慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	触感伝達システムを用いた動物とのインタラクション : さわれないものにさわる
Sub Title	Interaction with animal using transmission system for tactile sense-touch things unable to touch
Author	日高, 佑輔(Hidaka, Yusuke) 前野, 隆司(Maeno, Takashi)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・ マネジメント研究科
Publication year	2009
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2009年度システムエンジニアリング学 第14号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002009-0035

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2009 年度

触感伝達システムを用いた
動物とのインタラクション
―さわれないものにさわる―

日高　佑輔
（学籍番号：80833430）

指導教員　前野　隆司

2010 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

論　　文　　要　　旨

学籍番号	80833430	氏　名	日高　佑輔

論 文 題 目：

触感伝達システムを用いた動物とのインタラクション
―さわれないものにさわる―

（内容の要旨）

本研究は，ヒトがあたかも動物に触ったように感じる，マスタースレーブ型触感伝達システムを提案するものである．

まず，従来の触覚技術の用途をマインドマップを用いたブレインストーミングによって洗い出した．つぎにアンケートを行なった結果，「さわれないものにさわる」事を実現すると，高い価値を生み出せる事がわかった．触れないものにはいくつかの種類がある．例えば，実体が無く物理的に触れない光，遠すぎて触れない月および危険なので触れない猛獣などが挙げられる．本研究では，危険な動物に触ることに着目する．我々の開発する，遠隔地に触感を伝送する技術を用い，危険な動物を安全に触る方法を実現する．具体的には，ロボットアームの先端に触感を検出できる触感センサを取り付け，その触感を安全なところにいる操作者に触感ディスプレイを介して呈示するという方法である．この場合，操作者は自分が動物とインタラクションしているような感覚を得られる．本研究が提案する手法に，剥製を触る場合では味わえない価値があることを示す．

ヒトが触れなかった動物に遠隔で触るために，マスタースレーブ型の触感伝達システムを構築した．操作者はマスタ側のロボットアームを操作する．この操作に応じて、スレーブ側のアームが動作する．スレーブ側アームの先端には，我々の開発したヒト指型弾性触感センサを装着した．ヒト指型弾性触感センサは，ヒトの指と同等に小型で，指の特徴である指紋および層構造を有したセンサである．ひずみゲージが内蔵してあり，対象物の粗さ感，摩擦感および硬軟感を，二次元方向に検出可能となっている．このようにして得られた触感情報が，ネットワークを介してマスタ側に送信される．マスタ側では，この情報に基づき，ボイスコイルが振動する．この振動によって操作者に触感を呈示する．

構築したシステムの評価を行なった．一例として，クサガメの触感を被験者に体験してもらった．その結果，以下に述べる 3 つの知見を得た．

- 提案するシステムは，はく製に触る場合と比較して，より触りたいという好奇心を満たす
- 力覚のみを呈示する場合と，触感と力覚を呈示する場合を比較すると，触感と力覚を呈示する方が，よりヒトの好奇心を満たす
- 触対象の正確な触感を再現していなくとも，ヒトの好奇心を満たす

また，動物園の飼育員の方にインタビューを行い，システムの実現化への可能性と今後の課題を明らかにした．

以上のように，これまで触れなかった動物に触れるようになる動物触感伝達システムを構築し，動物の触感を伝達する事に成功した．また，ヒトの好奇心を満たす事において，本システムが有効である事を明らかにした．

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	80833430	Name	YUSUKE, Hidaka

Title

Interaction with Animal using Transmission System for Tactile Sense

-Touch Things Unable to Touch-

Abstract

This research proposes the master-slave type transmission system for tactile sense, which man feels when he touches the animal.

First, We researched the usage of tactile sense technology by brainstorming using mindmap. Next, We had found out that the realization of "touch things unable to touch" would perform high value in the future. In this research, we focused attention on touch the dangerous animals. This technology transmits tactile sense to remote place enables us to touch the dangerous animals. In this case, the operator feels like getting interaction with animals. The survey in this study indicates that to use this technology is more valuable than to touch a stuffed animal.

We constructed the system, capable of touching animals remotely that we hadn't been touch. The user operates the robot arm at the master side. According to this operation, the arm at the slave side works. It equipped with the human's finger type elastic tactile sensor that we developed at the tip of a slave side arm. Human's finger type elastic tactile sensor is as small as a man's finger, and the sensor has the fingerprint and layer structure that are the feature of a finger. The strain gauge is built in the sensor and the coarseness feeling, the feeling of friction, and the hard and soft feeling of a subject can be detected in the direction of two dimensions. Thus, the acquired tactile sense information is transmitted to a master side through a network. The voice coil vibrates based on this information by the master side. Tactile feeling is shown to an operator by this vibration.

We evaluated the constructed system. As on example, the testee experienced the tactile sense of turtle. As a result, we had obtained three findings described as follows.

- The system arouses more curiosity, compared with the case to touch stuffed animal.
- Compared the case to present only inner force sense with the case to present sense of inner force and touch, the latter raised more curiosity.
- Even if an accurate the animal's sense of touch is not reproduced, human's curiosity is filled.

As explained above, we have succeeded in transmitting sense of touching Animals by constructing a master-slave system. In addition, it is shown that the system is effective for filling human's curiosity.

目　次

第1章　序論 1
1.1　背景 1
1.2　従来研究 2
1.2.1　触覚センサ 2
1.2.2　触覚ディスプレイ 5
1.2.3　触覚伝達システム 6
1.3　研究目的 7

第2章　触覚技術の創出する価値 9
2.1　用途の洗い出し 8
2.2　用途の選択に用いる方法 17
2.2.1　ニーズに関する分析の方法 17
2.2.2　皮膚感覚の付与効果に関する分析の方法 18
2.2.3　実現可能性に関する分析の方法 19
2.3　用途の選択 20

第3章　動物触感伝達システムの設計と構築 23
3.1 提案するシステムのニーズに関する調査 23
3.2 触覚伝達システムの設計 25
3.2.1　要求仕様 25
3.2.2　システムの構成 25
3.3 触覚センサの設計と構築 26
3.3.1　ヒトの指の機能と構造 26
3.3.2　触覚受容器の構造と機械刺激に対する受容特性 28
3.3.3　ヒトの触感認識に関する知見と触感の定義 33
3.3.4　触感センサを用いた触感評価法 35
3.3.5　触感センサの詳細設計 38
3.4 触覚ディスプレイの設計と構築 41
3.4.1　粗さ感の呈示 41
3.4.2　摩擦感の呈示 42
3.4.3　圧覚の呈示 42
3.4.4　皮膚感覚情報の推定法 42

第4章　システムの技術的検証 45
4.1　触覚伝達システムの技術的検証 45
4.2　触覚センサの技術的検証 46
4.2.1　粗さ感の検出に関する評価 48
4.2.2　硬軟感の検出に関する評価 49
4.2.3　摩擦感の検出に関する評価 50
4.3　触覚ディスプレイ 51
4.3.1　触覚ディスプレイの周波数特性 51
4.3.2　触覚ディスプレイを用いた実素材の触感呈示 52

第5章　動物触感伝達システムの評価 55
5.1　動物触感伝達システムの評価 55
5.1.1　システムのニーズに関する意識調査 55
5.1.2　実験に用いる動物の選択 56
5.1.3　評価実験の方法 59
5.1.4　評価実験の結果と考察 60
5.2　動物園運営者側から見たニーズ 63

第6章　今後の展開 66

第7章　結論 68

謝辞

参考文献

付録 A　動物園職員に行なったインタビュー

1

序論

本研究は，ヒトがあたかも動物に触ったように感じる，マスタースレーブ型触感伝達システムを提案するものである．本章ではこれまで研究されてきた触覚技術について特徴の紹介を行なうとともに，触覚技術が抱える問題について述べる．その後，本研究の目的と手法について論ずる．

1.1 触覚技術の現状

一般的にヒトの感覚機能は，視覚，聴覚，触覚，味覚，嗅覚の五種類に分類され，これらを総称して五感と呼ばれている[山口 2006]．ヒトは五感によって自身の周囲の情報を取得し，そういった情報を知覚することにより周囲の変化に対応し生活してきた．近年ではそうした感覚の中でも特に，視覚及び聴覚を利用した技術は我々の生活の身近に浸透して来ている．視覚を利用した技術としては，例えばテレビとカメラのように，映像をヒトに呈示する技術と映像を取得する技術が確立されている．同様に聴覚を利用した技術で言えば，スピーカーとマイクのように音声を呈示し検出する技術が確立され我々の身近に浸透している．味覚や嗅覚の分野においても調味料や香水といったように，任意の味や香りを呈示する面での技術は発達している．近年，視聴覚に次ぐ次世代の技術として触覚に注目が集まってきた．触覚は，皮膚に直接物体が接触することで生じる感覚で，日常生活を営む上で重要な役割を担っており，生理学的には体性感覚と呼ばれる感覚の一部であるとされる．体性感覚とは，「身体の表層組織(皮膚や粘膜)や，深部組織(筋，腱，骨膜，関節嚢，靱帯)にある受容器が刺激されて生じる感覚」のことである[岩村 2001]．ヒトの体性感覚と大脳が司る部位に関して研究された知見によれば，大脳において体性感覚を司る部位が大半を占めており，このことからも人々の日常生活における触覚の重要性がわかる[グリーンフィールド 1999]．こうした事実から，触覚提示技術を確立することは，多岐にわたる分野において多用な価値をもたらすと期待されている．しかし，五感の中でも触覚を利用した技術においては，現状として，研究はされているが，我々の暮らしに浸透していない．その理由をいくつか以下に挙げる．

ａ）触覚を呈示検出する技術の，実用化に向けた開発が，企業などによって成されていないこと

社会において呈示や検出といった触覚技術の実用化を目的とした開発が，企業などで行われていない．その理由として，どういった用途がありそれら用途にどの様な価値があるのか，明確化されていない事が挙げられる．技術を開発したとして，その価値がどれ程あるのかがわかってい

ないからこそ，どれだけ投資していいのか定かでない．その為企業は，実現化を視野にいれた開発を行なうことができない．こうした現状ではあるものの，学術的に触覚技術の研究は毎年行なわれている．しかし，そうした研究の中でその用途と価値に関する研究が行なわれていない．

ｂ）触覚特有の技術的な難しさ

今現在，ヒトの触感を正確に検出・呈示する技術はまだ無く，もしできるようになればヴァーチャルリアリティなどの分野での利用が見込まれる．検出および呈示する場合において，ヒトが感じる触感をどの程度まで正確に再現できるのかといった，技術的な課題がある．

ｃ）現状の技術レベルに即した有効な用途が提案されていない．

現状では柔らかさ感や冷温感など単一の触感因子を再現する技術は確立されつつあるが，それらの技術を有効に活用したアプリケーションは提案されていない．一方で，現在想定されている用途を実現するためには高度な皮膚感覚技術の確立が要求されているために，今後も技術開発に多額のコストをかける必要がある．

こうした理由から，我々の生活に浸透するようなアプリケーションが現れていない．上記で述べたように様々な研究がなされてきたわけであるが，以下にこれまでに行なわれてきた触覚技術に関する研究及び最新の動向についてまとめる．

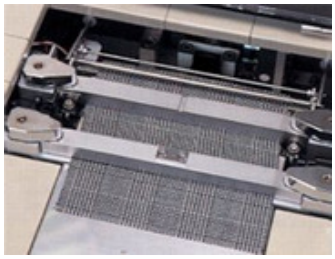
1.2　従来研究

これまで行なわれてきた触覚に関する研究を，扱う触覚について大きく分けると二種類に分けられる．触覚は「深部感覚」と「皮膚感覚」とに分類される．前者は，皮下の筋肉，腱，関節などによっておこる感覚で，触対象物の接触情報や反力を知覚する．後者は皮膚表面の受容器によって起こる感覚で，「つるつる」「ざらざら」といった微細な表面状態の触感覚を表現する定性的な認識である触感や，「こり」「しこり」のような対象物の内部の弾性分布といった対象物の状態を知覚する．これに対応して，広義の触覚技術は，深部感覚情報を扱う力覚技術と皮膚感覚情報を扱う皮膚感覚技術に分類される．本研究では，そうした皮膚感覚まで扱っている研究を参考にし，これまでどの様な技術が研究されてきたのかを調べた．

1.2.1　触覚センサ

触覚センサとは，ヒトが手指などを用いて対象の触感を感じるように，ヒトの手指の代わりに触感を検出する装置のことである．これまでにも多くの触覚センサが開発されてきた．

市販されている触感計測システムとして，Fig. 1.1 に示すような，カトーテック(株)の KES シリーズが挙げられる．風合い計測と称し，ヒトが触感を評価するときに行なう「なでる」，「引っ張る」，「折り曲げる」，「指でおす」といった動作を測定装置で再現し，風合いの定量化を目的としている．しかし，引張り・せん断試験機，純曲試験機，圧縮試験機，表面試験機，摩擦テスターといったように試験機が独立しており，同時に測定することはできない．また，物体との接触面が剛体であるため，ヒトの指の接触状態を再現することができない．したがって，素材の違いを判断するために用いる物理量もヒトが用いる物理量とは異なり，ヒトが感じることができる触感の評価には不十分である．ヒトの触覚に着目している研究に焦点を当てる．ヒトの触覚に関連するセンシング技術には現在少なくとも三つの方向性があり，それぞれに開発すべき内容と優先順位が異なっている[篠田 2007]．第一の用途はロボッ



(a) 自動化引張り・せん断試験機



(b) 自動化圧縮試験機

Fig. 1.1　KES シリーズ [カトーテック　http://www.keskato.co.jp/]

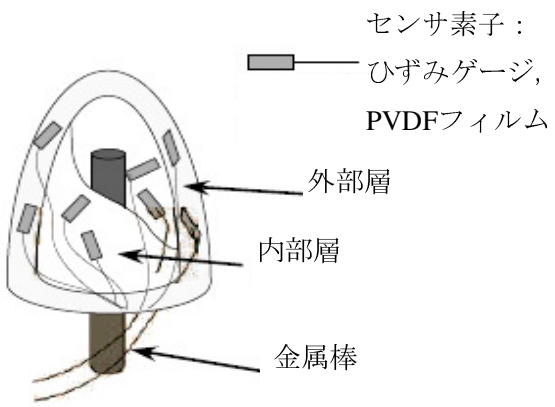


Fig. 1.2 人間型柔軟指 [多田2005]

トの全身触覚である．この開発における目下の目標は，実用的な丈夫さを持ち柔らかく自由曲面を覆うことができるデバイスを開発することである．当面の目的において皮膚の一点でのセンシング能力はそれほど高くなくてもよい．まずは全身にくまなく触覚を実装できることが必要であり, センシングの解像度や能力(その内容は後述する)はその後で除々に高めていけばよいというのが研究開発の基本姿勢となる．

第二の用途としては，VR における触感を忠実に計測できるセンサを実現することである．多くの VR 研究者は触覚までも忠実に再現したいと望んでいるが，そのためにはまず皮膚が対象物に触れたときの触感をデータ化するセンサが必要になる．この目的において最も重要なのは，ヒトが取得しているのと同等な触覚情報を知覚するセンサを実現することである．その目的が達せられればそのセンサがロボットの表面に容易に実装できるものでなくても当面は問題ではない．全身のような広い面積ではなく，まずは体の一部(できれば指先)を代替するものが実現されれば十分である．触感センサは，VR だけでなく工業製品の表面の触感を定量化し，触感という面から製品の品質向上を目指す上でも注目される技術領域である．医師の触診の自動化も，触感センサの応用分野となる事が想定される．

第三の用途は自動作業するハンドの指先のセンサである．ロボット工学と同時に始まった触覚センサの最初の目標は，自動作業をするロボットの指先に取り付けて物体把持の状態を計測することであった．最近では完成度の高い触覚センサの開発例も見られるようになっており，また触覚情報を用いた高速マニピュレーションなども実現されるようになってきた．この応用にとって，触感検出の能力が必ずしも人間のそれと同じ特性を持つ必要はない．指の表面における力分布がベクトルとして正確に計測できることが重要で，その精度，時間応

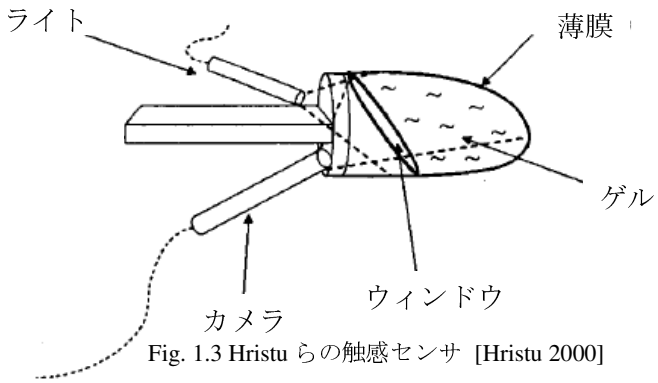
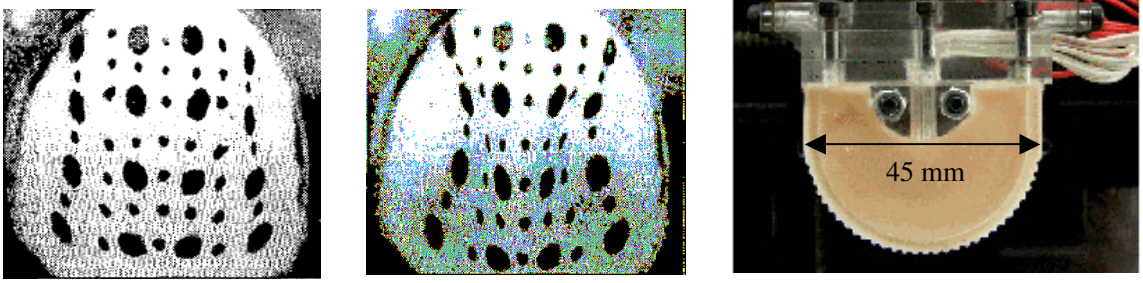


Fig. 1.3 Hristu らの触感センサ [Hristu 2000]



(a) 変形前　　(b) 変形後

Fig. 1.4 撮影画像 [Hristu 2000]

答はむしろ人間の能力を超えたものになることが望ましい．本研究では後ほど，提案するシステムのために触覚センサの開発を行うが，この際に重要となるのは，この分類で第 2 の用途及び第 3 の用途のために開発されるセンサのそれぞれの長所を同時に併せ持つセンサを開発しなければならないという事にある．以下に参考とした今まで開発されてきた触覚センサについて以下に代表的なものを紹介する．

多田らは Fig. 1.2 に示すような，内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指の開発を行った[多田 2005]．多田らのセンサは，2 層のシリコーンゴムから構成される．外部層に使用しているシリコーンゴムは内部層のシリコーンゴムよりも縦弾性係数が大きいものを使用している．センサ素子にはひずみゲージおよび PVDF フィルムを使用し，それぞれ各層に 6 枚ずつ，合計 24 枚のセンサ素子をランダムな位置，方向に配置している．多田らは，このセンサを物体に押し付けたり，擦ったりした際に得られる複数のセンサ素子の出力から，コルク，紙，ビニルおよび 2 種類の木材の識別を行った．しかし，多田らのセンサは上述の 5 つの物体を識別することはできるが，縦弾性係数や動摩擦係数といった物性値を測定する手法の提案には至っていない．したがって，未知の物体の触感を識別することは困難であると考えられる．

Hristu らは，Fig. 1.3 に示すような，変形可能な薄膜を用いたフィンガによる触感センサの開発を行った[Hristu 2000]．Hristu らのセンサには，小型カメラが内蔵されており，内蔵したカメラで撮影した Fig. 1.9 のような画像情報をもとに物体表面の変形を推定し，表面形状などの特徴を検出した．しかし，標点が 0.5 mm 間隔でプロットされているため，微細な凹凸の形状測定はできない．したがって，Hristu らのセンサは，mm オーダーの形状測定には有効なアプローチであることが示されたが，細かい形状測定が困難である上，力の検出が行われていないため，物体の触感を評価するには不十分である．

向坊らは Fig. 1.5 に示すような，指紋を有した弾性触感センサの開発を行った[向坊 2005]．センサの弾性部は，縦弾性係数の異なるシリーンゴムを用いた 2 層構造で形成されている．センサ



Fig. 1.6　PHANToM　[http://sensable.jp/]

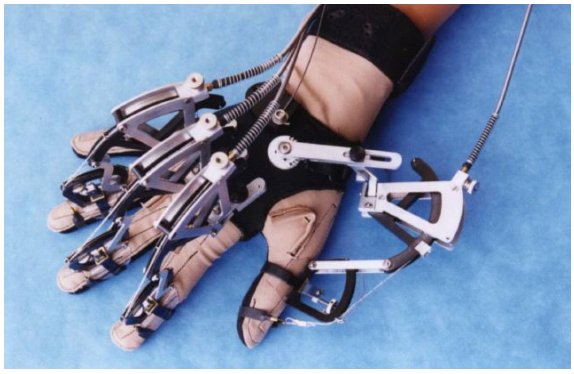


Fig.1.7CyberGrasp　[http://www.immersion.com/]

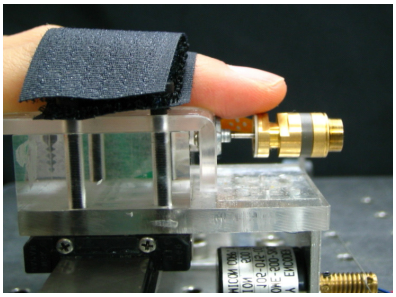


Fig. 1.8　超音波振動型触感ディスプレイ [音川 2005]

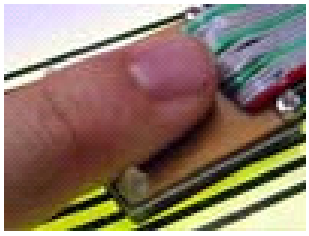


Fig. 1.9　電気刺激型ディスプレイ [梶本 2001]

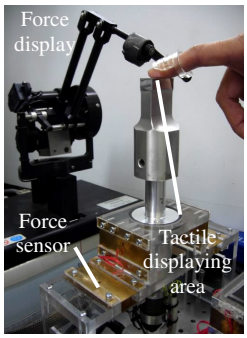


Fig. 1.10　超音波振動子と力覚提示装置を統合した皮膚感覚提示システム　[塩川 2009]

の内部にはセンサ素子として小型のひずみゲージが放射状に 5 つ配置されている．また，センサの表面は曲面形状と指紋を模倣した突起を有する．さらに，センサのベース部分に配置された 2 軸力センサにより法線方向の力と接線方向の力を測定することができる．向坊らは，これらの特徴を持つセンサを用いて，物体表面の凹凸の検出（あらさ感），物体の縦弾性係数の検出（やわらかさ感），法線方向の力と接線方向の力の比から物体の動摩擦係数の検出（摩擦感）ができることを確認した．向坊らは，取得した触感情報をもとに，アルミニウム，コルク，サテン，デニム，タオル，発泡スチロールなど異なる触感の材質の識別を行った．このように，向坊らのセンサは，触感情報の取得に優れているが，センサ弾性部の幅が 45 mm とヒトの指と比べて大型であるため，小型化を必要とするロボットハンドへの装着は困難である．

1.2.2　触覚ディスプレイ

触覚ディスプレイとは，ヒトがあたかも現実の物体に接触しているかのような感覚を，人間に提示する装置である．力覚提示技術においては，提示原理の確立および提示デバイスの開発がともに着実な進歩を遂げつつある．代表的な例として，Fig. 1.6 および Fig. 1.7 にそれぞれ示す PHANToM[SensAble]や Cyber Grasp[Immersion]がある．これらのデバイスは，既に実用化されており，主にバーチャルリアリティ(Virtual Reality; VR)の分野において高い価値を創出している．デバイスの小型・軽量化などにおいて課題を残すものの，今後ますます利用されていくことが予想さ

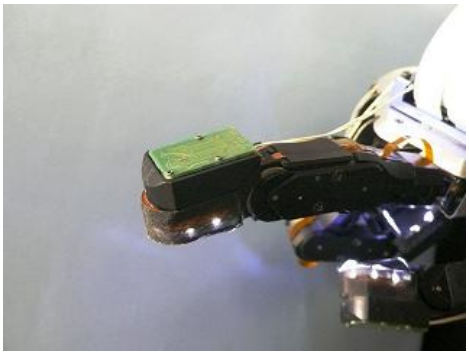
れる．その一方で，皮膚感覚提示技術は力覚提示技術に対して遅れている．力覚呈示と触感呈示との差は開発にかけるコストによって生じているというよりは，むしろ皮膚感覚提示技術の開発が力覚提示技術と比較して多くの困難さを伴うためである．皮膚感覚提示技術の確立を目指す研究機関や，次世代の技術を搭載することによって製品の差別化を図りたい企業などにおいては，皮膚感覚提示技術の困難さを打開することが強く求められている．現在のデバイスの開発に対する方向性を大きく分類すると，簡素化とリアリティの二つに分類される．これまでに行われてきた皮膚感覚呈示技術を調査し，代表的なものを以下に挙げる．

音川や塩川らは，超音波振動を用いて複雑な触感を呈示する事に試みた[音川 2005] [塩川 2009]. 特に塩川の研究ではヒトの触感が，粗さ感，硬軟感，摩擦感，冷温感に関する 4 つの潜在的な因子によって成るという白土らの知見[白土 2004]に着目し，そのうちの粗さ感，硬軟感および摩擦感を超音波振動の振幅変調と力覚ディスプレイを用いて独立に制御することで，リアルな触感の提示を試みた．これを図 1.13 に示す．超音波振動の振幅変調波の定常成分振幅が硬軟感に影響することを利用し，非定常成分の波形と振幅を調整することで粗さ感を，定常成分の振幅を調整することで硬軟感を，さらに指側面に力覚ディスプレイを用いて接線力を提示することによって摩擦感を調整した．提案した手法を用いて，日常的に触る一般的な実素材の触感を再現した結果，実素材に近い粗さ感，硬軟感および摩擦感を複合的に呈示することに成功した．冷温感ディスプレイとの統合によって，よりリアリティの高い皮膚感覚を提示可能になると考えられる．しかし，複数のディスプレイとの統合によってリアリティの高い皮膚感覚を実現しているため，システムが大型・複雑化することは避けがたい．このため，本手法は実用面で多くの課題を有している．

デバイスの簡素化を実現しながらも，複雑な皮膚感覚の提示にも応用可能なディスプレイを開発した研究としては，梶本らの開発した電気刺激型触覚ディスプレイが挙げられる．梶本らは，電流刺激を用いた皮膚感覚ディスプレイを開発した[梶本 2001]．これを図 1.17 に示す．電流の流し方によって皮膚内部の各種感覚受容器につながる神経軸策を選択的に刺激することも可能であり，小型軽量で簡素でありながら複雑な皮膚感覚を提示することにも成功している．さらに，複数の電極を高密度で配置することによって，従来の手法では困難であった空間分布の提示も可能である．しかし，深部に存在する触覚受容器のみを選択的に刺激することはできないという欠点がある．また，このディスプレイでは指の変形を生じさせないため，操作者は提示される感覚のタイミングと大きさを予測することができない．このとき，電気刺激を利用しているため，不意に提示される刺激が電気ショックとして認識される場合がある．したがって，物理現象と神経の触感受容メカニズムを解明し，これを考慮することで，操作者の不安や違和感を取り除く必要があると考えられる．

1.2.3　触覚伝達システム

テレイグジスタンス（Telexistence，遠隔臨場感，遠隔存在感）とは，バーチャルリアリティの一分野であり，遠隔地にある物（あるいは人）があたかも近くにあるかのように感じながら，操作などをリアルタイムに行う環境を構築する技術およびその体系のことで，東京大学の舘暲教授によって 1984 年に初めて紹介された[@wikipedia]．これまでにも多くはないものの，先に述べたような触覚センサ及びディスプレイを用いて触感を伝達しようといいう試みはあった．Fig.1.11 および Fig.1.12 に示すように，館らのグループでは触感を伝達するロボットハンドマスタースレー



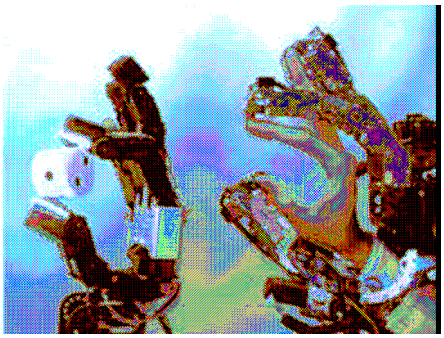


Fig. 1.12　ロボットハンドマスタースレーブシステム　[佐藤 2007]

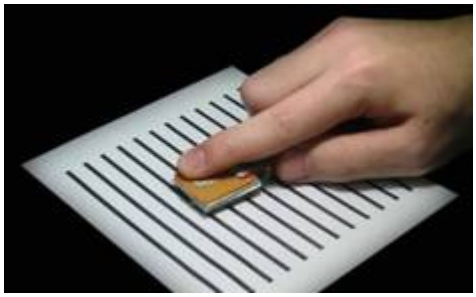


Fig. 1.11　触感情報伝送　[神山 2002]



Fig.1.13 力覚の伝達　[NTTdocomo　2009]

ブシステムを開発した．この技術に用いられているのは，1.2.1 で述べた Hristu らの触覚センサと同様に光学センサを用いたタイプの触覚センサと 1.2.2 で述べた梶本らの電気触覚ディスプレイを用いる事で，力覚のみならず，かたさ，表面形状などの触感も伝達する事ができる．実現を視野にいれているかどうかは不明ではあるが, 企業からも触覚の技術を, 研究する動きが見られた．2009 年に行なわれたワイアレスジャパンにおいて NTT ドコモは慶應義塾大学大西研究室と共同で力覚を伝達するシステムを開発した．こうしたマスタースレーブ技術を用いた触覚の伝達の研究においての問題点は，触覚の複雑さに対してある一部を再現しようと試みている事にある．白土らの研究で明らかになった粗さ感，硬軟感，摩擦感，冷温感という四つのうちの一つを再現しようとしており，これまでにそれらのうちの複数を同時に伝達しようとした研究は無い．

1.3　研究の目的

1.2 で述べたように多くの研究がされて来たにもかかわらず，まだ我々の身近に浸透するような，触感を使った技術は現れていない．また 1.2 で紹介した研究を含め，これまでの研究はヴァーチャルリアリティや遠隔医療の分野で価値があると述べながらも，その価値を明確にする事無く研究が行なわれてきた．本研究では，皮膚感覚を利用した技術を明確にし，それらの価値を得点付けを行う．その結果最も価値が高いと思われる用途について，実際に開発を行い，評価を行うことで，触覚技術を用いた価値のあるシステムの開発を行う事を目的とする．具体的には，アンケートを行った結果，将来的に高い価値を生み出す事がわかったヒトがあたかも動物に触ったように感じる，マスタースレーブ型触感伝達システムを提案する．また，共同研究を行う塩川らの研

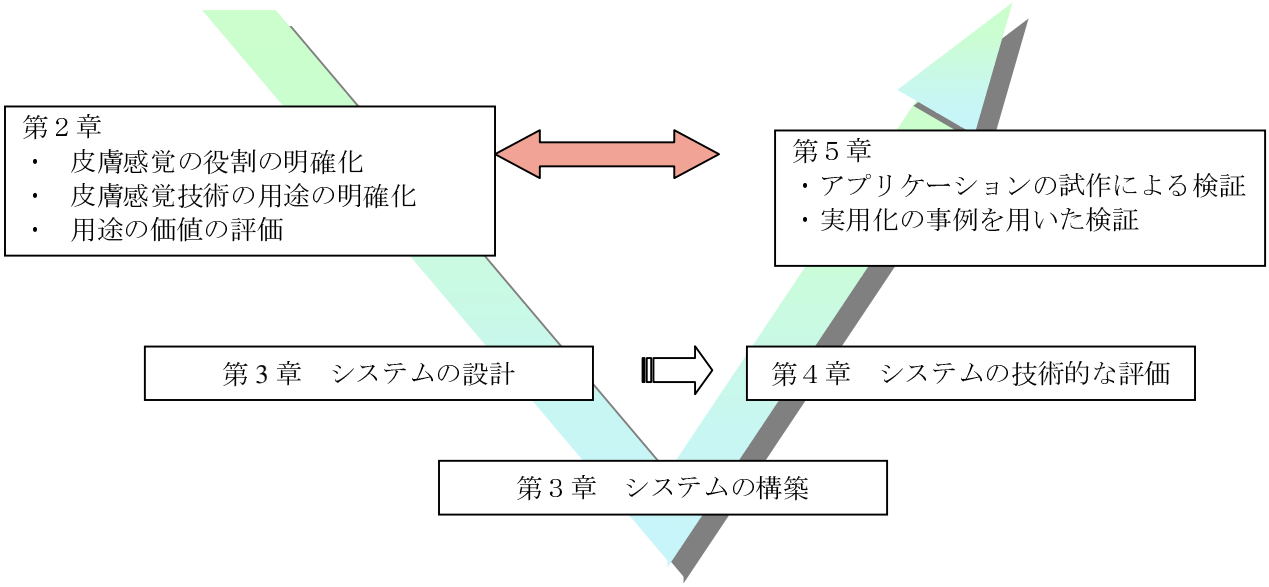


Fig. 1.4　本論文の構成と V モデル

究から挙げられた用途の価値を明らかにし, 本研究と合わせて, 皮膚感覚を用いた触覚技術が我々の身近に浸透することへの寄与を目的としている．以下に本論文の構成とそれぞれの章の役割について述べる. 本論文は全 7 章から構成されており本章では, 本論文の研究背景と目的を述べた. 第二章では触覚について我々が日常どの様に使っているのかという事について触れるとともに, 先に述べた様に触覚技術の用途について従来の知見から集めるだけでなく，ブレインストーミングや KJ 法などの様々な発想法を用いて徹底的に洗い出す. 次に, 得られた用途の価値の高さを(1)ニーズ（2）皮膚感覚付与効果（3）実現可能性の三つの観点から評価することによって，価値の高い用途を明確にする．第三章では明らかにした価値の高い用途に対するアプリケーションの開発及び構築について述べる．第四章では開発したシステムの技術的な検証を行なうことで動作の確認をする．第五章では本研究で開発したシステムの評価を行い，触覚技術の価値について述べる.

2

触覚技術の創出する価値

本章では，皮膚感覚技術の用途を徹底的に洗い出すとともに，得られた用途についての分類を行なう．次に，得られた用途の中で価値の高い用途の選出を行なう．

2.1　用途の洗い出し

本研究ではこれまで研究が行なわれてきたような，皮膚感覚技術について，

(1)　従来研究にて想定されている用途の洗い出し

(2)　皮膚感覚を用いた日常動作・状態の洗い出し

(3)　発想法を用いた新たな用途の洗い出し

の 3 つの方法で，皮膚感覚提示技術の用途を洗い出した．詳しくは，共同研究を行なった塩川の研究に述べられている[塩川 2009]．ブレインストーミングを複数回やることによって洗い出すと共に，KJ 法やマインドマップを用いて用途をいくつかのグループに収束させた．またそのグループの中に含まれるアイデアを洗い出す事で，約 200 のアイデアを洗い出した．得られたアイデアを塩川らが MECE に分類する事を試みる一方で，本研究ではそのアイデアのなかで，将来的に価値が高いと考えられるアイデアの選定を行なった．本節では Tab.2.1 に示す，得られたアイデアの一覧について説明を行なう．

グループにまとめられた各用途について説明を行なうと共にそのグループに含まれる主だったものを述べる．得られたアイデアに総じていえることとして，ヒトが感じる感覚である為に，ヒトに触覚を呈示する，触覚呈示技術に関連する用途が数多く見られた．

Tab.2.1　アイデアだしから整理した用途の一覧

用途番号	用途	用途の説明
1	環境の VR 体験	普段は行けないような場所（南極、月など）の環境を VR 空間で体験する。
2	遠隔触覚コミュニケーション	触感遠隔伝達デバイスを用いて、遠隔地の家族、恋人、ペットなどと触れ合う。
3	遠隔触感体験	危険な動物、美術品など、直に触れることはできないものの触れてみたい生物・モノに、触感遠隔伝達デバイスを介して間接的に触れる。ただし、利用者および触対象に危険は一切ないものとする。
4	携帯触感再生機	IPOD に好みの音楽を入れて持ち歩くような感覚で、心地よい触感・好みの触感・覚えておきたい触感など、所望の触感を携帯型触感提示デバイスに保存しておき、好きな時に提示する。
5	触感の定量的表現	本などに記載されている触感の定性的な表現（料理本における「耳たぶくらいのかたさ」など）を、実際に表現通りの触感を提示することでより直感的な理解を可能にする。
6	快感覚の定常的提示	衣類型デバイスを着用することで、厚着をしていても涼しい感覚、薄着でも温かい感覚など、常に快適な感覚を得る。
7	ネットショッピング	ネット通販などで商品の画像に触れて、手触り、服の着心地、重さなどを直感的に確かめることができる。
8	快感覚の VR 体験	VR 空間上で、温泉につかっている感覚など、心地良い感覚を体験する。VR 提示装置さえあれば、自宅でも所望の快感覚を体験することができる（例 : VR 温泉、VR マッサージ、VR 風俗）。
9	現実ではできないことの VR 体験	法的・倫理的な問題などで直接は触れることのできないモノや、現実には存在しないもの（絶滅した動物など）に、VR 空間上で触れる。
10	操作フィードバック	タッチパネルなど、触感フィードバックのないデバイスに、ボタンの押下感、形状などの触感を提示する。
11	VR 空間上での痛みの提示	VR 空間上で危険なモノに触れた際、痛みをリアルに提示することで、直感的な回避行動を誘発したり、触対象が危険なモノであることを直感的に学習する。
12	触感のシミュレーション	美容用品の使い心地、付け心地や使用後の肌・髪の触感を、美容用品使用前に体験する。
13	気温のシミュレーション	天気予報に基づき、気温、湿度などをリアルに再現する。外出先の気候に適した服装を直感的に判断することができる。
14	危険警告の抑制	手袋型・衣類型デバイスを介して得られた不快感覚（衝撃を受けた際の痛みなど）を、実際よりも小さくして装着者に提示する。
15	快感覚の増幅	手袋型・衣類型デバイスを介して得られた快感覚を、実際よりも増幅して装着者に提示する。

16	操作感の最適化	手袋型デバイスを介してキーボードなどの入力インタフェースを操作すると、操作するデバイスによらず各ユーザにとって最も操作しやすい触感が操作フィードバックとして提示される。
17	快触感による触行動の促進	本来は触れたくないモノ（不快な感触のモノ、嫌な手作業）に手袋型デバイスを介して触れると、触対象の触感を快感に変換して装着者に提示し、触りたいという気持ちを誘発する。
18	不快触感による触行動の抑制	触れてはいけないモノに手袋型デバイスを介して触れると、触対象の触感を不快な感覚に変換して装着者に提示し、触りたいという気持ちを抑制する。美術品の保護、痴漢などの犯罪防止に利用。

1　環境の VR 体験

南極，月，砂漠など，普段は行けない特殊な環境を，皮膚感覚提示技術を用いて VR 空間上でリアルに体験する．気温，風圧，重力などの触覚で知覚する情報をリアルに再現することによって，ユーザはあたかも現地にいるかのような体験をすることができる．これによって，普段は行けないような特殊な環境に行ってみたいという好奇心を満たすことができると考えられる．既に，宇宙空間における無重力環境や，南極の極寒環境など，一部の特殊環境を再現する技術は実用化されている．

2　遠隔触覚コミュニケーション

コミュニケーションにおいて，触覚は親愛的な感覚を伝達する機能をもつと考えられている[山口 06]．このことから，遠隔コミュニケーションにおいて，視覚・聴覚に加えて触覚を付与することができれば，コミュニケーションの質を高めることができると考えられる．家族・恋人とのコミュニケーションでは，触覚を付与することによって，「抱きしめる」「頭をなでる」などの触覚コミュニケーションを実現することができるため，より多くの安心感を得ることが期待できる．また，友人との遠隔コミュニケーションにおいても，例えば「つっこみ」などの触覚コミュニケーションが可能になれば，より多くの親しみや満足感を得ることができると考えられる．携帯電話や IP 電話などの普及により，遠隔コミュニケーションの利用のし易さや頻度が増した現代社会においては，実際にヒトと触れ合う機会が相対的に減少しているが，皮膚感覚提示技術を用いればそうした機会を補償することができると考えられる．しかし，デバイスを介した触覚コミュニケーションによって，実際に触れ合うことと同等の効果を得られるかは定かではない．また，このような用途によって，実際に触れ合う機会の減少を加速させる可能性もある．

3　遠隔触感体験

2 の遠隔触覚コミュニケーションに類似しているが，センサとディスプレイが同じ空間に存在する環境下で皮膚感覚情報を伝達することを，本研究では便宜上，「近距離伝達」と呼ぶ．近距離伝達は，ユーザと触対象も同じ空間に存在するが何らかの理由で触対象に直接接触することができず，何らかのデバイスを介してであれば対象に触れることができる場合を想定している．デバイスを介して間接的に触れた対象の皮膚感覚情報をユーザに提示することで，ユーザはあたかも直に対象に触れているかのように感じる可能性がある．これによって，さまざまなアプリケーションが実現できる．

触対象に直接触れることができない要因は，

- 外部環境に問題がある
- 自身に問題がある
- 触対象に問題がある

の三通りが考えられる．以下に，各々の問題と，それらの問題に対し皮膚感覚情報の近距離伝達が果たす効果の例を挙げる．

外部環境の問題により接触できない事の解消

全身を覆う作業服や手袋などを装着しなければならない環境下にいる場合には，知覚できる皮膚感覚情報が大幅に抑制されてしまう．このような環境の例として，宇宙環境や原発などの極限環境，極寒の環境，食品工場などの清潔な環境などがある．皮膚感覚提示技術を応用すれば，例えば手袋の外側に触感センサ，内側に触感ディスプレイを取り付け，センサで取得した皮膚感覚情報をリアルタイムで内側のディスプレイで提示することで，ユーザは手袋をはめているにも関わらず，素手で対象に触れているかのように感じるかもしれない．このような用途の目的は，皮膚感覚情報が大幅に抑制されている状態では実現できない精密な作業などを，安全面や衛生面を変えることなく実現可能にすることである．その他の例として，分厚い作業服を着ていても，作業服の外側に取り付けたセンサによって取得した皮膚感覚情報を内側で提示することができれば，周囲の変化を敏感に感知することが可能になるため，作業効率の向上だけでなく，危険の感知の補助としても役立つと考えられる．

自身の問題により接触できないことの解消

感染症を患っているヒトや，潔癖症のヒトなどは，対象に直接触れることが困難であるため，手袋などを介して触れることになる．そうした状況にあるヒトにとっては，知覚できる皮膚感覚情報が日常生活においても抑制されることになるため，生活に支障をきたす場合もありうる．したがって，外部環境に問題がある場合と同様に，外側に触感センサ，内側に触感ディスプレイを取り付けた手袋があれば，触対象の特徴の認識，器用な作業の実現，快感の取得，危険の学習・感知など様々な場面で役立てられると考えられる．

触対象の問題による接触不可の解消

危険な動物や国宝など，法的・倫理的問題などによって直接は触れられない対象に，デバイスを介して間接的に触れることによって，その触感を体験する．普段触ることのできないモノに触ってみたいという好奇心を持つヒトは多いため，この用途によって，そうした好奇心を満たすことができると考えられる．触感を体験するのみであれば，VR で体験するなどの方法もあるが，この用途の特徴として，触対象が生物であれば触れられた際のリアクションを見ることができることである．これによって，ユーザは，本物に触れている・インタラクションしているという実感を持つことができると考えられる．また，危険な動物の体調を管理する際にも，獣医が安全に動物の皮膚感覚情報を確認することに貢献できると考えられる．

次に，情報の検出と提示が「非同期」の場合の用途について述べる．これらの用途では，刺激の生成方法に着目すると，二種類に細分化することができる．すなわち，保存しておいた皮膚感覚情報を提示する用途と，シミュレーションした皮膚感覚情報を提示する用途である．保存しておいた皮膚感覚情報を提示する用途では，センサによって検出した皮膚感覚情報を基に刺激を生成するが，提示するタイミングは検出と同期しない．

4　携帯触感再生機

この用途の特徴は，所望のタイミングで情報を提示できることである．保存した情報を提示することによって実現できるアプリケーションがアイデアとして挙がった．アップル社の iPhone に代表されるように，好きな楽曲，動画，写真などを携帯端末などに保存し，所望のタイミングで再生することができるデバイスが近年普及している．皮膚感覚提示技術を応用すれば，従来の視覚・聴覚メディアに加えて，気に入った触感，心地よい触感，覚えておきたい触感などを保存し，好きなときに提示させることができる．

5　触感の定量的な呈示

また一方で，シミュレーションした皮膚感覚情報を提示する用途についてもアイデアが挙がった．本用途の主だったものとして，料理本などによく記載されている「耳たぶくらいのかたさ」など，触感の表現は極めて定性的である場合が多いため，ヒトによって解釈が異なるという問題がある．皮膚感覚提示技術を用いて，前述したような表現を定量的に提示することで，ヒトによる解釈の差異を減らすことができると考えられる．

6　快感覚の定常的提示

厚着をしていても涼しい感覚，薄着をしていても暖かい感覚，着心地の悪い服を着ていても心地よい感覚など，快適な感覚を定常的に提示する．例えば，気温などの外部環境によらず定められた服装を身につけなければならない状況などに対して有効であると考えら

れる．いかなる服装であっても快感覚を定常的に提示することによって，装着者のストレスを軽減することができる．また，見た目を違和感のないものにできれば，対峙した相手の気分を害することなくコミュニケーションをとることができると考えられる．

7　ネットショッピング

インターネットの普及とともに，ネットショッピングの利用率が拡大している[情報通信総合研究所]．ネットショッピングの問題点として，商品を実際に手に取ることができないことがある．特に，衣類やアクセサリーなどの装飾品については，商品を実際に手に取らないと安心して購入できないという人も少なくない．また，ネットショッピングを利用して商品を購入した後も，実際に手に取ってみたら手触りが気に入らない，サイズが合わないなどの理由で商品を返品するケースもある．皮膚感覚提示技術を用いて，ネットショッピングにおいて商品の手触り，重さ，服の着心地，フィット感などを直感的に体験することができれば，前述した問題を解決することができると考えられる．

8　快感覚の VR 体験

VR 空間上で，例えば「温泉につかっている感覚」などの心地良い感覚を体験する．VR 提示装置さえあれば，アミューズメントパークのみならず自宅などでも所望の快感覚を体験することができる．身体障害者や高齢者など，健常者のように気軽に所望の場所に出向くことができない人に対して有効な用途であると考えられる．応用例としては，VR 温泉，VR マッサージ，VR 風俗などが考えられる．

9 現実ではできないことの VR 体験

法的･倫理的な問題などで現実では直接触れることのできない対象に VR 空間上で触れる．「触対象の問題による接触不可の解消」と異なる点は，触れることができる対象と行うことのできる触行動にある．前者に関しては，VR であるため，絶滅した動物や架空の対象物のように現実には存在しない対象にも触れることができるなど，遠隔操作で現存する対象に触れる場合と比較して触対象の選択肢が多いというメリットを有する．また，後者に関しては，VR 空間上であれば対象に好きなように触れることができるため，より大きな満足感を得ることができる可能性がある．しかし，間接的ではあっても実物に触れる場合と，VR 空間上で仮想的な対象に触れる場合とを比較して，どちらが大きな満足感を得られるかは調査されていないため，触行動の選択肢が少なくても実物に触れる方が得られる満足感が高い可能性もある．

10 操作フィードバック

タッチパネルなどの普及に伴い，機械的な変形の伴わないユーザインタフェースに対して皮膚感覚フィードバックを提示することが強く求められている．皮膚感覚提示技術を用

いて操作フィードバックを提示することができれば，大画面・必要最小限のボタン要素などのタッチパネルのメリットを損なうことなく，従来のデメリットであったフィードバックがないことに起因する誤入力の頻発，画面注視の必要性などの問題を解決することができると考えられる．また，ボタン押下感，ページめくり感，スクロール感などをタッチパネル上でリアルに再現することができれば，機械的な変形を伴う端末に慣れ親しんだ人でも，違和感なくタッチパネルを使用できると考えられる．

11 VR 空間上での痛みの提示

現実と比較して遜色ないリアリティを有する VR に慣れ親しんでしまうと，痛みなどの不快感覚に対する免疫が小さくなる可能性がある．VR 空間上で痛みをリアルに再現して提示することで，反射的な回避行動や危険の学習を効果的に誘発できることに加えて，不快感覚に対する耐性を身に付けることができると考えられる．

12 触感のシミュレーション

これまで数値情報としてのみ提示されていた皮膚感覚情報のシミュレーション結果を，皮膚感覚提示技術を用いて実際に再現することで，より直感的な判断を可能にする．美容用品使用後の肌や髪の触感など，従来は使用してみるまでわからなかったものを事前にシミュレーションして皮膚感覚情報として体験することができれば，購入の判断が適切に下せるようになると考えられる．

13 気温のシュミレーション

これまでは気温・湿度・風速などが数値情報として提示されているが，実際にリアルな皮膚感覚情報として体感することができれば，外出先の気候に適した服装が容易に選択できるようになるなど，多くのメリットが生まれると考えられる．12 と同じ様により直感的に判断が出来るなどの利点が考えられる．

14 危険警告の抑制

皮膚感覚情報を抑制して提示する．痛みなどの不快感覚などは，危険警告として重要な役割を持つものの，必要最低限の不快さであることが望ましい．不快感覚のみを，危険警告としての役割を損なわない程度に選択的に抑制することができれば，日常生活をより快適にすることができると期待できる．ただし，不快感覚が抑制された状態に慣れてしまうと，不快感覚に対する免疫が衰えてしまう可能性がある．不快感覚は，危険警告のみでなく，社会生活の中で思い通りにならない不快な感情に耐える耐性を身に付ける役割も有していると考えられる．実際に，不快感の抑制が無気力の増加につながることを示唆した興味深い実験結果も報告されている[Dweck 75]．このため，必要な時にのみに抑制するなどの対処が必要であると考えられる．

15 快感覚の増幅

皮膚感覚情報を増幅して提示する．全情報を増幅することができれば，皮膚感覚の知覚能力が衰えたヒトの補助デバイスになると考えられる．また，必要な情報のみを増幅して提示することができれば，表面の歪みやしこりの検出など，触対象の特徴を識別しやすくすることができる．研究レベルでは，凹凸感を増幅させるデバイスが開発されている[佐野 05]．心地よいと感じる感覚を増幅してヒトに呈示する事により，より心地よいと感じられる事が考えられる．

16 操作感の最適化

キーボード，タッチパッド，ポインティングデバイスなど，現在さまざまなユーザインタフェースが普及しているが，最も操作しやすいユーザインタフェースはヒトによって異なる．ユーザインタフェースの操作性に影響を与える要因の一つに，操作触感がある．例えば，キーボードのキー押し込み時の反力，鋭さ，ストロークなどの操作触感は，キーボードの種類によって異なり，ヒトによって最も操作しやすい操作触感は異なる．このため，複数のユーザインタフェースを実際に試した上で，最も操作しやすいものを選択しなければならないという手間がユーザに生じる．また，全ての作業環境において同様の操作触感を得るためには，入力インタフェースを統一しなければならない．そこで，皮膚感覚提示技術を用いて操作触感を自在に調整できれば，どの入力インタフェースを用いても，常に各ユーザにとって最適な操作触感を提示することができる．このため，ユーザは機器を選択する手間が省けることに加え，機器による操作性の差異は生じにくくなるため，作業環境が異なっても一定の作業効率を維持できるようになると考えられる．また，ユーザインタフェースを開発する企業にとっても，多種類の機器を開発する必要がなくなるため，コストなどの点において大きなメリットになりうる．

17 快触感による触行動の促進

嫌な手作業や，不快な手触りのモノなど，種々の理由によって直接触れたくない対象の触感を，皮膚感覚提示技術を用いて「心地よい」などの快触感に変換する．これによって，触れたいという気持ちを誘発できる可能性がある．例えば，文房具などを使用した際に快触感が得られれば，単調な事務作業であっても快適に行えるようになるかもしれない．このように，対象に触れる・操作する際に得られる皮膚感覚情報を快触感に変換することによって，触れるという行動を促進する．

18 不快触感による触行動の抑制

法的・倫理的な問題なので直接触れてはいけない対象の触感を，皮膚感覚提示技術を用いて「痛い」「気持ち悪い」などの不快触感に変換する．これによって，「快触感による触

行動の促進」とは逆に，触行動を抑制させることができると考えられる．このような用途は，例えば美術品の保護、痴漢などの犯罪防止に利用できると考えられる．また，タバコに触れた際に不快触感を提示することで，喫煙を抑制することにも応用できる．

2.2　用途の選択に用いる方法

本節では，前節で洗い出した用途の価値に対する分析方法の概要を述べる．なお，本研究では，本研究では，

(1)　ニーズ
(2)　皮膚感覚付与効果
(3)　実現可能性

の 3 つの観点から分析する．(1) のニーズでは，各用途が理想的なレベルまで実現したと仮定した際，それぞれのニーズがどの程度あるのかを調査する．(2) の皮膚感覚付与効果では，各用途における皮膚感覚技術の非代替性，および用途の主機能を達成する上で提示した皮膚感覚が果たす役割の大きさを分析することで，各用途において皮膚感覚を付与することの重要性がどの程度あるかを推定する．(3) の実現可能性では，各用途に要求される皮膚感覚技術の難易度，デバイスのサイズなどの制約，コストなどを分析することで，現状の技術力で実現できる用途，引き続き研究開発を行うことで将来的に実現可能な用途，実現することがほぼ不可能な用途などを明確にする．これらを明確にすることは，皮膚感覚技術の今後の方向性を提言する上で必要不可欠である．以上の 3 つの観点の分析結果を基に，

・　現状の技術で実現できる価値の高い用途
・　将来的に価値の高い用途を実現するための技術開発の方向性

について考察する．

2.2.1　ニーズに関する分析の方法

本研究では，アンケートによって前項にて選択した 18 の用途のニーズを調査した．まず，Microsoft Excel を用いてアンケートの作成を行った．

・アンケート調査の目的
・皮膚感覚技術の説明
・前項にて選定した各用途の説明
・回答者の属性に関する設問
・各用途のニーズに関する設問

から構成される．アンケート調査の目的では，皮膚感覚技術を用いた有効なアプリケーションの模索が目的であることを記述した．各用途の説明を行う上で，回答者は皮膚感覚技

術の概要を知っている必要があるため，皮膚感覚技術の簡単な紹介を行った．Tab. 2. 1 のように，用途の説明では，具体例を交えるなど，特別な予備知識がなくても理解できるような工夫を施した．回答者の属性に関する設問では，回答者の性別，年齢，職業を答えさせた．各用途のニーズに関する設問では，各用途の

・　　個人の顕在的なニーズ
・　　個人の潜在的なニーズ
・　　社会的なニーズ

を調査するために，それぞれに対応した 3 つの設問を設定した．回答者には，前述した 3 つのニーズの程度に関して，それぞれの設問にて 4 段階（1:全く思わない～4:たびたび思う）あるいは 7 段階（1:全くそう思わない～7:非常にそう思う）で評価させた．各用途に関するコメントなどがある場合を想定して，用途ごとに自由記入欄を設けた．なおアンケートは 20 代～40 代の男女 18 名に回答してもらった．

2.2.2　皮膚感覚の付与効果に関する分析の方法

本研究では，各用途において皮膚感覚を付与することの重要性を皮膚感覚付与効果と呼ぶ．従来提案されてきた用途には，皮膚感覚の付与が機能の向上にわずかしか影響しないものや，既に確立した視覚・聴覚提示技術などで容易に代替できてしまうものもある．こうした用途に皮膚感覚技術を用いても，費用対効果が低く，用途の価値が高いとはいえない．以上から，皮膚感覚付与効果が高い用途とは，

・用途の主機能が他の技術では代替できないこと
・その機能を達成する上で，提示した皮膚感覚の果たす役割が大きいこと

の二つの条件を満たした用途であると考えられる．このため，本研究では，以上の二つの視点から各用途を分析することによって，皮膚感覚付与効果を推定した．なお，本研究では，前者を非代替性，後者を皮膚感覚依存度と呼ぶ．

次に，皮膚感覚技術の非代替性の分析方法について述べる．まず，各用途の主機能を，皮膚感覚技術以外の技術を用いて代替できるかどうかを分析した．次に，各用途において皮膚感覚技術を用いた場合と代替技術を用いた場合を比較し，他技術を用いてどの程度代替できるかを Tab.2.2 に示す評価基準で得点付けした．以上によって，各用途について，皮膚感覚提示技術の非代替性を評価した．さらに，皮膚感覚依存度の分析方法について述べる．まず，各用途においてユーザが行う動作・状態と類似した日常動作・状態を抽出し当てはめた．当てはめた日常動作・状態における皮膚感覚への依存度について，考察し得点付けすることにより各用途の主機能を達成する上での提示する皮膚感覚への依存度を推定した．

Tab.2.2　皮膚感覚技術の代替性についての評価基準

得点	評価基準
3	他の技術では代替できない
2	他の技術でも代替できるが，皮膚感覚提示技術と比較すると大きく劣る
1	他の技術でも代替できるが，皮膚感覚提示技術と比較するとわずかに劣る
0	他の技術で代替しても全く問題ない，もしくは他の技術を用いた方がメリットが大きい

2.2.3　実現可能性に関する分析

本研究では，実現可能性に影響する要素を，各用途に要求される

- 皮膚感覚の生成の技術的難易度
- デバイスのサイズの制約
- 触運動の自由度

の 3 つに特定し，各要素についての評価を総合的に判断することで，実現可能性を評価した．なお，コストも実現可能性に大きく影響すると考えられるが，実現方法が不明確な用途もあることからコストの推定が困難であるため，本研究では実現方法が明確な用途のみコストについての検討を行った．まず，上述した 3 つの要素の評価方法について述べる．Tab.2.3 に示す評価基準で，各要素を小，中，大の 3 段階で大まかに評価した．皮膚感覚の生成の技術的難易度では，各用途が目的とする機能を実現する上で必要となる皮膚感覚情報のリアリティと，現状の技術レベルとのギャップを評価した．現状の技術レベルは，1 章で述べたように，Tab.2.3 の「中」に相当するレベルである．デバイスのサイズの制約では，各用途の機能を実現する上で，どの程度デバイスのサイズに制約があるかを評価した．例えば，用途番号 4 の「携帯触感再生機」のように携帯可能でなくてはならない用途や，用途番号 6 の「快感覚の定常的提示」などのように違和感のある外見であってはならない用途は，デバイスのサイズに制約が非常に大きく，実現する上で大きな弊害である．一方で，用途番号 7 の「ネットショッピング」のように主に室内で用いる用途の場合は，小型である方が望ましいものの，大型であっても目的とする機能を十分果たすことができると考えられる．触運動の自由度では，ユーザがデバイスを用いてなんらかの対象に触れる際の触運動の自由度がどれだけ必要であるかを評価した．例えば，用途番号 3 の「遠隔触感体験」では，ユーザが遠隔地の触対象をさまざまな角度などから触れなければ大きな満足感を与えることはできないと考えられる．触運動の自由度を向上させることに伴い，提示面積，可動域などが増加するため，実現がより困難になる．一方で，用途番号 10 の「操作フィードバック」のように，ユーザが限られた触運動しか行わない用途や，用途番号 1 の「環境の VR 体験」のようにユーザが能動的な触運動を行わない用途は，触運動の自由度が高い用途よりも実現が容易であると考えられる．

Tab.2.3 各要素の評価の基準

評価	皮膚感覚の生成の技術的難易度	デバイスのサイズの制約	触運動の自由度
小	単一の振動刺激など、単純な刺激のみで実現可能	制約がほとんどない	自由度はほとんど必要でない
中	柔らかさ感や冷温感など単一の触感因子の再現によって実現可能	制約がややある	自由度がやや必要である
大	多様でリアルな皮膚感覚提示要求される	制約が非常にある	自由度が非常に必要である

Tab.2.4　実現可能性の評価基準

得点	評価基準（目安）	評価の意味
0	技術的難易度が大，かつ その他のいずれかの項目が大	実現のための理論が明らかでない，もしくは理論的には実現可能であるが，実現には非常に大きな課題を残す
1	技術的難易度が大，かつ その他の項目が小～中	理論的には実現可能であるが，実現には大きな課題を残す
2	技術的難易度が中，かつ その他のいずれかの項目が大	理論的には実現可能であるが，実現にはわずかに課題を残す
3	技術的難易度が小～中，かつ その他の項目が小～中	すぐにでも実現可能である

次に，各要素の評価をもとに，Tab. 2. 4 に示す評価基準を目安として，総合的な実現可能性を評価した．Tab. 2. 4 をみればわかるように，用途の実現可能性に最も大きな影響を及ぼすと考えられることから，皮膚感覚の生成の技術的難易度の評価をベースとして総合的な評価を行った．ただし，コストなど，上述した 3 つ以外の要素が実現可能性に影響する場合もある．そうした場合には，必ずしも Tab. 2. 4 に示す評価基準に従わないものとした．

2.3　用途の選択

前節までの分析方法によって，皮膚感覚技術の価値について考察した．詳しくは塩川が皮膚感覚が創出する価値の分析の中で述べているが，Tab. 2. 16 に，各観点の評価が高い用途を示す．本研究では，簡略化のため，ニーズに関しては個人の潜在的ニーズの平均得点が 2 以上，または皮膚感覚付与効果に関しては推定値が 5 以上，または実現可能性に関しては総合評価値が 2 以上の用途についてのみ抽出した．

Tab2.5　価値が高いと考えられる用途の候補と評価項目の値

	用途	ニーズ	皮膚感覚付与効果	実現可能性	Fig.2.1 内の位置付け
1	環境の VR 体験	5.7	2.5	2	①
10	操作フィードバック	5.5	1	3	②
3	遠隔触感体験	5.3	3	1	③
6	快感覚の定常的提示	5.6	3	0	③
8	快感覚の VR 体験	5	3	0	③
9	現実ではできないことの VR 体験	5.2	3	0	③
7	ネットショッピング	5.1	2.5	1	③
4	携帯触感再生機	4.3	3	0	該当しない
2	遠隔触覚コミュニケーション	4.6	2.5	1	該当しない
12	触感のシミュレーション	4.7	2.5	0	該当しない
5	触感の定量的表現	4.2	1	2	該当しない
11	VR 空間上での痛みの提示	3.7	2	2	該当しない
13	気温のシミュレーション	4.9	2	2	該当しない
18	不快触感による触行動の抑制	3.5	2	2	該当しない

Fig.2.1 に示すように，ニーズ，皮膚感覚付与効果および実現可能性の有無によって，皮膚感覚技術の方向性は異なる．図中の①は，ニーズ，皮膚感覚付与効果および実現可能性が全て高く，現時点で最も有効な用途であると考えられる．①に含まれる用途は，「環境の VR 体験」のみであった．ユーザが体験してみたいと思う環境を詳細に調査し，低コストでの

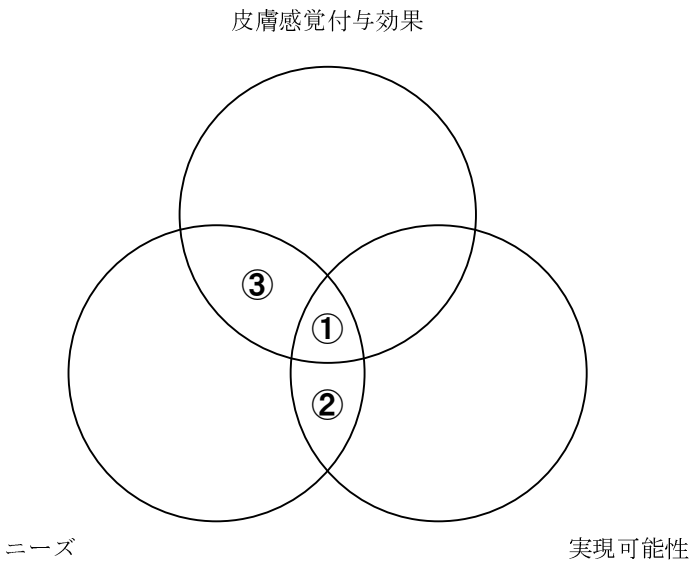


Fig.2.1　用途と評価項目による分類

実現を目指すことによって，他の技術では実現できない新しいアプリケーションを実現することができ，多くの利用者数が見込めると考えられる．図中の②は，ニーズおよび実現可能性が高い用途である．②に含まれる用途は，「操作フィードバック」のみであった．この用途は，皮膚感覚付与効果が高い用途と比較すると，皮膚感覚を用いた恩恵が劣るものの，実現に向けた課題がほとんどないとことを考慮すれば，費用対効果は「環境の VR 体験」に決して劣らない可能性がある．皮膚感覚付与効果が決して高くないとはいえ，付与することによってある程度の効果は見込めるため，製品の差別化においては有効性の高い手段の一つであると考えられる．以上から，①および②に含まれた用途は，現時点で最も開発に力を入れるべき用途であると考えられる．

図中の③は，ニーズおよび皮膚感覚付与効果が高いものの，実現に向けた課題が大きい用途である．③に含まれる用途は，

遠隔触感体験

快感覚の定常的提示

ネットショッピング

快感覚のＶＲ体験

現実ではできないことのＶＲ体験

であった．実現のための理論が明確でない「快感覚の定常的提示」を除けば，上述した用途はいずれも高いリアリティの皮膚感覚提示を必要とする一方で，デバイスの小型・簡素化は最優先次項ではないと考えられる．したがって，リアルで多様な皮膚感覚提示とデバイスの小型・簡素化は必ずしも両立する必要はなく，上述した用途を実現する上で研究者が最も優先すべき事項は，リアリティの高い皮膚感覚の提示手法の確立であるといえる．しかし，そのような技術を確立するためには，技術開発に多額のコストを投じる必要があるため，上述した用途の市場規模や費用対効果などをより詳細に調査した上で，技術開発の方向性を定める必要がある．

　以上をまとめると，

現状の技術で実現できる価値の高い用途は，「環境の VR 体験」および「操作フィードバック」である．将来的に価値の高い用途を実現するための技術開発の方向性としては「遠隔触感体験」，「快感覚の定常的提示」，「ネットショッピング」及び「快感覚のＶＲ体験」であると結論付けることができる．これらの用途はこれまでに研究が行なわれていないものの高い価値を生み出す可能性がある．本研究では「遠隔触感体験」の用途に着目し開発及び検証を行なう．

3

動物触感伝達システムの設計と構築

第２章で確認した将来的に高い価値を創出する用途に含まれる「遠隔触覚体験」に着目する.本件急ではその中でも，アイデアだしの中で注目を集めた「触れないモノに触る」という用途に着目する.この用途の一例として，動物の触感を伝達するシステムを構築した.本章ではその設計及び構築において行ったことについて述べる.

3.1　提案するシステムのニーズに関する調査

第２章で触覚を用いた技術の用途として，今までヒトが触った事の無いものに対して触る体験を提供することで高い価値を将来的に創出できる事が，調査の結果などから明らかとなった．本研究でその用途の一例として提案する，動物の触感を遠隔伝達する動物触感伝達システムに対して，人々にどれだけのニースがあるのかについて調査した.

CVCA を用いたステークホルダーの分析

顧客価値連鎖分析（CVCA：Customer Value Chain Analysis）は製品や工程の開発において，決定権者や中間業者をはっきりとさせ，だれが購入を決定するのか，複雑な市場の構造と各業者との関係を明確にするという効用がある．[石井　2008]基本的な手順について以下に記す.

(1)　これから開発しようとする製品に関連する業者をすべて上げる．決定権者，顧客，事業パートナー，企画団体など

(2)　以下の流れから，これら業者間の関係を明らかにする

①　金銭や資本の流れを”￥”で示す

②　物品：機械，材料，サービス，情報などの流れを示す

③　クレーム，規格の影響，投票などの流れを”！”で示す

(3)　完成した CVCA 図から以下の問について考える

①　プロジェクト全体を通して重要なカスタマは誰か

②　挙げられた業者にとってのバリューは何か

③　これらの情報から顧客の声（VOC：Voice Of the Customer）を構成する

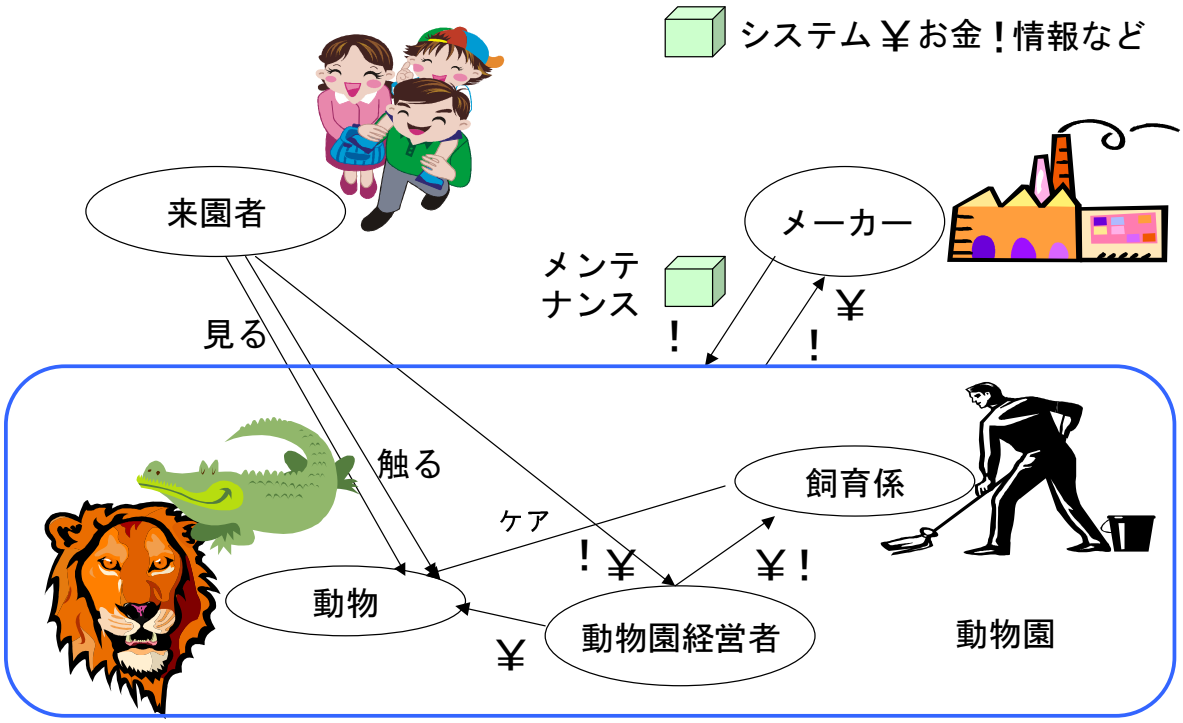


Fig. 3.1　Customer Value Chain Analysis

④　“！”の流れ，特にクレームからマイナスの顧客の声を見つける

(4)　これらの情報を製品定義評価に使用する

(5)　CVCA の結果は，今後の開発工程に利用する

提案するシステムを実用化する際に，どの様な人々がかかわりを持ちどの様な要求があるかを明確化するために，CVCA を用いた分析を行なった．本システムを実際に運用する際には動物園に設置する事を想定し，その際に関係する者を調査した．Fig. 3.1 に示すように従来，動物園に来園した人は動物を視ることで楽しんできた．本研究が提案するシステムは，来園者に触覚による楽しみ方を，従来の行為に付加して提供するものである．また，設備を整えるメーカーと，実際に設置する動物園経営者，動物の世話を行なう飼育員が深く関わっている．　本研究における主なカスタマとして来園者と，飼育員と動物園経営者を含めた動物園関係者を定める．これらのカスタマそれぞれの立場における声をブレインストーミングにより洗い出した．これらの顧客としての要求を挙げると，動物園関係者としての VOC は安全性・扱いやすさといった事が挙がる．それに対し動物園利用者としては，触った事の無い動物を触る事に関する好奇心と，触った事に対して動物がどの様に反応するのかを見てみたいというインタラクションに対する好奇心に分別できる．また，動物が苦手である，または動物がかわいそうであるという負の意見も挙がった事は見逃す事はできない．具体的にどの様な動物に触りたいのかについて，またどの程度触りたいのかにつ

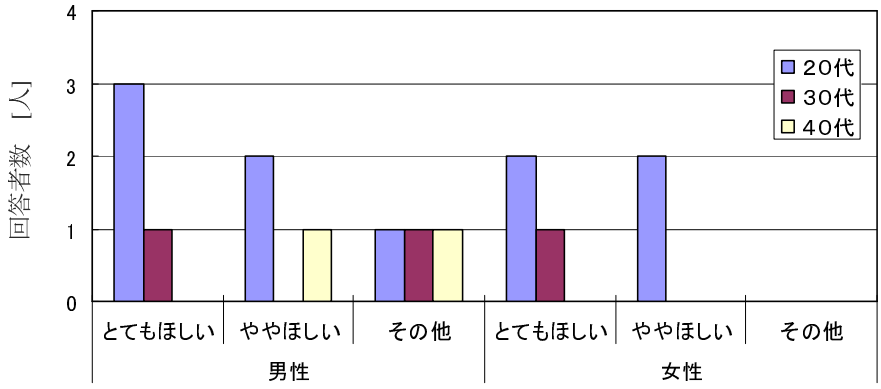


Fig.3.2　動物触感伝達システムのニーズ

いてアンケート調査を行なった．概要について以下に示す.また，その結果を Fig.3.2 に示す.15 人の回答者のうち 12 人がシステムに対しとても欲しいまたはやや欲しいと回答しており，システムのニーズがある事が確認できた.

3.2　触感伝達システムの設計

3.2.1 要求仕様

3.1 における結果より，人々が普段触れない動物を触りたいということを確認する事ができた.本節ではこうしたニーズを満たせるようなシステムを設計する.動物の触感を伝達する上で，コアとなる触感伝達技術については東北大学昆陽らと共に開発を行った.システムに対する要求として，ヒトが直接触れない事を踏まえて，人の代わりに直接，対象となる動物に触る機能と，そのとき触った情報を人に還元し呈示する機能がこのシステムの主たる機能となる.また，副次的に求められる機能として考えられるものを含め以下に列挙する.

・　人の代わりに直接，対象となる動物に触る触覚センサとしての機能

人の指が感じる触感を検出するために，人の指が触感を感じる際の機能を有するセンサが求められる.

・　機械が触った情報を人に還元し呈示する触覚ディスプレイとしての機能

人の指に検出した触感を呈示するために,

・　情報を計算し触感を生成する機能

・　情報を取得した側から呈示する側へと通信する機能

が必要となる.

3.2.2 システムの構成

それぞれの機能を満たす装置を設計開発し，全体で一つのシステムとして稼動するように設計を行った.人の代わりに触感を検出するセンシング機能を著者が担当した．本研究で用いたシステムの主な機能と要素について Fig3.3 で示す.触感を検出するスレーブ側では，触感センサを取り付けたロボットアームによって，触感情報，アームの位置，アームにかかる力を検出する．人に触感を呈示するマスタ側では，スレーブ側によって検出された情

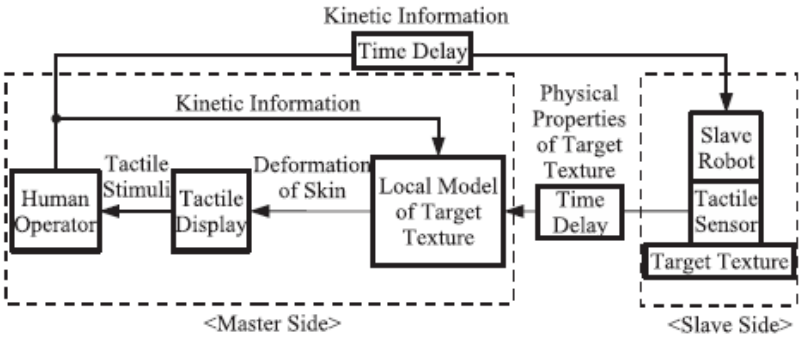


Fig.3.3　触感伝達システムの機能と要素

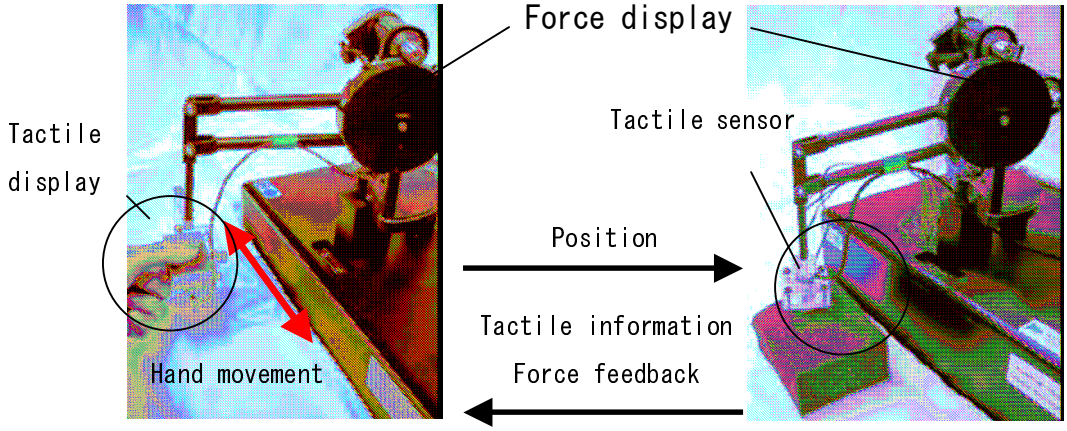


Fig.3.4　触感伝達システム

報を元に，触感情報を触覚ディスプレイによって呈示し，スレーブ側におけるアームにかかる力と位置及び速度のフィードバックを行なう事で，遠隔で操作者があたかも対象となるものに触っているかのような感覚を与える．機能設計を元に開発したシステムの概略を Fig.3.4 に示す．

3.3　触覚センサの設計と構築

3.3.1 ヒトの指の機能と構造

ヒトの指は主に皮膚，骨，爪によって構成されている．Fig. 3.5 にヒトの指の断面図を示す．指先は末節骨の周囲を粘弾性体である皮膚が覆う形で構成され，楕円に近い断面を有する．末節骨は指断面の中心よりやや背面側に位置しており，指の背面には表皮細胞からなる爪に覆われている．皮膚は，手掌や足裏などの無毛部とそれ以外の有毛部に分けられる．皮膚には，外部からの刺激を検出する触覚受容器が数多く配置されているが，無毛部と有毛部では，その種類や密度が異なる．Fig 3.6 に指の皮膚構造の模式図を示す．Fig. 3.6 に示すように，皮膚組織は表面から表皮，真皮，皮下脂肪と呼ばれる 3 層の粘弾性体から構成される．前野らは，表皮，真皮，皮下脂肪の縦弾性係数がそれぞれ 1.4×10^{5} Pa，8.0

×10^4 P a，3.4×10^4 P a であることを確認した[前野 1997]．ヒトの指は全体が粘弾性体から構成されているため，物体表面にならうことにより，常に安定して物体と接触することが可能である．

また，ヒトの指の皮膚表面には，指紋が存在する．指紋とは皮膚表面に規則的に形成された稜紋であり，高さは約 0.1 mm，幅は約 0.3～0.5 mm である．指紋形状は円弧と台形を組み合わせた形状をしている．ヒトは指紋を有することにより指に加わる力を均一に分散させ，安定した把持を行うことができる［前野 2005]．向坊らは，有限要素モデルを用いた解析結果から，指が変形した際に指紋を有することにより指紋内部に応力が集中することを示した[向坊 2005]．このことから，触感検出において，凹凸を有する表面上を指でなぞった際に凹凸に指紋が衝突し振動することにより，内部に存在する触覚受容器の感度が向上すると考えられる．

皮膚表面から約 0.7 mm の深さにある表皮と真皮の境界面は平面ではなく，Fig. 3.6 に示すように真皮乳頭と呼ばれる突起群によって凹凸面になっている．真皮乳頭は，基本的に指紋の直下に 2 列に配置されている．表皮から見て凹部にマイスナー小体（Meissner corpuscle），凸部にメルケル小体（Merkel’s discs）と呼ばれる触覚受容器が存在する．真皮の深部にはパチニ小体（Pacinian corpuscle）とルフィニ終末（Ruffini endings）が存在する．パチニ小体およびルフィニ終末は，いずれも皮膚表面から 2 mm 以上深部に存在する．以上のように各触覚受容器の配置深さが異なるのは，表面状態を効率的に受容するのに重要であると考えられる．Fig 3.7 に示す弾性理論によると，表面に与えられる振動パターンは空間周波数成分が高いほど弾性体の表面近くで強く減衰し，周波数成分が低いほ

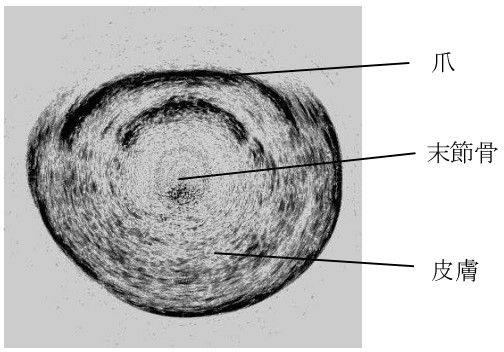


Fig. 3.5　ヒトの指の断面図 [本間 2006]

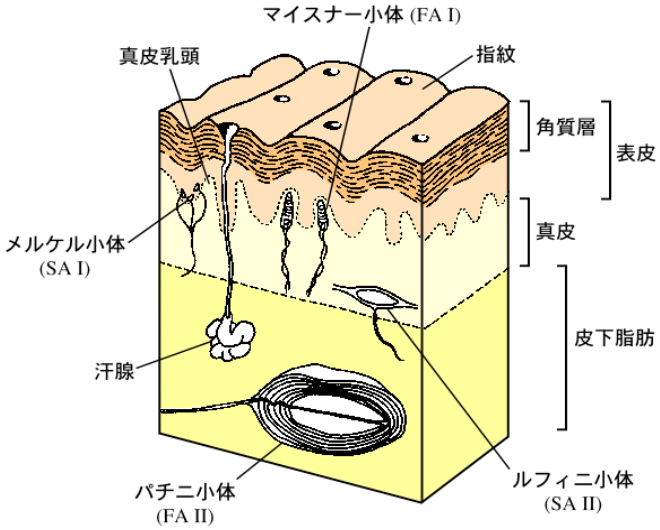


Fig. 3.6　ヒトの指の皮膚構造 [前野 2000]

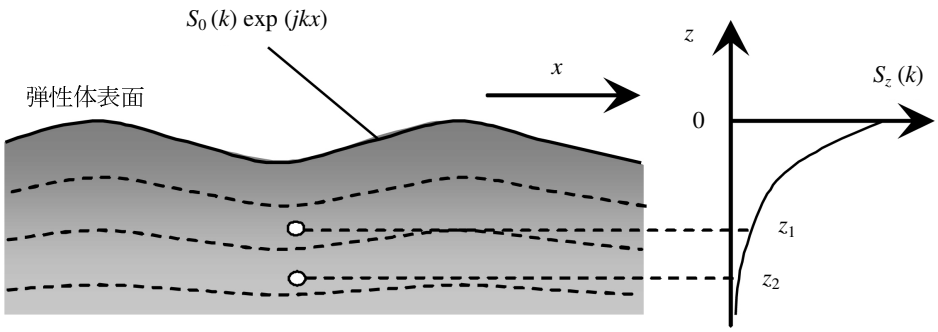


Fig. 3.7　弾性体における空間周波数成分の減衰 [篠田 2002] を改変

ど深部に容易に到達する．したがって，各触覚受容器は配置された深さによって選択的に空間スペクトルの分布特徴をとらえることができると考えられる[篠田 2002]．

3.3.2　触覚受容器の構造と機械刺激に対する受容特性

3.3.1 項で述べたように，ヒトの指には，表皮の最深部に位置するメルケル小体，真皮乳頭の先端部に位置するマイスナー小体，深層にあるパチニ小体，ルフィニ終末が存在する．触覚受容器はみなカプセルに包まれていて，周囲から明確に区別できる構造をもつ．カプセルは神経周囲細胞からつくられ層状をなしており，この構造は刺激に対する応答特性に大きく影響する．以下に 4 種類の触覚受容器それぞれの解剖学的特性について述べる．

(a)　触覚受容器の構造

マイスナー小体は，真皮乳頭の先端部に存在する長さ 20～150 μm，直径 40～70 μm の神経周囲細胞でできた膜とコラゲン線維とからなる受容器である．マイスナー小体の構造を Fig. 3.9 に示す．Fig. 3.9 のように神経終末が水平方向にとぐろをまくようならせん構造をなしている．らせん構造は全体のせん断変形を神経線維の表面における伸縮変形に変換する．またせん断共振周波数は縦共振周波数の 1/10 程度の低い値である．マイスナー小体が 100Hz 以下の振動を検出していることを考慮すると，マイスナー小体はらせん構造をすることで皮膚中の横ずれ力を選択的に検出していると言える[奈良 2000]．

メルケル小体は，有髄線維が真皮内の表皮との境界約 500 μｍのところで多数枝分かれして無髄となった終末部分が円盤状に膨大したメルケル盤が，シナプス様結合によって狭義のメルケル細胞に結合したものである．メルケル小体は表皮の上皮細胞が分化したものである[小川 1993]．メルケル小体の構造を Fig. 3.8 に示す．メルケル小体は，汗腺の通過する表皮最深層部，つまり真皮乳頭の谷に当たる部分に小群をなして存在する．メルケル小体には指状の突起が数本出ていて，これが周囲からの刺激を感受しているのではないかと考えられている．メルケル盤は直径約 7 μｍ，厚さ約 1 μｍである[岩村 1984]．

パチニ小体は皮下組織内に存在する長さ 0.3～1.5mm，直径 0.2～0.7 mm の受容器である[奈良 2000]．パチニ小体の構造を Fig. 3.10 に示す．パチニ小体の構造は棍棒状の内芯をラメラと呼ばれる同心円状の薄いカプセルが 20～70 層にわたって取り囲んでいる．このラメラ構造は最低次振動モードの振動のみを中心部に伝えるため，単純変形の刺激のみを内芯に伝えるフィルタの働きをしていると考えられる．軸索は先端に繊毛状の突起を持ち，内芯のカプセルに入り込んでいる．この突起が外部からの機械的刺激を軸索の受容膜へ伝えると考えられている[大山 1994]．

ルフィニ終末は真皮内に存在する紡錘形で長さ 0.5～2 mm の受容器で，3～5 層のカプセル内に液体が満たされ，内部はいくつかに区切られている．ルフィニ終末の構造を Fig. 3.11 に示す．ルフィニ終末の内芯は直径 6～12 μｍの有髄線維が細かく枝分かれしたもので，コラゲン線維に包まれている．このコラゲン線維が外界と直結していて，これによって外部の刺激を効率よく伝達しているのではないかと考えられている[岩村 1984]．しかし，ルフィニ終末は，未だ解明されていない部分も多く，現状では解剖学的知見が少ない受容器である．

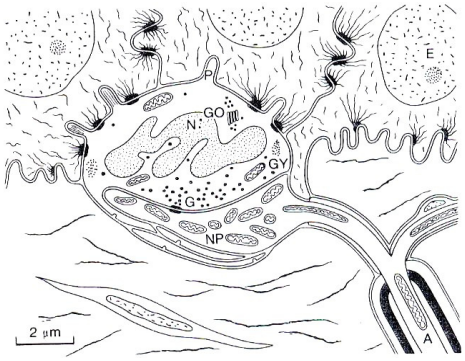


Fig. 3.8　メルケル小体の構造

[Iggo 1969]を改変

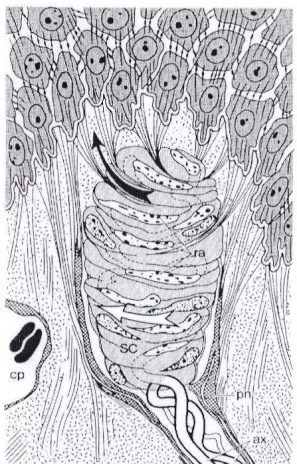


Fig. 3.9　マイスナー小体の構造

[Iggo 1969]を改変

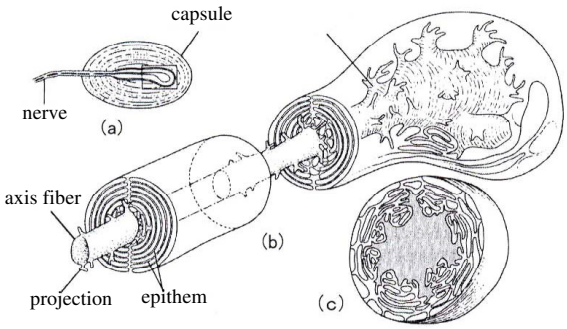


Fig. 3.10　パチニ小体の構造

[Spencer 1973]を改変

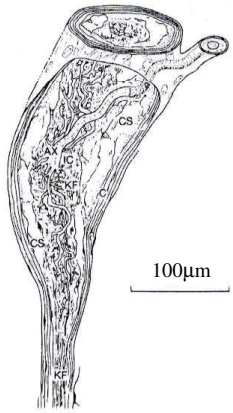


Fig. 3.11　ルフィニ終末の構造

[Chambers 1972]を改変

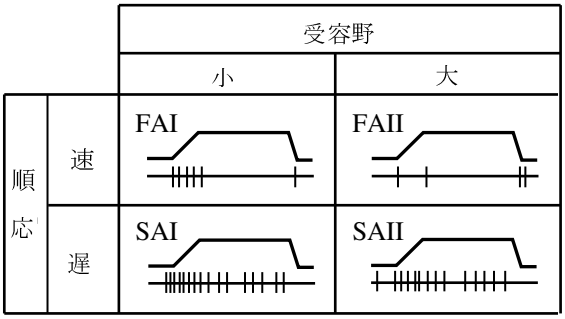


Fig. 3.12　触覚受容ユニットの 4 型

[Johansson 1983]を改変

機械刺激に対する受容特性

各触覚受容器の応答特性について述べる．Johansson と Vallbo は，細いタングステン微小電極を皮膚に差し込み，手の無毛皮膚を支配する神経からインパルス発射を記録して，受容器の応答特性を調べた[Johansson 1983]．矩形波状に持続する皮膚の変形刺激に対する応答の順応の様子を Fig.3.12 に示す．Fig. 3.12 上側の太実線は皮膚の変形刺激の経過を示し，下側のができる．

Tab. 3.1 各触覚受容器の大きさと応答特性 [前野 2000]

name of receptors	Type	receptive field	adaptation	size
Meissner corpuscle	FA Ⅰ	small	fast	L=20～150 μm, D=40～70 μm
Merkel's discs	SA Ⅰ	small	slow	D=7 μm, T=1 μm
Pacinian corpuscle	FA Ⅱ(PC)	large	very fast	L=0.3～1.5 mm, D=0.2～0.7 mm
Ruffini endings	SA Ⅱ	large	slow	L=0.5～2 mm, D=0.2 mm

(L:length, D:diameter, T:thickness)

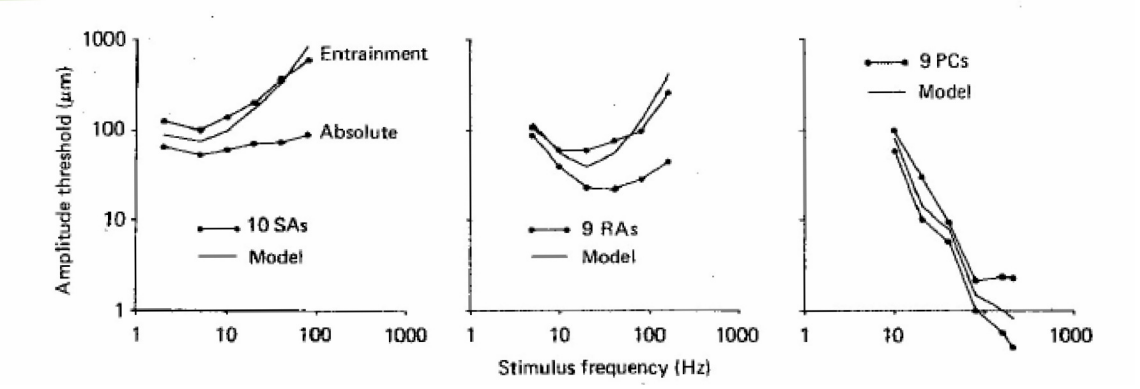


Fig. 3.13　測定された各受容器の振動閾値曲線 [Freeman 1982]

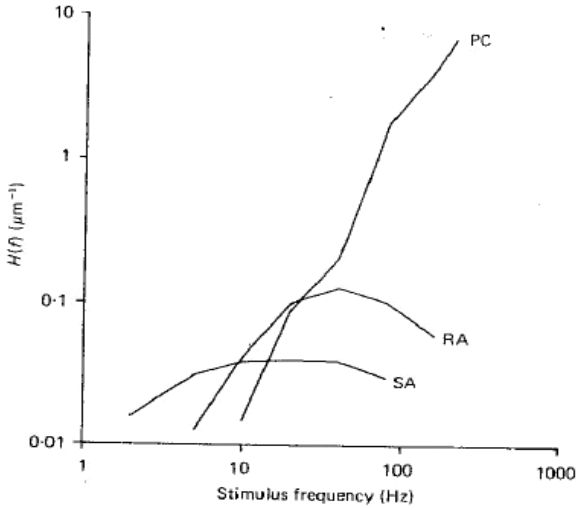


Fig. 3.14 モデル化した各受容器の伝達関数 [Freeman 1982]

ここで，触覚受容単位とは，受容器とその神経束によって構成されるユニットのことである．SA 型は刺激が与えられている間，応答が持続する．一方，FA 型は刺激の始めと終わりにのみ応答する．どのユニットに関しても接触刺激の有効範囲はある広さに決まっており，これを受容野と呼び，上述の 2 種類の受容器はそれぞれ受容野の広さによってⅠ型とⅡ型に分けられる．Ⅰ型（SAⅠ，FAⅠ）は受容野が非常に狭いため境界が比較的鮮明であるのに対し，Ⅱ型（SAⅡ，FAⅡ）は受容野が広いため境界が不鮮明である．FAⅠ，SAⅠ，FAⅡ，SAⅡの各ユニットを構成している受容器は，それぞれ，マイスナー小体，メルケル小体，パチニ小体，ルフィニ終末であると考えられている．各触覚受容器の大きさと応答特性をまとめたものを Tab. 2.1 に示す．各受容器は，振動刺激に対して異なる時間応答特性を有する．Freeman と Johnson は，皮膚表面に振動刺激を与えた場合における各受容器の振動検出閾値の測定を行い，モデル化を行った[Freeman 1982]．Fig. 3.13 に測定された振動閾値曲線を示す．Fig. 3.13 における SA はメルケル小体，RA はマイスナー小体，PC はパチニ小体であり，振動検出閾値とは，触覚受容器がインパルスを発射できる最小振動振幅である．Freeman らは，微小電極法による測定結果より，各受容器に絶対閾値と同調閾値があることを発見した．絶対閾値以下の振幅刺激に関して受容器から全くインパルス発射が行われない．絶対閾値から同調閾値内の振幅刺激に関しては，刺激に大きさに応じて単調に 0 から 1 のインパルス発射が行われる．同調閾値以上の振幅刺激に関しては，各サイクルに対し 1 インパルス発射される．Fig. 3.13 の絶対閾値の振動閾値曲線をフィルタの伝達関数として表したものを Fig. 3.14 に示す．Fig. 3.13 で得られた絶対閾値の振動閾値曲線を模式化した図を Fig.3.15 に示す．Fig. 3.15 より，メルケル小体は振動検出閾値が周波数によらず，

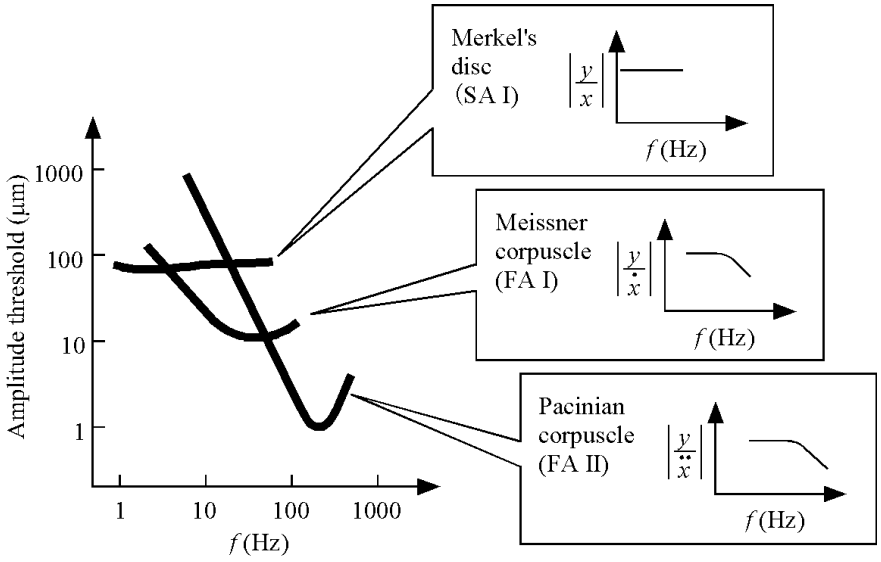


Fig. 3.15　受容器の振動閾値曲線とフィルタリング効果［前野 2000］

ほぼ一定であることがわかる．一方，マイスナー小体は数 10Hz で最高感度に達し，それ以下の周波数では振動速度振幅の閾値がほぼ一定になることがわかる．したがって，メルケル小体は，触刺激の強度を，マイスナー小体は，触刺激の速度を検出していると考えられる．パチニ小体は 200Hz 付近で最高感度に達し，数 100Hz 以下の周波数において振動加速度振幅の閾値がほぼ一定になることがわかる[前野 2000]．
以上(a)，(b)で述べたように，各触覚受容器は，その特徴的な構造と受容特性からそれぞれ異なる情報を検出する役割を担っている．ヒトが物体を把持する場合や物体表面の触感を認識する場合，メルケル小体は接触圧や低周波数の凹凸，マイスナー小体は粗さパターン，パチニ小体は高周波数の粗さや固着・滑り情報，運動の変化を検出していると考えられる．このため，ヒトが触感認識する場合を考えると，各受容器で異なる情報を検出し，そのパターンを脳で処理することによって触感認識を行っていると考えられる．

3.3.3　ヒトの触感認識に関する知見と触感の定義

白土らは，布類，皮革，木材，金属，紙類，プラスチック，発泡スチロール，ゴム，スポンジといった 20 種類の試料を用いて，触感認識機構のモデル化を行った[白土 2004]．試料の物理特性と官能評価により得られた触感評価を因子分析および重回帰分析を用いて，線形近似しモデルを構築した．白土らによって構築された材質認識機構のモデルを Fig. 3.16 に示す．ヒトの触感は，粗さ感，冷温感，乾湿感，硬軟感に関する 4 つの潜在的な因子に集約できることを確認した．また，各因子は，算術平均粗さ，伝熱特性値および縦弾性係数の 3 つの物理特性によって表すことができることを示した．このモデルで用いられた物理特性では，布類，紙類，木材などの触感を大まかに識別することが可能であるが，布類の中での触感の違い，紙類の中での触感の違いなど微小な物体表面から得られる触感の違いを評価できないことがわかっている．しかし，白土らの研究より物体の触感は大別すると物体表面の凹凸，熱特性，弾性によって識別することが可能であることが示された．
宮下らは，複数のセンサを用いて布の熱特性，凹凸特性，圧縮特性，摩擦特性を測定し，官能評価により得られる布の触感との関係を解析することにより，布の触感の定量化を行った[宮下 1996]．布の表面形状に関する官能検査の結果から因子分析を行い，布に関する触感をさわやかさ因子，暖かさ因子，嗜好因子，触り心地因子，柔らかさ因子で表した．また，5 つの触感因子と物理特性の関係解析を行い，さわやかさ因子は摩擦特性や凹凸の振幅に，暖かさ因子は温度降下量，凹凸の振幅に，触り心地因子は温度降下量，布の厚さに関連深いことを示した．したがって，宮下らは熱特性，凹凸特性，圧縮特性，摩擦特性の 4 つの物理特性によって，触感を評価した．しかし，各因子と物理特性の相関係数は 0.5 程度で，定量化を行うには不十分であるといえる．また，触対象を布に限定しているため，全てのモノに適用できる触感定量化手法ではないという問題点がある．

神川らは，皮膚上塗布物のトライボロジ特性と触感の関係解析を行った[神川 2006] [神川 2007]．トライボロジとは，相対運動をしながら，互いに作用しあう面に生じる摩擦や磨耗といった現象に関する科学である．ヒトが触運動をする際，押圧力，摩擦力，物体表面の粗さなどがトライボロジ特性と関係する．神川らは，Fig. 3.17 に示すように，皮膚に固体潤滑剤および流体潤滑剤を塗布した際の触感がトライボロジ特性に関係すると考え解析を行った．また，ヒトの皮膚と類似した触感を呈する模擬皮膚に潤滑剤を塗布し，ヒトが触運動を行う際の押圧力，動摩擦力および触運動速度の測定をした．さらに，官能評価により触感評価を行い，測定結果より得られた物理特性の関係を重回帰分析によってモデル化した．構築されたモデルを Fig. 3.18 に示す．神川らは摩擦現象を基に触感との関係を定量化したが，皮膚上に潤滑剤を塗布した際の触感に限定している．

以上のように，触感を定量化する方法としてさまざまな研究がなされてきた．しかし，触感の定義の一般化はなされていない．したがって，本研究では上述の知見を基に，表面形状，弾性，摩擦特性，伝熱特性の 4 つをヒトの触感認識に大きな役割を果たす物理特性として定義する．

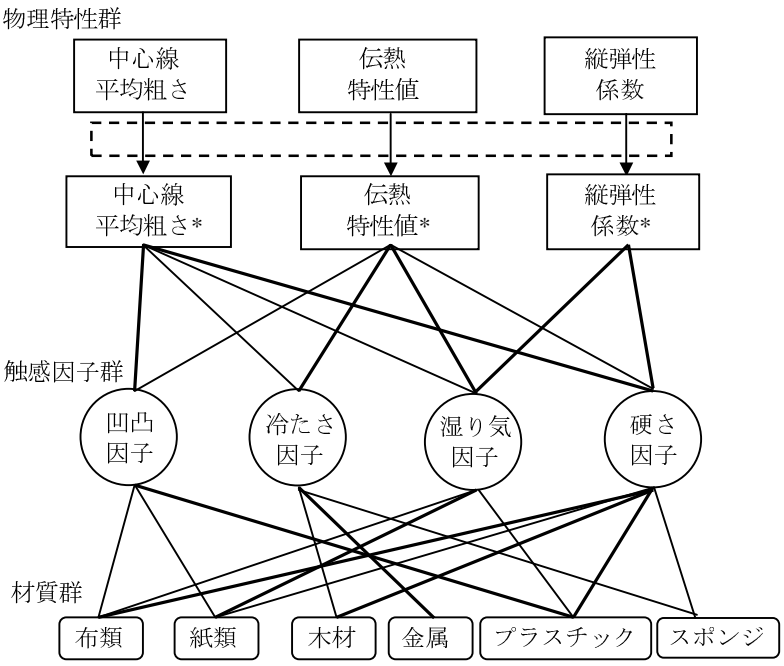


Fig. 3.16　触感認識モデル [白土 2004]

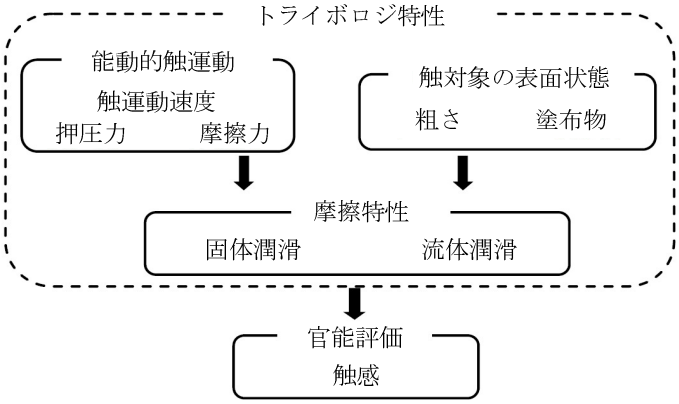


Fig. 3.17　トライボロジ特性と触感の関係 [神川 2006]

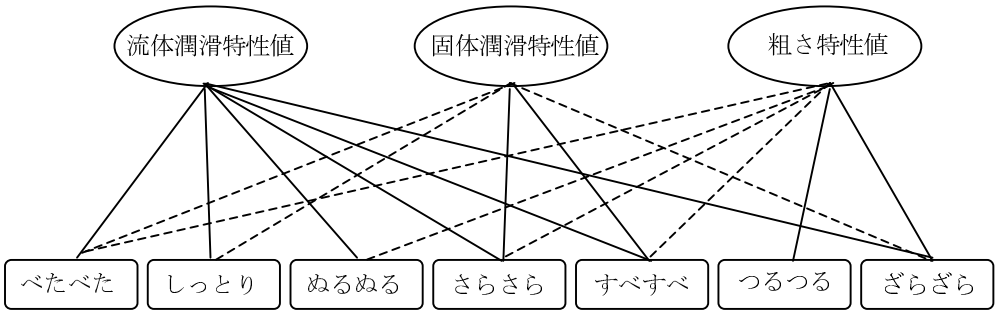


Fig. 3.18　トライボロジ特性と触感の関係のモデル [神川 2006]

3.3.4 触感センサを用いた触感評価法

2.2 節で，ヒトの触感認識に大きな役割を果たす物理特性として，表面形状，弾性，摩擦特性，伝熱特性の 4 つを定義した．これらの物理特性のうち，伝熱特性は種々の温度計により容易に検出可能であると考えられる．したがって，本研究では，『表面形状』，『弾性』，『摩擦特性』の 3 つの物理特性を検出可能なセンサを製作する．

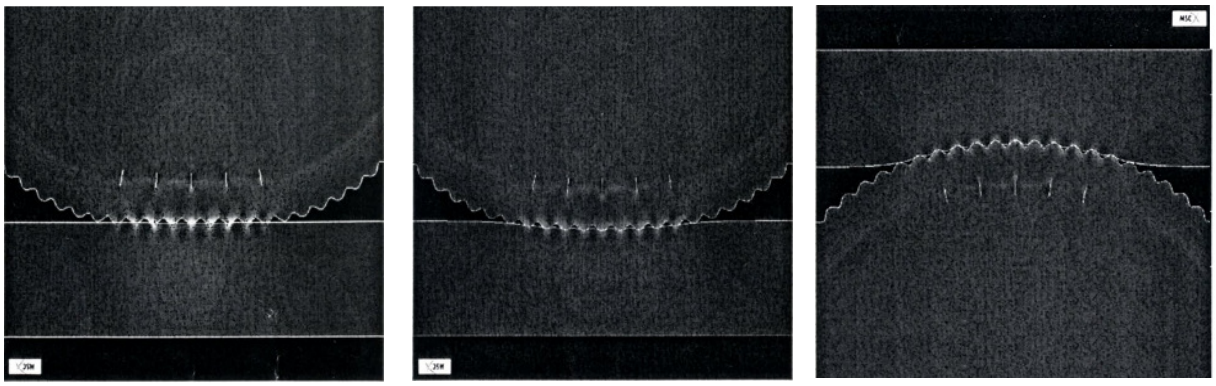
3.3.4.1　表面形状を表す特徴量

本研究では，表面形状を表す特徴量として，物体表面の凹凸の間隔（空間周波数）および凹凸の高さ（振幅）の検出を行う．2.1 節で述べたように，指紋および曲面形状を有するヒトの指は物体の表面形状を検出するのに適した皮膚構造と受容器配置をしている．この

ため，ヒトの指の構造を模倣したセンサを製作することにより，ヒトと同等の触感検出が可能であると考えられる．ヒトの指紋および曲面形状を模倣したセンサを用いて物体表面をなぞることにより，物体表面の凹凸に応じて指紋が振動するため，センサ内部に振動が伝播する．この際，指紋直下にセンサ素子を配置し，ひずみ変化を検出することにより，空間周波数および凹凸振幅を検出が可能となる．

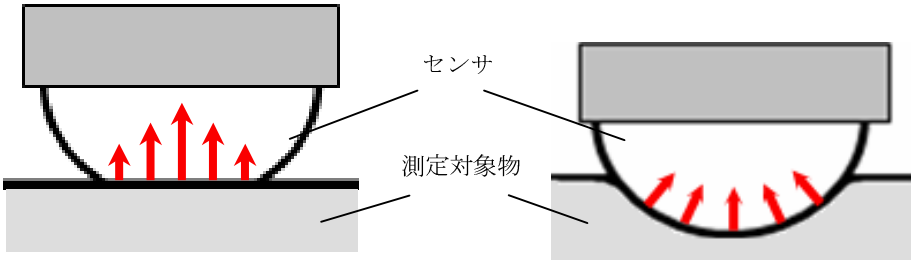
3.3.4.2　弾性を表す特徴量

2.1 節で述べたように，ヒトの指の内部には触覚受容器が分布的に配置されている．ヒトの指は曲率を有した弾性体であるため，物体に指に押し込んだ際，部位によって異なるひずみが生じる．このとき，内部に生じるひずみ分布パターンにより，物体のやわらかさを推定する手法が向坊らによって提案されている[向坊 2005]．向坊らは，有限要素法を用いて縦弾性係数の異なる物体にセンサを押し込むシミュレーションを行った．シミュレーション結果を Fig. 3.19 に示す．Fig. 3.19 から，物体の縦弾性係数によってセンサの変形量が異なることがわかる．物体の縦弾性係数が大きい場合，物体はほとんど変形せず，センサのみが変形する．このとき，Fig. 3.19 (a) のようにセンサの中心位置のひずみは大きく，両端のひずみは小さい．一方，物体の縦弾性係数が小さい場合，センサと接触した際に，物体が変形することにより，より広い面積で接触する．このとき，Fig. 3.19 (b) のようにセンサ内部のひずみ分布は比較的均一になる．向坊らは，この違いを，



(a)　縦弾性係数：1.0 MPa　　(b)　縦弾性係数：0.07 MPa　　(c)　縦弾性係数：0.01 MPa

Fig. 3.19 シミュレーションによる変形の様子 [向坊 2005]



(a) 縦弾性係数：大きい　　(b) 縦弾性係数：小さい

Fig. 3.20 物体表面の弾性検出原理

$$S_{softness} = \frac{1}{5}\sum\left(x_i - \bar{x}\right)^2 \quad (i = 1,2,3,4,5) \tag{3.1}$$

という式を用いて定量的に評価した．ただし，x_i は各位置におけるひずみの値である．Fig. 3.20 および式 2.1 より，縦弾性係数が大きい物体は各ひずみの分散が大きくなり，縦弾性係数が小さい物体は各ひずみの分散が小さくなることがわかる．つまり，センサ全体に加わる力や相対的変位を測定しなくても，センサのひずみの分散を算出することにより物体の縦弾性係数を推定することができる．したがって，本研究では，弾性を表す特徴量としてひずみ分布の検出を行い，各ひずみの分散を算出することで物体表面の弾性を評価する．

3.3.4.3　摩擦特性を表す特徴量

摩擦特性とは，滑りやすい，滑りにくいなどの感覚であり，本研究では，摩擦特性を表す特徴量として動摩擦係数を用いる．センサで物体をなぞった際の動摩擦係数 μ は，

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \tag{3.2}$$

で表すことができる．ここで，F_t は接線方向の力，F_n は法線方向の力である．したがって，センサに加わる接線方向の力と法線方向の力の比を求めることにより，摩擦特性を評価する．

3.3.5　触感センサの詳細設計

これまでに述べた物理特性を検出するためのセンサの設計の概念を以下に示す．ヒトの指は，指紋や曲面形状を有する弾性体であり，触感を検出するのに適した皮膚構造と受容器配置をしている．このため，ヒトの指の構造を模倣したセンサを製作することにより，ヒトの指と物体の間に生じる接触現象を再現することができ，ヒトと同等の触感検出が可能であると考えられる．そのためには，まず，弾性素材を用いることにより変形しやすい接触面を実現する必要がある．弾性素材を用いることによりセンサが変形し，常に安定してセンサを物体に接触させることが可能となる．次に，指紋および曲面形状を有する接触面を再現する．ヒトの指紋および曲面形状を模倣したセンサを用いて物体表面をなぞることにより，物体表面の凹凸に応じて指紋が振動するため，センサ内部に振動が伝播する．この際，指紋直下にセンサ素子を配置し，ひずみ変化を検出することにより，空間周波数および凹凸振幅の検出が可能となる．また，センサ内部には複数のセンサ素子を配置する．センサ内部にセンサ素子を複数配置することにより，2.3.2 項で述べた縦弾性係数を推定する手法を実現する．また，動摩擦係数を検出するために，接線方向の力と法線方向の力を検出する力覚センサを設置する．ただし，触感センサの内部に設置することは構造上困難であるため，触感センサの根元に設置する．

本触感センサは，マスタ・スレーブによる遠隔伝達を目的としている為，センサを装着するスレーブ側は，より器用な作業をするためにできるだけ小さくする必要があると考えられる．したがって，本触感センサもヒトの指程度の大きさまで小型化する．また，マスタ・スレーブの操作における多様な触運動に対応するために，2 次元方向にセンサ素子を配置し，測定方向の検出を行う．以上をまとめると，本触感センサは以下のような特徴を有するものとする．

・材料に弾性素材を使用
・接触面に指紋および曲面形状を保有
・センサ全体に加わる力を計測する力覚センサを設置
・ヒトの指程度の大きさまで小型化
・2 次元方向に複数のセンサ素子を配置

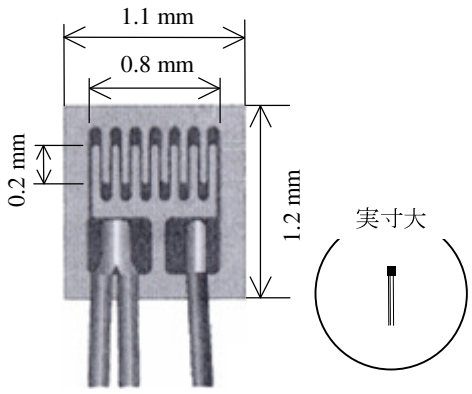


Fig. 3.2　ひずみゲージの概観
(KYOWA elec.)

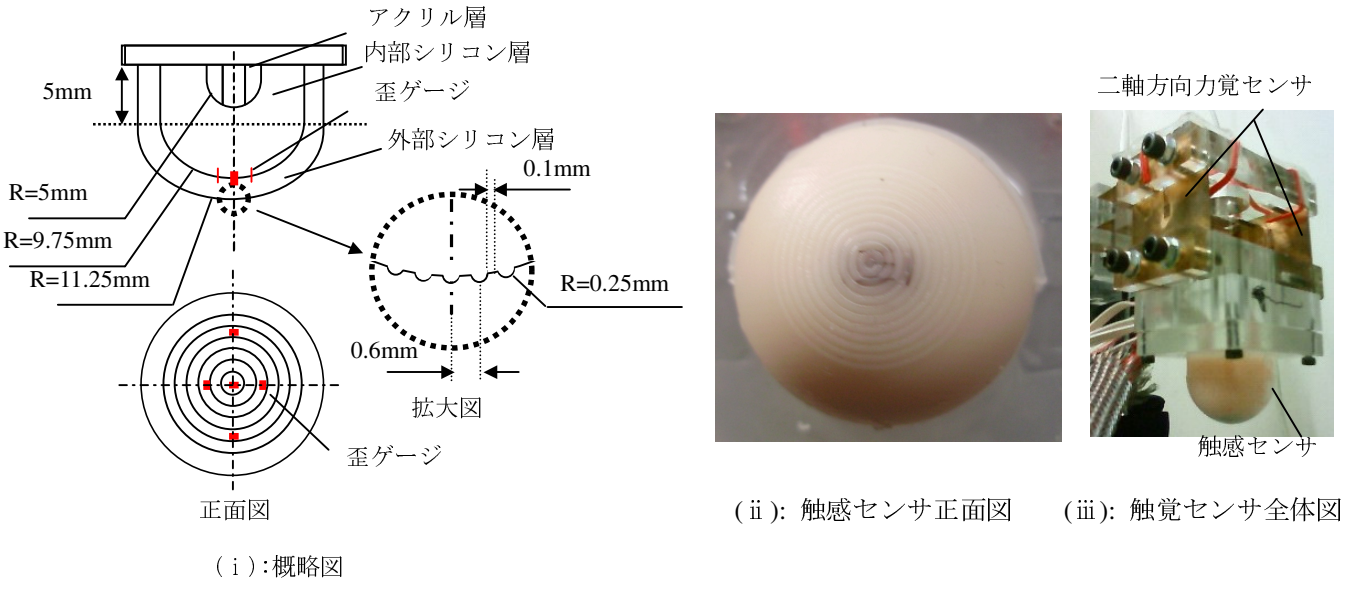
Tab. 3.2 ひずみゲージの仕様

形式名	KFRS-02-120-C1-13
抵抗素子　ニッケル・クロム合金	(厚さ 2.5 μm)
ゲージベース	ポリイミド(13 μm)
ラミネート	ポリエステル(9 μm)
抵抗値	120 Ω

Fig. 3.23 センサ素子

まず，センサ内部のひずみを検出するためのセンサ素子を選定する．センサ素子は，接触面の近くに設置することにより，検出感度が向上すると考えられる．しかし，本触感センサは 3.2.1 項で述べたように，柔軟なシリコンゴムにより形成されるため，センサ素子の剛性が高すぎる場合，接触面に大きな力が加わった際にシリコンゴムが破断する恐れがある．したがって，剛性の低いセンサ素子を用いる必要がある．また，複数のセンサ素子を限られたスペース内に配置するため，センサ素子は小型であることが重要である．以上の点を考慮し，本研究ではセンサ素子として，小型のひずみゲージを用いることとした．本研究で用いたひずみゲージ(共和電業　KFRS シリーズ)の概観を Fig. 3.2 に，主な特徴を Tab. 3.1 にそれぞれ示す．

次に，ひずみゲージの配置位置を決定する．3.1 節で述べた縦弾性係数を推定する手法を実現するために，Fig. 3.3(a)のように歪ゲージをなぞる方向に 3 つ並べて配置することとした．また，測定方向の検出を行うためにひずみゲージを 3 つの歪ゲージを配置した方向と鉛直方向にに 2 つ配置することとした．なぞる方向に配置した歪ゲージは中心の指紋からに 1 つ目の指紋，5 つ目の指紋に二つ，3 つのひずみゲージと鉛直方向に配置した歪ゲージは 3 つ目の指紋の直下にそれぞれ配置することとし，配置位置は，Fig. 3.3(b)のようにセンサ表面からの距離が等しくなるように 3 つ目の指紋の直下に配置することとした．



(ⅰ):概略図　(ⅱ): 触感センサ正面図　(ⅲ): 触覚センサ全体図

Fig. 3.23　指型弾性触覚センサ

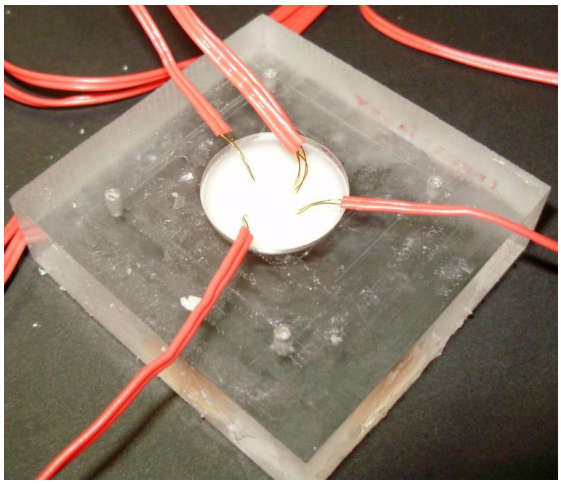


Fig. 3.24　触感センサの製作に用いた内枠

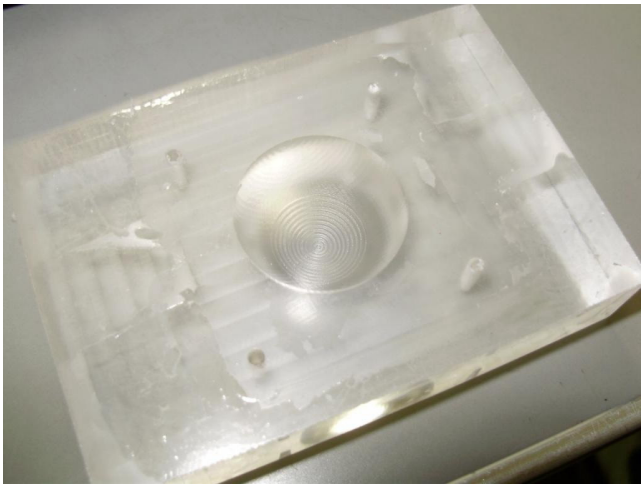


Fig. 3.25　触感センサの製作に用いた外枠

実際に行なった製作方法について以下に示す.

１　型とその寸法

製作用の型は内型×１, 内型補助パーツ×２, 外型×１, 外型補助パーツ×２の四種類である。設計した寸法については, 内型の径 19.5 ㎜, 歪ゲージを収納するポケットについては, ひずみゲージを収納できるように, 深さ 1.5 ㎜, 厚さ 0.25 ㎜, 横幅 2.2 ㎜とした. 外枠については径を 22.5 ㎜とし, 指紋の高さ 0.25 ㎜, 指紋の間隔は 0.1 ㎜, 幅 0.5 ㎜とし実際の指紋をさんこうにしている r =5 ㎜の半球体に, 径 4.5 ㎜の孔を設け, ねじ穴の間隔は 30 ㎜間隔を設けた.

２　製作手順

①内型に歪ゲージを固定して、VP7550：SLJ3266＝92：8 の割合で混合し硬化剤を３％混ぜたシリコンゴム（以下シリコンゴム（軟）と呼ぶ）を歪ゲージを覆うようにして注ぐ。
この際, 離型剤をよく吹きかけておく。

②固まったところで、リードを骨パーツのリード孔に通し, リードに記号をふって識別できるようにしておく。内型に補助パーツの仮止め（テープ・両面テープ等で）を行いシリコンゴム（軟）を注ぎ込む. 上から骨パーツを押し付け, 気泡が入らないようにねじ止めを行う.

型とゴムの接触面には必ず離型剤を塗る。リード線を強く引っ張らないように注意が必要。

③補助パーツの切れ目に適切なものを挟み込ませ, 補助パーツをはずす。その後慎重に内型からはずす。

④はずしたセンサーのコアを外型に, ②の後半と同様にシリコンゴムを入れて固定する。
この際, VP7550：SLJ3266＝80：20, 硬化剤は同様のまま３％のシリコンゴム（硬）を用いる。

⑤型から取り出して表面を乾燥させることによって完成する.



Fig.3.26. 触覚ディスプレィ

3.4　触覚ディスプレイの設計構築

触感伝達システムの人に対する呈示側としては,共同研究を行なった東北大学の山内らの設計したものを，本システムでは実装している．触覚ディスプレイとしてボイスコイルを用いる．この触覚ディスプレイは，小型のボイスコイル(AURA SOUND/NSW1-205-8A) をアクリル板(厚さ：0.5 mm) で覆ったもので，Fig3.26 に示すように指を膜上に置いて使用する．スピーカコーンによって発生する空気の振動がアクリル板を振動させ，操作者に振動刺激を呈示する．触覚ディスプレイは，ジンバル機構を有する治具によりロボット・アームと接続されており，滑らかな触運動が可能である．ディスプレイによる触感因子の呈示方法として，粗さ感，摩擦感，圧覚の呈示手法について述べる．触対象の物理パラメータと操作者の運動に基づいた触刺激を生成する点がポイントである．現状では最もリアリティの高い皮膚感覚情報を遠隔地に伝達可能なシステムであるといえる．なお，山内らのシステムは，可動域，耐久性，使用可能環境などを考慮すると，動物を触るのに適した設計ではないが，本研究では遠隔触感体験において皮膚感覚を付与することの効果を評価することが主目的であるため，リアリティの面で最も優れた山内らのシステムを用いる

3.4.1 粗さ感の呈示

粗さ感に影響を与える主要な物理パラメータとして対象物の空間波長がある[Yoshioka 01][Lederman 83]．この空間波長，(t) を有する物体を触速度 v(t) でなぞった際の振動周波数 f(t)(= v(t)=，(t))が粗さ感に大きく影響を与えている．そこで本研究では，触覚センサで推定した空間波長と操作者の触速度から周波数を算出し，その周波数を有する正弦波の振動刺激を呈示する．振動刺激の振幅は，空間波長の推定で用いる高速フーリエ変換処理によって得られるパワーに比例したものとする．また，実素材の複雑な粗さ感を実現するため，複数の空間波長で構成する粗さ刺激とする．この振動刺激は，波長ごとで決定される振動刺激の単純な重ね合わせにより構成する．

3.4.2 摩擦感の呈示

昆陽らは，摩擦現象の一つである固着・滑りに注目した摩擦感の呈示法を提案している[昆陽 2007].これは固着から滑りに遷移する際の急激なひずみ変化を,触覚受容器 FA II が検出するとの仮説に基づくものである．固着から滑りに遷移するタイミングを推定するために一自由度振動系の摩擦モデルを作成し，遷移する瞬間に FA II が応答しやすい高周波の振動刺激を呈示する手法である．具体的な触刺激は，400Hz の正弦波振動を振幅変調して利用し,固着から滑りに遷移するタイミングで,振幅を 5 ms かけて直線的に増幅させる．その後，30 ms かけて放物線上に減衰させて自然な摩擦感を呈示している．本研究ではこの手法を用いて，摩擦感呈示を行う．このモデルに含まれる物理パラメータは，ばね定数・減衰係数・指の質量・動摩擦係数・静止摩擦係数である．本研究では，触覚センサから推定した摩擦係数を逐次更新する．その他のパラメータは，触対象を剛体と仮定し，過去の研究結果を引用する[Konyo 2008].

3.4.3 圧覚の呈示

圧覚の呈示について，触覚受容器 SA I のみが活動しやすい周波数帯域を利用した圧覚の呈示法を提案している[昆陽 2006]．5 Hz の低周波振動の振幅を変えることで，圧覚の大きさを変えることができる．呈示する振動振幅が大きいほど圧覚も大きく，硬いものを触ったような感覚を得られ，振幅が小さいとフェルトを触ったようなふんわりした感覚を得られることを確認している．本研究では，対象物のヤング率と呈示する刺激の振動振幅が反比例の関係にあると仮定し，それに基づいた 5 Hz の正弦波振動刺激を呈示する．

3.4.4　皮膚感覚情報の推定法

粗さ感・摩擦感・圧覚提示のための触刺激の生成に必要な物理パラメータの抽出法について述べる．まず，粗さ感に最も影響する物理パラメータであると考えられる空間波長の推定法について述べる．山内らのシステムでは，皮膚感覚センサが触対象をなぞった際のひずみゲージの出力値を，高速フーリエ変換し振動周波数を算出する．算出した振動周波数のパワーを基に，伝達すべき振動周波数の選択を行う．図 5.16 に，ある試料を皮膚感覚センサでなぞった際のパワースペクトラム密度（PSD）を示す．周波数の選択は，PSD の形が凸になっている箇所から，パワーの大きいものを 3 つ選択する．また各周波数のパワーは，マスタ側で提示する粗さ刺激の印加電圧の振幅に用いる．選択された周波数成分 f とスレーブ側の触速度 v_s から，空間波長 λ を(3.3) 式より推定する．

$$\lambda = \frac{f}{|v_s|} \tag{3.3}$$

摩擦感に最も影響する物理パラメータであると考えられる摩擦係数は，皮膚感覚センサの上部に搭載された力覚センサを用いて推定する．しかし，皮膚感覚センサ表面での固着・滑りによる振動は，力覚センサに伝播する間に減衰するため，推定した値が静止摩擦係数

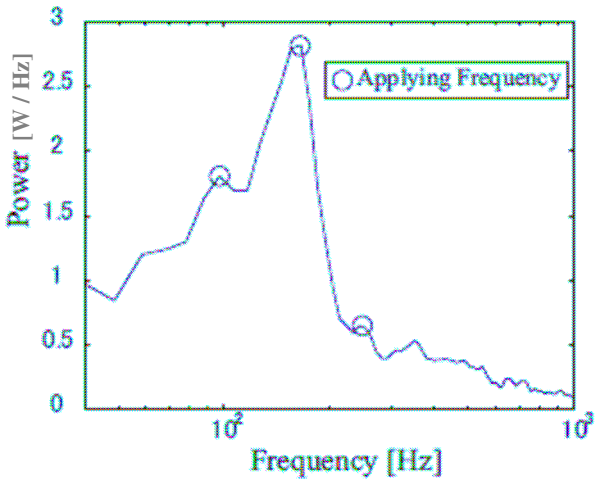


Fig.3.27　波長推定で用いる周波数

と動摩擦係数のどちらであるか区別ができない．山内らのシステムでは，固着・滑り振動の観察実験から，固着している時間よりも滑っている時間の方が長いことが確認されているため，推定される値は動摩擦係数とみなしている．Dm を，動摩擦係数に比例した値とし，素材ごとで異なる摩擦感を実現する．なお，動摩擦係数 md は運動方向の力成分 Ft とそれに対する法線方向の力成分 Fn から（5.2） 式より推定する．

$$\mu_d = \frac{|F_t|}{|F_n|} \tag{5.2}$$

最後に，圧覚に最も影響する物理パラメータであると考えられるヤング率の推定法について述べる．センサの内部応力は，対象のヤング率と押付け力に関係する．山内らのシステムでは，事前にヤング率の異なる 3 つの対象物に，押付け力を 0.2 N から 2.0 N まで 0.2 N ずつ変化させな がらセンサを押し込む実験を行い，この実験で得られたひずみゲージの出力値と押し付け力を正規化し，ヤング率の推定モデルを構築している．図 6 に示すように，ヤング率と押付け力が大きくなるほど，ひずみゲージの出力値も大きくなる傾向が見て取れる．図 5.17 に示すモデルを用いて以下の手順でヤング率の推定を行う．計測したひずみゲージの出力値 Vget と押付け力 Fget を正規化し(5.3) 式に代入する．

$$d = \sqrt{(V_{get} - V_i)^2 + (F_{get} - F_i)^2} \tag{5.3}$$

V_i, F_i (i = 1, 2, …, 30) は，事前の押し込み実験により得られたひずみゲージの出力値と押付け力を正規化した値である．(3) 式より，d が小さくなる事前実験のデータを 3 点選択する．この 3 点は，計測点から最も近いデータであることを意味する．つぎに，選択された 3 点から平面の式を導出する．この平面へ計測点を投射することで，ヤング率を推

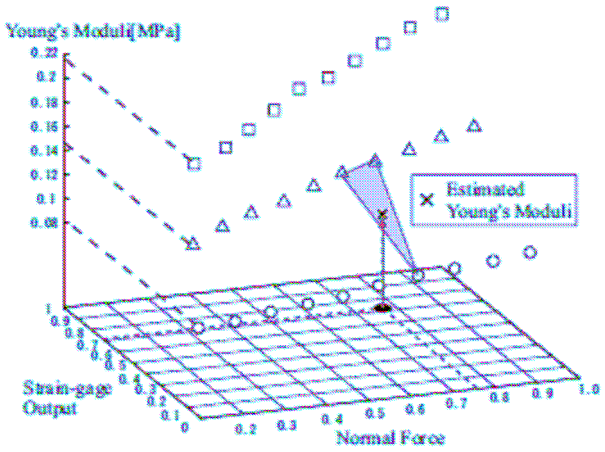


Fig.3.28　ヤング率推定モデル

定する．ただし，選択された 3 点が同一のヤング率を有するデータの場合は，平面の式はヤング率の軸に対し平行となるため，推定されるヤング率は 0 となってしまう．そこで，選択した 3 点のうち d が最も大きいデータを，ヤング率の異なるデータで d が最も小さいデータと置き換える．以上から，(5.4) 式を用いてヤング率 $E_{estimation}$ を推定する．

$$E_{estimation} = E_1 - \frac{A(F_{get} - F_1) + B(V_{get} - V_1)}{C} \tag{5.4}$$

$$A = (V_2 - V_1)(E_3 - E_1) - (V_3 - V_1)(E_2 - E_1) \tag{5.5}$$

$$B = (E_2 - E_1)(F_3 - F_1) - (E_3 - E_1)(F_2 - F_1) \tag{5.6}$$

$$C = (F_2 - F_1)(V_3 - V_1) - (F_3 - F_1)(V_2 - V_1) \tag{5.7}$$

V_t，F_t，E_t（t = 1，2，3）は，選択された 3 点のひずみゲージの出力値，押し付け力，ヤング率である．皮膚感覚センサには 4 つのひずみゲージが埋め込まれており，それぞれのひずみゲージでモデルを構築しヤング率を推定する．推定された 4 つのヤング率のうち最大と最小を除いた 2 つのヤング率の平均を用いる．また，皮膚感覚センサにせん断方向の力が加わっている際は，この手法は適用できないため，皮膚感覚センサと触対象が最初に接触したときのみ推定する仕様となっている．

4

システムの技術的検証

本章では 3 章で設計を行った本研究で提案するシステムと, 本システムに実装する為に開発した触覚センサが有効であることの確認として行なった技術的検証について述べる.

4.1　触覚伝達システムの技術的検証

第 3 章にて構築を行なった遠隔触感伝達システムが, 人に触感を正しくフィードバックを行なえるかどうかについて検証のための実験を行った. 提案するシステムの素材弁別実験として, 開発した触感伝達システムと力覚のみを伝達した場合とで 5 種類の異なる素材を弁別する実験を行った. 実験内容としては, 被験者は遠隔のロボットアームを介してある素材を触る. そして, ロボットアームが触っていると思う素材を手元にある素材から選択する. 本実験は, 皮膚感覚と力覚を伝達する開発システムと皮膚感覚呈示機能をオフにして力覚のみを伝達した場合で行い, 開発した触感伝達システムを介した素材の弁別能力を評価する. 素材は, エンボス紙, アクリルで制作したグレーティング・スケール, 紙, フリース, ボアの 5 種類を用いた. 簡単に練習を行った後, 各素材で 5 試行, 合計 25 試行を 1 セットとし, 各システムで 2 セットずつ行った. 被験者は二人であった. 実験結果として, 素材ごとの正答率と標準偏差を Tab4.1 に示す. 力覚のみを伝達したシステムと比較して, 開発したシステムの方が正答率が高い傾向にある. 特に, 力覚のみの伝達ではほとんど弁別できなかったエンボス紙とグレーティング・スケールに対し, 開発したシステムでは高い確率で弁別できている. フィードバック手法と素材を因子とし, 正答率に二元配置の分散

Tab. 4. 1　2 種類のフィードバック手法を用いた素材弁別の正答率

Type of Feedback	Embossed Paper	Grating Scale	Paper	Fleece	Boa
Tactile + Force Feedback	0.95 ± 0.071	0.80 ± 0.141	0.45 ± 0.071	0.65 ± 0.071	0.65 ± 0.212
Force Feedback Only	0.25 ± 0.071	0.25 ± 0.212	0.25 ± 0.212	0.4 ± 0.283	0.55 ± 0.212

分析を適用した．その結果，開発したシステムと力覚のみの伝達システムでの正答率には有意な差が確認された（F(1; 10) = 21:6，p = 9:11 × 10¡4）．紙とフリースに関しては，開発したシステムを介しても 2 つの素材間の弁別が難しいとの意見もあったが，力覚のみを伝達した場合よりも開発したシステムの方が高い確率で弁別できていた．また，ボアについては力覚のみの伝達でもボア特有の柔らかさを感じることができるため，開発したシステムとの顕著な差は生じなかった．この結果より開発した触感伝達システムは，力覚のみの場合と比較して，実素材の弁別を行う上で有効である事を確認した[山内 2009].

4.2　触覚センサの技術的検証

4.1 で行なった，システムを使用してヒトが素材の明らかな触感の違いを弁別できる事に関する検証に先駆けて，開発した触覚センサが触感を検出できる事を実験で確認した．製作した触感センサの評価実験を行うための実験装置の構成について述べる．Fig. 4.1 に実験装置の構成を示す．実験装置は，触感センサ，自動ステージ，ひずみ計測器および計算機から構成される．ステージは，コントローラを用いて，図に示す X 方向および Z 方向にそれぞれ等速で移動させることができる．自動ステージに固定された触感センサは，試料を一定の押し込み力で等速になぞることができる．また，触感センサを取り付ける部分には Fig. 3.23 で示した接線方向及び法線方向にかかる力を検出できる力覚センサが取り付けられている．触感センサおよび力覚センサの出力は，ひずみ計測器によって測定される．ひずみ計測器には，KEYENCE 社製 NR-500 および NR-ST04 を用いた．

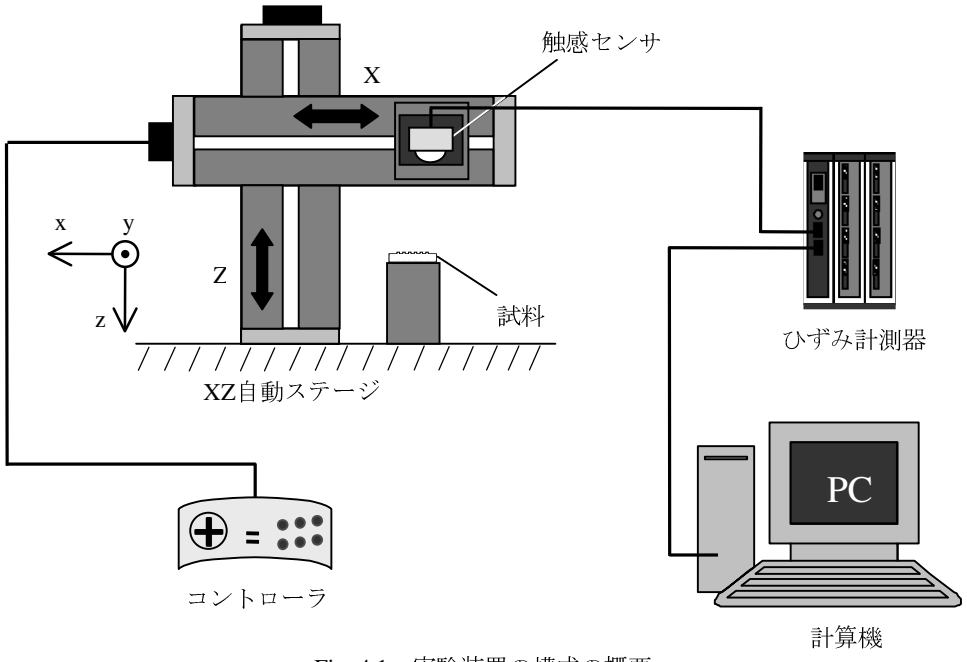
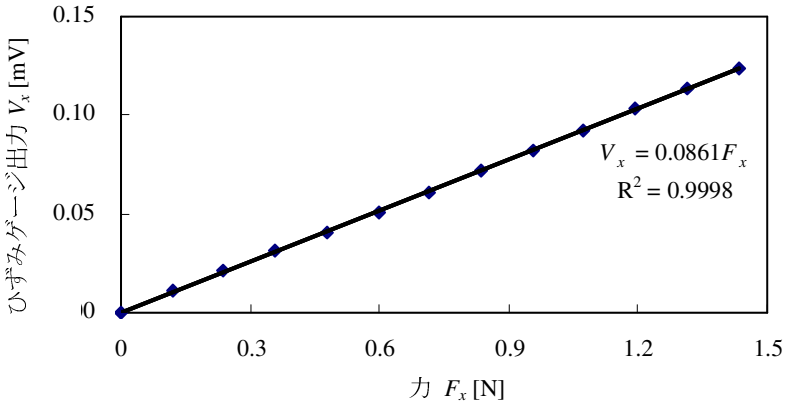
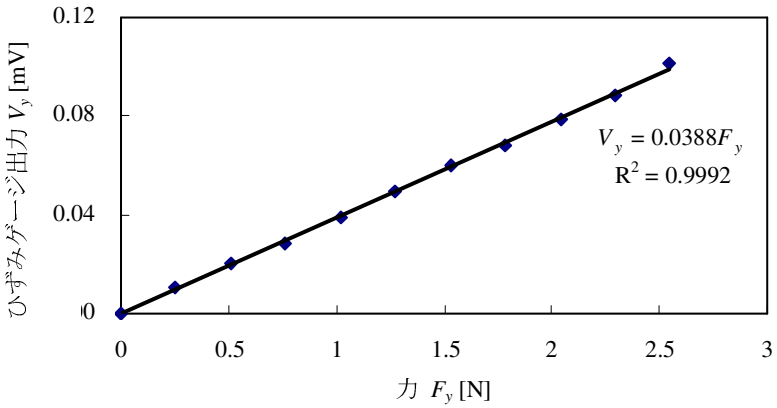


Fig. 4.1　実験装置の構成の概要



(a)　X 方向の力とひずみゲージ出力の関係



(b)　Z 方向の力とひずみゲージ出力の関係

Fig. 4.2　力覚センサのキャリブレーション結果

ひずみ計測器によって計測されたデータは，計算機に取り込まれる．触覚センサに求められる性能として，ヒトと同様に，表面の摩擦感，表面形状を示す粗さ感，表面を押し込んだときに感じる硬軟感を同時に取得できる事が求められる．それぞれを検出できる事の確認として以下に示す実験を行った．なお，各実験を行う為に触覚センサの取り付け部に搭載した力センサのキャリブレーションを行なった．その結果を Fig.4.2 に示す．自動ステージに取り付けられた力覚センサは，2 枚ばね構造を有するひずみゲージにより構成されている．X 方向および Z 方向の力とひずみゲージの出力の関係は，Fig. 4.3 に示すように線形近似することができる．このため，X 方向の力 Fx とひずみゲージの出力 Vx の関係は，

Vx＝ 0.0861 Fx　(4.1)

と表すことができ，Z 方向の力 Fz とひずみのゲージ出力 Vz の関係は，

Vz＝ 0.0388 Fz　(4.2)

と表すことができる．したがって，X 方向の力 Fx および Z 方向の力 Fz は，

Fx＝ 11.6 Vx　(4.3)

Fz＝ 25.8 Vz　(4.4)

と表すことができる．すなわち，ひずみゲージの出力を測定することにより，X 方向および Z 方向の力を算出することができる．

4.2.1　粗さ感の検出に関する評価

（a）実験の方法

本研究では，粗さ感を検出する際に触対象となる物体の表面の凹凸や空間周波数の検出を行なう．触感センサがそれらの物理量を十分に検出できる事を確認する為の実験を行なった．まず，凹凸の高さを検出できる事を確認する為に Fig.4.3 に示すような実験を行った．一般的な触速度を想定し 2 ㎜/s で対象の表面に 1 N の力で押し込みながら 0.1 ㎜から 0.8 ㎜の高さの異なるアクリルの試料を用意し，その表面をなぞった．また Fig.4.4 の実験の模式図に示すように 1 ㎜に 5 本のスリットが刻まれたアクリル製の試料を製作し，触速度 200 ㎜/s，押下力 1 N で試料をなぞり，その空間周波数が正しく検出される事を確認する実験を行なった．なお，この際のサンプリング周波数は 0.02ms とした．

（b）実験の結果と考察

実験結果をそれぞれ Fig.4.5 及び Fig.4.6 に示す．Fig4.5 の結果より 0.1 ㎜から 0.8 ㎜間での範囲において，出力された歪ゲージの値における，ピーク値の振幅が線形に検出できる事が実験結果から判明した.同時に行なった，0.05 ㎜と小さな凹凸においても出力が確認された．また空間周波数の実験においては，得られた歪ゲージの出力をフーリエ変換を行なう事により得られた結果を Fig.4.6 に示す．Fig4.6 から，空間周波数の理論値である 5kHz に近しい値が正しく検出されている事を確認した．

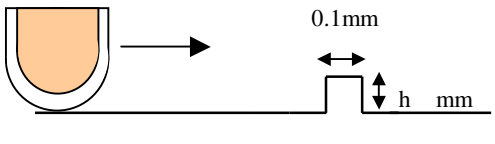


Fig.4.3　凹凸高さの検出実験

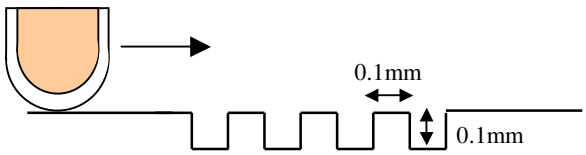


Fig.4.4　空間周波数の検出実験

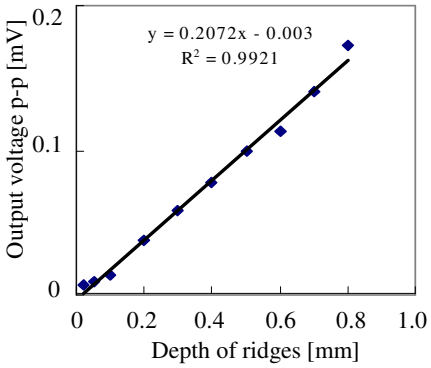


Fig. 4.5　凹凸高さの測定結果

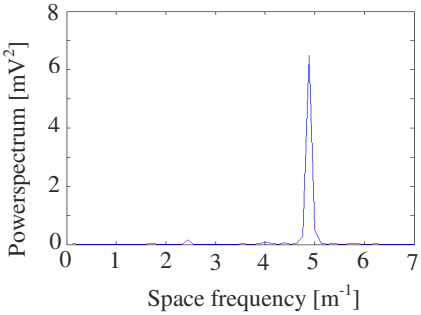


Fig. 4.6　空間周波数の測定結果

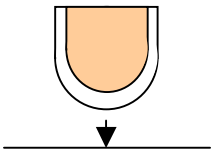


Fig.4.7　硬軟感の検出実験

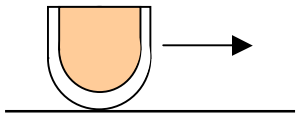


Fig.4.8　摩擦係数の検出実験

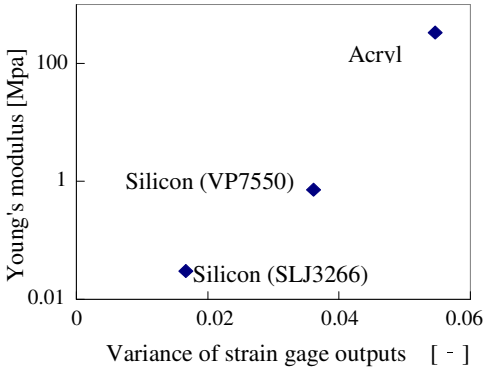


Fig. 4.9　硬軟感検出実験の結果

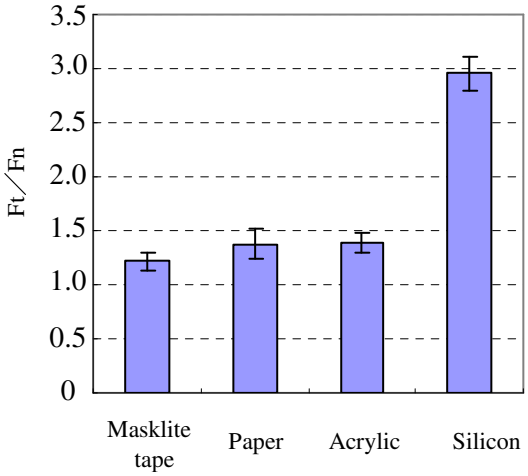


Fig.4.10　摩擦感測定実験の結果

4.2.2　硬軟感の検出に関する評価

(a)　実験の方法

触覚センサを触対象に押し込んだ際にその硬軟を検出できる事の検証として実験を行った．Fig. 4. 7 の模式図に示すように，アクリル，シリコンゴム 2 種類の計 3 種類の試料に対して，1 N の力で押下しその際に，歪ゲージの出力値の分散から触感センサは対象の硬軟を判別する．シリコンゴムに関しては，旭化成ワッカー社製の SLJ3266 と VP7550 の混合比を調節することで縦弾性係数の異なる試料を製作した．測定された時刻歴データを計算機に取り込み，式 2.1 を用いて各ひずみゲージの出力の分散を算出した．自動ステージを Z 方向に移動させ，約 1.0 N の力で触感センサを試料に押し込んだ．このとき，触感センサ内部のひずみゲージの出力をサンプリング周期 1 ms で測定した．

(b)　実験の結果と考察

Fig4.9 にそれぞれの試料のヤング率と歪ゲージの分散との関係をプロットした．縦軸はヤング率を横軸は歪ゲージの分散の値を示しており，Fig. 4. 9 の結果からわかるようにヤング率が高いほど，歪ゲージの分散の値も大きくなる傾向にある事がわかる．このことから触対象の硬軟を歪ゲージの分散の値と式 3. 1 を用いて推定できる事が判明した．

4.2.3　摩擦感の検出に関する評価

(a) 実験の方法

Fig.4.6 の模式図に示すように，触覚センサを触対象に約 1.0 N の力で触感センサを試料に押し込んだ後，X 方向に 200 mm/s で移動させ，触感センサに 4 種類の異なる試料をなぞらせた．このとき，力覚センサに貼付したひずみゲージの出力をサンプリング周期 1ms で測定し，接線方向の力および法線方向の力を測定した．試料には，アクリル，紙，シリコンゴムおよび養生テープの非粘着面の 4 種類を用いた．測定された時刻歴データを計算機に取り込み, 式 3.2 を用いて接線方向の力と法線方向の力の比から動摩擦係数を求めた．

また，測定に用いた 5 種類の試料を被験者に指でなぞらせて，試料の滑りやすさを評価させる実験を行った．このとき，被験者に対し滑りやすいと思う順に並べさせるように指示した．被験者は 20 代と 50 代の男女 6 名である．

（b）実験の結果と考察

各試料の動摩擦係数を測定しまとめたものを Fig. 4.10 に示す. Fig. 4.10 よりシリコーンゴム，アクリル，紙，養生テープの順に動摩擦係数が小さいことがわかる．一方，ヒトに対して滑りやすさを評価させる実験を行った結果, 6 名中 5 名は, シリコーンゴム, アクリル, 紙，養生テープの順に滑りやすいと評価した．この結果は Fig. 4.10 と一致する．残りの 1 名はシリコーンゴム，紙，アクリル，養生テープの順に滑りやすいと評価した．Fig. 4.10 からわかるように，本触感センサにより検出された動摩擦係数は，アクリルと紙とでほとんど差が見られない．したがって，研磨したアクリルと紙の滑りやすさが同等であると判断することは妥当な結果であるといえる．

また，ヒトの指と触感センサの材料に用いたシリコーンゴムでは，摩擦特性が異なるため，今回検出された動摩擦係数の具体的な数値は意味のないものである．しかし，物体をなぞった際の動摩擦係数の大小関係は，ヒトの指と触感センサとで変化しないと考えられるため，補正係数をかけることでヒトの指で物体をなぞった際の動摩擦係数を算出することができると考えられる．

以上より，本触感センサで物体をなぞった際，根元に設置した力覚センサにより法線方向の力と接線方向の力を検出し，それぞれの力の比を算出することにより，物体の動摩擦係数の違いを評価できることが示された．

4.3 触覚ディスプレイの検証

本研究が提案する触感伝達システムに用いる触感ディスプレイについて，技術的な検証を行った．触感ディスプレイの機能としてボイスコイルによる振動をヒトの指腹部に呈示する事によって，触対象の表面形状，硬軟感及び摩擦感をヒトに感じさせる事である．3 章において構築した触覚ディスプレイを用いてヒトの指に意図した振動を呈示できる事を確認した．

4.3.1　触感ディスプレイの周波数特性

(a) 実験の方法

ヒトの指がディスプレイの振動部である厚さ 0.5㎜ のアクリル板に接触している事を想定し，0.98N の荷重をアクリル板中央のボイスコイル直上部に負荷し，その際の周波数特性について検証を行なった．

(b) 結果と考察

Fig.4.11 にディスプレイに異なる電圧を掛けた際の振動の周波数と，振動の振幅との関係を示す．3.4 において粗さ感，摩擦感及び圧覚のそれぞれの呈示法をのべたが，ヒトの指腹部の各触覚受容器に対して，選択して刺激する為に本研究では，5Hz と 400Hz の正弦波振動を用いる．1.0～5.0V のそれぞれの電圧を掛けた場合において，本研究において呈示する周波数における，振幅の出力が成される事を確認した．

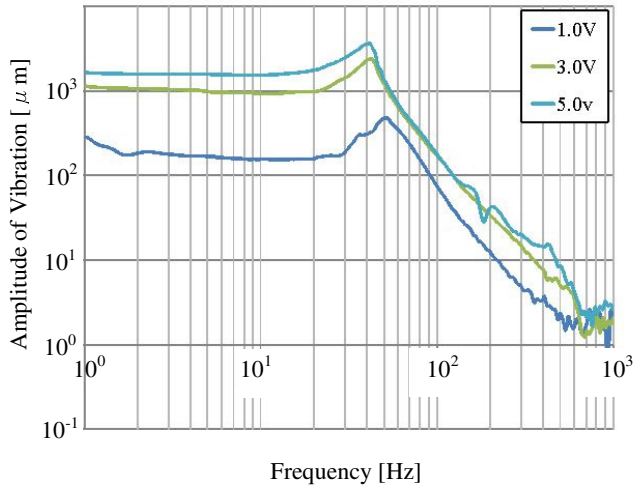


Fig.4.11 触感ディスプレイの周波数特性

4.3.2　触感ディスプレイを用いた実素材の触感呈示

4.3.1 において本研究において呈示する周波数における，振幅の出力が成される事を確認した．実際の素材においてどの様に出力が成されるのかを確認する為，ヒトが触ったとき明らかに異なった触感を感じられる 4 種類の実素材について，触覚センサでえられた触感をディスプレイで異なる振動を生成できているのかを確認する為に実験を行った．実素材として用いたのは，Fig.4.12 に示すように，カーペット，フェイクレザー，タオル生地及びナイロンの 4 種類の生地を用いた．

(a)　実験方法

上記した，明らかに異なる 4 つの触感をもつ実素材に対して，触感伝達システムを用いて，センサ側で検出した各種触感情報について，ボイスコイルでどの様に出力されるのかを確認した．明らかに異なった触感を有する実素材をなぞっている為，本研究で用いるシステムにおいても異なった触感が出力されることを確認することが目的である．



Carpet



Fake leather



Towel



Nylon

Fig.4.12 実験で用いた実素材

(b)　実験結果

Fig.4.13 に実素材の触感伝達を行なった際の，ディスプレイ側への印加電圧の時間変化を示す．センサでなぞった際にひずみゲージに生じる電圧の時間変化を，ディスプレイ側に入力を行なう．この際に PC で計算し，触感ディスプレイで出力される波形を，それぞれの触感だけに絞って出力を行なうプログラムを使用することで粗さ感，摩擦感及び硬軟感について Fig.4.14～Fig.4.16 に示す．4 種の実素材の中で比較した際に，表面の凹凸が比較的大きな素材であるカーペット及びタオル地では粗さ感でも，振動を呈示している事がわかる．凹凸が比較的小さいフェイクレザー及びナイロンでは振動波形の振幅も小さく呈示している事がわかる．また，Fig.4.15 に示すように摩擦感の呈示を見るとヒトが指でなぞったときに引っかかりやすいカーペットでは大きな振幅を呈示し，その他の実素材においてはほとんど振幅を呈示していない事がわかる．最後に硬軟感について，4 種の実素材に触感センサを押し込んだ際に得られるひずみゲージの出力値の分散から触対象のやわらかさを推定し，ディスプレイで呈示した振動波形を Fig.4.16 にて示す．ヒトが触った際にやわらかさを 4 種の実素材の中で比較的感じやすいカーペットとタオル地において 5Hz の振動を呈示している事がわかる．3.4 で述べたように，SA1 という触覚受容器を選択して刺激する為にこの波形を生じさせている．以上のことから，今回選択した異なる実素材について，異なった触感をヒトに呈示できる事が確認された．

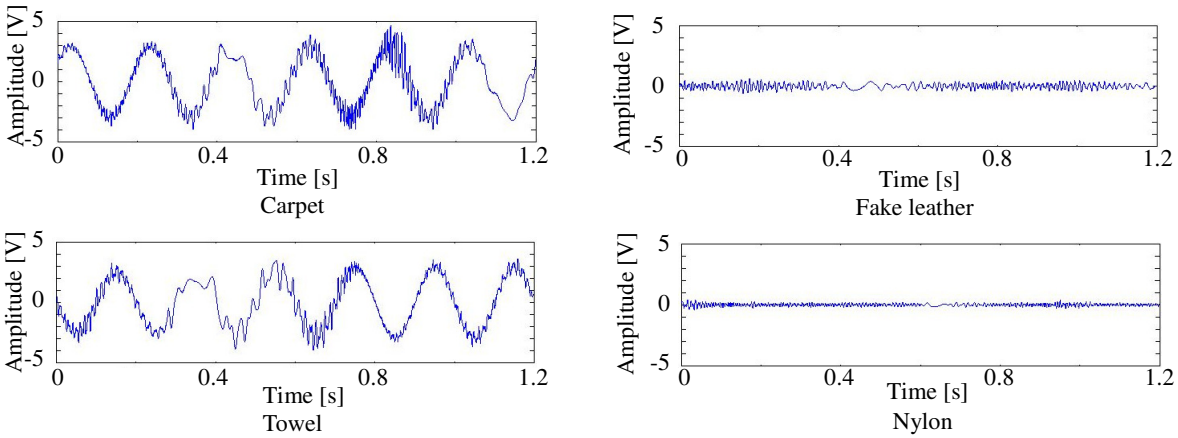


Fig.4.13　触感ディスプレイへの印加電圧

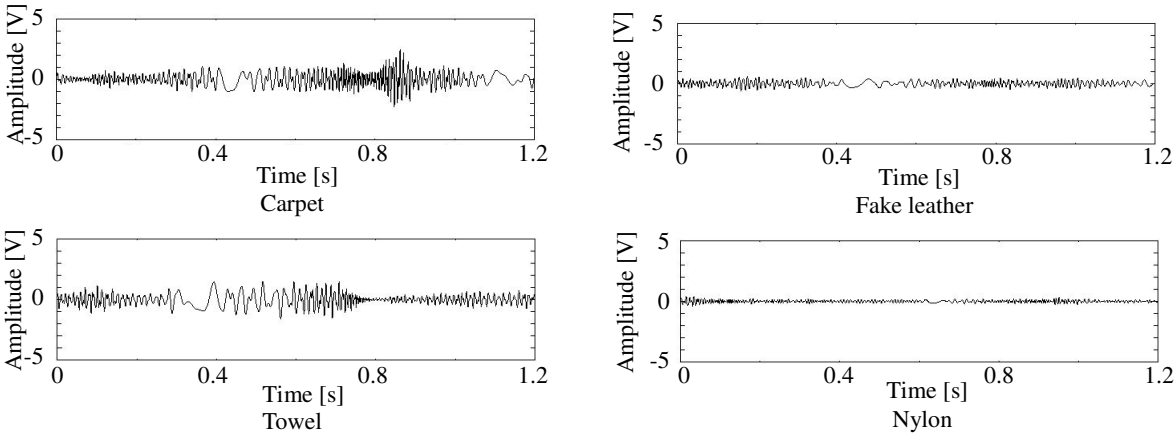


Fig.4.14　触感ディスプレイによる粗さ感呈示

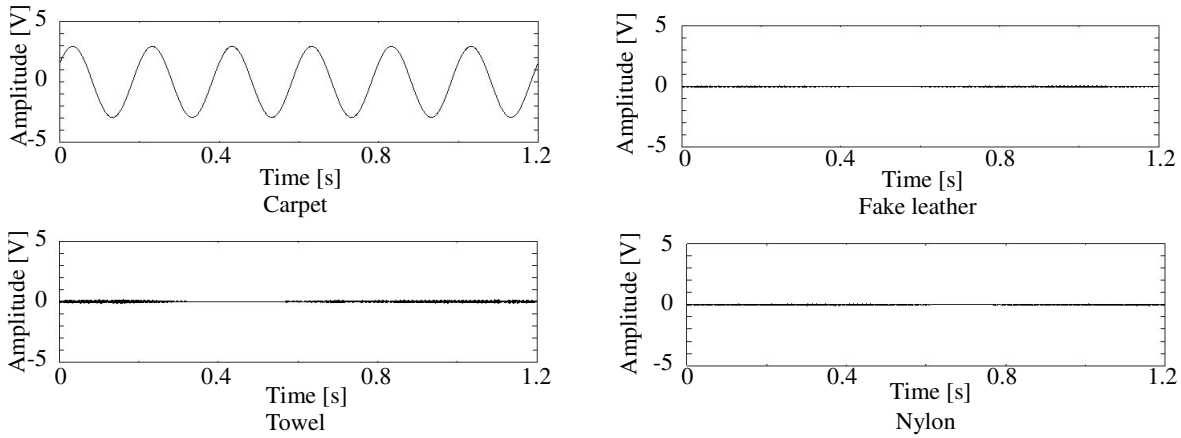


Fig.4.15　触感ディスプレイによる摩擦感呈示

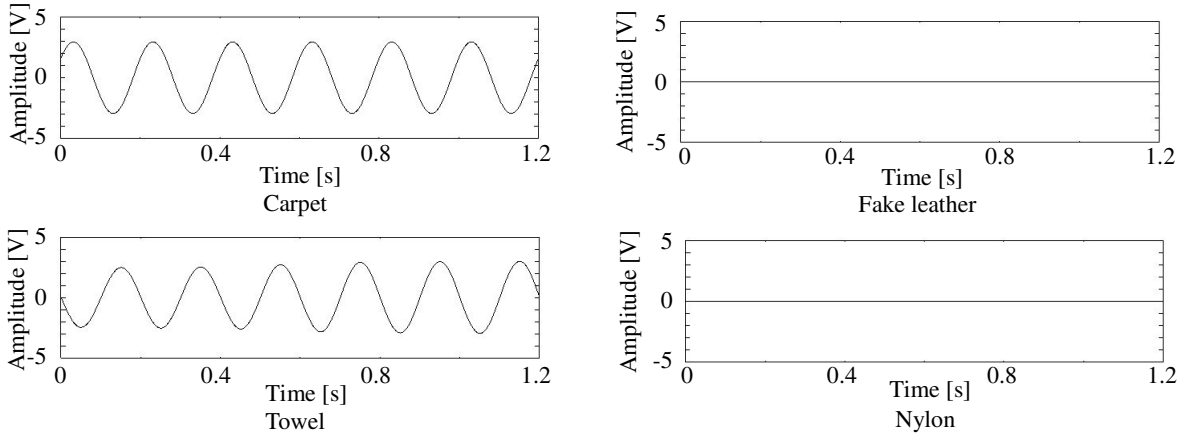


Fig.4.16　触感ディスプレイによる硬軟感呈示

5

動物触感伝達システムの評価

本研究ではこれまでに，研究されてきた触覚技術の用途として，触れなかったものを触る事に高い価値があることを確認してきた．また，その中の一例として動物の触感を伝達するシステムを提案し構築を行なってきた．本章では，本システムが用途に対して有効であることの検証として行なった，実験及びアンケート調査について示す．

5.1　動物触覚伝達システムの評価

5.1.1 システムのニーズに関する意識調査

本システムを用いた実験の前に，本研究で提案するシステムの特徴について述べる．本システムを利用する事によって，使用者は動物に対し，間接的に触る事ができ，その触感がフィードバックされる．本システムが提供しようとするのは，人が触れなかった動物に対して，あたかも触ったかの様に感じられる体験であり，それによって利用者の触りたいという好奇心を満たすことを価値として提供する．しかし，そうした価値を提供するのは，本システムを除けば２つの方法が考えられる．ひとつははく製に触ることであり，もう一方は本システムと同様に技術は発展途上であるが VR で触ったような気持ちをヒトに体験させる事である．本研究とその二つを比較して，本研究が提案するシステムに意義があるのかを見極めるためにアンケート調査を行なった．アンケートでは本研究が提案するシステムと VR を用いて触った気持ちを体験する事，およびはく製に触ることについて，それぞれの理解を一致させる為に，説明を行なった．説明を行った上で，自身が触りたいと感じる動物に対して，それぞれどの様に感じるのかを７段階に得点付けを行なってもらった．評価としては１とても触りたい，２触りたい，３どちらかというと触りたい，４どちらともいえない，５どちらかというと触りたくない，６触りたくない，７とても触りたくないを基準として設け，自身の考えに最も近いと思うものを回答してもらった．なお本アンケートに関しては 20 代から 40 代の男女 9 名に協力してもらい回答を得た．Fig.5.1 に得られ

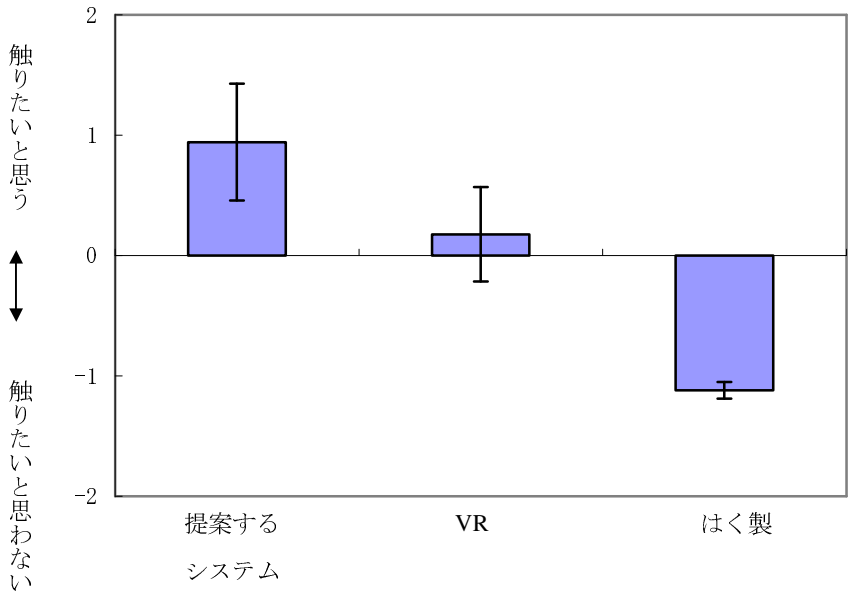


Fig.5.1　本システムのコンセプトに関する調査結果

た結果を示す.個人の回答に対して偏りが生じないように，それぞれの回答を正規化しその値を元に平均を取ることで得られた結果を示している.本研究が提案するシステムと VR, およびはく製について解答してもらった結果とを比較する．多重比較法を用いた検定を行なった結果，本システムと VR を用いて，触ることを体験する事とは 95%信頼区間において有意な差が見られた．また，はく製と比較した場合は 99%信頼区間において有意な差が見られた．このことから本システムのコンセプトは，ヒトに動物の触感を体験してもらう上で今回比較したものの中では有効であると考える事ができる．

5.1.2 実験に用いる動物の選択

第四章にて検証を行なった触感伝達システムが，人に動物の触感を伝達する事によってヒトの好奇心を満たすことができるのか，その価値を検証するために実験を行った．その為にどの様な動物が実験に有効であるのか検討したので以下に示す.

実験に用いる動物の条件をブレインストーミングなどを用いて明確化した．出てきた意見をまとめる事により，以下に挙げる 8 の条件を全て満たす動物をセレクトした.

① システムに用いる事のできるサイズ
② 陸上で活動できる生物であること
③ 身体の触る部位によって様々な触感を持つ事
④ 実験で本物を触った触感と比較する為，触る事に危険が無い生物
⑤ 実験期間中に飼育できる生物
⑥ システムに触られる際にスレーブ側に攻撃を仕掛けにくいおとなしい生物
⑦ 人が触りたくないと思わない動物
⑧ システムとはく製に触った場合とを比較するためにはく製がある生物

それぞれの条件について以下に詳しく説明する．

①　本システムに用いる事のできるサイズ

スレーブ側のハンドの大きさ及び，稼動域に収まりきらないサイズの動物は実験に用いることはできない為に除外した．最大でも人間が持てるほどのサイズが実験に適した動物の条件として求められる．

②　陸上で活動できる生物であること

本研究で提案するシステムは水中で用いる事を目的として開発を行っていない．その為実験においても陸上で行なうため，水中でしか生きられない哺乳類及び魚類，あるいは飛翔することでシステムが捕らえきれない鳥類などを除外して実験の対象となる動物を選択した．

③　身体の触る部位によって様々な触感を持つ事

本研究で提案するシステムの長所として，硬軟感・摩擦感・表面形状といった様々な触感を取り扱える事が挙げられる．実験の対象となる動物として，体表が均質な触感を持つ動物より，触る部位を変えることによって様々な触感を感じることができる動物を選出した．

④　実験で本物を触った触感と比較する為，触る事に危険が無い生物

本システムを用いる現場として，危険性などがあり触れない動物を考えているものの，今回の実験では実物の触感と比較する為，実際の動物にも触れる必要性がある．

⑤　実験期間中に飼育できる動物

実験の期間中に飼えないと判断される動物については，命を尊重するために除外した．

⑥　本システムに触られる際にスレーブ側に攻撃を仕掛けにくいおとなしい生物

試験的に開発を行った本システムには，現在動物からの攻撃にたいして，スレーブ側を防御するシステムは搭載していない．その為，動物の上方からスレーブ側のセンサを近付ける際に動物からの攻撃を受けると触感センサの部位に破損を生じ，本来の性能を損

Tab.5.1 触りたい動物の上位 10 種類

（アンケート対象：10 代～40 代男女 15 名）

1	クジラ	14人
2	ジャイアントパンダ	13人
3	イルカ	12人
4	ペンギン	10人
5	ライオン	9人
5	ホッキョクグマ	9人
7	ワニ	8人
8	ハリセンボン	6人
9	サイ	5人
10	ヤマアラシ	5人



Fig.5.2　クサガメ

なう恐れがある．このため，比較的おとなしく攻撃を仕掛けない動物を選択した．

⑦　ヒトがさわりたくないと思わない動物

本実験に先駆けて，ヒトが触りたいと思っている動物を調査した．１０代から５０代の男女 15 名にアンケート及びインタビューを行ない触りたいと思っている動物と，触りたいと思っていない動物をアンケート及びインタビュー結果から考察した．動物は東京ズーネットに挙げられる実際に動物園で展示されている動物を列挙してその中で触りたいと思う程度を得点付けしてもらった．[@http://www.tokyo-zoo.net/encyclopedia/index.html] アンケート結果を要約して Tab.5.1 に示す．触りたいとおもう動物の傾向として，普段触れない珍しい動物，触感てきな特徴を有する動物，触った事によって好意などの情動が書きたてられるであろう動物などの傾向が見られた．逆に触りたいと思わない動物として鳥類，魚類，普段身近にいるイヌやネコといった動物などの傾向が見られ，触りたいと思われていない動物に関しては研究の目的と実験へのバイアスを考慮した結果除外した．

⑧　本システムとはく製に触った場合とを比較するためにはく製がある生物

本システムの企画の段階でわざわざ本システムを用いなくてもはく製に触る事によって動物に触りたいという好奇心が満たされるのではないかという意見が挙がった．しかし，アンケートで得られた結果や同時に行なった質問事項などから，作り物ではなく実際に生きている動物に触る事にヒトが興味を持っている事が仮説として考えられる．

Tab. 5. 2 クサガメの特徴

①　本システムに用いる事のできるサイズ	体長は成体で 20㎝ 程度，重さは約１kg 程度である
②　陸上で活動できる生物であること	両生類に属しており地上，水中で活動できる
③　身体の触る部位によって様々な触感を持つ事	甲羅や頭など部位によって異なる触感がある
④　本物を触った触感と比較する為，触る事に危険が無い生物	ペットとして飼われているため，触ることに危険性は少ない
⑤　実験期間中に飼育できる生物	水をきれいにし，えさを与える事で飼育できる
⑥　本システムに触られる際に攻撃を仕掛けにくいおとなしい生物	動きは比較的緩慢であり，攻撃性は少ない
⑦　人が触りたくないと思わない動物	アンケート調査からも触りたくないと回答した人は少なかった
⑧　本システムとはく製との比較の為，はく製がある生物	品種によって様々であるが，多くのはく製が製造されている

本実験では，ヒトがどうして動物が触りたいのかという理由に着目し，上記した様に，人が触った事によって好意などの情動が書きたてられるであろう動物に触りたいという結果から本当の動物に本システムを介して触ることと，はく製として作られた動物との比較の為，はく製を手配した．そのため，はく製を作られていない動物，法的はく製の手配が困難である動物に関しては実験の対象としての動物から除外した．絶滅の機に瀕する動物の絶滅のおそれのある野生動植物の種の国際取引に関する条約（サイテス・ワシントン条約）によれば、希少な野生動植物の国際的な取引が規制されている。この為一部の希少な動物のはく製に関しても規制がかかっており，本研究ではそうした動物を対象から除外した[@wikipedia]．これらの条件を全て満たす動物を考慮し，本研究に用いる動物としてFig.5.2に示す”クサガメ”を選択した.クサガメの特徴として,Tab.5.2に示す.

5.1.3　評価実験の方法

本研究が提案するシステムを用いた実験を，20 代から 30 代の男女９名に体験してもらい，下記に挙げるアンケートについて解答してもらった.

① 予備調査として，被験者にクサガメに触りたいか否かを尋ねた．１とても触りたい，２触りたい，３少し触りたい，４どちらともいえない，５あまり触りたくない，６触りたくない，７とても触りたくないの内で，自身の意見に最も近いと思われるものにマークをしてもらった.

② 本システムを実際に体験してもらう場合，クサガメに直接触ってもらう場合を体験してもらった．システムを実際に体験してもらう場合については力覚のみをフィードバックする場合と，力覚と触感をフィードバックする場合の２種類を行なってもらい計３つのパターンの触感を体験してもらい，どの程度触感に好奇心を満たされたか評価を７段階による評価を行ってもらった．評価の基準として，Tab.5.3 に示す．１非常に好奇心が満たされた，２好奇心が満たされた，３どちらかというと好奇心が満たされた，４どちらともいえない，５どちらかというと不満，６不満，７非常に不満の７つの評価の内自身の意見に最も近いと思われるものにマークをしてもらった．この際に，好奇心への影響を考慮し，順番は力覚のみ，触感と力覚，本物に触るの順で行なった.

③ 本物の動物を触った場合と比較して，リアリティを感じるか否か（本システムが呈示する触感が似ているかそうでないか）を７段階で評価した．評価の基準としては１非常に感じた，２感じた，３どちらかというと感じた，４どちらともいえない，５どちらかというと感じない，６感じない，７全く感じないの７つの評価の内自身の意見に最も近いと思われるものにマークをしてもらった.

④ 満足するにあたりリアリティの必要性を感じるか，そうでないかについて７段階の内最も自身の意見に近いものを選択してもらった．評価の基準としては１非常に感じた，２感じた，３どちらかというと感じた，４どちらともいえない，５どちらかというと

感じない，６感じない，７全く感じないの７つの内自身の意見に最も近いと思われるものにマークをしてもらった．

⑤ クサガメのはく製に触ってもらう場合と，本システムを介して実際のクサガメに触ってもらう場合とを比較してどちらの方がより満足感が得られたのかを回答してもらった．評価の基準は７段階として１とても本システムの方がいいと思った，２本システムのほうがいい，３どちらかというと本システムのほうがいい，４どちらともいえない，５どちらかというとはく製の方がいい，６はく製の方がいい，７とてもはく製の方がいいの７段階の内の内自身の意見に最も近いと思われるものにマークさせた．

⑥ 最後に今後研究が進んだとして，本研究が提案するようなシステムを用いて実際に動物と触れ合ってみたいと感じるか否かについて，１非常に感じた，２感じた，３どちらかというと感じた，４どちらともいえない，５どちらかというと感じない，６感じない，７全く感じないの７つの内自身の意見に最も近いと思われるものにマークをしてもらった．

5.1.4　評価実験の結果と考察

実験とアンケート評価の結果についてまとめたものを以下に示す．まず，5.1.3 で述べた①の項目に関して Fig5.2 に示すような結果を得られた．人によってその動物に触りたいかどうかは 5.1.2 で述べたアンケートでもそうであったようにばらつきがあり，カメにおいては触りたいと思う人が触りたくないと思う人に比較して多かった．Fig.5.3 には今回の実験で得られた結果を示し，Fig.5.4 にはその回答結果を元に，個人の回答の偏りを軽減するために，正規化した結果についての平均をとった値をグラフにして示す．A，B，C の結果はそれぞれ，力覚のみを呈示した場合の評価結果，触覚及び力覚を呈示した場合の評価結果，クサガメに直接触ってもらった評価結果をしめしている．本システムが提案する触感伝達システムを用いた結果を示しているのが B であり，今回のアンケートの結果から多重比較法を用いた検定を行なった．その結果により，本物の動物に触ることに比較して好奇心が満たされたかという質問に対しては劣る傾向にあるものの，力覚のみの呈示と比較した場合 99%信頼区間において有意に差が出る事が判明し，力覚のみの場合と比較して触感を呈示する事が有効である事が判明した．

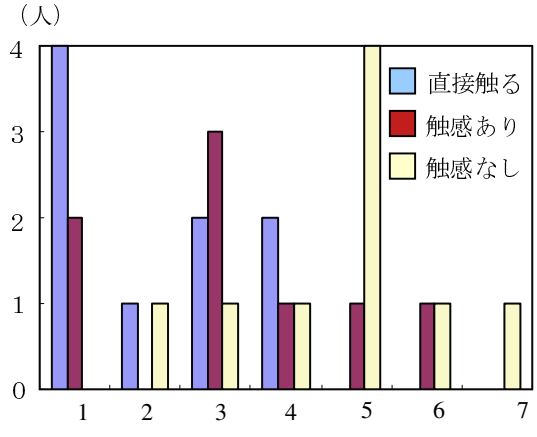


Fig.5.3　動物の触感を体験してもらった回答結果

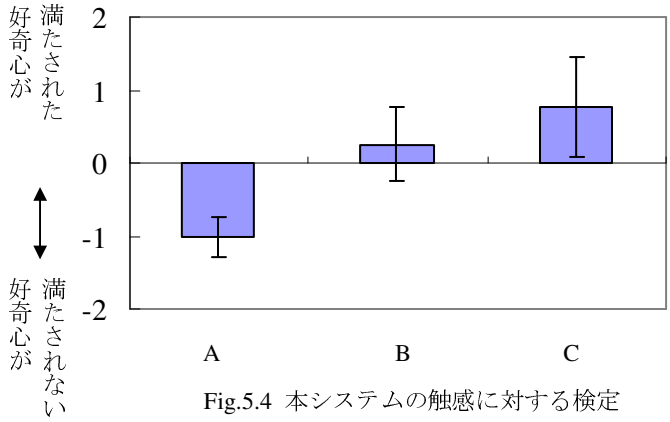


Fig.5.4 本システムの触感に対する検定

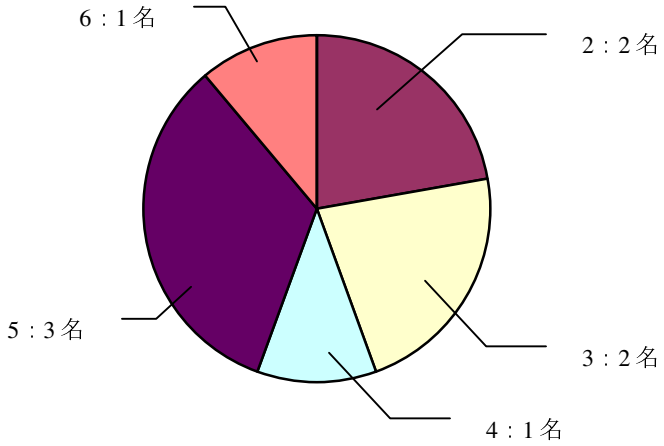


Fig.5.5　呈示した触感にリアリティがあると感じたか

Tab5.3 ③の質問に対する評価基準

評価得点	評価基準
1	非常に感じた
2	感じた
3	どちらかというと感じた
4	どちらともいえない
5	どちらかというと感じない
6	感じない
7	全く感じない

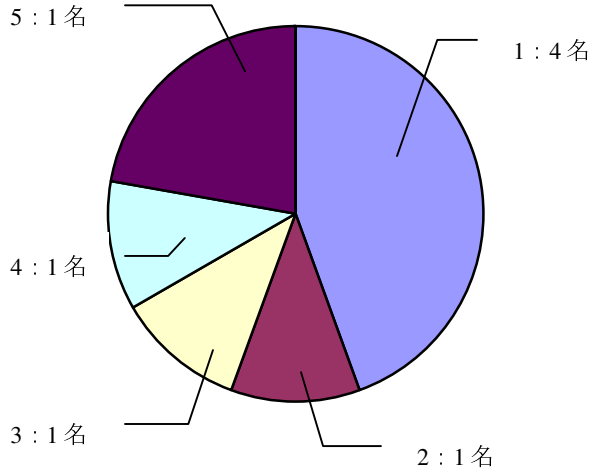


Fig.5.6 満足するにあたり，リアリティが必要であると感じたか

Tab5.4 ④の質問に対する評価基準

評価得点	評価基準
1	非常に感じた
2	感じた
3	どちらかというと感じた
4	どちらともいえない
5	どちらかというと感じない
6	感じない
7	全く感じない

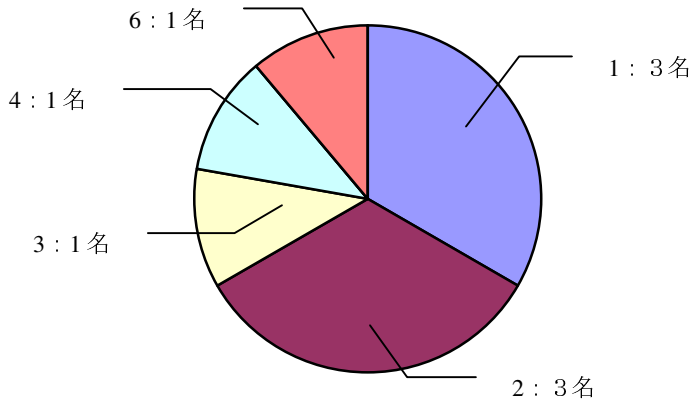


Fig.5.7　はく製に直接触れるのと，本システムを介して本物の動物に触れるのとどちらがいいか

Tab5.5 ⑤の質問に対する評価基準

評価得点	評価基準
1	とても本システムの方がいい
2	本システムの方がいい
3	どちらかというと本システムの方がいい
4	どちらともいえない
5	どちらかというとはく製の方がいい
6	はく製の方がいい
7	とてもはく製の方がいい

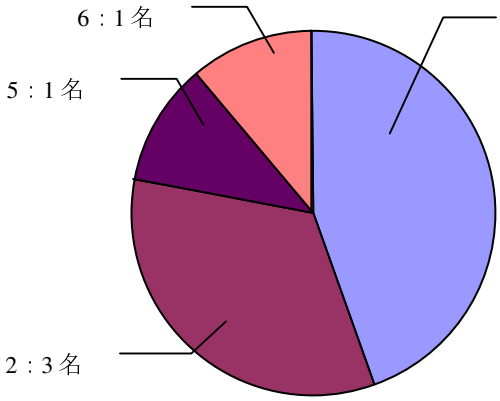


Fig.5.8 今後本システムの発展に期待する

Tab5.6 ⑥の質問に対する評価基準

評価得点	評価基準
1	非常に期待している
2	期待する
3	どちらかというと期待する
4	どちらともいえない
5	どちらかというと期待しない
6	期待しない
7	全く期待しない

Fig.5.5 には 5.1.3 の③で述べたリアリティを感じたかそうでないかという質問に対する回答を集計した結果を示す．また，Fig.5.6 には 5.1.2 の④で述べた，満足するにあたりリアリティの必要性を感じるか，そうでないかという質問に対する回答を集計した結果を示す．また，Fig.5.7 には 5.1.3 の⑤で述べた，満足するにあたりリアリティの必要性を感じるか，そうでないかという質問に対する回答を集計した結果を示す．また，Fig.5.8 には 5.1.2 の⑥で述べた，満足するにあたりリアリティの必要性を感じるか，そうでないかという質問に対する回答を集計した結果を示す．

Fig.5.3～5.6 までの結果について考察をおこなう．Fig.5.5 に示すように，本システムが呈示する触感のリアリティは高いとは言い切れない．回答者の多くは，本システムによって提示する触感のリアリティが十分ではないと回答している．これは，本システムでは，粗さ感，柔らかさ感および摩擦感を再現しているものの，冷温感，乾湿感や空間分布などリアリティに強く影響する要素の再現はできていないためである．しかし，Fig.5.6 に示すように，多くの人が好奇心を満たすことにリアリティが必要であると回答している．以上から，皮膚感覚を付与することで本システムを介したインタラクションの満足度を向上させることができるものの，リアリティが十分でないために，直接触れる場合と比較すると満足度が劣ったのだと考えられる．また，本システムを体験し好奇心が満たされたかという質問に対して，大半を占める被験者が好奇心が満たされたと回答している．つまり，今後リアリティを向上させることで，直接触れるのと同等の満足感が得られる可能性は大いにありうると考えられる．一方で，リアリティは不十分であると回答されているにも関わら

ず，　9 名中 5 名の被験者が本システムによって，直接触れるほどではないものの，ある程度好奇心が満たされたと回答している．この結果に関して被験者にヒアリング調査を行なったところ，カメの皮膚のざらざらした感触や，甲羅の凹凸など，最も特徴的な触感が再現されていれば，触れているという実感をある程度持てることが原因であることがわかった．

次に，本システムのコンセプトに対する評価について述べる．Fig.5.7 に示すように，はく製に触った場合と比較した際に，9 名中 7 名を占める被験者がはく製と比較して本システムの方が，自身の好奇心を満たせると回答した．これは，本項の最初に述べたように，ヒトが動物に触れてみたいと思う理由が，動物とインタラクションしたいことと，動物の皮膚感覚自体に興味があることであり，はく製が後者しか満たせないのに対し，本システムのような遠隔触感体験では両者が満たせるためであると考えられる．実際に，この結果に関してヒアリング調査を行ったところ，本物の動物の触られた際のリアクションによってインタラクションしている実感が得られることが主な要因であることがわかった．Fig.5.8 に示す回答結果から，9 名中 7 名が今後の研究の発展に期待していると考えられる．これまでに述べた考察は，5.1.3①で質問を行なった際に，クサガメに触りたいと思わないまたはあまり触りたくないと回答した者はいずれの質問に対しても低い水準で回答している事から，触りたいと回答したものに絞って考察を行なうと，いずれの結果においてもより顕著な結果が得られることが予想される．

以上の結果から，本システムにおいて皮膚感覚を付与することによる効果と，システムそのものニーズが検証された．現状での技術レベルでは，マスタ・スレーブシステムによって直接触れるのと同等の満足感を与えることは困難であるが，今後の皮膚感覚提示技術の発展に伴い，多くの人々の好奇心を満たすことのできるシステムの開発が期待できる．

5.2　動物園の飼育係へのインタビューによる評価

3.1 において述べたように本研究の主なステークホルダーとして, 5.1 で想定したような動物園への客が考えられる. 一般の人の多くはこの立場に当てはまる. 本システムを実際に使用し, 動物との触れ合いを体験することで, 本研究が提案するシステムの主な顧客といえる. しかし, 本システムを導入したうえで異なった立場の人からの視点を考える事が必要である. それは, 導入する側の動物園で動物を飼育する人, あるいは動物園を経営する立場にある人である. 本研究ではこれらを総じて動物園関係者と呼称する. 動物園関係者の考え方は, 一般の人へのアンケートなどではわからない為, 今回, 横浜動物園ズーラシアで動物についての考え方を普及させるお仕事に取り組まれている川口英治氏と長倉かすみ氏に本研究の概略をお伝えし, 意見をうかがうことで, 本研究の展望と今後の課題を明らかにした. 以下に箇条書きにて示す. また付録に, 今回のインタビューの詳細を示す. 頂いたご意見を元に, ここでは簡略に述べる. （詳細は付録を参照されたい.）

インタビューを行なった事で川口英治氏から，以下に挙げるような意見を得る事ができた．それぞれの意見について考察を行い，以下に示す．

・インタビューから得られた本研究の提案するシステムの課題

「相手が生き物であるということから, 動物の気持ちを尊重すべきである．」

動物園から見た一番クリアするべき課題として, 動物に負荷をかけない事が考えられる．本研究で提案するシステムを用いる事で，利用者は動物にこれまでに触れなかった動物に触れることで，好奇心をみたすという価値を得ることが出来る．しかし，相手が動物であるという難しさも同時に生じる事が確認された．具体的には，これまで触ったことのない動物に近づく事で動物を知る事ができるが, その一方で, 縄張りの侵略などの問題が考えられる. 動物に触るということは，そうしたストレスを与えてしまう事になる為，本研究のコンセプトについて, ヒトと動物の間に, どこに境界を設けるべきなのかということを考える必要がある. こうした問題を解決することが実現に向けた大きな課題であるといえる．

・ヒトにとっても動物にとっても安全である事

本研究が提案したシステムはプロトタイプであり, 動物と人にとって, 上記した精神てきな問題と共に，物理にも安全である必要がある. 本研究が提案するシステムが，真に動物に安全に触れるという価値を提供するためには，動物に危害を与えない事だけでなく，本研究で提案するシステムが，動物からの攻撃を受けないような工夫が必要である．川口氏が「メンテナンスなどのコストを考えた上で，果たして導入するかは疑問が残る．」と指摘するように，本研究では利用者に価値を提供できる事が確認されたものの，攻撃性の高い動物に対して，安全に運用できるかどうかといった面ではまだ検証されていない．今後の研究の方向として，そうした運用面での安全性が重要であると考えられる．

・インタビューから得られた本研究の提案するシステムの展望

以上に挙げたように，本研究が提案する動物との新しい触れ合い方について，課題だけでなく展望も，川口氏へのインタビューから明らかとなった．以下に概略を述べる．

「本研究がコンセプトとして掲げる, 触れ合う事は, 動物の存在を感じる上で最も大切で効果的である. そういった観点から触れ合えるということは非常に大切である．」

動物に触れ合えるということは，自然な姿を展示することを目指すズーラシアでは行なっていないものの，他の動物園では取り組まれている．こうした動物との触れ合いは，地球上にヒトが動物と共生しているということを理解し，その動物を知ることにおいて効果的で，重要であるといえる．川口氏が「動物に触りたいとおもっているヒトは非常に多い．」というように，動物に触れ合いたいという意見は，来園者から多く寄せられている意見である事が，本研究でも調査したようにわかった．

また，局所的な運用ではあるが本研究が動物園の側から見て役立つ状況がインタビューからわかった．

「動物の親が育てられないときに，ヒトが育てなければならない．そうした期間にこそ，本システムは役に立てる可能性がある．なるべく人とのふれあいを少なくする事で動物が，人離れしやすくなりスムーズに動物社会へと戻っていく事が可能かもしれない」と川口氏は述べる．不幸にして，動物は自身の子であっても育てることを放棄してしまう事がある．そうした動物を，保護しやがて群れへと返す為に，動物園ではそうした取り組みを行う事がある．ヒトが手を掛けすぎてしまうと，群れの中に戻る事が難しいという問題が生じる．そうした問題を解決する手段として，本研究で提案するシステムが有効であると示唆された．

本研究が提案する手法は，実現する上で，解決しなければならない課題がある事が確認された．しかし，その一方で，本研究が局所的にではあるが役に立つ事が示唆された．

6

今後の展開

本研究の今後の展開として，2 つの視点に立って述べる．1 つ目は今回開発した触感伝達システムの技術的な展望についてである．2 つ目は触覚技術の今後の展望について述べる．

（a）今回開発した動物触感伝達システムの技術的な展望

本研究で開発したシステムはあくまでもプロトタイプであり実用化を行う上で課題を残している.前章までで考えられる課題について述べる．

・　実用化を目指した安全性の追求

実用化を目指すうえで使用者，および動物側に対する安全性を考慮し再度設計を行う必要がある．ロボットアーム及び，触感センサは動物の攻撃に対して壊れやすく，壊れないような設計の改善または，動物から攻撃されないように工夫する事が必要である．本システムの長所として，マスタ側とディスプレイ側が離れていた場合においても触感を伝達する事が可能である為，スレーブ側に可動式の台座を用意する事などでこうした問題を解決できると考えられる．

・　触感のリアリティの追求

第五章で述べたように，リアリティが十分でないために，直接触れる場合と比較すると満足度が劣る事が確認された．しかし，今後リアリティを向上させることで，直接触れるのと同等の満足感が得られる可能性は大いにありうるということは確認できた．今後，触感のリアリティを改善していく上で２つの視点に立って述べる．

1 つは触感センサの改良についてである．冷温感を検出できるように改良を行なう必要がある．これは，実験を行った際に，カメの触感はわかるものの，手足の湿った触感などは伝わってこない事から違和感を感じたものがいた為である．操作者は特徴的な触感を予測して，その触感が実際に指に感じられることによりリアリティがあると感じると考えられる．回答者の中には，冷温感を強く予測していたものがいる事がヒアリングを行なった結果，確認された．こうしたヒトは少なくないと考えられることから触感センサにレーザー温度計を実装するなどの方法で冷温感を検出することでリアリティの向上につながると考

えられる．また，現状で用いた触感ディスプレイでは，一つのボイスコイルで触感の再現をおこなった為，細かな触感の分布や，センサ側でのべた冷温感を再現する事ができていない．複雑な触感を再現できる触感ディスプレイについては開発が行われているものの，本システムに実装するような小型化には至っていない[塩川 2008]．今後の課題として，触感センサ及びディスプレイの改良によるリアリティの向上が必要であると言える．

また,今回実施した,動物園職員に対するアンケートから相手が生き物であるということから，動物の気持ちを尊重する工夫を行なう必要がある事が確認された．動物が触られることによってストレスを受けないような工夫として，餌を与える際に用いるなどの運用する上での工夫が有効であると考える．

（b）触覚技術の今後の展望

2 つ目は本研究によって，提案される触覚技術の用途とその価値の一例との関係について明らかになった．触覚技術の今後の展望について述べる．第二章にて考察をおこなったように，本研究テーマのほかにも将来的に高い価値を内包すると考えられる用途が明らかになった．具体的には，現状の技術で実現できる価値の高い用途は，「環境の VR 体験」および「操作フィードバック」である．将来的に価値の高い用途を実現するための技術開発の方向性としては「遠隔触感体験」，「快感覚の定常的提示」，「ネットショッピング」及び「快感覚のＶＲ体験」が考えられる．こうした用途において，技術開発を行っていくことにより有益なシステムが提案されると考えられる．また開発するシステムの価値を明らかにし，技術開発を行う事によって，触覚技術の技術力の向上につながると考えられ，従来おこなわれてきた儀銃的な開発のみならず，価値に関する研究が行われることが，触覚の分野では必要であるといえる．

（c）動物園での実用化についての課題と展望

最後に本研究の提案するシステムを動物園に実用化を目指す上での課題と展望について述べる．本研究で提案する手法は，これまで触ったことのない動物に近づく事で動物を知る事ができるが，その一方で，縄張りの侵略などのストレスを動物が感じてしまうなどの問題が考えられる．本研究のコンセプトについて，ヒトと動物の間に，どこに境界を設けるべきなのかということを考える必要がある．また，運用する事を考えたときに，本研究が提案したシステムはプロトタイプであり，安全に運用できる工夫が不十分であると考えられる．こうした問題を解決することが実現に向けた大きな課題であるといえる．また，その一方で，ヒトに触ってもらうことで，動物を理解してもらえるといった，コンセプト面での展望や，ヒトが動物を育てる際に，ヒト離れを支援する事ができるといった，局所的な運用による可能性も示唆された．

7

結論

動物とインタラクションを行なう為の触感伝達システムを構築した．本システムの特徴は，離れた距離にあっても，あたかもヒトが対象に触っているかのような感覚を，触対象となる動物から検出し，呈示できることにある．本システムを構築するにあたり，ヒトの触覚を利用した技術に着目し，触感技術の用途とその用途の一例について要求分析，設計，構築，検証，評価を行った．要求分析では，ヒトが望む触覚を用いたアプリケーションについて洗い出しを行った．また，その中から選択手法を用いて用途の選択を行い，選んだ用途を満たすシステムの設計を行なった．構築では従来のものと比較して，ヒトの指に近い形状を持ち小型で平面に対応可能な触覚センサを開発した．また，小型なスピーカーを用いた触覚ディスプレイと併用し，複雑な触感を伝達する事ができるマスタースレーブ触感伝達システムの開発に携わった．第四章で述べたように技術的な検証を経て，第五章ではこのシステムを実際に利用して動物に触れてもらう実験を行うことで以下の結果を得られた．

- 「遠隔触感体験」，「快感覚の定常的提示」，「ネットショッピング」及び「快感覚のＶＲ体験」といった触覚技術の用途が将来的に価値の高い用途として挙げられる．
- 上記した遠隔触感体験の中でも人は今までに触ったことの無いものに触ることに興味を抱いており，中でも動物の触感を伝達するシステムに価値がある事を確認した．
- 動物にヒトが触りたい理由として動物とインタラクションしたいことと，動物の皮膚感覚自体に興味があることである．
- 本研究が提案する動物触感伝達システムを用いる事で，ヒトの動物に触りたいという好奇心を満たす事ができる．
- 現状では，ある程度のリアリティを持った触感しか伝達する事はできないが，特徴をつかんだ触感を呈示する事や，動物とのインタラクションをしているという気持ちからヒトの好奇心を満たすことができる．
- 現状での技術レベルでは，マスタ・スレーブシステムによって直接触れるのと同等の

満足感を与えることは困難であるが，今後の皮膚感覚提示技術の発展に伴い，多くの人々の好奇心を満たすことのできるシステムの開発が期待できる．

- 触感を付与する事により力覚のみの場合と比較して，ヒトの好奇心を満たす上で有効である事を確認した．
- ヴァーチャルリアリティやはく製のような作り物とコンセプトの比較をして，本システムのような本物に触れる事ができるシステムの方がヒトの触りたいという好奇心をを満たす事ができる．

また，実際に動物園でのインタビューを行なった結果として

- 本研究で提案する手法は，ヒトと動物の間に，どこに境界を設けるべきなのかということを考える必要がある．また安全に運用できる工夫が不十分であると考えられる．こうした問題を解決することが実現に向けた大きな課題であるといえる．
- ヒトに触ってもらうことで，動物を理解してもらえるといった，コンセプト面に期待がある事が確認された．また，ヒトが動物を育てる際に，ヒト離れを支援する事ができるといった，局所的な運用による可能性も示唆された．

以上にあげる事が本研究の結果として述べる事ができる．第二章で約 200 触覚技術を用いた人々が望む技術を洗い出したが，”今までに触れなかったものに触る”に限らずその他にもまだまだ多くの触覚技術がその価値が明確にされないまま研究されている事と思う．今後は，価値を明確にし，より利用者の目線に立つことにより，本当に望まれるような触覚アプリケーションの開発が行えると考えられる．

謝　辞

本研究は数多くの先生方，諸先輩方，諸同輩らの数多くの支えによって行うことができました．特に慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科前野隆司教授には指導教員として，ご指導，ご助言いただき心より感謝いたします．本研究を進めるにあたって，先生に厳しく指摘いただく事によって，研究の方向を正して頂きました．本研究の結論までたどり着くことができたのは，お忙しい合間に何度もディスカッションをしていただいたおかげです．また，貴重な体験をさせていただき研究のみならず学生生活においても充実させることができました．

また，牧野泰才助教授には本研究の分野においての深い知識から，私の研究に助言をいただき，システムの構築を行なう上で大きなお力添えをしていただきました．牧野さんの御家族の方から，今回の実験において重要な意味を持つクサガメをお借りいたしました．ここに感謝の意を示します．共同研究を行なった塩川君には修士生活を通して支えていただき深く感謝しています，塩川君には本研究の背景に当たる部分の研究を行なっていただくと共にシステムの構築に助力していただきました．また，同研究室の河津君，村尾君には研究に対する数々の助言を頂きました．時には助言だけでなく作業を手伝っていただき，また時には本研究の実験に参加していただきました．本研究に対して，田代君，今関さん，白土さんから知恵をお借りすると共に，津久木さん，高峯さん，松本さんには実験に参加をしていただき助言をいただきました．他にも研究室内の方々，研究科内の同輩および先生方の助言によって，本研究は進めてくる事ができました．

特に本研究の副査を担当いただいた，狼嘉彰研究科委員長および当麻哲哉准教授には私の研究について指導をしていただき，真に感謝いたします．

本研究で提案するシステムを構築する際に，共同研究を行なった東北大学情報科学研究科の昆陽雅司准教授，岡本さん，山内君には技術的な協力をしていただきました．本研究の基盤となる技術を開発していただき，協力が無ければ本研究の存在は無かったともいえます．

研究に対する声を専門家の方にうかがう際に，横浜動物園ズーラシアの長倉かすみ様，川口英治様からはお時間を割いていただき，本研究の今後の展望と課題を確認する上で貴重な意見をいただきました．

最後に，影ながら常に私を支えていただいた両親に感謝します．公私にわたり充実した日々を送れた事に，私を支えていただいた全ての人に感謝の意を，ここに示したいと思います．

2010 年　2 月

参考文献

[Chambers 1972] Chambers, M. R., Andres, K. H., During, M. von, & Iggo, A. : The structure and function of the slowly adapting type II mechanoreceptor in hairy skin, Quarterly Journal of Experimental Physiology, Vol. 57, pp. 417-445 , 1972

[Dweck 1975] Dweck : The Role of Expectations and Attributions in the alleviation of learned helplessness, Journal of Personality and Social Psychology, 31, pp. 674-685, 1975

[Freeman 1982] Alan W. Freeman and Kenneth O. Johnson : A Model Accounting For Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey, Journal of Physiology, Vol. 323, pp. 43-64, 1982

[Hristu 2000] Dimitris Hristu, Nicola Ferrier, Roger W. Brockett : The performance of a deformable-membrane tactile sensor: basicresults on geometrically-defined tasks, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.508-513

[Iggo 1969] Iggo, A. & Muir, A. R. : The structure and function of a slowly adapting touch corpuscle in hairy skin, Journal of Physiology, Vol. 200, pp. 763-796 , 1969

[Johansson 1983] R. S. Johansson and A. B. Vallbo : Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand, TINS(Trends in Neurosciences), Vol. 6, pp. 27-32,1983

[Konyo 2008] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto and S. Tadokoro : Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force,proc. of EUROHAPTICS 2008

[Lederman 1983] S. Lederman : Tactual Roughness Perception: Spatial and Temporal Determinants, Canadian Journal of Psychology, Vol. 37, No. 4, 1983

[Spencer 1973] Spencer, P. S. & Schaumburg, H. H. : An ultrastructural study of the inner core of the Paccinian corpuscle, Journal of Neurocytology, Vol. 2, pp. 217-235 , (1973)

[Yoshioka 2001] T. Yoshioka, B. Gibb, A. Dorsch, S. Hsiao and K. Johnson : Neural Coding Mechanisms Underlying Perceived Roughness of Finely Textured Surfaces, The Journal of Neuroscience, 2001

[@Wikipedia] http://ja.wikipedia.org

[石井 1992] 石井浩介　飯野謙次：設計の科学　価値作り設計，養賢堂，第一版 pp. 20-25，2008

[岩村 1984] 岩村吉晃：ヒト触覚受容器の構造と特性，日本ロボット学会誌，Vol. 2, No.5，pp. 438-444

[岩村 2001] 岩村 : タッチ〈神経心理学コレクション〉，医学書院，東京，初版，pp.2-7, 148-161，2001

[大山 1994] 大山正，今井省吾，和気典ニ：新編　感覚・知覚心理学ハンドブック，誠信書房，初版

[小川 1993] 小川和朗，溝口史郎：組織学，文光堂，No. 2，pp.315-321

[音川 2005] 音川佳代 : 超音波振動の振幅変調を用いた人工触感呈示法，慶應義塾大学 2005 年度修士論文，2005

[梶本 2001] 梶本裕之，川上直樹，前田太郎，舘暲 : 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ，電子情報通信学会論文誌 D- II，Vol. J84-D-II，No. 1，pp. 120- 128, 2001

[神川 2006] 神川康久，白土寛和，前野隆司： 人工皮膚の開発と皮膚上塗布物の触感の解明，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集， 2P2-B32，(2006)

[神川 2007] 神川康久，野々村美宗，前野隆司 : 皮膚上塗布物のトライボロジ特性と触感の関係，日本機械学会論文集 C，Vol. 73，No. 730，pp. 1827-1833，(2007)

[神山 2002] 神山和人，梶本裕之，稲見昌彦，川上直樹，舘暲: 触覚のテレイグジスタンスシステムに関する研究，日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集, pp.443-444 ,2002

[グリーンフィールド 1999] スーザン・グリーンフィールド : 脳が心を生みだすとき，草思社，東京，初版，p. 59，1999

[昆陽 06] 昆陽雅司，横田求，前野隆司，田所諭：低周波振動刺激によって起こる静的圧覚の呈示条件，第 11 回ロボティクスシンポジア講演論文集, 2006

[昆陽 06] 昆陽雅司，中本雅崇，前野隆司，田所諭：ICPF アクチュエータを用いたヒト指腹部への分布振動刺激に基づく把持力調整反射の誘発，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 11 巻 1 号，pp. 3-10，2006

[昆陽 07] 昆陽雅司，山田浩史，田所論ら：触覚受容器の神経活動に着目した皮膚刺激による摩擦感呈示，第 8 回システムインテグレーション部門講演会論文集，1A3_2 ,2007

[佐藤 2007] 佐藤克成，古明地秀治，南澤孝太，新居英明，川上直樹，舘暲: Haptic Telexistence -分布型触力覚情報を伝達するロボットハンドシステム-，インタラクティブ東京 2007 概要集, 16

[佐野 2005] 佐野明人，武居直行，望山洋，菊植亮，藤本英雄 : 表面歪検知レンズ（触覚コンタクトレンズ），検査技術, Vol.10, No.1, pp.8-12, 2005

[塩川 2009] 塩川雄太，田蔵淳史，昆陽雅司，前野隆司 : 超音波振動子と力覚呈示装置

の統合に基づく複合触感呈示法，日本機械学会論文集 75 巻 749 号C 編，pp. 132-140，2009

[塩川 2009] 塩川雄太，日高佑輔，牧野泰才，前野隆司，日常動作における皮膚感覚の役割の明確化，第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2009）

[篠田 2002] 篠田裕之：皮膚の力学的構造に隠れている知能，システム制御情.報学会誌，Vol. 46，No. 1，pp.28-34

[篠田 2007] 篠田裕之，人のように触れる，日本バーチャルリアリティ学会，Vol.12，No.3，pp.150-155,2007

[白土 2004] 白土寛和，昆陽雅司，前野隆司，ヒトの触感認識機構のモデル構築，日本機械学会論文集 73 巻 733 号 C 編，2007 年 9 月，pp.2514-2522

[多田 2005] 多田泰徳，細田耕，浅田稔 : 内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指，日本ロボット学会誌，Vol.23，No.4，pp.482-487,2005

[奈良 2000] 奈良高明，前田太郎，安藤繁，舘暲 : 皮膚の直行変形量に関する考察－マイスナー小体，パチニ小体が検出する皮膚変形量について－，第 15 回生体・生理シンポジウム論文集，pp.407－410，(2000)

[前野 1997] 前野隆司，小林一三，山崎信寿，ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係，日本機会学会論文集 C，Vol.63，No.607，pp.881-888

[前野 2000] 前野隆司：ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能，日本ロボット学会誌，Vol. 18，No. 6，pp.772-775

[前野 2005] 前野隆司，山田大介，佐藤英成 : ヒト指紋形状の力学的意味，日本機会学会論文集 C，Vol.71，No.701，pp.245-250

[宮下 1996] 宮下武，中沢賢，河村隆，中谷潤也 : 擦動型触覚センサによるテクスチャの識別，日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集，vol.1996，No. A，pp.269-272，1996

[向坊 2005] 向坊由佳，白土寛和，前野隆司，昆陽雅司 : ヒト指の構造と知覚機構を模倣した触感センサ， 日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol.23，Page.2C11,2005

[山内 2009] 山内敬大, 昆陽雅司, 岡本正吾, 日高佑輔, 前野隆司, 田所諭, : マスタ・スレーブ型触感伝達システムの開発 —第 4 報:粗さ・摩擦・硬軟を含む多様なテクスチャ感の遠隔伝達, 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2A3-4, 2009

[山口 2006] 山口創 : 皮膚感覚の不思議，ブルーバックス，講談社，2006

付録 A

横浜動物園ズーラシアにて,動物に対する考え方の普及に取り組んでいらっしゃる,川口氏にインタビューを行なった結果,非常に貴重な意見を得ることが出来た.5.2 で述べた本研究の展望と課題は,今回のインタビューの結果得られたものである.付録では,録音したインタビューをまとめ,以下に示すものとする.

質問 A　動物と触れ合うということについて

「触れ合う事は,動物の存在を感じる上で最も大切である.動物園で働いている立場として,五感を利用するということは,動物が生きているということが最もよく伝わる.そういった観点から触れ合えるということは非常に大切である.」

質問 B　本システムについて

「動物の世話をする立場からすると,わざわざ機械を通して触れ合う事にどこまでの必要性があるかは疑問である.動物園には 2 種類の動物がいる,家畜と野生動物である.動物園とは,本来すんでない動物を域外保全する事を行っている.その為,人間が手を掛けて保全する動物園は自然の姿に反する事である.とはいえ,野生動物を多くの人に知ってもらう事,身近に感じてもらうことは必要である.動物園とは,いうなればあえて人間が（親が育児をしなくなった場合なども含めて）動物を育てる場所である.そうすることによって動物は人間になれてきてしまう.出来るだけ動物と人間との境界は持たせておきたいと考える.だから,そうした場合に,本システムを使う（限定的に）使う事で活用するということは出来るかもしれない.しかし動物が繁殖期になったときに,本来であれば,人間から手の離れたところで繁殖をしていかなければならない中で,必要以上に触ることには疑問を抱く.本システムをもちいて,動物に触るということを考えたときに,わざわざ機械を用いて怖い動物に触りたいと言うニーズがあるかという疑問も少しある.」

質問 C　お客さんのニーズについて

「触りたいというお客さんは非常に多い.老若男女問わず来園する.多い日では 2 万人程度の集客がある.国民性かもしれないが,農耕民族は動物にたいして仲間意識を持ちやすい.狩猟民族は固体への愛着が乏しい.そういった部分からか,本来触る事ができない動物に対しても（日本人は）触りたいという気持ちを抱きがちである.実際に触れ合うということは,最も効果的に動物のすばらしさをわかってもらう方法であると思う.しかしその為に,（調教などによって）“人に触られる動物”を作り上げるということは,その固体を不幸にしてしまうので必要が無いと思われる.一番の理想は親が育てる事である.しかしそれが出来ないときに,ヒトが育てなければならないと思う.そうした期間にこそ,本システムは役に立つと思う.そうした期間を過ぎたときに自然に戻す事ができると思う.一番いいのは,じかに触れること.」

質問Ｄ　本研究が提案するシステムを導入したいと思いますか？

「飼育係からすると,ものに頼らずに動物と信頼関係を築いた上でじかに触れることを目指していく.危険な動物の治療・触診などでは便利かもしれないが,機械に対して攻撃することを考えるとメリットが少ないと思われる.」

質問Ｅ　お客さんは本システムを使いたいと思いますか？

「それに関してはわからない.しかし動物園側としては伝えたい事とずれてしまう懸念がある.ズーラシアは動物の本来の姿を見せる事によって，人が動物と共存している事を伝え,ヒトが今住んでいるこの環境に対して目を向けてもらいたいと考えている．その為，自然展示（動物本来のありのままを目指す展示方法）を目指している.」

質問Ｆ　動物園の保有頭数について

「敷地に対する保有数は少ない．頭数が増えればコストがかかる.横浜にある動物園の中でも野毛山動物園は,街中にあるため猛獣は入れられない.狭いからこそなじみのある身近な動物を見せる事で強みにしている.ズーラシアは珍しい動物がのびのびとしていて,より自然に近い生態環境を見せる展示法を目指している．動物園は時代と共に変わってきている.檻の中にいる動物を見せることから,より見せ方を工夫した総合展示へとシフトしているケースが多く見られる.金沢動物園は希少な草食獣を集めた.それぞれが強みになる.」

質問Ｇ　このシステムを強みにしていく動物園はあるのか？

「身近な動物であれば,じかに触れる.猛獣であれば触れるようにするための課題がある.そうした事や,距離があるのに触っていることから違和感を感じることも考えられる.触れる範囲で触らせてあげたいということは誰しもが思う事であるが,動物に強要する事ではないので,信頼関係などの条件をクリアした上での自然に触れるようになる事が望ましい.そうした面から,壁があると考えられる.」

質問Ｈ　触られたい動物触られたくない動物

「触られたい動物もいる.しかし,それは信頼関係によってストレスを乗り越えた上である.飼育員は担当が決まっている為,動物との信頼関係を築いている.他の飼育員ではそうは行かない.気持ちがない機械でどこまで出来るかが疑問である.」

質問Ｇ　動物園は何故必要なのか？

「ただ見せるだけではない.そこに,本来暮らすはずのない動物が何故そこにいるのか.野生では増えるのに,動物園では増えない。動物の存在意義とは？そうした問題はなぜおこるのか？試行錯誤した上で,動物のストレスフリー,野生と同じ空間を再現するという気運が

高まってきた. そうした環境を見てもらったうえで, 人に共生を理解して欲しい. 動物がのびのびとしているのは森のおかげである. 自然が大切であるということを知ってもらうと共に, 自分たちもその一部である. その事について考えて欲しい. 見せるということは生きた教材を見てもらって, 環境などの問題に目を向けてほしいということ. 作り物を見せるのでは意味がない. 生きているものに触ることもまた特別であると考えられる.」

質問H　ヒトが触れないモノに触れるようになるという事について

「動物園にも, 無理難題なニーズが寄せられる。応えられないこともある. 動物を調教して触れる動物を作ることは様々な危険性をはらんでいる。どこまで応えるべきか. したくない事であっても, 可能な範囲で行なう事で伝えたい事を伝えなければならない. そうしたときに, 先ほど提案したように, 限定的にシステムを用いるという事は有効であると考えられる.」

質問I　ズーラシアのニーズに応える取り組み

「動物が見えない. という意見がある. 動物に味方してしまいがちだが, お客さんの為に, 極力近くで見えるようにするといった, 展示法, 飼育などで工夫を行なっている. 旭山動物園は行動展示, ズーラシアは自然展示を行なっている. 目指しているコンセプトは一緒だが, 人工物を使わないで自然環境に近付けた上で本来の行動を引き出す事を目指している. 色んな特色がある動物園が存在するべきであり, ズーラシアはこのコンセプトを突き詰めていくべきであると考える. 伝えたい事が伝わっているかという事が大切である. テーマパークのように, コンセプトを突き詰める事で人にとっての非日常を, 動物にとっての自然な姿を演出したい.」

質問J　本研究の課題は

「相手が生き物であるということから, 動物の気持ちを尊重すべきである. 動物園から見た一番クリアするべき課題として, 動物に負荷をかけない事が考えられる.
また, ヒトが踏み入りすぎる事で問題が生じる事が考えられる. どこに境界を設けるべきなのかということを考える必要がある.」

その他の本研究が提案するシステムに対してのご指摘

「動物にとってストレスを与えることを考えると他の, 医療関係に用いる事, 義手や人の補助の面などで有効なのではないか？」