入射角を  $\theta_i$ 、屈折角を  $\theta_r$ 、赤外光の空気における屈折率を  $n_0$ 、アクリルパネルにおける屈折率を  $n_a$  とする。屈折

角が 90deg よりも小さい場合、図 3.16(1),(2) に示すように赤外光はアクリルパネルから空気へ屈折して進んでいく。 $n_0 < n_a$  を満たすとき、入射角が図 3.16(3) に示す臨界角を  $\theta_m$  とすると、スネルの法則より  $\theta_m$  は式 (3.26) のように表される。

$$\theta_m = \arcsin \frac{n_0}{n_a} \quad (3.26)$$

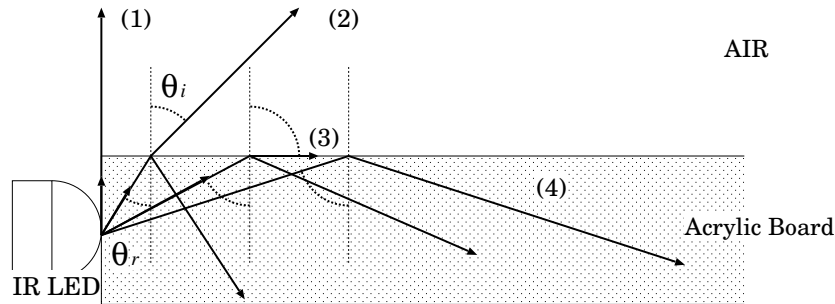


図 3.16: 光の屈折

入射角が臨界角より大きい時、つまり式 (3.27) を満たす場合、図 3.16(4) に示すような全反射が起こる

$$\theta_i > \theta_m \quad (3.27)$$

従って、赤外線 LED からアクリルパネルに入射した赤外光は、式 (3.27) を満たす時、アクリルパネルの中を全反射し続ける。しかし、アクリルパネルに指先が触れることで、拡散反射が起きる。

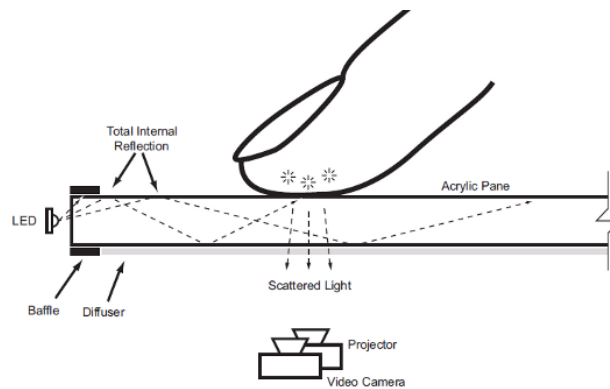


図 3.17: FTIR による指先接触位置検出 [25]

従って、図 3.17 に示すようにアクリルパネルに対して指が光源のように振る舞う。従って、赤外カメラで指の反射光を撮影することにより、反射光の中心座標として指先の位置、総ピクセル数として接触面積を求めることができる。



### 3.4.2 画像処理

FTIRによって得られた画像を2値化し、ラベリングすることで指の位置、及び接触面積を計算する。ラベリングによって得られた指領域のピクセル総数を接触面積を求めるために用い、領域の中心座標を指の位置を求めるために用いた。図 3.18 に示すように、プロジェクタ、カメラはアルミフレームによってディスプレイと接続してあり、ユーザが押し込むことによってディスプレイが移動した場合でも、プロジェクタ、カメラとディスプレイとの位置関係は変わらない。故に、提示映像の縮尺はディスプレイの移動に応じて変化させる必要はない。

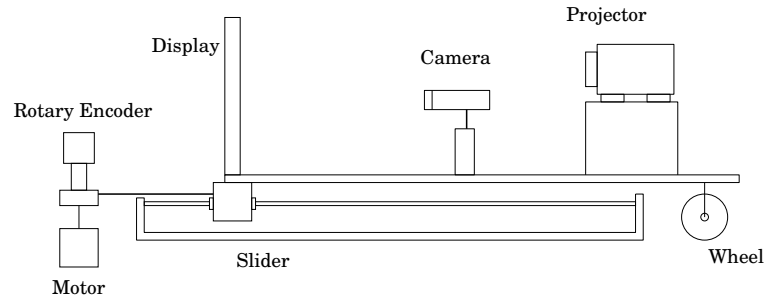


図 3.18: カメラとディスプレイの構造

カメラに写る映像の縦幅と横幅は常に一定であるので、得られたピクセル数を  $P_{ix}$ 、接触面積を  $S$ 、カメラに映ったディスプレイの横幅を  $W$ 、縦幅を  $H$ 、カメラの画素数を  $N_c$  とすると、式 (3.28) によって接触面積が求められる。

$$S = WH \frac{P_{ix}}{N_c} \quad (3.28)$$

また、ラベリング領域の中心は図 3.19 のように、 $x$  軸、 $y$  軸においてそれぞれ領域の最大値  $x_{max}, y_{max}$  と最小値  $x_{min}, y_{min}$  の中間を中心座標  $(x_{mid}, y_{mid})$  とすると、式 (3.29) に示すように指の位置と決定する。

$$(x_{mid}, y_{mid}) = \left( \frac{x_{max} + x_{min}}{2}, \frac{y_{max} + y_{min}}{2} \right) \quad (3.29)$$

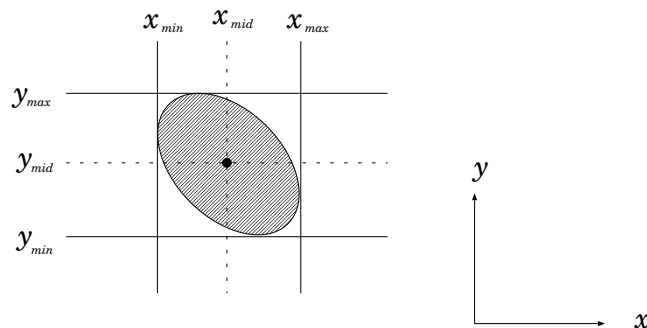


図 3.19: ラベリング領域の中心座標

### 3.4.3 画像提示

図 3.20 に示すように、映像は中心に提示した大きな立体形状の弾性体と小さな立方体からなるスイッチから構成される。図 3.21 のフローチャートに示すように指がディスプレイに接触し、かつ、中心の立方体を押し込んだ場合、立方体の変形を弾性理論 [26] に基づいて計算する。指がディスプレイに接触し、スイッチを押し込んだ場合、それぞれのスイッチに応じてヤング率を変化させ、力触覚からなる硬さ及び、映像の変位量を変化させる。また、弾性物体はディスプレイに対して左右方向の伸縮を大きくし、上下方向の伸縮は小さくした。ただし、スイッチを押した瞬間にヤング率を変化させると、ヤング率が小さい立方体から大きい立方体に変化した場合、急激に大きな反力が加わる可能性があるため、スイッチを押し込み終わり指が離れた瞬間を接触面積から判定し、指が離れた瞬間にヤング率を変化させることとする。

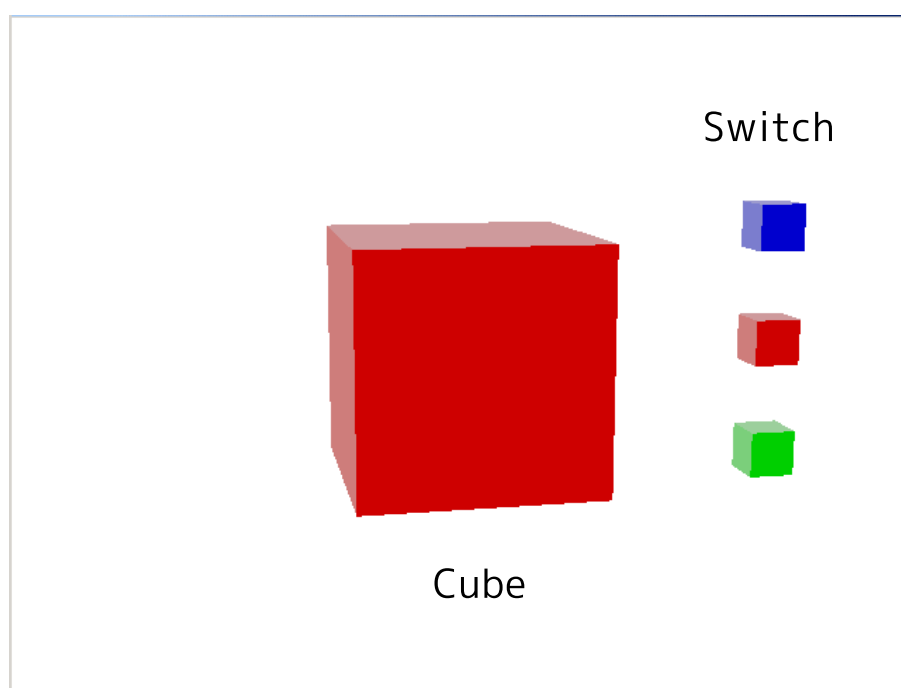


図 3.20: 提示する映像のイメージ

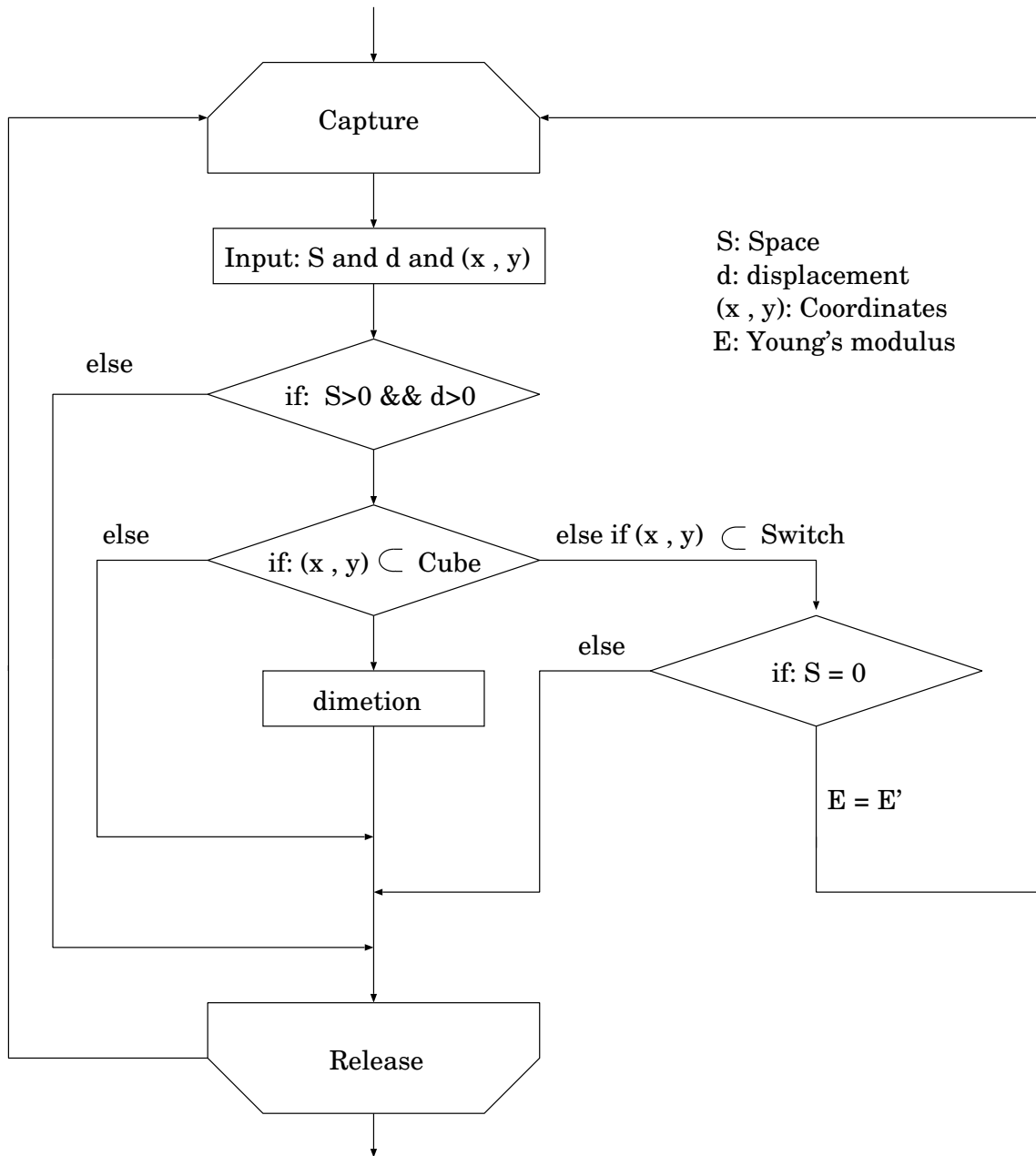


図 3.21: プログラムの流れ

## 第4章 実装システムと結果

視覚と統合した硬さの提示システムを構築した。硬さの提示という目的を達成するために異なる硬さの面を複数生成し、製作した視触覚融合タッチパネルを用いて実験を行った。本章では、システムの実装方法および実験の結果を示す。

### 4.1 実装システムの構成

本研究では、図 4.1 に示すように視覚と力触覚を融合したタッチパネルシステムを実装した。ユーザはコンピュータグラフィックスとして表示されたスイッチを指で押し込んだ際に、画像に応じた力触覚を介して指先に提示することを目的としている。

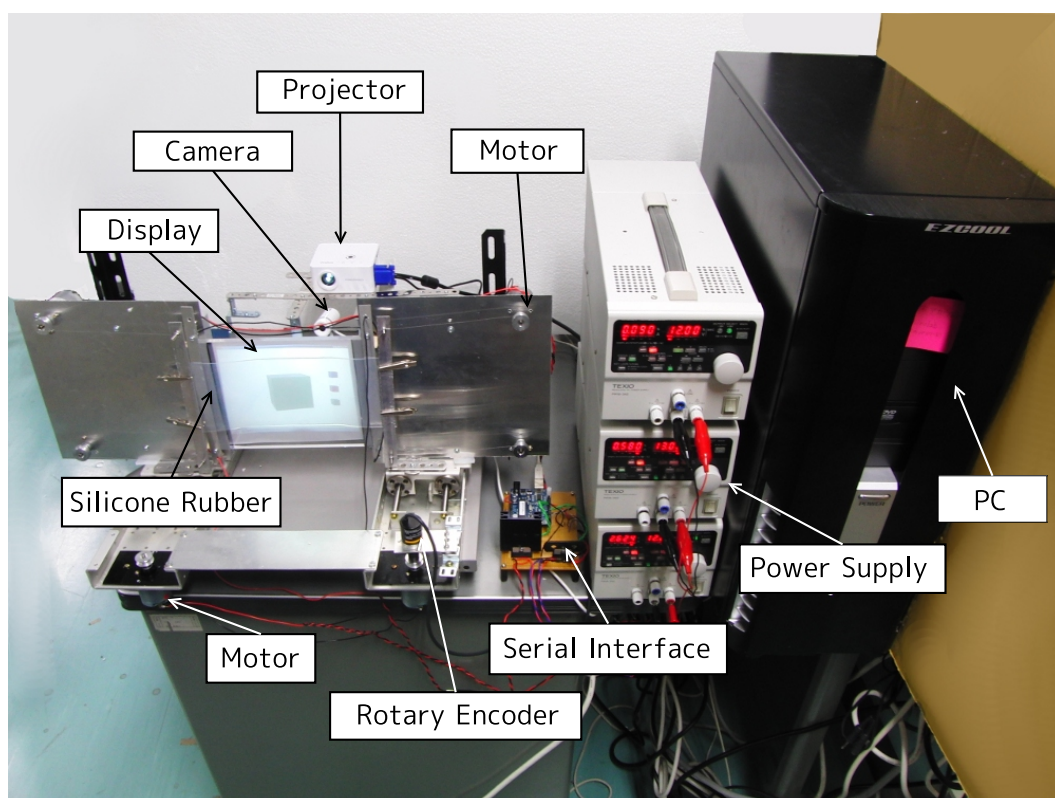


図 4.1: 視触覚融合タッチパネルシステム

#### 4.1.1 力触覚提示部

力覚提示部のシステムは図 4.2 のようになり、触覚提示システムは図 4.3 のようになる。また、モータ制御を行なった回路と PC と信号入出力を行なったシリアルインターフェースをそれぞれ図 4.4、図 4.5 に示す。シリアルインターフェースの各ピンにはモータの制御に 4 本、ロータリエンコーダに 2 本の入力信号線が必要となる。

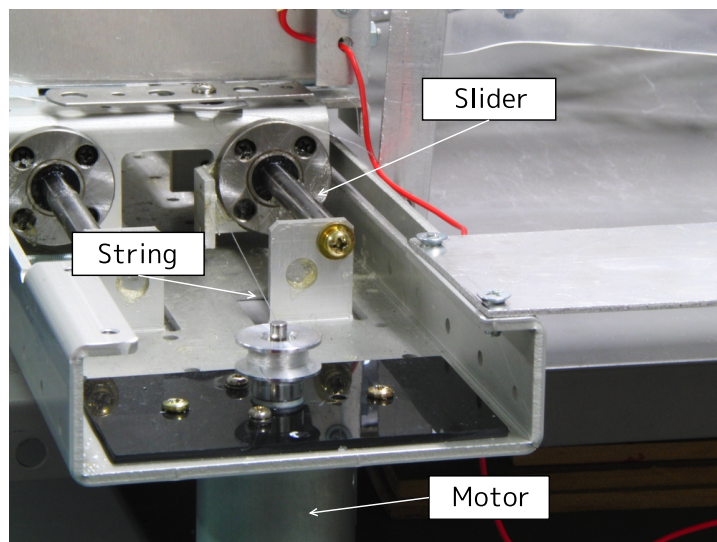


図 4.2: 力覚提示システム

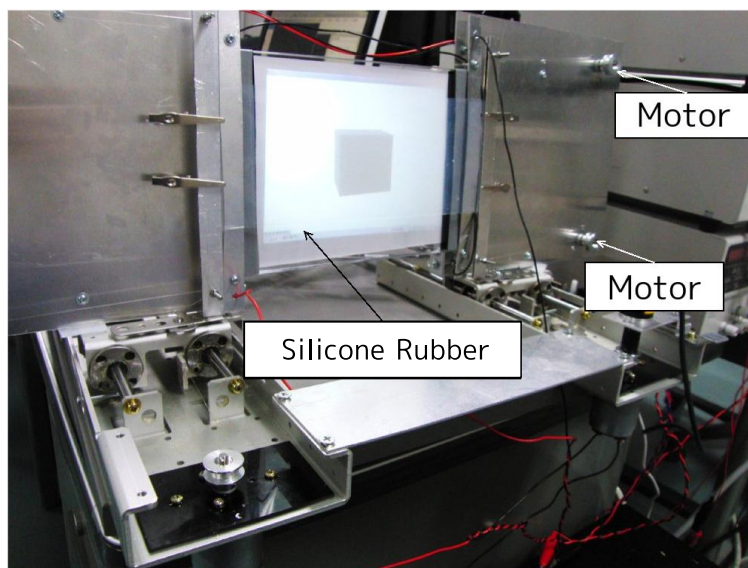


図 4.3: 触覚提示システム

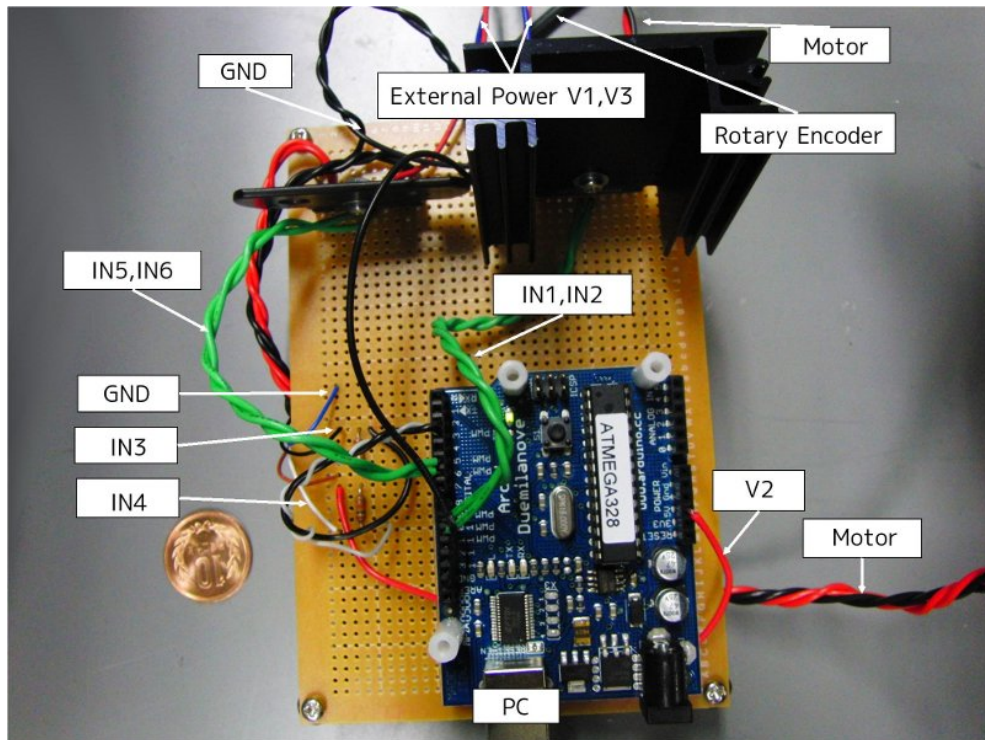


図 4.4: 実装した回路

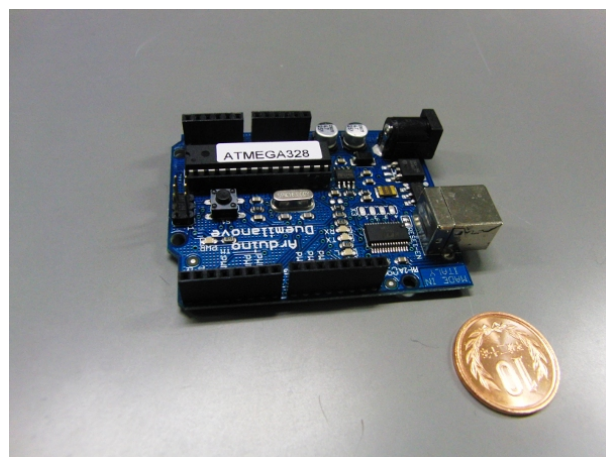


図 4.5: シリアルインタフェース



#### 4.1.2 映像提示部

映像提示部のシステムを図 4.6 に示す。プロジェクタ、カメラはアルミフレームによってディスプレイと接続してあり、ユーザが押し込むことによってディスプレイが移動した場合でも、プロジェクタ、カメラとディスプレイとの位置関係は変わらないように設置した。映像提示を行なうディスプレイは、図 4.7 に示す FTIR を用いて位置計測を行なうために赤外線 LED を両端にアレイ状に並べたアクリルパネルに背面投影型スクリーンを貼り付けることで制作した。ディスプレイに背面からプロジェクタの映像を投影することで、映像を提示する。図 4.8 に示すように、指の位置を計測にはカメラに IR 透過フィルムを貼り付けたものを用いた。また、プロジェクタの映像がディスプレイで反射することによって、カメラに赤外光が入り込むのを防ぐために、図 4.9 に示すようにプロジェクタには IR カットフィルタを設置した。

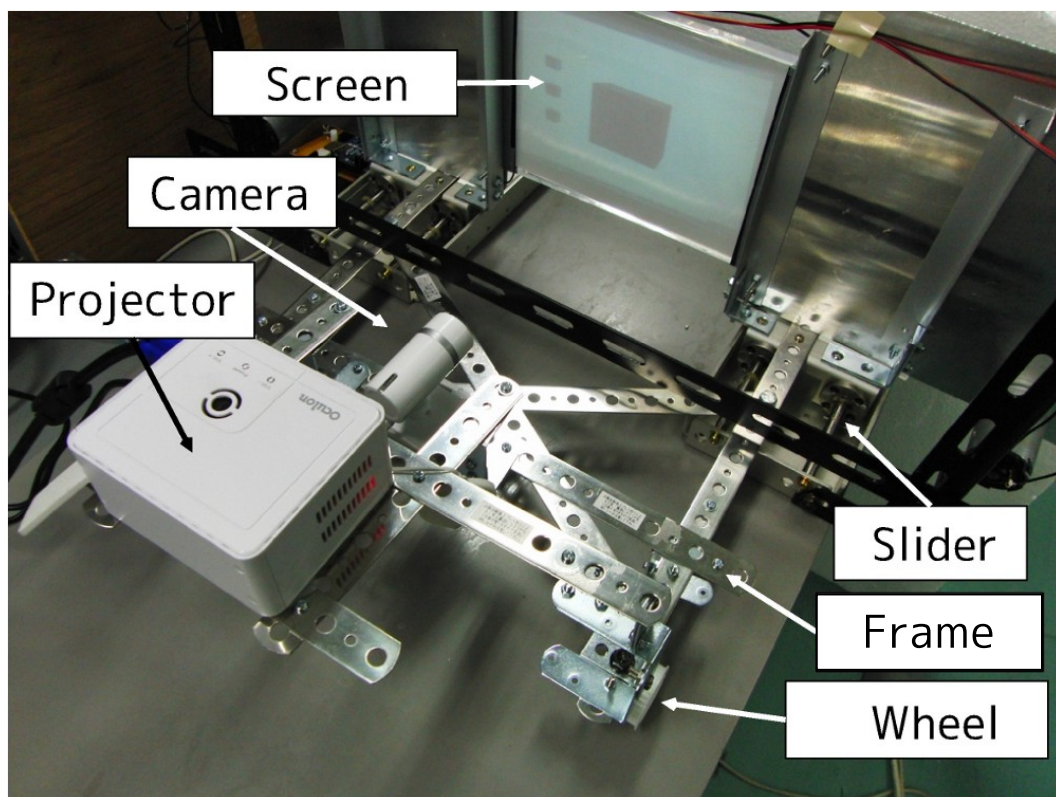


図 4.6: 映像覚提示システム

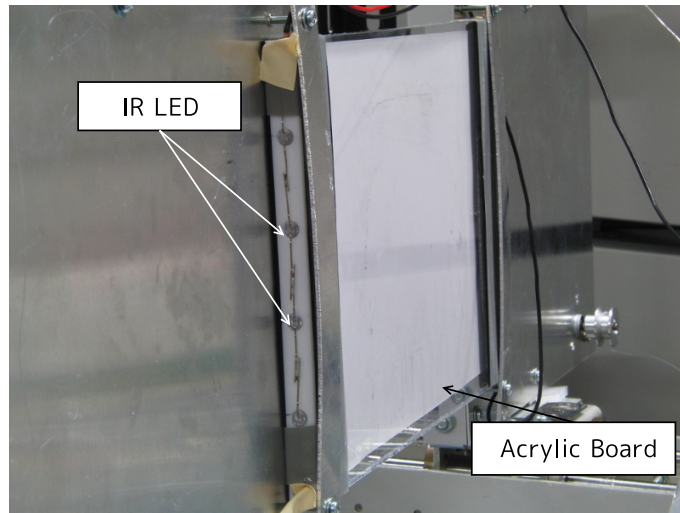


図 4.7: アクリルパネル

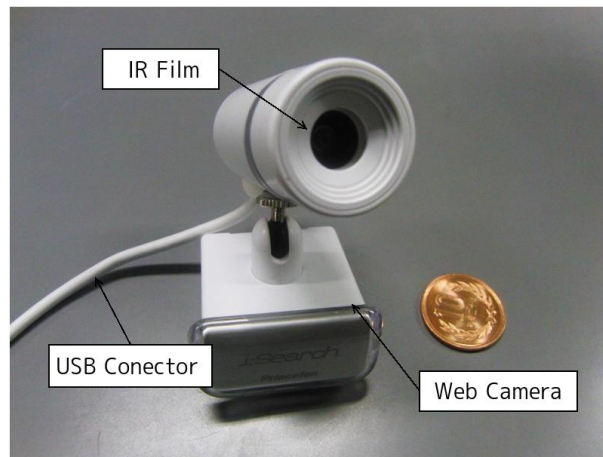


図 4.8: 赤外化カメラ

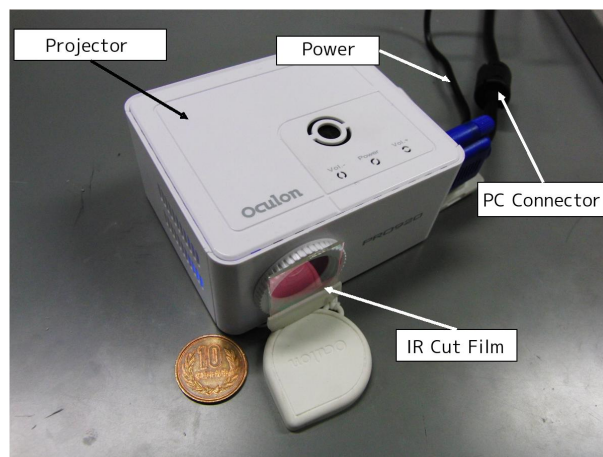


図 4.9: プロジェクタ



## 4.2 システムの実装環境

本章では、システムの実装環境を示す。

### 4.2.1 PCの環境

本研究で用いたPCの仕様を表4.1に示す。

表 4.1: コンピュータの仕様

項目	
OS	Microsoft Windows 2000
CPU	Intel Celeron 3.33GHz
Memory	2.0GB

### 4.2.2 制作デバイス

制作したデバイスに用いた機材を表4.2に示す。

表 4.2: 使用道具

機材	特徴	個数
DC モータ (DME37BB, DME37KB)	定格 24V, 0.53A, 定格 24V, 0.60A	2 個, 4 個
シリアルインターフェース (Arduino)	デジタル I/O ピン 14 本	1 個
ロータリーエンコーダ (E6A2-C)	分解能 (パルス/回転) 360	1 個
低硬度シリコンゴム	100mm × 280mm × 3mm	1 個
カメラ (PWC-30ISW)	30 万画素	1 台
IR 透過フィルム	波長 800nm 以下の光をカット	1 枚
プロジェクタ (PRO920)	解像度 640 × 480	1 台
IR カットフィルム	波長 750nm 以上の光をカット	1 枚
赤外線 LED	ピーク波長 810nm	8 個
背面投影スクリーン	150mm × 200mm	1 個
アクリル板	150mm × 200mm × 10mm	1 個
背面スクリーン	140mm × 200mm × 0.5mm	1 枚

### 4.2.3 パラメータ

本研究で用いた設定したパラメータを表 4.3、計測または計算したパラメータを表 4.4 に示す。

表 4.3: 設定したパラメータ

要素	設定値
バネモデルにおける断面積 $S$	200mm <sup>2</sup>
バネモデルにおける対象物体の厚み $d$	50mm
PWM 制御に関する周波数	100Hz(力覚部)、200Hz(触覚部)
PWM 制御に関する電圧	18V(力覚部)、14V(触覚部)
LED に加えた電流	0.010A

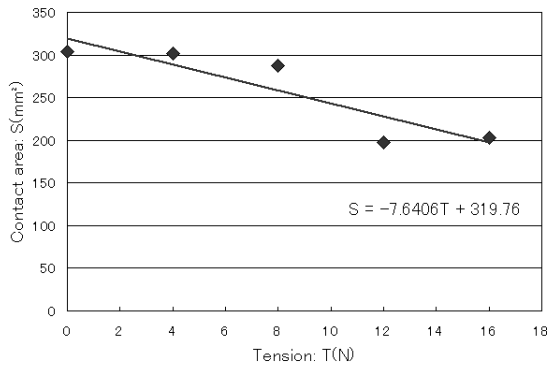
表 4.4: 計測及び計算したパラメータ

要素	設定値
力覚提示モータの糸を巻く回転軸部分の半径 $r$	6.60mm
力覚提示モータのトルクと電流特性の $a_i$	33.3
力覚提示モータのトルクと電流特性の $b_i$	2.67
力覚提示モータのデューティ比と電流特性の $a_d$	0.887
力覚提示モータのトルクと電流特性の $b_d$	-0.0383
触覚提示モータの糸を巻く回転軸部分の半径 $r$	6.25mm
触覚提示モータのトルクと電流特性の $a_i$	50.0
触覚提示モータのトルクと電流特性の $b_i$	5.50
触覚提示モータのデューティ比と電流特性の $a_d$	1.23
触覚提示モータのトルクと電流特性の $b_d$	-0.0922

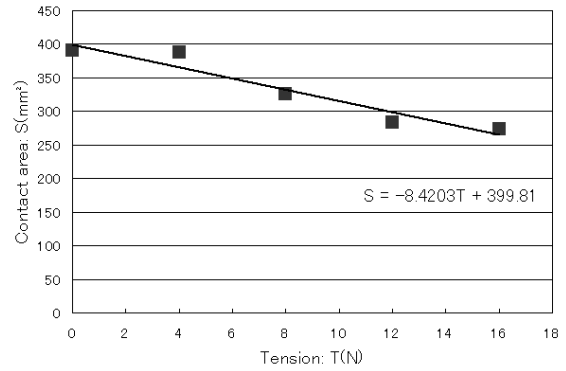
## 4.3 結果と考察

### 4.3.1 力触覚提示

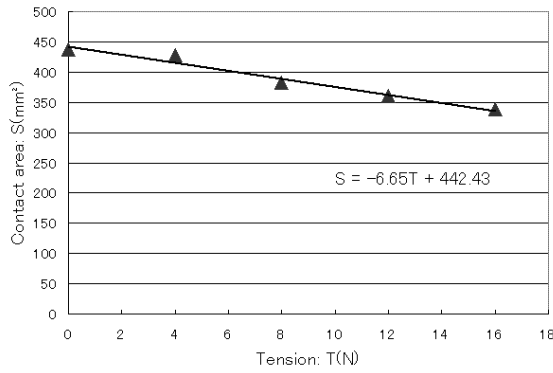
PWM 制御のデューティ比と電流特性を求め、モータのトルクを制御し、指先に加わる押下力を計算した。図 3.15 の計測結果から、図 4.10 に示すように、ある押下力  $F$  の時の、張力  $T$  と接触面積  $S$  の関係式を線形近似によって求めた。図 4.10(a)-(e) の全てにおいて、張力を増加させると接触面積は線形的に減少することがわかるため、シリコンゴムに張力を加えることによって、ディスプレイの表面を硬くすることが可能であると示せた。また、3 節の図 3.15 に示した通り、最初にシリコンゴムに一定の張力を加えた状態で、ディスプレイに押下力を加えて行くと、接触面積は加えられた張力に応じて減少することがわかる。従って、押下力に対して張力を変化させることで接触面積を制御することは可能であると示せた。



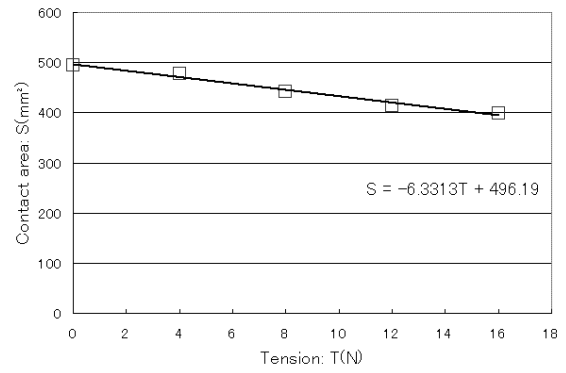
(a) 押下力 1N



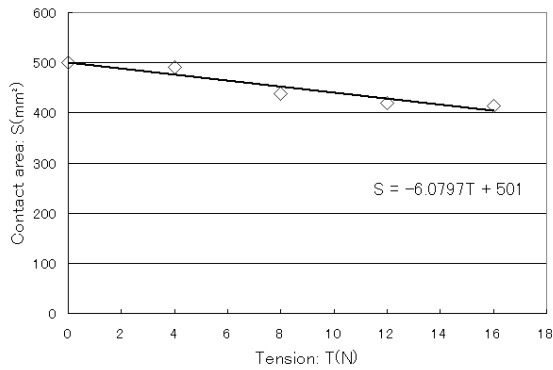
(b) 押下力 2N



(c) 押下力 3N



(d) 押下力 4N



(e) 押下力 5N

図 4.10: 押下力を固定した時の張力と接触面積の関係

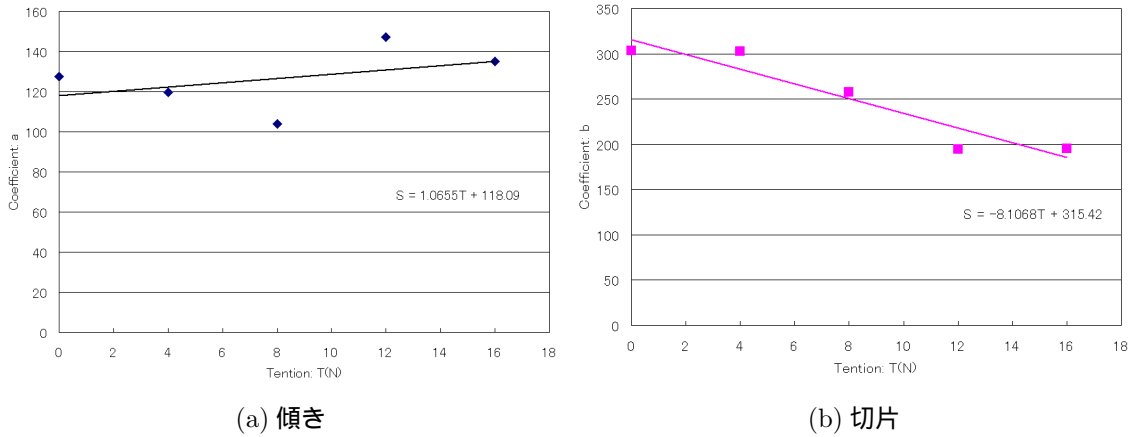


図 4.11: 張力と傾き、切片の関係式

$S, T, F$  の関係式を求めるために、 $F$  と  $S$  の近似式  $S = a \log F + b$  の傾き  $a$ 、及び切片  $b$  を  $T$  を用いて表すと、図 4.11 に示すようになり、 $S, T, F$  の関係式は式 (4.1) となった。

$$S = (1.0655T + 118.09) \log F + (-8.1008T + 315.42) \quad (4.1)$$

従って、ある実物体の接触面積と力の関係がわかれば、式 (4.1) に示す接触面積  $S$ 、張力  $T$ 、押下力  $F$  の関係式によって、 $T$  を動的に変化させることで実物体と等しい接触面積と力の関係を導くことができるようになる。

3N の押下力の状態で、張力を 16N から 0N まで徐々に減らした場合の、実データと張力と接触面積の関係を理論式 (4.1) と比較してみると、図 4.12 に示すようになった。

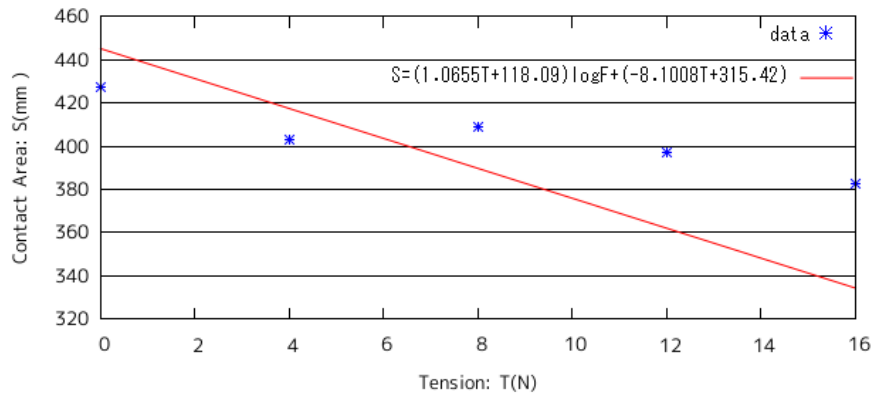


図 4.12: 3N の押下力を加えた時の張力と接触面積の関係

実データの総数を  $n_e$ 、値を  $x_k (k = 1, \dots, n_e)$ 、理論式の値を  $x_e$  として誤差  $e$  を、式 (4.2) から求めると、 $e = 29.88$  となる。

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_e} (x_e - x_k)^2}{n_e}} \quad (4.2)$$

実データと理論式の誤差の原因としては、実際のシリコンゴムは、非線形材料でありヤング率が一定ではなくひずみによって変化すること、FTIR による接触面積計測に関して、背面投影スクリーン及び、シリコンゴムシートによって指の光は大きく拡散し、指の接触面積を求めるための画像処理における 2 値化の閾値の決定が困難となること、シリコンゴムとアクリルパネルの摩擦および、シリコンゴムと指の摩擦により、シリコンゴムを伸縮させることが困難になること、シリコンゴムのヒステリシスなどが主にあげられる。また、本研究で制作した力覚提示部は、接触面積の計測、最大静止摩擦力の問題の両方において、1N 以下の小さな押下力を提示するのは難しく、理論式における接触面積が急激に増加する 0-1N 付近のデータが測定できないために、理論式の傾きの計算が困難であることも関係している。シリコンや背面投影スクリーンの素材をうまく選択し、小さな力覚も提示できるようになれば、精度の高い接触面積の制御が行なえるようになると期待される。また、取得される映像は 30fps (frame per second) であり、約 33ms の間隔で接触面積の値が逐次得られるため、前のフレームの接触面積の値から、次に提示する接触面積を制御することも可能であると考えられる。

#### 4.3.2 映像提示

図 4.13 に示すように、FTIR によって得られた元画像に 2 値化、ラベリングの画像処理を行なうことで、指領域を求め、領域の総ピクセル数から接触面積を、領域の中心座標を指の位置を計算することが可能であった。

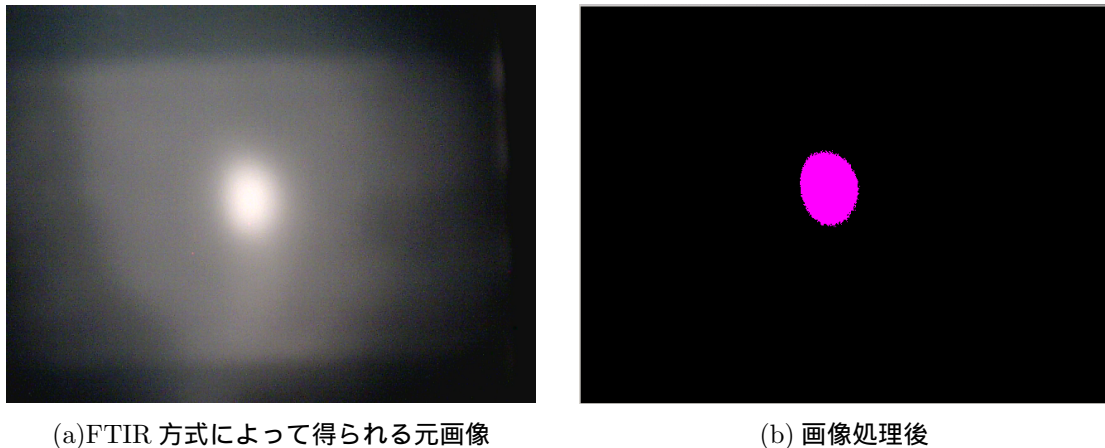


図 4.13: 位置、及び接触面積の計測

また、映像は、図 4.14 に示すような立方体形状の弾性体を提示した。ディスプレイ平面において、横方向に伸びやすく、縦方向に伸びにくいような弾性体を提示することとした。図 4.14 において、ディスプレイ右の緑、赤、青の立方体スイッチに触れることで、ディスプレイ中心に投影された立方体の色、およびヤング率が変化し、異なる色のスイッチにおいて、それぞれ異なった力触覚および、変位映像を提示することにした。本研究では、緑、赤、青の立方体スイッチの順に、ヤング率を大きくするように設定した。従って、緑のスイッチを押した後の立方体の変形が最も大きく、青のスイッチを押した後の立方体の変形が最も小さい。また、初期設定では、赤の立方体が表示されるようにした。

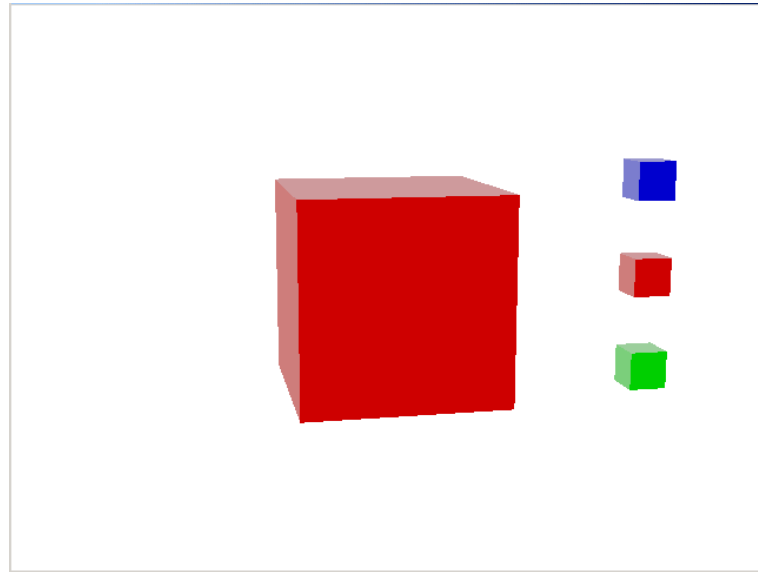
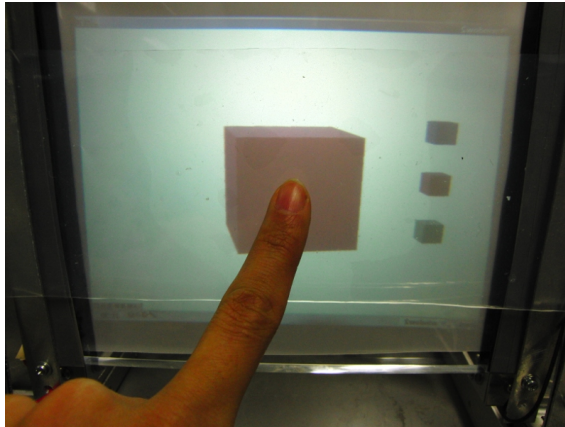
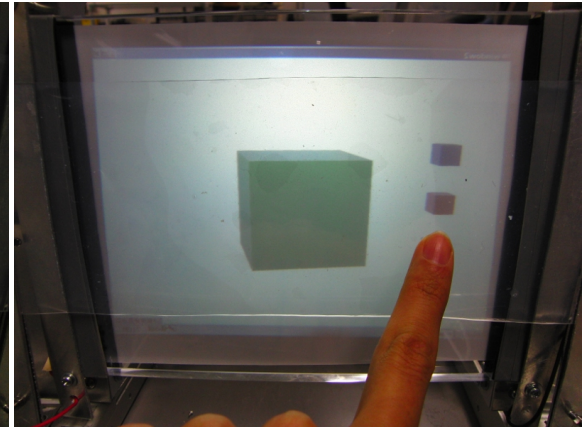


図 4.14: 提示映像

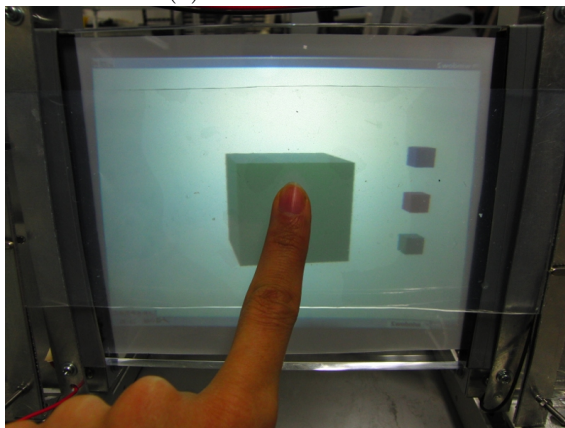
実際には図 4.15 のように視覚情報としての映像は立方体形状の弾性体を提示した。FTIR により得られた指の位置と接触面積から立方体との接触判定を行い、接触している場合は、接触面積に応じて、立方体の変形を計算した。図 4.15(a),(b) は、初期設定の赤い立方体から、緑の立方体スイッチを押した場合の色、及びヤング率の変化を示している。図 4.15(c),(d) は最もヤング率の小さい緑の立方体を押込んだ場合の変形を提示している。また、図 4.15(e),(f) は、最もヤング率の大きい青の立方体を押込んだ場合の変形を提示している。



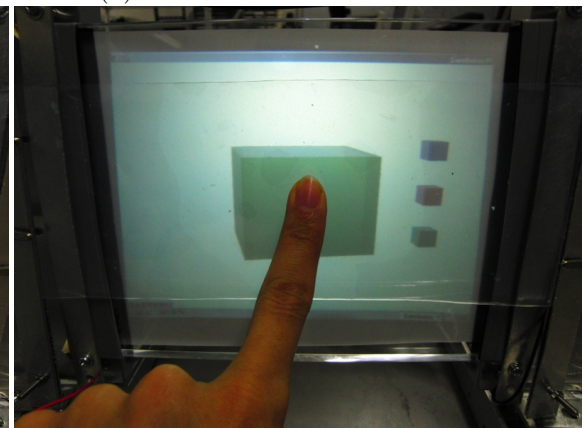
(a) スイッチを押す前



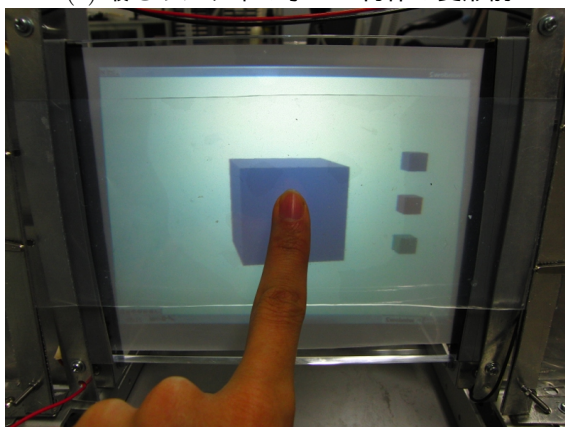
(b) スイッチを押すことによる変形



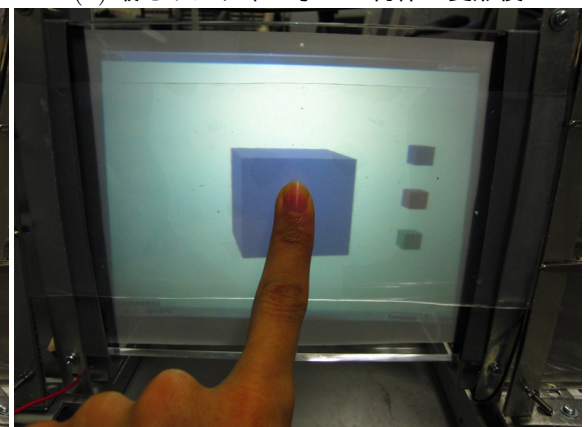
(c) 最もヤング率の小さい物体の変形前



(d) 最もヤング率の小さい物体の変形後



(e) 最もヤング率の大きい物体の変形前



(f) 最もヤング率の大きい物体の変形後

図 4.15: 投影映像

#### 4.3.3 視触覚を融合することによる認知

ヒトが物体を押し込むといった操作は、対象物体の変形によって得られる視覚、対象物体の変形により指先の接触面積が変化することによって得られる触覚、対象物体から指先に働く反力によって得られる力覚などの情報によって物体の物理的性質は知覚されるという考えに基づき、反力と接触面積と映像を変化させ、視触覚融合タッチパネルを制作した。しかし、押し込むという操作において、目が仮想物体を認知している場合の方が、目を閉じて仮想物体を認知していない場合に比べて、接触面積の変化は感じなかった。つまり、視覚を融合することによって、触覚の情報が失われた。力触覚デバイスと同一の提示空間に視覚を融合することによって、仮想物体がデバイスのディスプレイに提示された映像であるという遠心性コピーが生じ、仮想物体の硬さを予測してしまうために、小さな接触面積の変化を知覚できなくなる可能性があると考えられる。



## 第5章 まとめ

力触覚提示と視覚提示を組み合わせ入出力装置として、触覚フィードバック型のタッチパネルなどが考案され始めている。しかし、提示できるのは反力や振動覚のみで限定的である。

本研究では、映像の提示部と押し込んだ時の硬さを表現する力覚の提示部を一体化した視触覚融合タッチパネルを開発することを目的とした。ユーザが映像提示されたタッチパネルに触れ、押し込んだ場合に、押し込んだ力に応じて接触面積を変化させることによって硬さを提示した。接触面積の制御はディスプレイ表面に張力を加えることによる。

システムの全体として、力覚提示可能なディスプレイの上に触覚提示可能なゴムシートを置き、背面投影方式により映像を投影するため、ディスプレイの背面側にプロジェクタを配置した。また、力覚生成、及び触覚生成にはにはモータを用い、それぞれディスプレイとモータ、透明柔軟ゴムシートとモータを糸で接続した。映像を背面投影可能な環境で指の位置検出と接触面積を獲得するために、FTIR方式で赤外線の反射をカメラで計測し、2値化、ラベリング処理を行い、中心座標と表面積を計算した。

仮想物体の硬さを提示するために、反力の生成はPWM制御によって提示できることを確認した。また、触覚を提示するディスプレイ表面の剛性の変化は、モータで透明柔軟ゴムシートに張力を加えることで実現可能であることを確認した。力触覚の提示に加えて、タッチパネルのスイッチに応じた三種類の硬さの弾性物体の変形する映像を提示することで、視触覚を融合したタッチパネルの制作を可能にした。触覚提示部に関しては、表面素材をうまく選択することで、押し込み感覚の接触面積と反力と張力モデルと実測値をさらに近づけていくことが期待される。

## 謝 辞

本研究は大阪大学基礎工学部で行った。本研究において、研究環境を提供し、親身になって御指導、御助言等を頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科大城理教授に心から深く感謝するとともに、篤く御礼申し上げます。本研究をまとめるにあたって、副査教官として御指導頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科木原隆典助教に深く感謝します。本研究を通じて、様々な視点から多くの有益な御指導、御助言を与えてくださり、大変親身になって、指導して頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科井村誠孝准教授、黒田嘉宏助教、臨床医工学融合研究教育センタ鍵山善之特任助教に篤く御礼申し上げます。また、大城研究室の修士の方々である山崎直継氏、芦田洋敏氏、金守恒志氏、福塚大介氏、山田和広氏、奥村陽介氏、重枝慧氏、未竹哲也氏、田中翔太氏、徳井隆博氏、濱田友貴氏、吉元俊輔氏に深く感謝致します。最後に、日々の研究生活を共に過ごし助け合ってきた同研究室の近藤良氏、清水祐司氏、増田拓氏、森口裕樹氏、利原康寛氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] 岩田洋夫, “体性感覚呈示技術”, Vol.31, No.2, pp.78-81, 2007.
- [2] 藤田欣也, 大森純祐, 片桐宏, “指先接触面積制御による柔らかさディスプレイの試作”, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp.251-254, 2000.
- [3] 佐々木博, 藤田欣也, “力確提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌会, Vol.5, No.1, pp.795-802, 2000.
- [4] 新井史人, 岩田直也, 福田敏男新井, “タッチパネル用透明触覚スイッチ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌第9回大会, pp.5-6, 2004.
- [5] Hui Chen, Hanqiu Sun, “Real-time haptic sculpting in virtual volume space”, Virtual Reality Software and Technology, pp.81-88, 2002.
- [6] 黒田嘉宏, 平井真, 中尾恵, 佐藤寿彦, 黒田知宏, 長瀬啓介, 吉原博幸, “多指力覚提示装置を用いた臓器圧排シミュレータに関する研究”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌会, Vol.11, No.4, pp.515-525, 2006.
- [7] 坂巻克己, “二次元アクチュエータを応用した触覚提示マウスの研究開発”, 日本機械学会誌, Vol.104, No.996, November, 2001.
- [8] Hiroaki Takahashi, “Electro-Tactile Display with Localized High-Speed Switching”, ICAT 2002, December, 2002.
- [9] 下条誠, 篠原正美, 福井幸男, “3次元触覚ディスプレイにおける提示ピン配置密度と形状判別特性”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.5, pp.1202-1208, 1997.
- [10] Jussi Rantala, “Methods for Presenting Braille Characters on a Mobile Device with a Touchscreen and Tactile Feedback”, IEEE Transactions on Haptics, Vol.2, No.1, January-March 2009.
- [11] 山本晃生, 高崎正也, 樋口俊郎, “超薄型静電アクチュエータを用いた触感インターフェース”, SICE SI2000 講演論文集, pp59-60, 2000.
- [12] Frederick Phillips Brooks, “What’s Real About Virtual Reality?”, IEEE Computer Graphics and Applications, Special Report, pp.16-27, November/December, 1999.
- [13] FEELEX, <http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/feelex/feelex-j.html>

- [14] 宇高正憲, 池井寧触, “覚力覚の提示手法と感覚融合に関する基礎的研究”, 情報処理学会研究報告, HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 pp.3-6 2008
- [15] 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.
- [16] 赤羽歩, 村山淳, 寺西望, 小池康晴, 佐藤誠, “押下感のあるタッチパネルの開発と制御信号の検討”, インタラクション 2005, Vol.4, pp.33-34, 2005.
- [17] 金子光臣, 山崎恵子, “視覚障がい者対応タッチパネル”, 神奈川大学卒業論文, 2004.
- [18] 佐々木博, 藤田欣也, “力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.1, pp795-802, 2001.
- [19] CyberGrasp, Immersion: <http://www.immersion.com> (参照 2009-12-29).
- [20] PHANToM, SensAble: <http://www.sensable.com/> (参照 2009-12-29).
- [21] SPIDAR, <http://resource.renesas.com/> (参照 2010-1-25).
- [22] SPIDAR, <http://sklab-www.pi.titech.ac.jp> (参照 2010-1-25).
- [23] 井上健司, “柔軟シートを用いた視覚・触覚ディスプレイの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.84-85, 2004
- [24] 金裕可里, “知的照明システムにおけるタンジブル UI の開発”, 月例発表会, 第 109 回, 2009.
- [25] Jefferson Han, “Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection”, In Proc. of the 18th ACM symposium on User interface software and technology, pp.115-118, 2005.
- [26] 三好俊郎, “有限要素法入門”, 培風館, 東京, 1994.