

Title	皮膚感覚提示技術が創出する価値の分析
Sub Title	Analysis of value created by tactile displaying technology
Author	塩川, 雄太(Shiokawa, Yuta) 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年度システムデザイン・マネジメント学 第15号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002009-0019

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

皮膚感覚提示技術が 創出する価値の分析

塩川 雄太

(学籍番号：80833220)

指導教員 教授 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	80833220	氏 名	塩川 雄太
論文題目： 皮膚感覚提示技術が創出する価値の分析			
<p>(内容の要旨)</p> <p>皮膚感覚提示技術とは、「つつる」「温かい」などの皮膚感覚情報を人工的に生成してヒトに提示する技術であり、視覚・聴覚に次ぐ次世代の感覚提示技術として近年注目を集めている。しかし、既に多くの研究が行われているにも関わらず、皮膚感覚提示技術は他の感覚提示技術と比較して技術的に大きく立ち遅れている。これには、皮膚感覚提示技術の開発自体が多くの困難さを伴うことだけでなく、同技術の価値が不明確であることが大きく影響していると考えられる。これまでは技術的な問題のみに焦点が当てられていたのに対し、本研究では、価値を明確にすることを目的とする。すなわち、皮膚感覚提示技術の用途を徹底的に洗い出すとともに、各用途の価値を調査・検証する。これによって、技術開発にコストを投じやすくなるだけでなく、皮膚感覚提示技術をどのような目的で用いるべきかという技術開発の前提が明確になるため、開発のための指針として利用できる。</p> <p>まず、皮膚感覚提示技術の用途を考案する上で必要不可欠となるため、ヒトの日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割を明確にした。日常動作・状態を12種類に分類し、それぞれにおいて皮膚感覚が果たす主な役割を明確にするとともに、皮膚感覚にどの程度依存するかを調査・検証した。次に、皮膚感覚提示技術の用途を、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洗い出すことによって、従来想定されていなかった用途を含む、約160の用途を得た。また、得られた用途を約40のMECEなグループに分類することで、得られた用途の抽象度を統一するとともに、網羅性を確認した。さらに、各用途において提示する基となる情報が皮膚感覚で知覚できるか否かに着目して、皮膚感覚提示技術を触感ディスプレイおよび情報ディスプレイに大別し、それぞれの用途の価値を分析した。触感ディスプレイについては、得られた用途の(1)ニーズ、(2)皮膚感覚付与効果および(3)実現可能性を分析した。これによって、現状の技術で実現できる価値の高い用途および今後行っていくべき技術開発の方向性が明らかになった。情報ディスプレイについては、視覚・聴覚・力覚提示技術と比較した際のメリット・デメリットを分析した。これによって、皮膚感覚と他感覚提示技術との使い分けおよび統合のあり方が明確になった。最後に、これまでに報告されてきた技術を用いて、分析結果に基づき価値が高いと考えられる二つの用途のプロトタイプを試作した。既に実用化された事例および試作したプロトタイプを用いて、価値を検証した。その結果、各用途の本研究における価値の分析結果が妥当であることを確認した。</p> <p>以上のように、本研究では、皮膚感覚提示技術の用途を網羅的に示すとともに、それらの価値を分析・検証した。これによって、現状の技術力の有効的な活かし方や、将来的に価値の高い用途を実現するための今後の技術開発のあり方を提言することができた。本研究の成果によって、皮膚感覚提示技術の開発のための指針を明確にすることができるため、技術開発の効率を大幅に向上できると期待できる。</p>			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	80833220	Name	Yuta Shiokawa
Title			
Analysis of Value Created by Tactile Displaying Technology			
Abstract			
<p>Tactile display is expected to be second displaying technology to visual and audio display. However, it lags a long way behind the other displaying technologies in spite of considerable studies. This is dependant on two factors. One is that there are many difficulties in developing tactile display compared to the other displaying technologies, while the other is that the value of tactile display has not been clarified. In this study, we focused on the latter problem, whereas the former problems have been focus on the previous studies. The purpose of this study is to clarify applications of tactile display as well as investigating and verifying value of the given applications. These will allow researchers of tactile display to clarify the guideline to develop tactile display.</p> <p>First, the role of cutaneous sensation in daily behavior of humans has been analyzed in order to clarify applications of tactile display. As a result, it was found out that cutaneous sensation plays twelve different roles in achieving daily performance of behavior. Second, approximately 160 applications of tactile display including new ideas of applications were clarified using several idea gaining methods. The gained applications were integrated in the same level of abstraction and completeness was confirmed by classifying the gained applications into 40 MECE groups. In addition, tactile display was divided broadly into tactile sensation display and information display whether displayed information can be perceived by cutaneous sensation of humans or not. As for tactile sensation display, (1) needs, (2) effects on providing tactile sensation and (3) feasibility were analyzed. As a result, valuable applications able to be realized using current technology and future direction of developing tactile display were clarified. As for information display, comparative analysis was conducted. As a result, information suitable to be displayed to tactile sensation was clarified. Finally, prototypes of two applications having great value were developed. The value of each application was validated using the developed prototypes.</p> <p>As stated above, in this study, applications of tactile display were completely clarified, and the value of each application was validated. Using the study achievement, it is expected that development of tactile display will be more efficient.</p>			

目次

第1章 序論

1.1 背景.....	1
1.2 皮膚感覚提示技術の現状.....	3
1.2.1 実用化された事例.....	3
1.2.2 最新の研究動向.....	5
1.2.3 想定されている用途.....	10
1.2.4 問題点.....	11
1.3 目的.....	12

第2章 ヒトの日常動作・状態における皮膚感覚の役割

2.1 概要.....	14
2.2 皮膚感覚の役割の明確化.....	15
2.2.1 皮膚感覚の役割の知見.....	15
2.2.2 日常動作の洗い出しおよび分類.....	17
2.2.3 皮膚感覚の役割の分析.....	18
2.2.4 考察.....	21
2.3 皮膚感覚への依存度の調査.....	22
2.3.1 調査方法.....	22
2.3.2 調査結果および考察.....	27

第3章 皮膚感覚提示技術の用途の体系化

3.1 用途の洗い出し.....	29
3.1.1 従来研究にて想定されている用途の洗い出し.....	29
3.1.2 皮膚感覚を用いた日常動作・状態の洗い出し.....	30
3.1.3 発想法を用いた新たな用途の洗い出し.....	30
3.2 用途の体系化.....	35
3.2.1 触感ディスプレイ.....	35
3.2.2 情報ディスプレイ.....	44
3.2.3 その他.....	45

第4章 用途の価値の分析

4.1 価値の分析方法.....	47
------------------	----

4.2	触感ディスプレイの価値の分析.....	48
4.2.1	分析する用途の選択.....	48
4.2.2	ニーズの調査.....	49
4.2.3	皮膚感覚付与効果の推定.....	55
4.2.4	実現可能性の評価.....	60
4.2.5	考察.....	63
4.3	情報ディスプレイの価値の分析.....	66
4.3.1	他感覚提示による情報ディスプレイとの比較分析.....	66
4.3.2	考察.....	70
第5章 用途の価値の検証		
5.1	価値の検証方法.....	73
5.2	実用化された事例による検証.....	74
5.3	タッチパネル上での触感提示による検証.....	75
5.3.1	概要.....	75
5.3.2	プロトタイプの構築.....	76
5.3.3	検証実験.....	82
5.4	遠隔触感伝達システムを用いた動物との触れあい体験による検証.....	85
5.4.1	概要.....	85
5.4.2	プロトタイプの構築.....	85
5.4.3	検証実験.....	91
第6章 今後の展望		
6.1	課題.....	96
6.2	今後の展開.....	99
第7章 結論 101		
謝辞 103		
参考文献 105		
付録 A 皮膚感覚を用いた日常動作・状態の一覧		
付録 B 皮膚感覚提示技術の用途の一覧		
付録 C ニーズ調査のためのアンケートシート		
付録 D タッチパネル上で実現できる動作の一覧		

序論

1.1 背景

ヒトは、多種類の感覚機能を用いて外部環境を認識する。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[@Wikipedia]。人類は、五感の認識機構を科学的に解明するとともに、得られた知見を工学的に応用することにより、生活をより豊かなものにしてきた。その応用の一つであり、現在人々の生活に欠かせないモノとなっているのが、感覚提示技術である。感覚提示技術とは、五感情報を人工的に生成し、デバイスを介してヒトに提示する技術である。特に、視覚および聴覚を提示する技術は古くから研究開発が行われており、テレビ、パソコン、音楽プレーヤー、スピーカーなど様々なデバイスに応用されている。現代では、上述したような視覚・聴覚提示技術を利用した製品やサービスに触



図 1.1 大脳皮質における身体情報の割合 [グリーンフィールド 99]



図 1.2 PHANToM [SensAble]

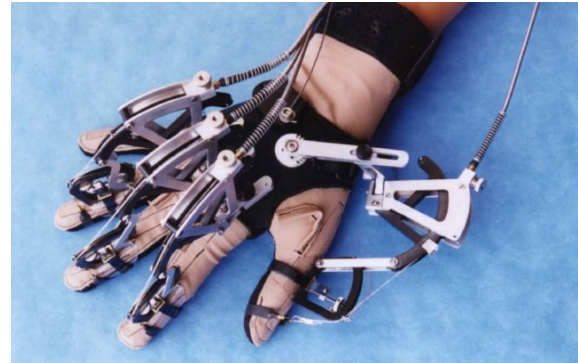


図 1.3 CyberGrasp [Immersion]

れないで生活することが困難なほど、視覚・聴覚提示技術は生活のいたるところに浸透している。

視覚・聴覚に次ぐ次世代の感覚提示技術として、近年注目を集めているのが触覚提示技術である。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、関節囊、靭帯)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 01]。図 1.1 に人体の各部位が司る大脳皮質の広さに比例させてヒトの身体を再構成させた図を示す[グリーンフィールド 99]。図 1.1 より、大脳において体性感覚を司る部位が大半を占めており、このことから人々の日常生活における触覚の重要性がわかる。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様な価値をもたらすと期待されている。

こうした背景から、近年、触覚提示技術に関する研究が盛んに行われている。一般に、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、「つつる」「ざらざら」といった微細な表面状態の触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、広義の触覚提示技術は、深部感覚情報を提示する力覚提示技術と皮膚感覚情報を提示する皮膚感覚提示技術に分類される。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、図 1.2 および図 1.3 にそれぞれ示す PHANToM[Massie 94][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、今後ますます進歩していくことが予想される。一方で、皮膚感覚提示技術は立ち遅れている。次節にて詳細を述べるが、この差は開発にかか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。本研究では、上述したように技術的な確立が期待され、既に多額のコストが開発に費やされながらも技術的に立ち遅れている皮膚感覚提示技術に焦点を当てる。

1.2 皮膚感覚提示技術の現状

本節では、皮膚感覚提示技術の現状を認識するとともに、その問題点を明らかにする。まず、これまでに実用化された皮膚感覚提示技術の事例を紹介する。次に、皮膚感覚提示に関する技術開発の現状について述べる。さらに、現在想定されている皮膚感覚提示技術の用途について述べることで、現状の技術レベルと理想的な技術レベルとのギャップと課題を明確にする。最後に、これらの知見や事例を踏まえ、皮膚感覚提示技術の普及を妨げている要因を分析する。

1.2.1 実用化された事例

本項では、これまで実用化されてきた皮膚感覚提示技術の用途を (a) 感覚の代行, (b) 情報の通知, (c) 操作性の向上, (d) 臨場感の向上および (e) その他に分類し、各々の詳細について述べる。

(a) 感覚の代行

皮膚感覚提示技術に関する研究は、元々、視覚障害者の感覚代行装置の開発を期に始まった。例として、図 1.4 に示す、1970 年代に Tele-sensory Systems 社によって製品化された OPTACON [Bliss 70] が挙げられる。これは、マトリクス状に並べたバイモルフ型 piezo 素子を振動させることにより、文字や図形などの形状を 2 値化したパターンによって提示するものである。これにより、視覚障害者が点字のない PC 画面の文字を読み取ることが可能となった。近年は、図 1.5 に示すようなピンを大面積に 2 次元分布させたデバイス [ケージーエス] も商品化されている。これによって、文字だけでなく図形情報の提示や、スクロールや拡大・縮小などの操作が可能になり、従来よりも幅広い用途に応用可能となった。

(b) 情報の通知

現在最も広く利用されている皮膚感覚提示技術の用途が、バイブレーション機能など、単純な振動刺激を用いた情報の通知である。単純な振動刺激は、着信情報やアラームなどといった On と Off の切り替えによって十分に伝達可能な情報の提示に適しており、携帯電話など様々な機器に搭載されている。特に、携帯電話のバイブレーション機能は、携帯電話の使用者の大多数が主要な情報提示手法としていることと、携帯電話の普及率が日本で 90% 以上であることを考慮する



図 1.4 Optacon (www.asphi.it より転載)



図 1.5 大面積点ディスプレイ [ケージーエス]

と、皮膚感覚提示技術を用いたアプリケーションとしては現在最も普及していると言える[電気通信事業者協会]。この技術が普及した要因としては、皮膚感覚提示技術が視覚や聴覚提示技術と比較して、携帯機器への搭載に適した特徴を多く有しているためであると考えられる。すなわち、

- ・ 公共の場でも使用可能であること
- ・ 接触している身体の一部によらず情報が提示可能であること
- ・ デバイスに接触しているユーザのみに情報が提示されるため、プライバシーの面で優れていること

などである。また、単純な振動刺激であれば、小型のモータのみで実現可能であるため、小型の機器に容易に搭載できることも同技術の普及を後押ししたと考えられる。

単純な振動の On/Off の切り替えのみでなく、振動のパターンに多様性を持たせることにより、使用者が複数の情報を識別することも可能である。しかし、現状で主要な振動生成アクチュエータとして用いられている電磁モータでは、振動の生成パターンに限界があり、複雑な情報の識別には至っていない。

(c) 操作性の向上

近年、操作フィードバックの提示に皮膚感覚提示技術が用いられる事例が多数報告されている。この背景には、iPhone などのタッチパネルに代表されるような機械的な変形を伴わない操作インタフェースが普及してきたことが影響していると考えられる。これらの操作インタフェースは、従来の機械的な変形を伴う機器と比較して操作感に乏しいため、誤動作の頻発や、画面を注視しなければならないなどの問題がある。従来は視覚・聴覚を用いた操作フィードバックが主に用いられてきたが、公共の場で用いるのが困難であることや、触覚と比較して操作感が直感的でないなどの問題があり、これらの問題を解決できる皮膚感覚提示技術に対する需要は極めて高いといえる。図 1.6 に示す TouchWiz[Samsung]は、全面タッチパネルを搭載した携帯端末である。TouchWiz では、タッチが正しく行われたことをユーザが把握できるように、タッチがある度に本体を振動させることによってユーザに操作フィードバックを提示可能である。また、図 1.7 に示す家庭用ゲーム機 Wii[任天堂]のコントローラにも振動を生成するためのモータが搭載されている。Wii のコントローラには、3 次元のモーションセンサーが内蔵されており、コントローラを振るなどの動作によって操作する。その際、操作者の動作に応じてコントローラに振動を発生させることで、操作性を向上させている。将来的には、リアルな触覚情報を提示することで、臨場感の向上にも応用できると考えられる。



図 1.6 TouchWiz [Samsung]



図 1.7 Wii リモコン [任天堂]



図 1.8 デュアルショック
[ソニー・コンピュータ・エンターテイメント]



図 1.9 触覚ジャケット [PHILIPS]

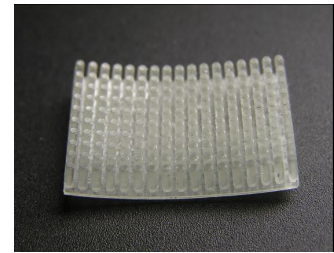


図 1.10 触覚コンタクトレンズ
[佐野 05]

(d) 臨場感の向上

エンターテイメントの分野では、視覚や聴覚などといった情報に触覚を付与することによって、臨場感を向上させる用途で皮膚感覚提示技術が用いられている。代表的な例として、図1.8に示すデュアルショック[ソニー・コンピュータ・エンターテイメント]が挙げられる。例えば、画面内で演出として生じる爆発や、登場人物の心臓の鼓動などと同期して振動を発生することによって、ユーザの臨場感を高めることが可能である。手指のみではなく、全身に振動を提示しようとする試みも行われている。図1.9に示す触覚ジャケット[PHILIPS]は、64個のアクチュエータを搭載しており、映画やゲームの内容に合わせて上半身の特定のポイントを振動させることができる。まだ製品化はされていないものの、振動の提示が手指に限定されたデュアルショックと比較して、より高い臨場感の演出が期待される[Lemmens 09]。また、遊園地のアトラクションなどでよく用いられている方法として、エアジェットがある。エアジェットは、細いノズルから空気流を噴射するシステムであり、自由空間に非接触で触覚のフィードバックを与えることができるため、大人数が同時に楽しむタイプのアトラクションに適しているといえる[Suzuki 05]。

以上のように、臨場感向上のためにさまざまな手法で皮膚感覚が提示されているが、いずれの手法においても、現状ではリアリティの高い皮膚感覚の提示は行われておらず、皮膚感覚はあくまで視覚や聴覚情報の伝達の補助として用いられている。

(e) その他

前述した用途の他にも、触覚の感覚を増幅・加工して体感させるデバイスとして、図 1.10 に示す触覚コンタクトレンズが開発されている[佐野 05]。製品化はされていないものの、医師の触診や板金の損傷検査等への応用が検討されている。

1.2.2 最新の研究動向

本研究では、触覚の提示を行うデバイスのことをディスプレイと呼ぶこととする。皮膚感覚提示技術の研究の方向性は、(a) 提示する感覚のリアリティや多様性を目指した研究と、(b) 提示デバイスの簡素化を目指した研究の二つに分類することができる。以下に、各々の従来研究を挙げる。

(a) 提示する感覚のリアリティや多様性を目指した研究

これまでさまざまな研究が行われているが、対象物体の材質感、手触り感をリアルに提示する技術には未だ確立された手法がなく、試行錯誤しながらの研究開発が進められている。

まず、粗さ感や柔らかさ感など単一の因子の提示を目的とした研究について述べる。音川らは図 1.11 に示すような超音波振動子を利用した皮膚感覚ディスプレイを開発した[音川 05]。超音波振動子の応答性の良さを生かして、超音波振動の振幅変調における信号波に実素材の表面形状波形をヒトの触速度に応じて提示することによって、実素材のような微細な粗さ感の違いを提示することに成功した。微細な粗さ感を提示する手法としては、現時点では他と比較して優れた手法であるが、皮膚感覚提示部を全面振動させるという原理上、触対象の空間分布を再現することは困難であり、リアルな粗さ感の提示には依然として課題を残している。

藤田らは、指先の接触面積を制御することによって、対象物の硬軟感を提示するディスプレイを開発した[藤田 00]。これを図 1.12 に示す。ゴム膜内部の空気圧を制御することにより、指先の接触面積を制御することが可能である。池田らは、これに力覚情報を統合することによって、実物体に近い柔らかさ感を提示することに成功した[池田 04]。ゴム膜を空気圧で制御するため、粗さ感など他の因子の提示法と統合することは困難であるが、柔らかさ感のみを提示するアプリケーションには十分適用可能であると考えられる。

山本らは、接触の瞬間に生じる急激な指表面付近の温度変化を、ペルチェ素子を用いて再現することによって、対象物の冷温感を提示することに成功した[Yamamoto 04]。実素材を用いた比較実験でも優れた結果が確認されている。ペルチェ素子は小型であることから、他デバイスとの統合も期待できる。

昆陽らは、固着・滑りのタイミングに合わせて、ヒト指腹部に高周波刺激を与えることで、ヒトが指腹部をなぞった際に惹起する摩擦感を提示する試みを行っている[昆陽 07]。この手法は、触対象の摩擦特性に応じて生じる stick-slip 現象による振動を表現している。振動を用いる手法のため、振動を用いた粗さ感提示法と併用が可能であると考えられる。リアルな摩擦感を提示するためには、力覚ディスプレイとの統合が必要であるが、力覚としての摩擦力を必ずしも必要としないアプリケーションであれば、携帯端末など小型の機器にも搭載できると考えられる。

以上のように、単一の触感因子を提示する技術は、多数提案されており、一部は触対象から得られる刺激を高いリアリティで再現しているものも存在する。

多様でリアルな皮膚感覚の提示を試みた研究としては、複数のアクチュエータを統合すること



図 1.11 超音波振動型触感ディスプレイ [音川 05]

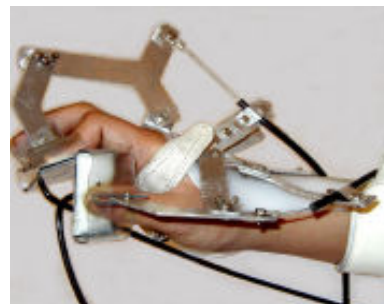


図 1.12 硬軟感ディスプレイ [池田 04]

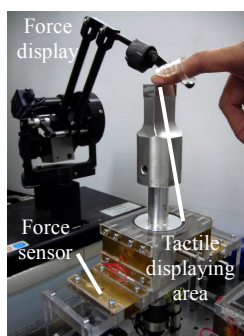


図 1.13 超音波振動子と力覚提示装置を統合した皮膚感覚提示システム [塩川 09]

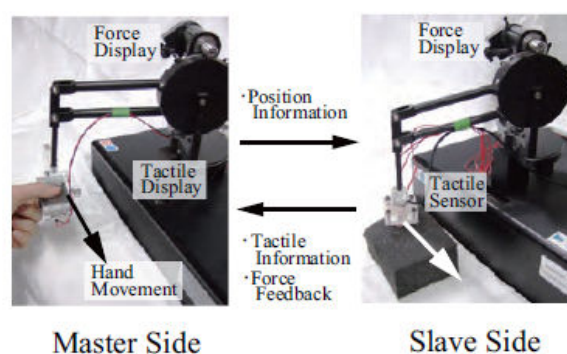


図 1.14 触感の遠隔伝達システム [山内 09]

によって刺激のパラメータに多様性を持たせた研究や、複数の触覚受容器を選択的に刺激する提示法（選択的刺激法）を用いた研究が挙げられる。

著者らは、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 04]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[塩川 09]。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提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。

選択的刺激法は、複数の触覚受容器が固有の周波数応答特性を有することを利用し、触覚受容器を選択的に刺激する提示法である[浅村 98]。選択的刺激法を利用した研究では、触覚受容器であるメルケル小体、マイスナー小体およびパチニ小体がそれぞれ主に圧覚、粗さおよび摩擦感の知覚に対応していることを利用し、各触覚受容器への刺激を組み合わせることによって多様な触感を提示するアプローチがとられている。昆陽らは、各触覚受容器の感度が最大に達する周波数成分の振動を合成させることによって、複数の触覚受容器を選択的に刺激する手法を提案した[Konyo 05]。これにより、圧覚（柔らかさ）、粗さおよび摩擦感を独立に制御するとともに、布のような微妙な手触りの違いを提示することに成功している。さらに、この触感提示法を応用して、センサを用いて取得した皮膚感覚情報をリアルタイムに遠隔地に伝達可能な図 1.14 に示すようなシステムも開発されている[山内 09]。粗さ感、圧覚および摩擦感の 3 種類の皮膚感覚情報を複合的に伝達することに成功した初めての例である。選択的刺激法のメリットは、1 KHz 以下の比較的 low 周波のみを用いて多様な触感を提示できる点にある。複数のデバイスを統合する手法と比較してシステムを簡素化できるため、実用面で優れているといえる。各触覚受容器に加わった刺激と惹起される触感の関係を詳細に解明することによって、よりリアルな触感提示の実現が今後の課題である。

以上のように、皮膚感覚のリアリティを追及した研究は多数報告されている。しかし、現状では、再現可能なリアリティは5種類前後の実素材の判別が可能な程度のものであり、実物と同様のリアリティの再現にはほど遠い。その主な要因は、触覚認識機構が未解明であることと、皮膚感覚提示に適したアクチュエータの開発が困難であることである。特に後者の問題に関しては、有効なソリューションがまだ提案されていない。微細な空間分布を再現するためには、触覚受容器の配置を考慮した間隔ごとに独立した刺激を与える必要がある。このような考え方から、多数のピンを用いることにより、触対象物の表面形状を再現する手法も多数報告されている[下條 99][赤井 99][Ikei 02][大岡 02]。しかし、ピンの本数に応じたアクチュエータ数が必要であり、図 1.15 に示すようにデバイスが大型・複雑化してしまうことや、絹やフェルトなどの微細な表面形状を有した素材を再現するほど高密度にピンを配置することはほぼ不可能であるという問題がある。したがって、高密度で配置可能かつ応答性などが皮膚感覚提示に適したレベルのアクチュエータをどのようにして実現するかが今後の大きな課題である。

(b) 提示デバイスの簡素化を目指した研究

前述したような多様でリアルな皮膚感覚提示を目指した研究は、多くのディスプレイが大型・複雑であるという問題を有している。一方で、デバイスの小型・簡素化を目指した研究も多数報告されている。これらの研究は、リアルな感覚の提示は困難であるものの、単純な刺激のみで実現可能なアプリケーションに適しており、より実用性が高いと考えられる。

皮膚感覚ディスプレイの小型・軽量化に特化した研究としては、青木らの開発した指先装着型ディスプレイがある[青木 09]。図 1.16 に示すように、このディスプレイではワイヤによる皮膚感覚刺激を用いて接触感を提示する。この方式を用いることにより、2g という非常に軽量のデバイスが実現できることが報告されている。モータを用いてワイヤを牽引することによって皮膚感覚を提示するという原理のため、複雑な皮膚感覚の提示には適してはいないものの、接触感のみで十分な目的を達成できるアプリケーションに対しては有効であると考えられる。

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、梶本らのディスプレイや山本らの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 01]。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索を選択的に刺激することも可能であり、

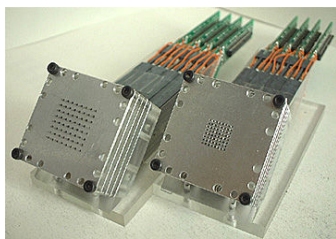


図 1.15 ピン振動型ディスプレイ[大岡 02]

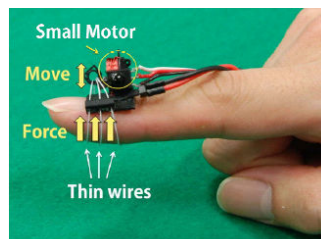


図 1.16 ワイヤ型ディスプレイ [青木 09]



図 1.17 電気刺激型ディスプレイ [梶本 01]



図 1.18 静電気力型ディスプレイ[山本 02]



図 1.19 爪装着型ディスプレイ[安藤 04]

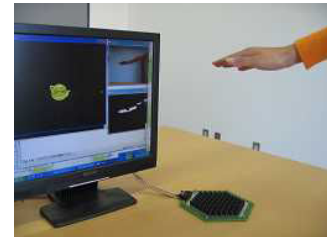


図 1.20 空中超音波ディスプレイ [Iwamoto 09]

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[梶本 01]．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．山本らは，静電気力を利用することで微細なテクスチャを提示するディスプレイを開発した[山本 02]．これを図 1.18 に示す．電極に電圧を印加すると，電圧印加した電極とスライダとの間に静電気力が発生する．この状態でスライダを指で動かすと，静電気力を垂直抗力として，各電極への電圧印加パターンに応じた摩擦力分布がスライダ裏面に生ずる．操作者に薄いフィルム状のスライダ越しになぞらせることによって，微細なテクスチャを提示する．薄く柔軟で透明なフィルムを用いて皮膚感覚を提示するため，他のデバイスとの統合が容易であるというメリットがある．実際に，視覚情報や硬軟感ディスプレイとの統合についても報告されている[Yokota 07]．しかし，提示可能な皮膚感覚は，振動を用いた手法と比較するとリアリティに乏しいことや，スライダフィルムの耐久性が実用面から考えると十分でないことなど，実用化に向けた課題は多く残している．

これまで述べてきたディスプレイは，小型軽量で簡素であるものの，指腹部に直接刺激を加えるという提示原理であるため，常に皮膚とデバイスが接触している必要があり，触覚のフィードバックが必要ない場合にも何かしらの触覚が生じてしまうという問題がある．また，指腹部にデバイスが存在しているために，実環境からの触覚情報が損なわれてしまうため，オーグメンティドリアリティ(Augmented Reality：拡張現実感，以下 AR[Azuma 97])の分野に適用することは困難である．これに対し，指腹部を拘束しないタイプのディスプレイの研究も複数報告されている．

安藤らは，図1.19に示す爪装着型触覚ディスプレイを開発した[安藤 04]．装着者の触運動に同期して，爪上に装着されたボイスコイルによって適切に振動刺激を与えることで，実環境からの触覚を損なうことなく，なめらかな面に仮想的な凹凸感を重畳させることに成功した．特筆すべきは，爪上から刺激を加えているにも関わらず，装着者はあたかも指腹部に凹凸感を提示されているかのように錯覚させることができることである．実環境からの触覚を阻害することなく凹凸感を提示できるという利点を活かし，ARの分野への応用が期待されているものの，現状では空間周波数が波長数mmから数十mm程度の大きな凹凸感の提示にとどまっている．単純な凹凸刺激の

みで実現可能かつ有効的なアプリケーションの開発が今後の課題である。

岩本らは、非装着で空中の任意の場所に触覚を提示するディスプレイとして、超音波による音響放射圧を用いた触覚ディスプレイシステムを開発した[Iwamoto 08]。これを図 1.20 に示す。超音波振動子アレイを触覚提示領域から離れた場所に設置し、各振動子の位相・強度を制御することで圧力パターンを生成することで、何も装着することなく人間の皮膚に直接触覚のフィードバックを与えることに成功した。将来的に立体視ディスプレイや HMD による映像提示と組み合わせることで、3D 映像のインタラクティブな操作や、より臨場感の高い VR 空間の生成に効果的であると考えられる。しかし、現状では提示可能な皮膚感覚は微弱で単純な刺激のみにとどまっている。

1.2.3 想定されている用途

従来研究における皮膚感覚提示技術の想定されている用途および各用途に要求される皮膚感覚提示の技術的難易度を、表 1.1 のようにまとめた。なお、技術的難易度に関しては、単一の振動刺激など単純な刺激のみで実現可能な用途は「低」、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な用途は「中」、多様でリアルな皮膚感覚提示が要求される用途は「高」と評価した。ただし、エンターテイメントのように、目的によって必要な技術レベルが異なる場合には「低～高」のように評価した。

表 1.1 から、皮膚感覚提示技術の想定されている用途は、単純な刺激のみで実現可能なものと

表 1.1 皮膚感覚提示技術の想定されている用途

用途	具体例	技術的難易度
感覚の代行	点字提示デバイス	低
操作性の向上	触覚フィードバック付きタッチパネル	低
	触覚フィードバック付きタッチペン	低
情報の通知	着信情報の通知	低
臨場感の向上	職業訓練シミュレータ	高
	遠隔操作の作業効率向上	中～高
	エンターテイメント	低～高
触感のシミュレーション	触感付き CAD	高
コミュニケーション	遠隔触覚コミュニケーション	高
触感の調査	遠隔操作による触診	高
触感の疑似体験	触れないものの触れる化	高
	ネットショッピング	高
その他	触感コンタクトレンズ	低～高
	触覚検知能力の検査	中
	新たな知見の獲得	中～高

多様でリアルな皮膚感覚提示が要求されるものが大半を占めていることがわかる。前項で述べたように、単一の触感因子の再現に関しては優れた性能を持つディスプレイもいくつか開発されているが、それらを用いたアプリケーションはほとんど提案されていない。したがって、1.2.1項で述べたように、現状の技術レベルにも関わらず、これまでに実用化された用途は単純な刺激のみしか用いられていない。今後皮膚感覚提示技術がさまざまなアプリケーションに適用されるようになるためには、前項で述べた技術的な課題を解決し、よりリアリティの高い皮膚感覚の提示技術の確立が必要であるといえる。しかし、ここで問題となるのが、技術的難易度の高い用途の社会的なニーズの程度である。さまざまな用途が提案されているものの、それらのニーズがどの程度あるのかについて十分な調査はなされていない。また、皮膚感覚を付与することによって得られる効果も定かではない。例えば、単純なロボットの遠隔操作において、操作性を向上させることを目的に皮膚感覚をフィードバックした例があるが、操作性を大きく向上させるには及ばなかった[佐藤07]。これは、皮膚感覚が操作性を向上させる役割を果たしてはいるものの、視覚や深部感覚と比較すれば、得られる恩恵が微々たるものにすぎないからであると考えられる。このような用途に皮膚感覚提示技術を用いても、費用対効果が低く、用途の価値が高いとはいえない。さらに、他感覚提示技術で代用できる用途もある。例えば、遠隔操作による触診は、患部の皮膚感覚情報を、皮膚感覚提示技術を用いてリアルに再現しなくても、数値や色などの視覚情報として患部の状態を提示することによって十分目的を達成可能であると考えられる。こうした用途については、実現に大きな課題を残す皮膚感覚提示技術を用いるのではなく、すでに確立している視覚提示技術を用いた方が効果的であると考えられる。

以上のように、皮膚感覚提示技術の想定されている用途の価値の高さは不明確であり、今後技術開発に多額のコストを投じるに値するのかどうか疑問視されている。

1.2.4 問題点

これまで述べてきたように、さまざまな皮膚感覚提示技術が開発されているにも関わらず、実用化に至ったものはわずかにすぎないというのが現状である。この要因を分析し、以下のようにまとめた。

- (1) 皮膚感覚は、全身に分布した感覚である上に、低次の反射から高次の認知にまで関わるといふ多様さを有するため、技術シーズ開発自体が他の感覚提示技術と比較して困難である。
- (2) 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。
- (3) 提案されている用途の価値がどの程度あるのか十分に検討されていない。

(1)の技術的困難さについては、1.2.2項で述べたように、さまざまな研究者が独自のアプローチで解決に取り組んでいる。高度な皮膚感覚提示技術の確立のためには、安価で応答性が高く高密度で配置可能な小型・軽量のアクチュエータの開発や触覚認識機構の解明が不可欠であり、今後も多くの研究が必要とされている。

(2)の問題については、前項で述べたように、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提示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。

ここで問題となるのが (3) である。前項で述べたように、皮膚感覚提示技術の想定されている用途の価値の高さが不明確であるために、技術開発に多額のコストを投じるに値するのかが疑問視され始めている。また、目指すべき用途が明確でないために、開発のための指針を立てることが困難である。このために、(1) の問題である技術シーズ開発の困難さにも関わらず、技術開発に十分なコストがかけられないことや、効率の良い開発を行うことができないなどといった大きな悪影響を及ぼしている。

以上のように、皮膚感覚提示技術に普及の芽が出ないのは、価値を明確にしようという試みが一向になされていないことが大きな要因となっていると考えられる。皮膚感覚提示技術の発展を促進するためには、従来のように技術的課題に取り組むだけでなく、現状の技術レベルに即した用途を含め、皮膚感覚提示技術の用途を徹底的に洗い出すとともに、得られた用途の費用対効果を明確にすることが必要であると考えられる。

1.3 目的

1.2.4 項で述べた皮膚感覚提示技術の問題点を踏まえ、本研究では、皮膚感覚提示技術が創出する価値を明確にすることによって、皮膚感覚提示技術の今後のあり方を提言する。すなわち、

- ・ 現状の技術をどのように応用すべきか
- ・ 将来的に価値の高い用途を実現するために、どのような技術開発を行うべきか

を明確にすることを目的とする。これによって、技術開発にコストをかけやすくなるだけでなく、皮膚感覚提示技術をどのような目的で用いるべきかという技術開発の前提が明確になるため、開発のための指針として利用できる。結果として、技術開発の効率を大幅に向上できると考えられる。

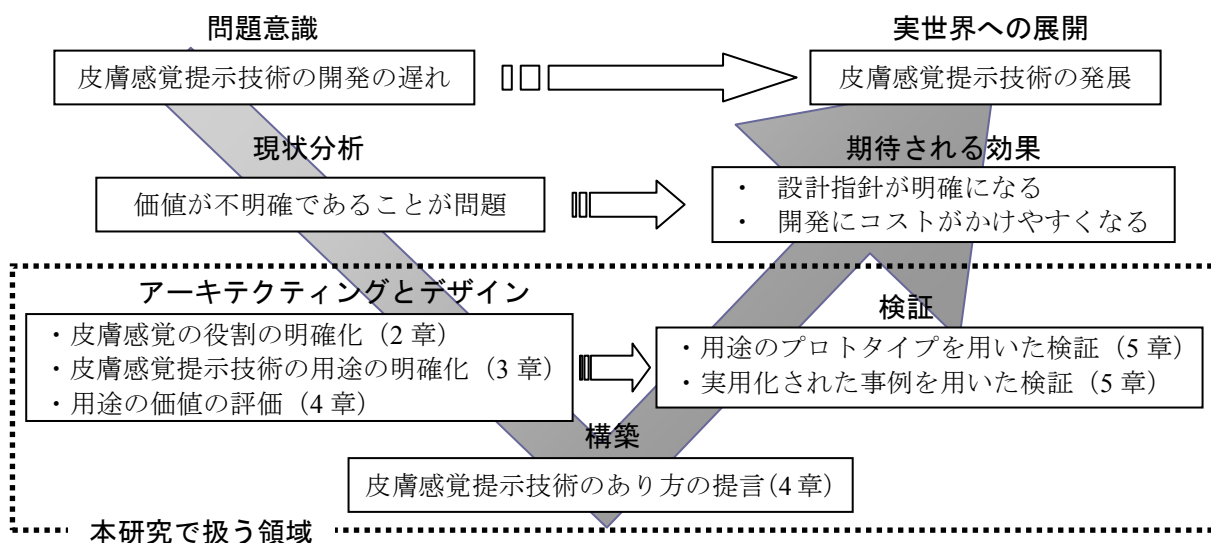


図 1.21 本研究の流れの V モデル

図 1.21 に、本研究の進め方を V モデルに当てはめた結果を示す。まず、皮膚感覚提示技術の用途を、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。最後に、これまでに報告されてきた技術を用いて、実際にいくつかのアプリケーションを試作することで、それらの価値を検証する。

本論文は序論を含めた 6 章から構成されている。第 2 章では、皮膚感覚提示技術の用途を考案する上で必要不可欠となる、ヒトの日常動作において皮膚感覚が果たす役割の明確化について述べる。第 3 章では、皮膚感覚提示技術の用途の明確化について述べる。第 4 章では、前章で明確にした用途の価値を複数の観点から評価し、皮膚感覚提示技術の今後のあり方を提言する。第 5 章では、複数のアプリケーションの試作による有効性の評価および過去の実用化の事例を基に皮膚感覚提示技術の用途の価値を検証する。そして、第 6 章、第 7 章の今後の展望および結論に至る。

ヒトの日常動作・状態における 皮膚感覚の役割

本章では、ヒトの日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割について述べる。まず、2.1節にて、本章の目的および本研究における位置付けなどの概要について述べる。次に、2.2節にて、皮膚感覚を用いた動作・状態の洗い出し・分類を行い、得られた動作・状態において皮膚感覚が果たす役割を分析する。最後に、2.3節にて、各動作・状態を達成する上で皮膚感覚にどの程度依存しているかアンケートによって調査する。

2.1 概要

前章で述べたように、本研究では、皮膚感覚提示技術の用途を徹底的に洗い出すとともに、それらの価値を分析する。そのために、まず、シーズの視点から離れ、日常生活における皮膚感覚の用途に焦点を当てる。すなわち、

- ・ 日常動作・状態を実現する上で皮膚感覚が果たす役割
- ・ 皮膚感覚がなければ実現できない動作・状態

を明確にする。2.2.1項にて詳細を述べるが、従来の神経生理学やロボティクスなどの学問において、物体の把持などの限定的な動作に対して皮膚感覚が果たす役割については実験的に確かめられているものの、ヒトが皮膚感覚を知覚し得るあらゆる日常動作・状態に対して、皮膚感覚が果たす役割を網羅的に示すとともに、各動作・状態の実現に皮膚感覚がどの程度貢献しているのかを調査した例はない。しかし、上述した二点を明確にすることは、皮膚感覚提示技術の価値を分析する上で必要不可欠である。すなわち、前者を明確にすることで、皮膚感覚提示技術の用途の洗い出しに役立てることができる。また、後者を明確にすることで、皮膚感覚提示技術がなければ実現できないアプリケーションを推定することができる。以上から、本章では、ヒトの日常動

作・状態を12種類に分類し、それぞれにおいて皮膚感覚が果たす役割を明確にするとともに、皮膚感覚がどの程度重要であるかを調査・検証した。前者については2.2節にて、後者については2.3節にてそれぞれ述べる。

2.2 皮膚感覚の役割の明確化

本節では、日常動作・状態を実現する上で皮膚感覚が果たす役割を網羅的に明らかにする。まず、2.2.1項にて、皮膚感覚の役割に関する知見を紹介する。次に、2.2.2項にて、皮膚感覚を用いたヒトの日常動作・状態を選別・分類する。さらに、2.2.3項にて、得られた日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割を分析する。最後に、2.2.4項にて、本研究の分析結果の妥当性などについて考察する。

2.2.1 皮膚感覚の役割の知見

皮膚感覚に関する生理学的な知見で述べられている皮膚感覚の役割をまとめると、痛覚を除くヒトの皮膚感覚の役割は、

- ・ 刺激の強度への反応
- ・ 空間定位
- ・ 外界の対象の様々な性質を知る

などであり、痛覚の役割は、

- ・ 警告信号
- ・ 回避学習の基礎
- ・ 損傷部の活動の制限・休息

などであると考えられる[岩山 01][東山 00][山口 06]。皮膚感覚が上述した役割を持つことは自明であるが、近年では、皮膚感覚で取得した情報を、動作におけるフィードバック制御のために利用していることを実験的に明らかにした研究も多数報告されている。例えば、ヒトが日常的に行う把持動作に着目すると、対象物体の質量やヒト指腹部との摩擦係数が予測不可能な場合には、指腹部の皮膚内部に配置された触覚受容器からの情報をフィードバックすることにより、把持力の制御を行っていると考えられている[Macefield96]。また、母指および示指の求心神経を麻痺させ、触覚受容器からの情報が伝わらないようにした状態で把持を行った場合、把持力の制御が不可能になることが報告されている[Johansson92]。以上の知見より、ヒトは対象物体と指腹部間の摩擦係数の違いを、触覚受容器によって知覚することにより、把持力のフィードバック制御を行っていると考えられる[Johansson96]。これらの知見を応用して、遠隔操作において皮膚感覚情報をフィードバックすることによって、作業効率の向上に成功させた例も複数報告されている[Ikeda 04][Maeno 02][Yamada 02][香田 08]。

一方で、上述した役割のみでは説明できない現象もある。例えば、脳神経医 Oliver Sacks の興味深い報告がある。深部感覚を失ったある患者は、自分の手がどこにあるかわからず、目をつぶる



図 2.1 スクイーズマシン
(<http://www.therafin.com> より転載)

と自分の身体が存在を自覚することができなかった。その患者は、わずかな皮膚感覚で感じる風によって、自己の存在を実感していたと言われている[サックス 1992]。この事例は、皮膚感覚が「自己の存在の認識」に重大な役割を果たしていることを示唆している。一般に、視覚・聴覚と異なり、触覚を失ったらどうなるかということは想像するのが困難であるが、普段あまり意識しない場面でも皮膚感覚が重要な役割を果たしていることを示唆した例としてサックスらの報告は興味深い。また、皮膚感覚が対人関係や社会性を築くための重要な役割を担っていることを示唆した実験結果もある。社会心理学者バーディーンは、被験者にある人物に、(1) 身体接触のみ、(2) 見るだけおよび(3) 言葉だけの三通りの方法で出会った際の印象をそれぞれ評定してもらった結果、接触だけの出会いでは「信頼できる、温かい」といった印象を持たれるのに対し、視覚的な出会いでは「冷たい」、聴覚的な出会いでは「距離がある」という印象をそれぞれ持たれることを明らかにした。このことから、人間関係における触覚は、親愛的な感覚を伝達する機能をもつと考えられる。その他の例として、幼少期に親子とのスキンシップが少ないと、人間不信や自閉的傾向が高くなることが報告されている[山口 06]。さらに、「圧」の触刺激を与えることによって、興奮している子供を落ち着かせることができることが知られている。実際に、アメリカの臨床現場ではこの性質を利用して、図 2.1 に示すスクイーズマシンを用いて、自閉症児の移動や注意の集中の困難といった症状や不安症状の改善に効果をあげている。

以上のように、皮膚感覚が日常生活において果たす役割は神経生理学やロボティクスの分野において多数報告されており、なかには皮膚感覚の役割を定量的に示した例もあるものの、これらの役割は体系化されておらず、また、網羅されているとは言いがたいのが現状である。

2.2.2 日常動作・状態の洗い出しおよび分類

まず、分析に用いる動作・状態を洗い出した。洗い出す動作・状態は、

- ・ 皮膚感覚を知覚すること
- ・ なんらかの対象に触れていること
- ・ ヒトが日常的に行うこと

を満たすこととした。手指動作に関しては、従来研究から網羅的に選定した。Cutkosky および鎌倉による手指動作の分類は、20世紀前半から積み上げられた過去の知見を広く参考にしているため、代表的な日常手指動作を十分網羅していると考えられる[Cutkosky 89][鎌倉 89]。その他の動作・状態については、文献調査および複数人による複数回のブレインストーミングによって洗い出した。以上によって得られた動作・状態の項目数は、約200である。付録Aに、得られた全動作・状態を示す。

次に、得られた約200の動作・状態の項目を、

- (1) 知覚する皮膚感覚情報の種類（識別感覚 or 快感覚 or 不快感覚）
- (2) 皮膚感覚情報を知覚する部位（手指などの特定の部位 or 特定の部位でない）
- (3) 知覚した皮膚感覚情報に向ける注意（意識 or 無意識）

の3つの観点から分析することによって、図2.2に示すように $3 \times 2 \times 2 = 12$ の論理的に異なるグループに分類した。以下に、各観点の詳細について述べる。

(1) 知覚する皮膚感覚情報の種類

ヒトが知覚する皮膚感覚情報は、識別感覚と原始感覚の二つに大別される。識別感覚とは、「つるつる」「冷たい」などといった、主に触対象の表面状態を識別するための情報である。それに対して、原始感覚とは、「心地よい」「痛い」などといった、感情の変化を伴う情報である。両者は異なった神経伝達路を経由して脳に伝達されることが知られていることから、両者を切り分けて考えることは、生理学的な観点からも妥当であると考えられる。また、原始感覚は、「心地よい」などの快または「痛い」などの不快のいずれかの感情を惹起させる性質を持つことが知られてい

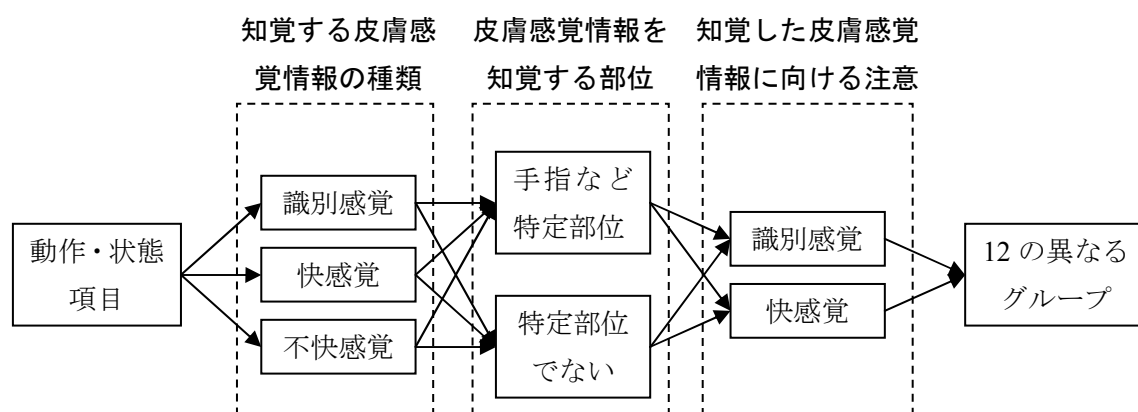


図2.2 動作・状態の分類方法

る。本研究では、前者を惹起させる皮膚感覚情報を快感、後者を惹起させる皮膚感覚情報を不快感覚と呼ぶこととし、列挙した動作・状態を「識別感覚」、「快感」および「不快感覚」のうちのどれを知覚するかによって、異なる3つのグループに細分化した。

(2) 皮膚感覚情報を知覚する部位

対象に皮膚の無毛部で触れた際には、意識が触対象に向くのに対し、有毛部で対象に触れた際には、触対象そのものよりも、触れているという状態に意識が向くということが知られている⁽⁷⁾。この現象には、体内に分布している触覚受容器の密度などが影響していると考えられている。このように、触れる部位によって異なる知覚現象が生じるため、触れる部位ごとに動作・状態を分類する必要があると考えられる。本研究では、簡単のため、得られる皮膚感覚を知覚している部位が手指などの特定部位に限られるか否かによって、列挙した動作・状態を2つの異なるグループに細分化した。

(3) 知覚した皮膚感覚情報に向ける注意

ヒトは、得られた皮膚感覚情報を必ずしも意識しない。例えば、ヒトが「布の手触りを確認する」際には、きめ細かさや滑らかさなどといった多様な皮膚感覚情報を意識することによって触対象の特徴を認識するであろうが、「包丁を把持する」際に皮膚と包丁間に生じる局所的滑り覚などの皮膚感覚情報は、把持するという目的を達成するために重要であるにもかかわらず、意識上にのぼることはほとんどないであろう。前者は、皮膚感覚を知覚することが動作の主目的であるのに対し、後者にとって皮膚感覚を知覚することは副次的であるといえる。後者のように、皮膚感覚情報を意識しない場合は、触対象が有する皮膚感覚の特徴自体は重要な意味を持たない場合もある。このように、意識する皮膚感覚と意識しない皮膚感覚とでは、取得する目的が異なるために、切り分けて考える必要があると考えられる。本研究では、列挙した各動作・状態によって得られる主な皮膚感覚情報をヒトが意識しているか否かによって、列挙した動作・状態項目を2つの異なるグループに細分化した。

2.2.3 皮膚感覚の役割の分析

列挙した約200の動作・状態項目を、前項で述べた3つの観点で分析することにより、12の論理的に異なるグループに分類した。さらに、各グループに含まれる動作・状態において得られる皮膚感覚情報が、それぞれの動作・状態においてどのような役割を果たしているかを分析した。その結果、各グループにおける皮膚感覚の主な役割は、表2.1のとおりであることがわかった。なお、本研究では、「不快感覚」のうち、危険を伴うものを『危険警告』、危険を伴わないものを『不快感』と呼ぶ。以下に、それぞれの役割の詳細について述べる。

表 2.1 動作・状態の分類結果および各分類において皮膚感覚が果たす主な役割

	知覚する皮膚感覚の特徴	皮膚感覚を知覚する部位	知覚した皮膚感覚に向ける注意	動作・状態の例	皮膚感覚の主な役割
1	識別感覚	特定部位	意識	<ul style="list-style-type: none"> ・布の手触りを確認する ・洗濯物の乾き具合を確認する ・額に手をあてて熱を測る 	触対象の特徴の認識
2	識別感覚	特定部位	無意識	<ul style="list-style-type: none"> ・包丁を把持する ・シャツのボタンをとめる ・ボールを蹴る 	作業の補助
3	識別感覚	特定部位でない	意識	<ul style="list-style-type: none"> ・携帯のバイブを感知する ・後ろから触られたことに気付く ・汗をかいていることに気づく 	周囲の変化の感知
4	識別感覚	特定部位でない	無意識	<ul style="list-style-type: none"> ・服を着ていることを認識する ・ベッドで寝ていることを認識する ・水中を泳いでいることを認識する 	周囲の定常の認識
5	快感覚	特定部位	意識	<ul style="list-style-type: none"> ・ふわふわの毛皮に触れる ・ぷちぷちをつぶす ・手触りの良い布に触れる 	能動的な快感の取得
6	快感覚	特定部位	無意識	<ul style="list-style-type: none"> ・子供の頭をなでる ・好きな動物と触れ合う ・切れ味の良い包丁で切る 	能動的な安心感の取得
7	快感覚	特定部位でない	意識	<ul style="list-style-type: none"> ・痒いところを掻く ・マッサージを受ける ・温泉に入浴する 	受動的な快感の取得
8	快感覚	特定部位でない	無意識	<ul style="list-style-type: none"> ・頭をなでられる ・抱きしめられる ・無意識に頭をかく 	受動的な安心感の取得
9	不快感覚	特定部位	意識	<ul style="list-style-type: none"> ・熱したフライパンに触れる ・バラのトゲに触れる ・金属に触れた際に放電する 	危険の学習
10	不快感覚	特定部位	無意識	<ul style="list-style-type: none"> ・手に油が付着する ・嫌いな虫に触れる 	能動的な不快感の取得
11	不快感覚	特定部位でない	意識	<ul style="list-style-type: none"> ・暑い ・蚊に刺されて痒い ・注射を打たれる 	危険の感知
12	不快感覚	特定部位でない	無意識	<ul style="list-style-type: none"> ・嫌いな虫が身体を這う ・知らないヒトに触れられる 	受動的な不快感の取得

(1) 触対象の特徴の認識（識別感覚/特定部位/意識）

「布の手触りを確認する」「洗濯物の乾き具合を確認する」などの項目が含まれる。皮膚感覚は、触対象表面の特徴や状態を認識するセンサとしての役割を担う。ヒトは、得られた皮膚感覚情報を意識することによって、外界の対象のさまざまな性質を認識することができる。

(2) 作業の補助（識別感覚/特定部位/無意識）

「包丁を把持する」「シャツのボタンをとめる」などの項目が含まれる。皮膚感覚は、主に作業の目的を達成することを補助する役割を担う。ヒトは、対象に触れることによって得た皮膚感覚情報を、無意識的に動作のフィードバック制御のために利用していると考えられる。指先を中心に用いるような精密な作業であるほど、皮膚感覚から得られる恩恵は大きい。

(3) 周囲の変化の感知（識別感覚/特定部位でない/意識）

「携帯のバイブレーションを感知する」「後ろから触れたことに気づく」などの項目が含まれる。ここで得られる皮膚感覚情報によって、周囲の状態が変化したことを認識できる。

(4) 周囲の定常の認識（識別感覚/特定部位でない/無意識）

「服を着ていることを認識する」「ベッドで寝ていることを認識する」などの項目が含まれる。ここで取得した皮膚感覚情報は、順応した感覚情報であるために意識はされないが、周囲の状態が変化していないことを無意識的に認識するために重要な役割を果たす。

(5) 能動的な快感の取得（快感覚/特定部位/意識）

「ふわふわの毛皮に触れる」「プチプチをつぶす」などの項目が含まれる。このグループに含まれる動作では、触対象の皮膚感覚情報が快な特徴を有しており、得られた「心地よい」などといった快感覚を意識することで、ヒトは快感を得る。

(6) 能動的な安心感の取得（快感覚/特定部位/無意識）

「子供の頭をなでる」「好きな動物と触れ合う」などの項目が含まれる。このグループに含まれる動作では、得られる皮膚感覚情報は必ずしも快な特徴を有していないことである。得られる皮膚感覚情報自体には重要な意味はなく、むしろ触れているという事実、触れるに至った理由、触れた後の対象の反応などの複数の要因が相互に影響することによって、ヒトは安心感を得ると考えられる。

(7) 受動的な快感の取得（快感覚/特定部位でない/意識）

「痒いところを搔く」「マッサージを受ける」などの項目が含まれる。このグループに含まれる動作・状態では、ヒトは触れられることによって快感を得る。(5)と異なり、触対象の皮膚感覚情報が心地よい特徴を有してはならず、触れる部位や力の加え方などを含む触れ方が、特定の条件を満たした際に快感を得る。

(8) 受動的な安心感の取得（快感覚/特定部位でない/無意識）

「頭をなでられる」「抱きしめられる」などの項目が含まれる。(6)と同様に、得られる皮膚感覚そのものの特徴よりも、触れられているという事実や触れられるに至った理由によって安心感を得ると考えられる。

(9) 危険の学習 (不快感覚/特定部位/意識)

「熱したフライパンに触れる」「バラのトゲに触れる」などの項目が含まれる。ここで得られる危険警告によって、対象に触れ続けることが危険であることを認識する。これによって、回避行動をとるとともに、対象に触れることが危険であることを学習する。

(10) 能動的な不快感の取得 (不快感覚/特定部位/無意識)

「手に油が付着する」「嫌いな虫に触れる」などの項目が含まれる。(9)と異なり、このグループに含まれる触対象の皮膚感覚情報は、必ずしも不快な特徴を有していない。触対象が有する皮膚感覚の特徴自体は重要な意味を持たず、むしろ触対象に対して嫌悪感を抱くために、触れてつながることによってヒトは不快感を得ていると考えられる。

(11) 危険の感知 (不快感覚/特定部位でない/意識)

「暑い」「痒い」などの項目が含まれる。自身の身体の異変を感知する。これによって、ヒトは異変のある部位を把握することができ、回避や治療などの行動をとることができる。

(12) 受動的な不快感の取得 (不快感覚/特定部位でない/無意識)

「嫌いな虫が身体を這う」「知らないヒトに触れられる」などの項目が含まれる。(10)と同様に、得られた皮膚感覚そのものの特徴よりも、触対象に対する嫌悪感が不快感に及ぼす影響の方が大きいと考えられる。

2.2.4 考察

前項にて、ヒトの日常動作・状態において皮膚感覚は12の異なる役割を果たすことを明らかにした。明らかになった役割は、2.2.1項で述べた従来の知見を包含している。例えば、触覚を失ったヒトが目をつぶると自分の手がどこにあるのかわからないなどの現象は、皮膚感覚を失ったことにより「周囲の定常の認識」を無意識的に行うことができなくなったためであると考えられる。また、親子のスキンシップが心に及ぼす影響や、圧刺激を用いた療法については、皮膚感覚が「能動的な安心感の取得」および「受動的な安心感の取得」の役割を果たしていることによって説明できる。また、「能動的な不快感の取得」および「受動的な不快感の取得」については、従来研究ではほとんど言及されていない新たな知見であると考えられる。以上から、本研究では、従来述べられてきた日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割を体系化しただけではなく、新たな役割を発見することができたと考えられる。

2.3 皮膚感覚への依存度の調査

前節にて、ヒトの日常動作・状態において皮膚感覚が 12 の異なる役割を果たすことを述べた。しかし、ヒトがどの程度皮膚感覚に依存しているかは、動作・状態ごとに異なると考えられる。1.2.3 項で述べたように、皮膚感覚にわずかししか依存しないような動作の実現のために皮膚感覚提示技術を用いても、費用対効果が低く、利用価値が高いとはいえない。本研究では、前節にて得られた動作・状態に対して、ヒトが皮膚感覚にどの程度依存しているかを調査する。これによって、皮膚感覚がなければ達成できない動作・状態、なくても困らない動作・状態が明らかになるため、皮膚感覚の価値を最大限に生かすことのできる用途を明確にすることができる。まず、2.3.1 項にて依存度の調査方法について述べ、2.3.2 項にて調査結果および考察について述べる。

2.3.1 調査方法

まず、前節にて得られた約 200 の動作・状態の中から、重複したものを排除するなどして、114 の項目を選定した。選定した各動作・項目について、皮膚感覚について基本的な知識を持つ 6 名に対し、以下の二つの設問に回答させた。

- (1) 各動作・状態を達成する上で、視覚・聴覚・深部感覚・皮膚感覚それぞれにどの程度頼っているか（4段階で評価）
- (2) 皮膚感覚が排除された状況（手袋を装着した状況など）を想定して、各動作・状態を達成することがどの程度困難であるか（4段階で評価）

なお、各設問の評価軸は図 2.3 のとおりである。各設問の回答者間の平均得点をもとに、各動作・状態を達成する上での皮膚感覚に依存する度合いを評価した。

設問 1：各動作を達成する上で、各感覚に 0 — 全く頼っていない 1 — どちらかという頼っていない 2 — どちらかという頼っている 3 — とても頼っている	設問 2：各動作を達成する上で、皮膚感覚が 0 — 全く必要ない 1 — なくても十分容易だが、あればより容易である 2 — ないと達成することが極めて困難 3 — ないと達成することができない
---	---

図 2.3 各設問の評価軸

表 2.2 各動作・状態における各設問の平均得点

	動作・状態の項目	設問①				設問②
		視覚	聴覚	深部	皮膚	得点
1	手首に指を当てて脈拍を測る	0.17	0.00	0.67	3.00	2.67
2	布の手触りを確認する	1.33	0.50	1.00	3.00	2.83
3	箸を通して煮物の煮え具合を柔らかさで確認する	1.50	0.17	2.67	0.67	1.33
4	果物が熟しているかどうか柔らかさで判別する	1.50	0.17	2.67	1.83	1.50

5	洗濯物が乾いたかどうか触って確認する	0.83	0.00	0.00	3.00	2.67
6	風呂が適温になったかどうか確認する	0.17	0.00	0.17	3.00	2.83
7	額に手をあてて熱を測る	0.17	0.00	0.00	3.00	3.00
8	スイカの中身がどれくらい詰まっているか重さで判別する	0.17	0.50	2.50	0.50	0.50
9	鞆の中から所望の物を取り出す	2.00	0.33	1.83	2.17	1.17
10	ズボンのポケットの中に手を入れて鍵を探し出す(注1)	0.00	0.50	1.33	3.00	1.67
11	包丁を把持する(注2)	0.67	0.00	2.67	1.83	1.33
12	うちわを把持する(注2)	0.50	0.00	2.17	2.33	1.50
13	編み棒を把持する(注2)	0.67	0.00	2.00	2.33	1.67
14	受け皿を把持する(注2)	0.83	0.00	2.67	1.67	1.17
15	ミニホッチキスを把持する(注2)	0.83	0.00	2.17	2.17	1.50
16	鉛筆その他の筆記具を把持する(注2)	0.67	0.00	2.17	2.33	1.50
17	ワイングラスの脚を把持する(注2)	0.67	0.00	2.33	2.00	1.50
18	茶筒の蓋を把持する(注2)	0.83	0.00	2.33	2.00	1.17
19	輪ゴムを把持する(注2)	0.67	0.00	2.00	2.33	1.83
20	トイレトペーパーを把持する(注2)	0.67	0.00	2.00	2.00	1.33
21	たばこを把持する(注2)	0.83	0.00	1.67	2.33	1.33
22	錠に差し込んである鍵を抜き取る	1.50	0.33	2.33	2.17	1.33
23	キリを用いて穴を開ける	1.83	0.00	2.50	1.50	1.33
24	紙の皺を伸ばす	2.17	0.33	2.33	2.17	1.83
25	消しゴムを使う間、紙を押える	1.67	0.00	2.67	2.17	1.50
26	線を引く間、物差しを押える	1.33	0.00	2.67	2.00	1.33
27	ドッジボールを片手に載せて支える	0.83	0.00	2.67	2.00	1.33
28	書類袋を抱える	0.83	0.00	2.50	2.00	1.67
29	つり革に手をかける	1.17	0.00	2.33	1.83	1.00
30	電話機のダイヤルをまわす	1.67	0.67	2.33	1.67	1.00
31	拇印をつく	1.00	0.00	2.33	2.17	1.17
32	ライターをつける	1.83	1.00	2.17	2.50	1.33
33	サインペンを掴みながら、掴んでいる手でキャップを外す	1.83	0.33	2.50	2.33	1.67
34	ノック式のボールペンをカチカチする	0.50	1.00	2.50	2.33	1.17
35	テニスボールを片手で二個持つ	1.50	0.00	2.67	2.17	2.00
36	針に糸を通す	2.17	0.00	1.17	2.17	1.33
37	シャツのボタンをとめる	1.50	0.00	2.00	2.83	2.00
38	たばこの灰を落とす	0.50	0.00	1.67	1.83	1.00
39	紙を折る	2.33	0.00	1.83	1.83	1.50
40	缶のプルタブを開ける	0.83	1.00	2.67	2.17	1.50
41	床の上の硬貨を拾う	1.33	0.00	2.00	2.67	1.83

42	スプレーを押す	0.67	1.17	2.67	1.50	0.67
43	ページをめくる	1.17	0.00	1.67	3.00	2.33
44	割れ目のあるゆで卵の殻をむく	2.00	0.00	1.83	3.00	2.33
45	カードをきる	1.50	0.00	2.00	3.00	2.00
46	包丁でりんごの皮をむく	2.00	0.00	2.67	2.83	2.33
47	カッターの刃を押し出す	1.17	1.00	2.50	2.33	1.17
48	ドライバーでねじを締める	1.50	0.00	3.00	1.83	1.83
49	ペットボトルの蓋を開け閉めする	0.83	0.17	2.67	2.00	1.50
50	鉛筆で字を書く	2.00	0.17	2.50	2.50	1.50
51	手袋をはめる	1.33	0.00	2.50	2.17	2.17
52	スポンジを圧縮する	0.50	0.00	2.83	1.67	0.50
53	はさみで紙を切る	1.83	0.33	2.50	2.00	1.00
54	床においてあるカードをつかむ	1.67	0.00	2.00	3.00	2.17
55	ピンをつまむ	1.33	0.00	2.00	2.17	2.00
56	茶筒をつかむ	0.83	0.00	2.67	2.00	1.17
57	フランスパンを噛みきる	0.17	0.33	3.00	1.67	1.00
58	歯をみがく	0.50	0.83	2.67	2.33	1.67
59	リップクリームを塗る	0.83	0.00	2.00	2.83	2.17
60	自分で耳かきをする	0.17	1.00	2.50	2.67	2.17
61	ボールを蹴る	2.00	0.33	3.00	1.67	0.67
62	靴を履く	1.33	0.00	2.67	2.50	2.00
63	地震がおきたことに気づく	1.17	1.00	2.67	0.67	0.67
64	ポケットに入っている携帯のバイブがなったことに気づく	0.00	1.50	0.50	2.83	2.33
65	外に出た瞬間の気温の変化に気づく	0.33	0.00	0.00	3.00	3.00
66	突風が吹いたことに気づく	0.83	1.50	1.00	2.50	2.33
67	歩いていて何かにぶつかったことに気づく	0.67	0.67	2.83	1.83	1.67
68	後ろから触られたことに気づく	0.17	0.50	2.17	2.67	2.50
69	汗をかいていることに気づく	1.17	0.00	0.33	3.00	2.17
70	体に虫がとまったことに気づく	1.33	0.33	0.17	2.83	2.33
71	外にいて雨が降り始めたことに気づく	1.33	0.83	0.33	3.00	2.00
72	服を着ている	1.33	0.33	0.83	2.83	2.00
73	腕時計をはめている	1.00	0.33	1.17	2.50	1.83
74	靴下をはいている	0.33	0.33	1.33	2.67	2.33
75	何かを握っている	1.17	0.17	2.00	2.33	1.50
76	歩いている	1.83	0.33	2.33	1.83	1.00
77	椅子に座っている	1.17	0.00	2.17	2.33	1.67
78	ベッドで寝ている	1.17	0.17	2.33	2.50	1.83

79	風に吹かれている	0.83	1.00	0.83	2.83	2.50
80	日が当たっている	2.67	0.00	0.33	2.83	1.83
81	水中を泳いでいる	2.00	1.33	1.83	3.00	1.67
82	ふわふわの毛皮を触る	0.67	0.00	1.33	2.83	2.83
83	手触りの良い布を触る	0.50	0.00	1.33	3.00	3.00
84	耳たぶに触れる	0.17	0.00	2.17	2.50	2.20
85	ぷちぷちをつぶす	0.33	1.83	2.50	2.67	2.00
86	ノック式のペンをカチカチする	0.33	2.67	2.33	1.67	2.00
87	好きな人と手をつなぐ	1.67	0.17	2.17	2.83	2.17
88	子供の頭をなでる	2.00	0.00	1.83	2.67	2.00
89	グリップ感の良いペンで字を書く	0.50	0.00	2.33	2.83	2.17
90	切れ味の良い包丁で切る	1.67	0.83	3.00	1.83	1.83
91	暑い時に扇風機にあたる	0.33	0.67	0.67	3.00	2.83
92	マッサージを受ける	0.17	0.00	3.00	1.83	2.33
93	温泉に入浴する	1.33	0.67	0.67	2.83	2.67
94	かゆいところを掻く	0.33	0.33	1.33	3.00	3.00
95	柔らかい布団にくるまる	0.33	0.17	1.67	2.83	2.67
96	頭をなでられる	1.33	0.50	1.83	2.83	2.17
97	頭を無意識的に掻く	0.17	0.50	1.50	2.17	2.40
98	抱きしめられる	1.50	0.17	2.83	2.50	1.83
99	熱したフライパンに触れる	0.50	0.33	0.00	3.00	3.00
100	ドライアイスに触れる	0.50	0.00	0.33	3.00	3.00
101	バラのトゲに触れる	0.50	0.00	0.17	3.00	2.83
102	金属に触れた際に放電する（静電気が発生する）	0.00	1.00	0.33	2.83	2.67
103	べたべたしたもの（シールをはがした痕など）に触れる	0.83	0.00	0.83	3.00	2.17
104	手に油が付着する	0.00	0.00	0.17	3.00	2.67
105	犬の糞などの汚物に触れる	2.67	0.33	1.33	2.50	1.33
106	固くて押しにくいキーボードを使用する	0.50	0.67	2.83	1.83	1.17
107	嫌いな虫に触れる	2.83	0.17	1.50	2.83	1.33
108	注射を打たれる	1.00	0.00	0.50	2.50	2.20
109	強く叩かれる	0.50	1.50	1.67	2.83	1.83
110	蚊に刺されて痒くなる	1.00	0.33	0.50	3.00	3.00
111	暑い部屋にこもる	0.33	0.17	0.17	3.00	2.67
112	濡れた服を着る	0.50	0.00	0.67	3.00	2.33
113	知らない人に触られる	2.17	0.00	1.50	2.50	1.50
114	嫌いな虫が体を這っている	2.83	0.50	0.83	3.00	1.50

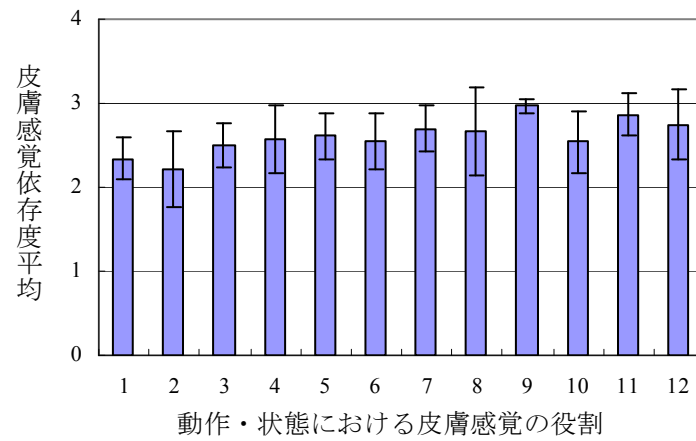


図 2.4 皮膚感覚への依存度

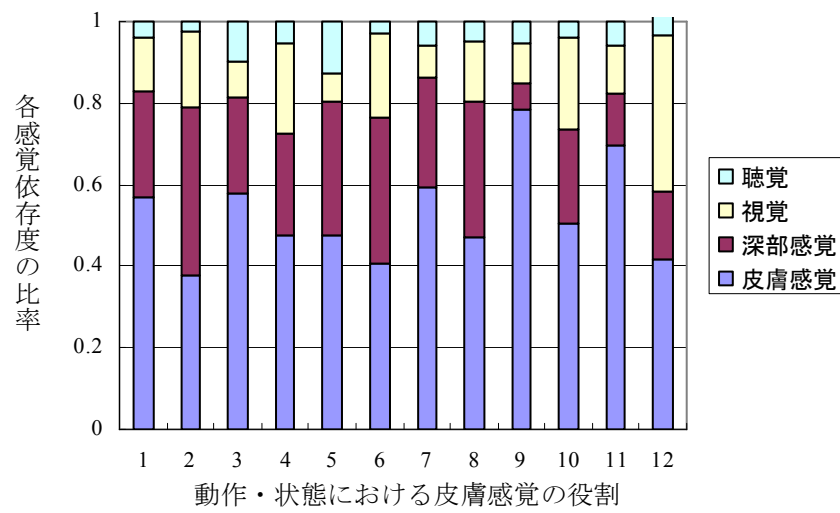


図 2.5 各感覚への依存度の比

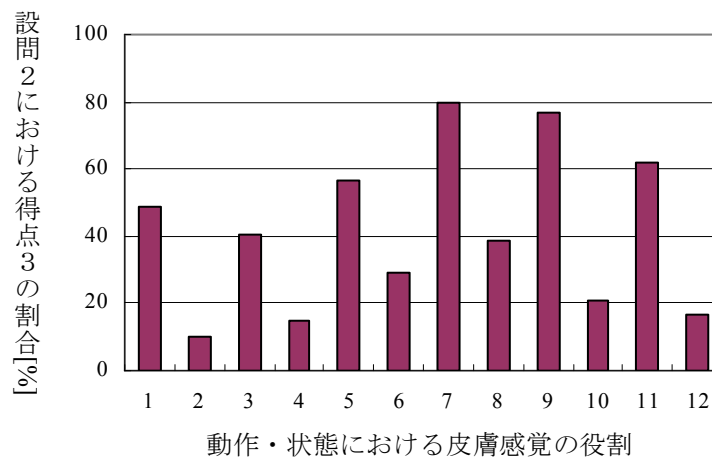


図 2.6 皮膚感覚なしでは実現できない動作・状態の割合

2.3.2 調査結果および考察

設問1で回答した得点の平均を図2.4に、各感覚の得点の比率を図2.5にそれぞれ示す。なお、図2.4および2.5の横軸の数字(1~12)は、表2.1の数字にそれぞれ対応している。また、以降の図に関しても、横軸の数字は表2.1に対応するものとする。図2.4から、平均得点が最も低いものでも2を上回っていることから、ヒトは皮膚感覚を知覚する全ての日常動作・状態において少なからず皮膚感覚に依存していると考えていることがわかる。一方で、図2.5をみればわかるように、4種類の感覚に対する依存度の比率には、動作・状態の種類によってばらつきがある。皮膚感覚の役割が危険の学習および危険の感知である動作・状態は、皮膚感覚への依存度が全体の7割以上を占めており、皮膚感覚の提示のみで前述した二つの役割はほぼ果たすことができると考えられる。一方で、皮膚感覚の役割が作業の補助である動作・状態は、皮膚感覚への依存度の比率が深部感覚よりも低い。このことから、深部感覚の方が皮膚感覚よりも作業の補助に貢献していると考えられていることがわかる。また、皮膚感覚の役割が快感の取得である動作・状態に関しては、皮膚感覚への依存度自体の平均得点は2.6以上と高いものの、図2.5では依存度の比率が低いことがわかる。これは、快感の取得においては皮膚感覚単体が重要な役割を果たすのではなく、視覚や深部感覚などさまざまな感覚の情報を複合的に取得することによって快感を得ているからであると考えられる。このため、快感の取得を目的とした場合には、皮膚感覚のみの提示よりも、視覚・聴覚・力覚提示などと統合して皮膚感覚を提示した方が効果的であると考えられる。

図2.6は、設問2において得点3(皮膚感覚がなければ達成することが不可能)を得た動作・状態項目の各グループにおける割合を示している。図2.6から、皮膚感覚の役割が快感の取得、危険の学習および感知の動作・状態は、半分以上が皮膚感覚がなければ実現できないと回答されていることがわかる。以上の結果から、ヒトの日常生活においては、対象に触れる(触れられる)ことによる快感の取得、危険の学習および危険の感知は、皮膚感覚がなくてはなしとげられないものが多いため、上述した役割を果たすために皮膚感覚提示技術を用いることは非常に有効であると考えられる。一方で、皮膚感覚の役割が作業の補助である動作・状態など、知覚する皮膚感覚に向ける注意が無意識である動作・状態に対しては、得られた得点が比較的小さいことから、皮膚感覚提示技術の用途としては費用対効果が低いことが予想される。

しかし、ここで注意すべき点は、本研究で行った調査は回答者の主観に基づいているため、正確な依存度を求めることはできていないことである。そこで、本研究で依存度を調査した各動作・状態ごとに、回答者の評価した依存度の得点の妥当性を検証した。表2.2は、依存度の調査を行った各動作の回答者間の平均得点である。なお、表2.2の1~10は皮膚感覚の役割が「触対象の特徴の認識」である動作・状態である。同様に、11~62は「作業の補助」、63~71は「周囲の変化の感知」、72~81は「周囲の定常の認識」、82~86は「能動的な快感の取得」、87~90は「能動的な安心感の取得」、91~95は「受動的な快感の取得」、96~98は「受動的な安心感の取得」、99~102は「危険の学習」、103~107は「能動的な不快感の取得」、108~112は「危険の感知」、113~114は「受動的な不快感の取得」の役割を皮膚感覚がそれぞれ果たしている動作・状態である。表2.2をみればわかるように、同じグループでも、動作・状態ごとに皮膚感覚への依存度にばらつきがあることがわかる。例えば、皮膚感覚の役割が「触対象の特徴の認識」である動作・状態

では、依存度が高い動作・状態が大半を占める中で、「箸を通して煮物の煮え具合を柔らかさで確認する」などは得られた得点が低い。これは、「柔らかさ」という情報が、皮膚感覚よりも深部感覚に依存する度合いが大きいからであると考えられる。また、皮膚感覚の役割が「作業の補助」である動作は、「シャツのボタンをとめる」などの依存度が高い動作と「スプレーを押す」などの依存度の低い動作に二極化している。2.2.1 項で述べたように、「シャツのボタンをとめる」などの精密動作は、触覚障害を患った人が実現困難な動作であることが確認されている[Robles-De-La-Torre 06]。さらに、「スプレーを押す」などの単純な動作については、皮膚感覚がなくても容易に実現できることが、VR 環境による実験によって確認されている[佐藤 07]。以上から、本研究で調査を行った一部の動作・状態については、回答者の評価した依存度の得点が、実験的に明らかにされている結果と照らし合わせてみても妥当であることを確認することができた。一方で、依存度得点の妥当性が明らかでない動作・状態もある。例えば、知覚する皮膚感覚に向ける注意が無意識である動作・状態は、各設問で得られた得点が全体的に小さいが、意識されないことから皮膚感覚の恩恵を直感的に認識することが困難であるために、実際よりも低く評価された可能性は大いにある。実際に、熟達した動作であるほど触覚に対して注意が向きにくくなるという知見がある[Prytherch 03]。また、「グラスを把持する」などの容易に実現できそうな動作であっても、例えばグラスを落とさずに立ちながら会話することは皮膚感覚抜きでは至難の業であると考えられる[前野 04]。以上から、各役割の実現のために皮膚感覚提示技術を利用した際の効果を、今回の調査結果のみで正確に推定することは困難である。したがって、今回の調査結果に客観性を持たせることは今後の課題である。

皮膚感覚提示技術の用途の体系化

本章では、皮膚感覚提示技術の用途を徹底的に洗い出すとともに、得られた用途を MECE に分類することで、用途の体系化を試みる。まず、3.1 節にて、用途の洗い出しについて述べる。次に、得られた用途を、3.2 節にて MECE に分類・整理するとともに、各グループに含まれる用途の概要を紹介する。

3.1 用途の洗い出し

本研究では、

- (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。本節では、各々の詳細を述べる。

3.1.1 従来研究にて想定されている用途の洗い出し

1 章で述べたように、これまでさまざまな皮膚感覚提示技術の研究が行われている。本研究では、これまで大学や企業などの研究機関にて発表された皮膚感覚提示技術の研究成果や技術動向など、皮膚感覚提示技術に関する文献を網羅的に収集し、それらの資料の中で想定されている皮膚感覚提示技術の用途を抽出した。

皮膚感覚提示技術に関する文献から抽出した用途を整理した結果は、表 1.1 に示した通りである。表 1.1 をみればわかるように、ここで得られた用途は、「遠隔操作による医師の触診」など具体的なものから、「エンターテイメントにおける臨場感の向上」など抽象度の高いものまで幅広い。

これらの用途の価値を分析するためには、抽象度を統一する必要があると考えられる。抽象度の統一については、次項以降にて得られた用途も含めて、次節にて行う。また、各文献には平均して2~3種類の用途が提案されているのみであり、用途を網羅的に示したと考えられる文献はなかった。以上のことから、文献に示された用途を抽出するのみでは、皮膚感覚提示技術の用途を網羅的に洗い出すことができたとはいえない。したがって、皮膚感覚提示技術の価値を明確化するためには、従来研究では述べられていない新しい用途を発想する必要があると考えられる。

3.1.2 皮膚感覚を用いた日常動作・状態の洗い出し

前章にて、皮膚感覚を用いた日常動作・状態を網羅的に洗い出すとともに、それらにおいて皮膚感覚が果たす12の役割を明確化した。洗い出した動作・状態は付録Aに示したとおりである。これらの日常動作・状態は、確立した皮膚感覚提示技術を用いれば、遠隔操作やVR空間などでも行うことができるようになると考えられる。つまり、前章にて洗い出した約200の日常動作・状態は、そのまま皮膚感覚提示技術の用途になりうると考えられる。本研究では、前章にて洗い出した日常動作・状態を、遠隔操作やVRの分野に適用できる用途に置き換えた。これにより、遠隔操作やVR空間で、皮膚感覚定時技術を用いることによって行うことのできるようになるヒトの日常動作・状態はほぼ網羅することができたと考えられる。

3.1.3 発想法を用いた新たな用途の洗い出し

発想法とは、決められた過程に沿って考えていくことで、結果的にアイデアを得る方法である[星野 89]。代表的なものとして、ブレインストーミング、マインドマップ、KJ法、NM法、形態分析法などがある。発想法を用いれば必ず優れたアイデアが得られるというわけではないものの、やみくもにアイデアを発想しようとするよりもはるかに効率的にアイデアを得られるような工夫がなされている。本研究では、複数ある発想法のうち、使いやすさ、汎用性を考慮して、(a)ブレインストーミング、(b)マインドマップおよび(c)KJ法を用いて用途の発想を行った。本項では、各々の詳細を述べる。

(a) ブレインストーミング

ブレインストーミングとは、広告代理店BBDO社のアレックス・オズボーンが1930年代の終わりに作った、現在世界で最も広く使われている発想法である。会議形式で行うアイデア発想法であるが、四つのルールに従うことを原則とする。すなわち、

- ・ 批判一切お断り
- ・ 自由奔放
- ・ 量を求める

- ・ 組み合わせ・改善

である。四つのルールを設定する背景には、「判断の留保」および「量が質を生む」と考え方があ
る。前者は、アイデアを作る段階ではアイデアを出すことのみ専念し、出されたアイデアの評
価を一切行わないという考え方である。この考え方にに基づき、ブレインストーミングでは、「そ
のようなアイデアは現実的でない」「そのアイデアは既に世に出ている」などの批判は禁句とされて
いる。後者は、アイデアの数をたくさん出すことによって結果的に良いアイデアが得られるとい
う考え方である。オズボーンは、「ブレインストーミングで出た最後の50のアイデアは、最初の
50のアイデアよりも質的にずっと高いものになっている」と述べている。このことは、様々な情
報が場に提供されることで、新たな組み合わせ・改善が試みられるためであると考えられる。一
方で、多くの量を得ることが目的であっても、ブレインストーミングを最も効率的に行うこと
のできる時間の目安は30分から1時間とされている。これは、時間が長くなるにつれて参加者の集
中力が低下するためである。また、参加者の人数は5名前後が適切であるとされる。人数が多け
れば多いほど多様なアイデアが得られる可能性があるものの、人数が多いために発言しなくても
構わない、発言しにくいなどの心理が生まれてしまうためである。その他、ブレインストーミン
グによって高い効果を得るための工夫としては、

- ・ テーマを絞ること
- ・ 参加者のバックグラウンドが多様であること
- ・ 参加者に事前準備をしてもらうこと
- ・ 司会者が計画的に会議の進行を図ること

などがある。特に、最後に挙げた司会者の役割は重要である。より効率的にアイデアを得るため
の時間設定や、発想を刺激するための資料の提示のタイミングなどを適切に行う必要がある。

本研究では、述べ38名に対し、計5回のブレインストーミングを行った。各ブレインストーミ
ングにおいて設定したテーマ、参加人数、時間、参加者の属性（世代、性別および皮膚感覚に対
する予備知識）を表3.1に示す。本研究では、可能な限り多様な用途を得ることを目的とした

表3.1 実施したブレインストーミングの概要

	設定テーマ	参加人数	世代	性別	皮膚感覚技術に 対する予備知識
1回目	皮膚感覚技術を用いてできそ うなこと	6人	20代	男性のみ	有り
2回目	日常生活にて触覚が役に立つ 場面とは	3人	20代	男性のみ	有り
3回目	リアルな触覚を再現してでき そうなこと	3人	20代	男女混合	有り
4回目	皮膚感覚技術を用いてできそ うなこと	5人	20代	女性のみ	有り
5回目	タッチパネル上で触覚を提示 してできそうなこと	7人×3グ ループ	20代～40代	男女混合	有り/無し混合

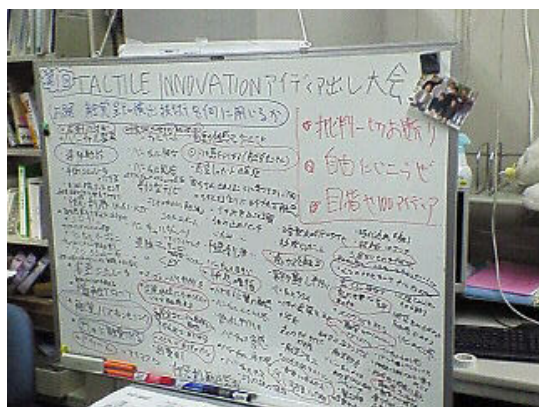


図 3.1 ブレインストーミング結果の例



図 3.2 ブレインストーミングの様子

め、設定するテーマの抽象度や参加者の属性に多様性を持たせた。全てのブレインストーミングにおいて、人数は3～6名、時間は30分～60分とした。集まった人数が適切な人数を大幅に上回った際には、いくつかのグループに分けてブレインストーミングを行った。図 3.1 および 3.2 に、本研究で行ったブレインストーミングの風景を示す。ブレインストーミングを行う際、列挙する項目数の目標を100と事前に設定するなど、なるべく多くの項目数を引き出す工夫を行った。得られたアイデアは、参加者全員にとって見やすくするために、ホワイトボードを用いて大きく板書した。

(b) マインドマップ

マインドマップは、トニー・ブザンが1960年代後半に考案したノート記述法である。脳が放射的に考えていることを利用し、脳と同じように放射的に書くことでアイデアを得る方法である[ブザン 05]。マインドマップを作成する手順について述べる。まず、無地の紙の中心に発想したいテーマを記入する。次に、中心に記入したテーマの周りに放射状に太い曲線を描き、その線の上にテーマから連想されるイメージや言葉を描く。さらに、描いたイメージや言葉から連想されるものを、さらに枝分かれさせて周囲に向かって描いていく。ある程度描けた段階で、マインドマップ全体を眺めてテーマについて考えた後、再びマインドマップに向かい、浮かんだ新しい考えを追加する。以上の流れを繰り返す過程で、アイデアや解決策を探る。マインドマップの特徴は、文字だけでなく、図などのイメージを多用することである。これによって、より効果的に発想を引き出すことができる。

本研究では、PCでマインドマップを作成できるツールである MindMapper を用いてマインドマップを作成した。中心に記述したテーマは、ブレインストーミングのテーマとほぼ同様である。また、本研究では、マインドマップを発想法としてのみでなく、発散したアイデアの整理法としても用いた。前章で皮膚感覚を用いた200の動作・状態を分類した際にも、マインドマップを用

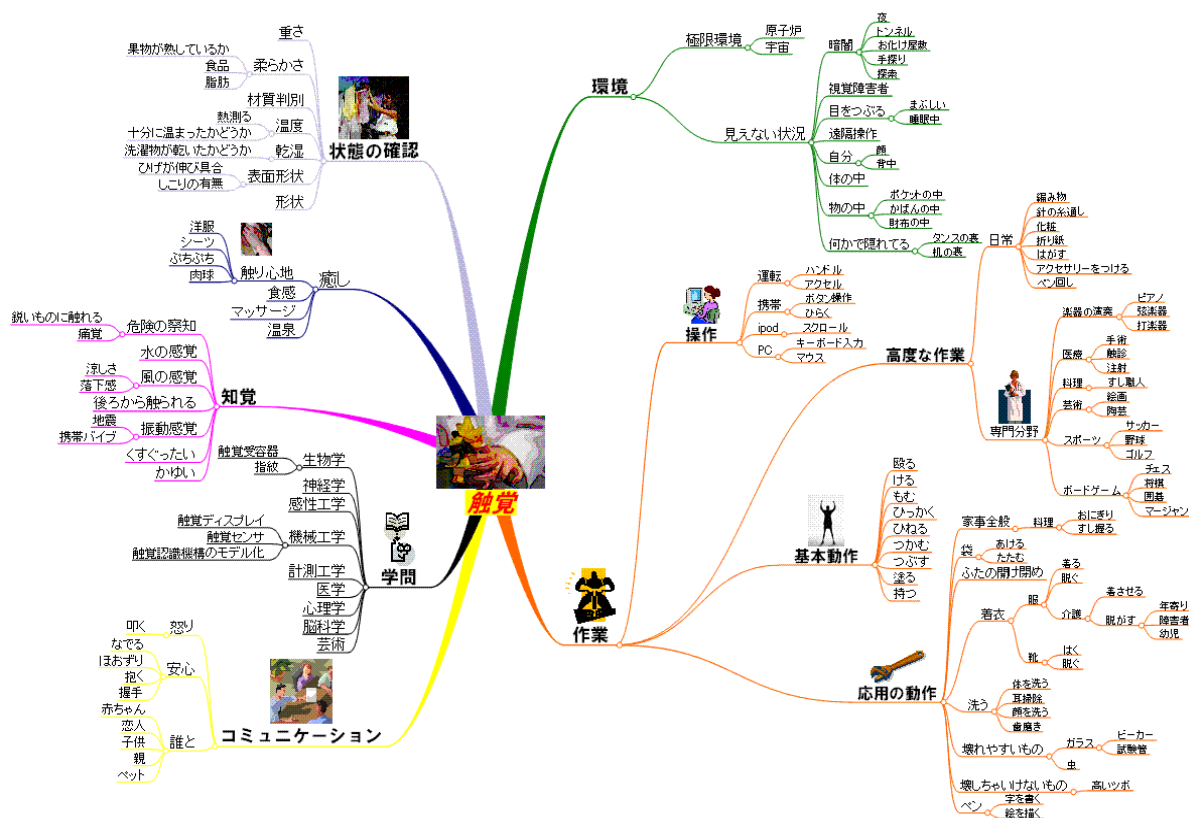


図 3.3 作成したマインドマップの例

いた. 図 3.3 に, 作成したマインドマップを示す. マインドマップにて類似した動作・状態を直感的に分類し, 分類結果の特徴を分析することで, 2.2.2 項で述べた 3 つの観点を発想するに至った. 以上のように, 大量の項目をマインドマップによって分類することで収束させた結果, 新たな発想が生まれるケースもあった.

(c) KJ 法

KJ 法は, ブレインストーミングと並んで広く使われている技法である. 開発した川喜田二郎の頭文字を取って名付けられた. 単にアイデアを発想するだけでなく, 雑多なデータをもとに仮説をまとめたり, 様々な側面を検討したりしながら全体像を組み立てることに向いている. KJ 法の手順の概要について述べる. まず, 設定したテーマに対するアイデアなどを一つずつラベルに書く. 次に, 似たラベルを集めてグループを作り, グループに名前をつける. さらに, 二段目のグループ, 三段目のグループと, これ以上分類できない段階までグループ分けを繰り返す. さらに, 大きな紙などにラベルのグループを貼り, 他のグループとの関係などを書き込む. 最後に,



図 3.4 KJ 法の実施の様子

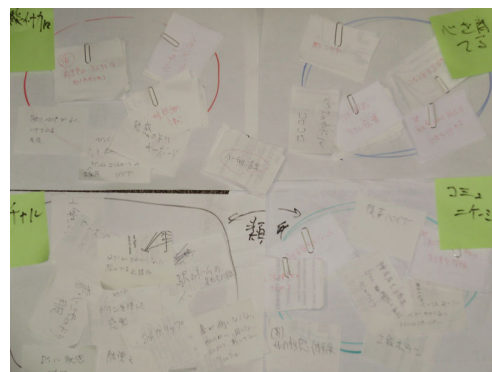


図 3.5 KJ 法の結果の例

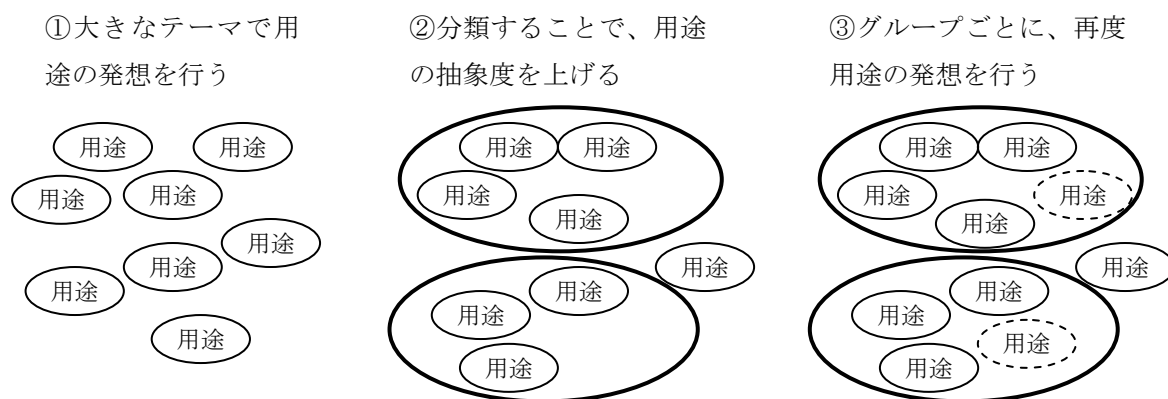


図 3.6 本研究における KJ 法の利用方法の概要

図解化して分かったものを文章化する．以上の一連の作業を通して，アイデアを発想する．

図 3.4 および 3.5 に，本研究で行った KJ 法の様子を示す．本研究では，大きく分けて二つの目的で KJ 法を使用した．一つ目の目的は，ブレインストーミングによって得られた多数のアイデアを直感的に分類していく過程で，MECE な分類法を考案することである．すなわち，直感的に分類した項目の特徴を分析することで，用途を MECE に分類することのできる軸の発見を容易にした．二つ目の目的は，図 3.6 に示すように，分類することで用途の抽象度を上げてから，再び抽象度の高いテーマをもとに発想を行うことで，新たな用途の発想を行うことである．例えば，最初は「皮膚感覚提示技術を用いて実現できること」などのように抽象度が高いテーマでブレインストーミングを行うことで，多数の用途のアイデアを得る．それらの用途のうち類似したものをまとめると，「遠隔操作ロボットの作業効率向上」などの新しい抽象的概念が生まれる．そして，今度は「遠隔操作ロボットの作業効率を向上させることで実現できること」などのテーマでブレインストーミングを行うことで，最初の抽象度が高かったテーマでは得られなかった用途を得る．

3.2 用途の体系化

前節にて、複数の方法で皮膚感覚提示技術の用途を洗い出すことによって、従来想定されていなかった用途を含む、約 160 の用途を得た。付録 B に、得られた全用途を示す。次に、得られた用途を MECE (Mutually Exclusive and Collective Exhaustive ; 相互に重なりなく、全部集めたら漏れないこと) に分類することで、用途の体系化を試みた。MECE に分類した主な目的は、

- ・ 得られた用途の抽象度を統一すること
- ・ 重複した項目をなくすこと
- ・ 用途の抜け漏れを把握し、網羅性を確認すること

などである。

まず、表 3.2 のように、得られた用途を、皮膚感覚を提示する基となる情報に着目し、基となる情報が (1) 皮膚感覚で知覚できる用途、(2) 皮膚感覚では知覚できない用途および (3) 存在しない用途の 3 種類に大別した。本研究では、(1) のように皮膚感覚で知覚できる情報を提示する技術を「触感ディスプレイ」、(2) のように皮膚感覚では知覚できない情報を提示する技術を「情報ディスプレイ」と呼ぶこととする。本節では、各々に含まれる用途の詳細について述べる。

表 3.2 提示する基となる情報の特徴に基づく皮膚感覚提示技術の分類

	提示する基となる情報	提示する情報の例
触感ディスプレイ	皮膚感覚で知覚できる情報	<ul style="list-style-type: none"> ・ 布の手触り ・ 患部のこり、しこり
情報ディスプレイ	皮膚感覚では知覚できない情報	<ul style="list-style-type: none"> ・ 文字、音声情報 ・ 携帯電話の着信情報
その他	基となる情報が存在しない	

3.2.1 触感ディスプレイ

触感ディスプレイとは、布の手触りや患部のこり・しこり情報などの皮膚感覚情報を提示するディスプレイである。一般に、触感ディスプレイでは、基となる皮膚感覚情報をいかにしてリアルに再現するかが重要であるとされている[篠田 08]。実際に、1.2.3 項で述べたように、触感ディスプレイの研究では、提示する皮膚感覚情報のリアリティの向上を第一目的とされる場合が多い。一方で、本研究で得られた触感ディスプレイの用途の中には、必ずしもリアルに再現することが重要ではないものもある。すなわち、触感ディスプレイの用途における皮膚感覚の提示方法に着目すると、基となる皮膚感覚情報を、

- (a) リアルに再現して提示する用途
- (b) カスタマイズして提示する用途
- (c) 異なる皮膚感覚情報に変換して提示する用途

の 3 種類に細分化することができる。以下に各々の詳細を述べる。

表 3.3 基となる皮膚感覚情報をリアルに再現して提示する触感ディスプレイの用途

検出と提示の同期性	細分	用途	具体例または用途の説明
同期	遠距離伝達	遠隔操作ロボットによる作業代行	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔地の皮膚感覚情報の調査（遠隔触診など） ・遠隔操作による器用な操りの実現（遠隔介護、遠隔マッサージ・エステなど）
		遠隔触覚コミュニケーション	<ul style="list-style-type: none"> ・子供・恋人・動物と触れ合う ・通話相手に突っ込みを入れる ・死ぬ間際のヒトの手を握る
	近距離伝達	外部環境の問題による接触不可の解消	<ul style="list-style-type: none"> ・極限環境などで、特殊な作業服に覆われている ・清潔な環境で、手袋をしなければならない
		自身の問題による接触不可の解消	<ul style="list-style-type: none"> ・感染症を患っているため直接触れられない ・潔癖症のため直接触れられない
		触対象の問題による接触不可の解消	<ul style="list-style-type: none"> ・肉食動物など、危険なため直接触れられない ・法的・倫理的問題で直接触れられない
	非同期	保存した情報の提示	携帯触感再生機
触感の定量的表現			・耳たぶのかたさなどの定量化
快感覚の定常的提示			厚着していても涼しい感覚・着心地の悪い服を着ていても快感覚など、常に最適な温度感の提示
ネットショッピング			<ul style="list-style-type: none"> ・商品の手触り確認 ・服の試着
快感覚の VR 体験			<ul style="list-style-type: none"> ・バーチャル温泉 ・バーチャルマッサージ
現実ではできないことの VR 体験			<ul style="list-style-type: none"> ・法的・倫理的に得ることのできない触感の仮想的体験 ・絶滅した動物など、現実には存在しないものの触感の仮想的体験
環境の VR 体験			南極・月などの環境体験
職業訓練シミュレータ			手術訓練シミュレータ
操作フィードバック			タッチパネル上での触感提示
特定の行動の誘発			仮想すべり提示による把持力増加の誘発
VR 空間上での痛みの提示			痛み提示による回避行動・学習の誘発
暗黙知の定量的な提示			職人技の技術伝承
シミュレーションした情報の提示		予測した触感情報の提示	<ul style="list-style-type: none"> ・気温のシミュレーション ・美容用品使用後の肌の触感シミュレーション
		リスク軽減のための触感情報の提示	<ul style="list-style-type: none"> ・化粧品の付け心地のシミュレーション ・製品の触感シミュレーション

(a) リアルに再現して提示する用途

基となる皮膚感覚情報を「リアルに再現して提示する」触感ディスプレイの用途を表 3.3 のようにまとめた。表 3.3 に示すように、このグループに含まれる触感ディスプレイの用途は、皮膚感覚情報の検出と提示の同期性に注目すると、「同期」と「非同期」の2種類に細分化することができる。

まず、皮膚感覚情報の検出と提示を「同期」させた場合の用途について述べる。これらの用途では、センサによってある対象の皮膚感覚情報を検出し、検出した情報を基にリアルタイムで刺激を生成してユーザに提示する。したがって、このような用途で触感ディスプレイを用いる場合には、提示する皮膚感覚情報のリアリティのみでなく、皮膚感覚情報の検出から提示するまでの遅延を小さくすることが重要となる[Okamoto 07]。この際、皮膚感覚を検出するセンサと提示するディスプレイの存在する空間に着目すると、これらの用途は、「遠距離伝達」と「近距離伝達」の2種類に細分化することができる。本研究では、センサとディスプレイが同じ空間に存在しない環境下で皮膚感覚情報を伝達することを「遠距離伝達」と呼ぶ。以下に、皮膚感覚情報の遠距離伝達によって実現できるアプリケーションの例を挙げる。

遠隔操作ロボットによる作業代行

遠隔操作の作業効率を向上させるためには、操作ロボット自体の動作精度などの向上に加えて、いかにして操作者にとってロボットを操作しやすくすることが重要であると考えられる。皮膚感覚提示技術は、後者に対する有効なソリューションとして注目を集めている。皮膚感覚提示技術を用いて、遠隔地のロボットが触れた対象の皮膚感覚情報を操作者にフィードバックすることができれば、従来では困難であった器用な操りも遠隔操作によって行うことができるようになると思われる。既に研究レベルでは、滑り覚を提示することで、遠隔操作ロボットによる物体の把持力調整を直感的に行うことに成功した事例が多数報告されている[Ikeda 04][Maeno 02][Yamada 02][香田 08]。こうした用途は、器用な操りのみでなく、遠隔地の触対象を損傷せずに操りたい場合にも有効である。例えば、遠隔介護や遠隔マッサージなど、触対象がヒトである場合には、力の加え方によって傷つけてしまう危険性があるが、皮膚感覚情報をフィードバックすることで微妙な力の加減が可能となり、システムとして安全性を高めることができる可能性がある。また、遠隔地の対象の皮膚感覚情報を調査したい場合にも有効である。例として、遠隔操作による医師の触診が挙げられる。触診ロボットが取得した皮膚感覚情報を、遠隔地で操作する医師に対してリアルに再現して提示することができれば、患者の患部の状態を直感的かつ安全に把握することができ、遠隔医療に貢献することができると考えられる。

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「つつこみ」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。このため、こうした用途の実用化は慎重に行うべきであると考えられる。

以上に述べてきた遠距離伝達に対し、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「近距離伝達」と呼ぶ。近距離伝達は、ユーザと触対象が同じ空間に存在するものの、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

場合の三通りが考えられる。以下に、各々の問題の具体例と、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る接触不可の解消

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、外側の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、手袋などの安全面や衛生面におけるメリットを損なうことなく、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られ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。

自身の問題による接触不可の解消

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

危険な動物などの安全面での問題や、国宝などの法的・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。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。以下に、保存した情報を所望のタイミングで提示することによって実現できるアプリケーションの例を挙げる。

携帯触感再生機

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。

触感の定量的提示

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。

快感の定常的提示

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。

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。

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リアルに体験する。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。

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。

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。

職業訓練シミュレータ

手術などの高度かつ失敗が許されない作業では、訓練をいかに実環境と近い環境下で行うことができるかが重要であると考えられる。皮膚感覚提示技術を用いて、訓練用シミュレータに皮膚感覚情報を付与すれば、ユーザは没入感を高めることができる。その結果、本番と訓練との環境の差が小さくなるため、より効果的な職業訓練を実現できると考えられる。

操作フィードバック

1.2.1 項で述べたように、タッチパネルの普及に伴い、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。

特定の行動の誘発

分布型振動刺激により、ヒトの無意識下での把持力調整を誘発できることが知られている[昆陽06]。遠隔操作において物体の把持を行う際、滑り落としそうになったときにこの手法を用いれば、特別な訓練を必要とせず、安全に遠隔地の物体を扱うことができる。このように、特定の行動の誘発に皮膚感覚提示技術を利用できる。これによって、直感的に危険を回避させることができると考えられる。他の例として、遠隔手術などにおいて、患部を意図せず傷つけそうになってしまった際に、傷つける直前に切る感触を仮想的に提示することで、操作者が操作を反射的に中断することを誘発することができると考えられる。「遠距離伝達」のように検出と提示が同期させると、危険情報を取得してからユーザに提示するので、回避行動の誘発が手遅れになる可能性がある。これに対し、「特定の行動の誘発」では、あらかじめ回避行動を誘発可能な刺激を生成しておき、危険の直前に提示するため、より多くの危険を未然に防ぐことができると考えられる。

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。

暗黙知の定量的な提示

職人の技術などは、長年の経験と勘から成り立っている部分が多いため、伝承が困難である。職人技術のうち、皮膚感覚が関与する部分を、皮膚感覚技術を用いて定量的に表現することがで

できれば、効率的な技術伝承に貢献できると考えられる。

シミュレーションした皮膚感覚情報を提示する用途では、未知の皮膚感覚情報を計算機などによって予測し、予測結果に基づいて生成した刺激を所望のタイミングでヒトに提示する。以下に、シミュレーション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の例を挙げる。

予測した触感情報の提示

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。例えば、気候においては、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。また、美容用品使用後の肌や髪触感など、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。

リスク軽減のための触感提示

シミュレーションした皮膚感覚情報を提示することで、さまざまなリスクを軽減する。例として、CADに皮膚感覚情報を付与することで、製品を実際に試作する前の段階で皮膚感覚の良し悪しを直感的に判断するなどの用途が考えられる。これにより、資源やコストなどの削減が期待できる。その他の例として、化粧品の付け心地を実際に使用する前に体験することによって、肌にダメージを与えることなく商品の良し悪しを直感的に評価するなどの用途も考えられる。

(b) カスタマイズして提示する用途

本研究では、カスタマイズして提示とは、提示する基となる皮膚感覚情報のうち、一部あるいは全情報を増幅・抑制・排除して提示することであると定義する。皮膚感覚情報を提示する目的によっては、リアルに再現して提示することが必ずしも最善とは限らない。カスタマイズして提

表 3.4 基となる皮膚感覚情報をカスタマイズして提示する触感ディスプレイの用途

用途	カスタマイズの目的	具体例・用途の説明
情報の増幅	全皮膚感覚情報の増幅	皮膚感覚を鋭敏に知覚できるようにする
	識別感覚の増幅	必要な情報のみを増幅して提示する
	快感覚の増幅	快感のみを増幅して提示する
情報の抑制	不快感覚の抑制	痛みなどの不快感覚を、必要最低限の大きさまで抑制して提示する
	快感覚の抑制	快感を抑制することで、特定の行動を抑制する
情報の排除	触覚ノイズの遮断	熱いものの熱さのみを取り除いて、器用に扱う
	不快感覚の遮断	衝撃を受けた際の痛みをキャンセル

示す目的は、用途の目的に応じた皮膚感覚情報の最適化である。基となる皮膚感覚情報をカスタマイズして提示する触感ディスプレイの用途の例を、表 3.4 のようにまとめた。以下に、各用途の詳細を述べる。

情報の増幅

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なる。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]。その他、快感覚のみを増幅するなどの用途も考えられる。

情報の抑制

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。

情報の排除

乳がんの検診などにおいては、しこりの検出を容易にするために、オイルなどの潤滑剤を用いて指先と乳房の摩擦感を取り除くといった手法が用いられている。このように、ノイズとなる皮膚感覚情報を選択的に遮断することができれば、目的とする皮膚感覚情報の検出が容易になるだけでなく、従来では困難であったさまざまな触行動が実現可能になると考えられる。例えば、高温の対象物は直に触れることが困難であるが、対策として分厚い手袋などで手を覆った場合、皮膚感覚情報が全て抑制されてしまうため、対象物を器用に操ることが困難になる。こうしたケースにおいて、もしも対象の冷温感情報のみを取り除き、表面の粗さや摩擦情報などの情報はそのままに知覚することができれば、精密な作業を安全に行うことができるようになると思われる。

表 3.5 基となる皮膚感覚情報を他の触感に変換して提示する触感ディスプレイの用途

用途	変換の目的	具体例・用途の説明
操作触感の最適化	作業効率の向上	個人ごとに最も操作のしやすい触感を呈示
快触感に変換	触行動の促進	好みの触感に変換して、嫌な作業を快適にできるようにする 本来不快で触りたくないものを、触りたくさせる
不快触感に変換	触行動の抑制	痴漢する人に不快な触感を提示することによる犯罪行為の抑制 不快な温度感を提示することによる居座りの抑制

(c) 異なる皮膚感覚情報に変換して提示する用途

ここでは、基となる皮膚感覚情報を、全く異なる皮膚感覚情報に変換して提示する触感ディスプレイの用途について述べる。このような触感ディスプレイの用途を、表 3.5 のようにまとめた。以下に、各々の用途の詳細を述べる。

操作触感の最適化

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。

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。

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。

3.2.2 情報ディスプレイ

情報ディスプレイとは、文字・音声情報など視覚・聴覚によって知覚する情報や、時刻情報や

表 3.6 情報ディスプレイで提示する主な情報の例

情報の提示目的	情報の種類	具体例
感覚代行	視覚の代行	文字
	聴覚の代行	音
物理情報通知	着信情報	携帯電話のバイブレーション機能
	時刻情報	アラーム機能
	道案内情報	目的地へ牽引する
	状態の悪化	対象物の鮮度の劣化を触感情報で提示
	残量情報	電池の残量を触感情報で提示 容器の中身の残量を触感情報で提示
心理情報通知	心理情報	感情を触感情報で提示
作業効率向上	操作フィードバック	タッチパネルのクリック感
危険警告	危険なモノに触感を付加	毒ガスに触感を付与
	周囲の危険情報	危険地帯にいることを触感情報で警告
エンターテイメント	見えるけど触感のないもの	火, 光, 雲などに触感情報を付与
	見えなくて触感のないもの	音, 匂い, 時の流れなどに触感情報を付与

携帯電話の着信情報のようにヒトの五感では知覚できない情報など、「皮膚感覚では知覚できない情報」を「皮膚感覚によって提示する」ディスプレイである。本来、情報ディスプレイには、皮膚感覚に限らず視覚・聴覚・力覚などさまざまな提示方法があるが、本研究では便宜上、特にことわりのない場合には、皮膚感覚によって情報提示を行うもの情報ディスプレイと呼ぶこととする。

表 3.6 に、情報ディスプレイによって提示する情報の例を示す。情報ディスプレイによって情報を提示する目的は、感覚代行、情報通知、作業効率向上、危険警告およびエンターテイメントなどが挙げられる。情報の提示目的を、前章で明確にした皮膚感覚の役割に当てはめると、感覚代行、物理情報通知および心理情報通知は「触対象の特徴の認識」および「周囲の変化の感知」に、作業効率向上は「作業の補助」に、危険警告は「危険の学習」および「危険の感知」に、エンターテイメントは「能動的な快感の取得」および「受動的な快感の取得」に相当すると考えられる。情報ディスプレイでは、皮膚感覚によって知覚できないあらゆる情報が提示対象となるため、提示する情報の種類は多数存在すると考えられるが、表 3.6 に示したのは、その中でも特に重要性が高いと考えられる情報である。したがって、情報ディスプレイを用いて提示する情報をテーマにしてブレインストーミングなどを行うことで、表 3.6 に示されていない情報が得られることは大いにありうる。

3.2.3 その他

前節にて得られた用途の中には、「提示する基となる情報が存在しない」用途も含まれていた。

以下に例を挙げる。

皮膚感覚知覚特性の解明

任意の刺激を生成することができれば、ヒトの皮膚感覚知覚特性の解明に役立てることができると考えられる。刺激のパラメータと知覚する皮膚感覚の関係解析や、有限要素解析などのシミュレーション結果の検証などに用いることができると考えられる。

特定の状態を誘発する刺激の提示

特定の刺激を加えることで、ヒトやモノの状態を変化させることができる可能性がある。そのような事例はまだ見つかっていないが、今後の皮膚感覚提示技術の発展に伴い、さまざまな状態を誘発する刺激のパラメータが明らかになるかもしれない。

触感のアート

絵画には、写実的なものだけでなく、抽象的なものも存在する。皮膚感覚提示技術を用いて生成した人工触感は、何らかの対象の触感を再現したのではない抽象的な触感であっても、アートという価値をもちうる。皮膚感覚提示技術の確立によって、アートの分野に従来にはない新しい概念を創出できるかもしれない。

用途の価値の分析

前章にて、皮膚感覚提示技術の用途を洗い出した。本章では、得られた用途の価値を複数の観点から分析する。さらに、分析結果を基に、皮膚感覚提示技術のあり方を提言する。まず、4.1節にて、価値の分析方法について述べる。4.2節および4.3節では、それぞれ触感ディスプレイおよび情報ディスプレイの価値を分析するとともに、それぞれのあり方を提言する。

4.1 価値の分析方法

前章で述べたように、皮膚感覚提示技術は、提示する基となる情報の特徴によって、触感ディスプレイと情報ディスプレイに大別できる。本研究では、それぞれの皮膚感覚提示技術の用途に対して、異なる方法で価値を分析する。本節では、それぞれの分析方法の概要を述べる。なお、本研究では、価値分析の第一段階として触感ディスプレイおよび情報ディスプレイについてのみ価値の分析を行う。3.2.3項で挙げたような「提示する基となる情報が存在しない用途」の価値分析については、今後の課題とする。

まず、触感ディスプレイの価値の分析方法について述べる。本研究では、1.2節の現状分析の結果に基づき、触感ディスプレイの価値を、

- (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提示技術の非代替性、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提示の技術的難易度、

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，皮膚感覚提示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，

- ・ 現状の技術力の有効的な活かし方
- ・ 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．

次に，情報ディスプレイの価値の分析方法について述べる．3.2.2項で述べたように，情報ディスプレイにおいては，必ずしも皮膚感覚で情報を提示しなくてもよく，視覚・聴覚・力覚などさまざまな提示方法が考えられる．どの感覚による提示が最も適しているかは，提示する情報の特性，外部環境，ユーザの特性などによって異なると考えられる．すなわち，皮膚感覚提示を用いた情報ディスプレイの価値とは，他感覚提示を用いた情報ディスプレイとのメリット・デメリットの比較分析を行うことで明らかになると考えられる．以上から，本研究では，視覚・聴覚・力覚・皮膚感覚提示をそれぞれ用いた情報ディスプレイのメリット・デメリットを複数の観点から分析する．分析結果を基に，視覚・聴覚・力覚など他感覚提示を用いた情報ディスプレイとの使い分けおよび統合のあり方について考察する．

4.2 触感ディスプレイの価値の分析

4.2.1 分析する用途の選択

まず，前章にて得られた皮膚感覚の用途の中から，価値を分析する用途を選択した．表4.1に，各用途において想定するユーザおよび市場規模を分析した結果を示す．表4.1における「想定するユーザの例」の欄には，各用途において最もユーザ数が多いと予想されるユーザの属性を示している．本研究では，これらの用途のうち，市場規模の大きさを考慮して，特にユーザを限定しない18の用途のみを価値の分析対象として選定した．

表 4.1 各用途が想定するユーザと市場規模の分析結果

用途	想定するユーザの例	市場規模
遠隔操作ロボットによる作業代行	医師など	中
遠隔触覚コミュニケーション	特にユーザを限定しない	大
外部環境の問題による接触不可の解消	手袋などを装着しなければならない環境に属するヒトなど	小
自身の問題による接触不可の解消	感染症を患っているヒトなど	小
触対象の問題による接触不可の解消	特にユーザを限定しない	大
携帯触感再生機	特にユーザを限定しない	大
触感の定量的表現	特にユーザを限定しない	大

快感覚の定常的提示	特にユーザを限定しない	大
ネットショッピング	特にユーザを限定しない	大
快感覚の VR 体験	特にユーザを限定しない	大
現実ではできないことの VR 体験	特にユーザを限定しない	大
環境の VR 体験	特にユーザを限定しない	大
職業訓練シミュレータ	医師など	中
操作フィードバック	特にユーザを限定しない	大
特定の行動の誘発	医師など	中
VR 空間上での痛みの提示	特にユーザを限定しない	大
暗黙知の定量的な提示	職人など	大
予測した触感情報の提示	特にユーザを限定しない	大
リスク回避のための触感情報の提示	特にユーザを限定しない	大
全皮膚感覚情報の増幅	触覚知覚能力が衰えたヒトなど	小
識別感覚の増幅	職人など	小
快感覚の増幅	特にユーザを限定しない	大
不快感覚の抑制	特にユーザを限定しない	大
快感覚の抑制	特にユーザを限定しない	大
触覚ノイズの遮断	職人など	小
不快感覚の遮断	特にユーザを限定しない	大
操作触感の最適化	特にユーザを限定しない	大
快触感による触行動の促進	特にユーザを限定しない	大
不快触感による触行動の抑制	特にユーザを限定しない	大

4.2.2 ニーズの調査

(a) 方法

本研究では、前項にて選定した 18 の用途のニーズを、アンケートによって調査した。まず、Microsoft Excel を用いてアンケートの作成を行った。付録 3 に作成したアンケートを示す。作成したアンケートは、

- ・ アンケート調査の目的
- ・ 皮膚感覚提示技術の説明
- ・ 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、皮膚感覚提示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、回答者は皮膚感覚提示技術の概要を知っている必要があるため、皮膚感覚提示技術の簡単な紹介を行った。表 4.2 に、アンケートに記載した各用途の説明文を示す。説明文中の(※)に関しては、別途説明を行った。表 4.2

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、各用途における

- ・ 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。回答者は20代～40代の男女18名である。なお、具体的な設問文や設問など、作成したアンケートの詳細に関しては、付録3を参照されたい。

表 4.2 アンケートに記載した用途の説明文

用途番号	用途	アンケートに記載した用途の説明文
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	触覚遠隔伝達デバイス（※）を用いて、遠隔地の家族、恋人、ペットなどと触れ合う。
3	遠隔触覚体験	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、触覚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	携帯触覚再生機	iPODに好みの音楽を入れて持ち歩くような感覚で、心地よい触覚・好みの触覚・覚えておきたい触覚など、所望の触覚を携帯型触覚提示デバイスに保存しておき、好きな時に提示する。
5	触覚の定量的表現	本などに記載されている触覚の定量的な表現（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覚を提示することでより直感的な理解を可能にする。
6	快覚の定常的提示	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。

(b) 結果および考察

図 4.1 に、各用途の個人の顕在的ニーズを問う設問で得られた得点の回答者間の平均と標準偏

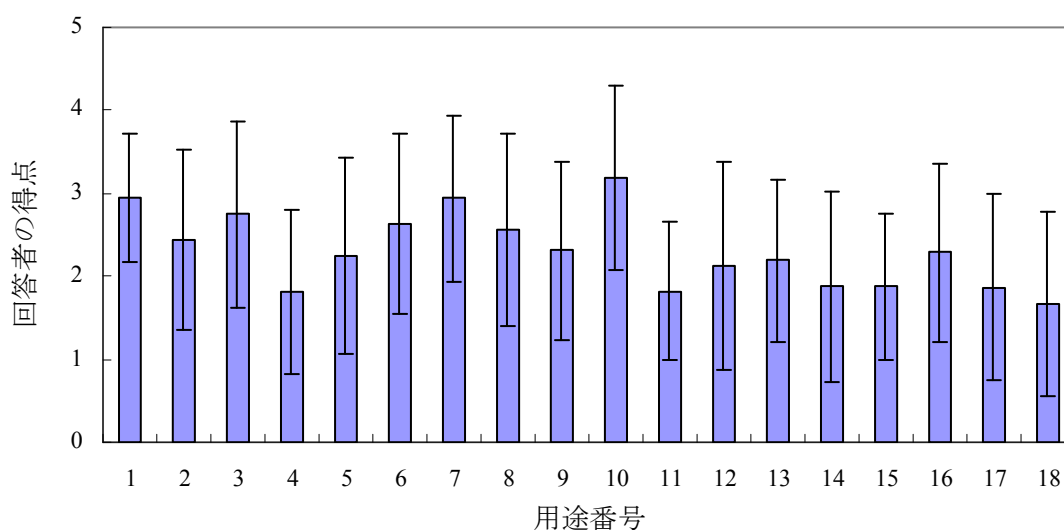


図 4.1 個人の顕在的ニーズの調査結果

差を示す。同様に、図 4.2 に各用途の個人の潜在的ニーズおよび社会的なニーズを問う設問で得られた得点の回答者間の平均と標準偏差を示す。なお、図 4.1～4.2 の横軸の用途番号 (1～18) は、表 4.2 の用途番号にそれぞれ対応している。また、以降の図に関しても、横軸の用途番号は表 4.2 に対応するものとする。

まず、個人の顕在的なニーズについて考察する。顕在的なニーズが高いと判断できる平均得点の目安を 2.5 (これまでに各用途を使ってみたいと時々～たびたび思うことがある) 以上とすると、該当する用途は、

- ・ 環境の VR 体験
- ・ 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
- ・ 操作フィードバック

であった。しかし、全ての用途において標準偏差が大きいため、用途間で平均得点に有意差はみられなかった。これは、回答者の属性や経験などによって潜在的なニーズは大きく異なるためであると考えられる。

次に、個人の潜在的なニーズをみてみたい。潜在的なニーズが高いと判断できる平均得点の目安を 5 (各用途が実現したとして、どちらかというと思ってみたいと思う) 以上とすると、該当する用途は、

- ・ 環境の VR 体験
- ・ 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

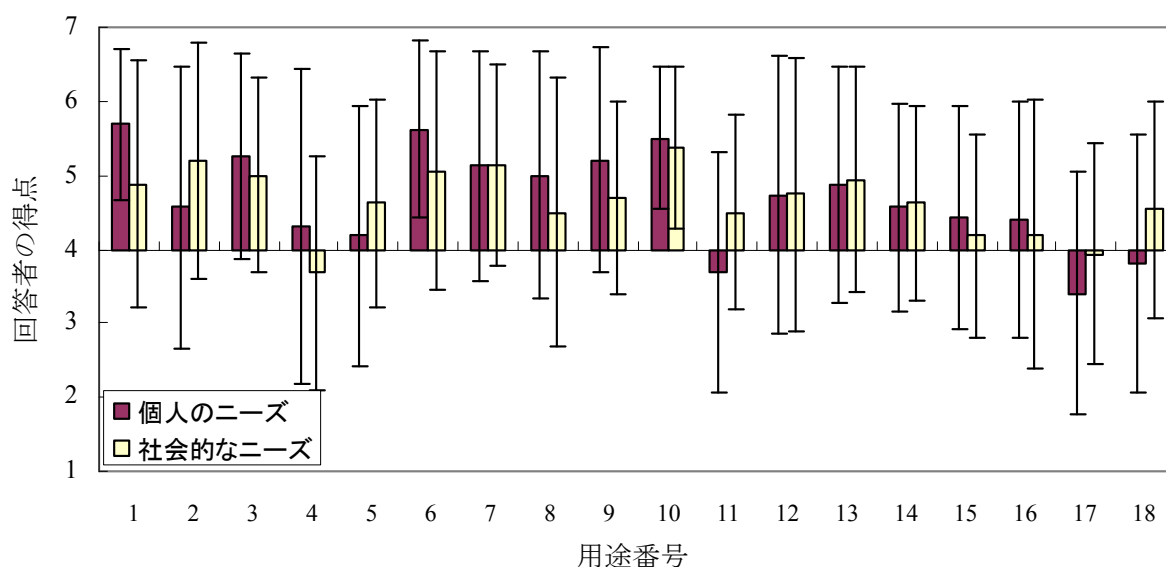


図 4.2 個人の潜在的ニーズおよび社会的ニーズの調査結果

- ・ 現実ではできないことのVR体験
- ・ 操作フィードバック

であった。これらの用途は、「現実ではできないことのVR体験」を除けば顕在的なニーズも高く、実現した際の普及が期待できる。用途番号4の「携帯触感再生機」は、標準偏差が非常に大きく、ニーズが高いと評価した回答者も存在したものの平均得点が低い結果になっている。これは、「携帯触感再生機」のような用途は、コンテンツの内容が非常に重要であるからと考えられる。実際に、「携帯触感再生機」をニーズが高いと評価した回答者は、自由記入欄にて、「コンテンツ次第では面白そう」「～の触感を持ち歩いてみたい」などと述べており、用途が実現した際のコンテンツがイメージできていると考えられるが、ニーズが低いと評価した回答者はそのような記述が一切なかった。また、用途番号2の「遠隔触覚コミュニケーション」も回答者間のばらつきが大きかった。自由記入欄に記述されていたコメントをもとに分析すると、「遠距離恋愛をしている」「単身赴任で家族と触れ合う機会が少ない」などのコメントをした回答者は、ニーズが高いと評価していた。一方で、「機械を介して触れ合うことに抵抗がある」と記述した回答者もいた。このため、「遠隔触覚コミュニケーション」を普及させるためには、いかにしてデバイスを介して触れ合うことに対する抵抗感を取り除くかを考慮することも重要であると考えられる。

また、回答者の属性ごとの回答の比較を行った。図4.3に、図4.2の結果を性別ごとに分けた結果を示す。図4.3より、女性の方がニーズが著しく高く評価された用途は、

- ・ 触感シミュレーション

であった。これは、上記2つの用途は、女性の方がより身近である衣類、小物類、化粧品などの触感の再現を想定しているためであると考えられる。一方で、男性の方がニーズが著しく高く評価された用途は、

- ・ 快感のVR体験
- ・ 現実ではできないことのVR体験

であった。これは男性の方がゲームなどVRを体験する機会が多いことが一つの要因として考えられる。

さらに、社会的なニーズについて考察する。個人の潜在的なニーズと同様に、ニーズが高いと

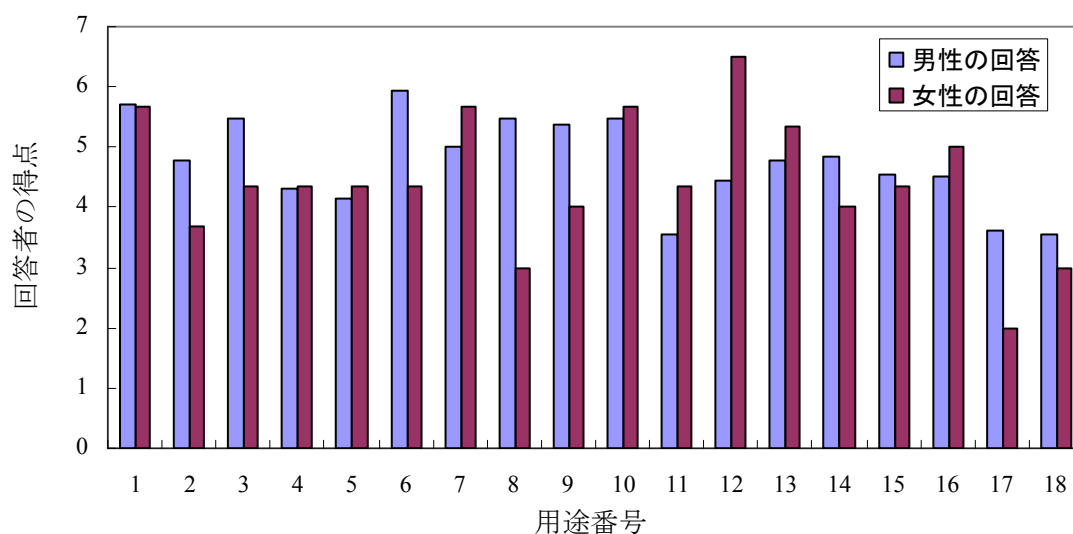


図4.4 男女別の個人の潜在的ニーズ

判断できる平均得点の目安を 5（各用途の社会的なニーズが、どちらかというところにあると思う）以上とすると、該当する用途は、

- ・ 遠隔触覚コミュニケーション
- ・ 遠隔触感体験
- ・ 快感覚の定常的提示
- ・ ネットショッピング
- ・ 操作フィードバック
- ・ 触感シミュレーション

であった。個人の潜在的なニーズと比較すると、

- ・ 遠隔触覚コミュニケーション
- ・ 触感シミュレーション

は、個人の潜在的なニーズが低いものの、社会的なニーズは高く評価されている。自由記入欄のコメントをもとに分析すると、「遠隔触覚コミュニケーション」については、地方の親などと離れて暮らす人々が増えてきていることから今後需要が増すなどの意見があり、「触感シミュレーション」については、近年の製品は触り心地、使い心地などで差別化が図られているため、事前に触感を体験できることの需要は高いなどの意見があった。一方で、

- ・ 快感覚の VR 体験
- ・ 現実ではできないことの VR 体験

は、個人の潜在的なニーズが高いものの、社会的なニーズは低く評価されている。こちらについても、自由記入欄のコメントをもとに分析すると、両用途とも、使ってみようと思うものの、VR のリアリティがますます向上することによって、現実との区別がつかなくなることに對して恐怖心や倫理的な抵抗感を持つなどの意見が目立った。このような意見は VR のリアリティを向上させることを目的とした研究分野全体に対する大きな課題であると考えられる。

以上の結果を踏まえて、総合的なニーズの評価について述べる。個人の顕在的ニーズ、潜在的ニーズおよび社会的ニーズがいずれも高く評価された用途は、

- ・ 環境の VR 体験
- ・ 遠隔触感体験
- ・ 快感覚の定常的提示
- ・ ネットショッピング
- ・ 操作フィードバック

であった。これらの用途は、個人のニーズが高く、社会的な需要も有すると評価した回答者が多かったことから、実現すれば普及することが大いに期待できる。また、個人の潜在的ニーズが高いものの、社会的なニーズが低かった

- ・ 快感覚の VR 体験
- ・ 現実ではできないことの VR 体験

についても、上述した VR の課題を解決することができれば、普及する可能性が高いと考えられる。

4.2.3 皮膚感覚付与効果の推定

(a) 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。1.2.3項で述べたように、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提示技術を用いても、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。

両者を分析する前に、まず、各用途において皮膚感覚を提示する目的を明確にした。日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割については、2章に明らかにした。しかし、例えば明らかにした12の役割の一つである「触対象の特徴の認識」は、触対象の触感情報を「調査する」として「体験する」との二つの異なる目的がある。前者については、触感情報を視覚情報として提示することで代替できるが、後者については代替が困難であると考えられる。したがって、各用途における皮膚感覚の提示目的を予め明確にすることは、皮膚感覚付与効果を推定する上で必要不可欠である。本研究では、2章で明確化した12の役割を、皮膚感覚を提示する目的に着目してブレイクダウンした。

次に、皮膚感覚提示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、皮膚感覚提示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提示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表4.3に示す評価基準で得点付けした。

さらに、提示する皮膚感覚への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、2章にて得られた日常動作・状態から抽出し、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は、2.3節にて調査済みである。2.3節の調査結果を用いて、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。

表4.3 非代替性の評価基準

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

(b) 結果および考察

まず、皮膚感覚を提示する目的を洗い出した結果、11の目的が得られた。得られた各目的と2章で明らかにした日常動作・状態において皮膚感覚が果たす12の役割との対応を、表4.4に示す。表4.4に示すように、皮膚感覚を提示する目的に着目すると、「触対象の特徴の認識」は『触感情報の調査』および『触感の体験』に、「能動的な快感の取得」は『快感の取得』および『触行動の誘発』に、「危険の感知」は『回避行動の誘発』および『危険部位の通知』にそれぞれブレークダウンされた。一方で、「周囲の変化の感知」および「周囲の定常の認識」に関しては、提示する目的に着目すると本質的な違いはないと判断したため、『周囲の情報の通知』としてまとめた。同様に、「能動的な快感の取得」および「受動的な快感の取得」は『快感の取得』、「能動的な安心感の取得」および「受動的な安心感の取得」は『安心感の取得』、「能動的な不快感の取得」および「受動的な不快感の取得」は『不快感の取得』としてそれぞれまとめた。

表 4.4 日常動作・状態における皮膚感覚の役割と皮膚感覚の提示目的の対応表

皮膚感覚を提示する目的 日常動作・状態における皮膚感覚の役割	触感情報の調査	触感の体験	作業の補助	周囲の情報の通知	触行動の誘発	快感の取得	安心感の取得	危険の学習	不快感の取得	回避行動の誘発	危険部位の通知
触対象の特徴の認識	○	○									
作業の補助			○								
周囲の変化の感知				○							
周囲の定常の認識				○							
能動的な快感の取得					○	○					
能動的な安心感の取得							○				
受動的な快感の取得						○					
受動的な安心感の取得							○				
危険の学習								○			
能動的な不快感の取得									○		
危険の感知										○	○
受動的な不快感の取得									○		

表 4.5 非代替性の評価結果

	用途	皮膚感覚を提示する目的	代替技術の例	代替性の評価	代替性評価理由
1	環境のVR体験	触感の体験	なし	3	触感情報を体験したいという欲求は、リアルな触感を提示することでしか満たせない

2	遠隔触覚コミュニケーション	安心感の取得	なし	3	触覚のインタラクションを目的とした場合には、他技術での代替は困難
3	遠隔触感体験	触感の体験	なし	3	触感情報を体験したいという欲求は、リアルな触感を提示することでしか満たせない
4	携帯触感再生機	快感の取得	なし	3	再生したい情報が皮膚感覚情報である場合には、他技術での代替は困難
5	触感の定量的表現	触感情報の調査	文字情報 聴覚情報	1	数値情報などで定量的に提示すれば、直感性では皮膚感覚に劣るが、十分代替可能
6	快感覚の定常的提示	快感の取得	なし	3	皮膚感覚によって得られる快感を他技術によって得ることは困難
7	ネットショッピング	触感情報の調査	文字情報	2	文字・数値情報として触感を表現することによって代替可能だが、直感性では大きく劣る
8	快感覚のVR体験	快感の取得	なし	3	皮膚感覚によって得られる快感を他技術によって得ることは困難
9	現実ではできないことのVR体験	触感の体験 快感の取得	なし	3	触感情報を体験したいという欲求は、リアルな触感を提示することでしか満たせない
10	操作フィードバック	作業の補助	視覚情報 聴覚情報	1	視覚・聴覚フィードバックでも操作性を高めることは可能だが、直感性、使用できる環境などさまざまな面で皮膚感覚には劣る
11	VR空間上での痛みの提示	危険の学習 回避行動の誘発 危険部位の通知	視覚情報 聴覚情報 力覚情報	1	直感性は劣るものの、視覚・聴覚情報でも危険警告は提示できる。また、痛みだけであれば力覚のみでも提示できる
12	触感のシミュレーション	触感情報の調査	文字情報	2	文字・数値情報として触感を表現することによって代替可能だが、直感性では大きく劣る
13	気温のシミュレーション	触感情報の調査	文字情報	1	数値情報などで定量的に提示すれば、直感性では皮膚感覚に劣るが、十分代替可能
14	危険警告の抑制	危険の学習 回避行動の誘発 危険部位の通知	視覚情報 聴覚情報	0	不快感覚を抑制して提示するよりも、完全に遮断した上で他感覚に変換して提示した方が有効である
15	快感覚の増幅	快感の取得	聴覚情報	1	触感+音による快感増幅など、増幅分を聴覚情報などで代替する方法もある
16	操作感の最適化	作業の補助 安心感の取得	視覚情報 聴覚情報	1	操作性向上のみなら視覚・聴覚フィードバックでも十分代替可能である
17	快触感による触行動の促進	触行動の誘発	聴覚情報	1	対象に触れた際に快の聴覚情報を提示することによっても触行動を促進できると思われる
18	不快触感による触行動の抑制	危険の学習 回避行動の誘発	聴覚情報	1	対象に触れた際に不快の聴覚情報を提示することによっても触行動を抑制できると思われる

表 4.6 皮膚感覚依存度の推定結果

	用途	皮膚感覚を提示する目的	類似した日常動作・状態	推定依存度
1	環境の VR 体験	触感の体験	・重力を知覚する ・今まで触れたことのないものに触れる	2
2	遠隔触覚コミュニケーション	安心感の取得	・子供の頭をなでる ・抱きしめられる	2
3	遠隔触感体験	触感の体験	・今まで触れたことのないものに触れる	3
4	携帯触感再生機	快感の取得	・ふわふわの毛皮に触れる ・手触りの良い布に触れる	3
5	触感の定量的表現	触感情報の調査	・果物が熟しているかどうか柔らかさで判別する ・箸を通して煮物の煮え具合を硬さで確認する	1
6	快感覚の定常的提示	快感の取得	・暑い時に扇風機に当たる	3
7	ネットショッピング	触感情報の調査	・布の手触りを確かめる	3
8	快感覚の VR 体験	快感の取得	・温泉に入浴する ・マッサージを受ける	3
9	現実ではできないことの VR 体験	触感の体験 快感の取得	・今まで触れたことのないものに触れる	3
10	操作フィードバック	作業の補助	・鉛筆で字を書く ・スプレーを押す	1
11	VR 空間上での痛みの提示	危険の学習 回避行動の誘発 危険部位の通知	・熱したフライパンに触れる ・ドライアイスに触れる ・蚊に刺されて痒くなる	3
12	触感のシミュレーション	触感情報の調査	・布の手触りを確かめる	3
13	気温のシミュレーション	触感情報の調査	・外に出て気温を把握する	3
14	危険警告の抑制	危険の学習 回避行動の誘発 危険部位の通知	・熱したフライパンに触れる ・ドライアイスに触れる ・蚊に刺されて痒くなる	3
15	快感覚の増幅	快感の取得	・ふわふわの毛皮に触れる ・温泉に入浴する	3
16	操作感の最適化	作業の補助 安心感の取得	・グリップ感の良いペンで字を書く ・切れ味の良い包丁で切る	2
17	快触感による触行動の促進	快感の取得	・プチプチを繰り返す ・心地よい感触のモノに触れたいと思う	3
18	不快触感による触行動の抑制	危険の学習 回避行動の誘発	・不快な感触のモノに触れたくないと思う	3

表 4.7 総合的な皮膚感覚付与効果の推定結果

	用途	皮膚感覚を提示する目的	代替性得点	依存度得点	皮膚感覚付与効果
3	遠隔触感体験	触感体験	3	3	3
4	携帯触感再生機	快感の取得	3	3	3
6	快感覚の定常的提示	快感の取得	3	3	3
8	快感覚の VR 体験	快感の取得	3	3	3
9	現実ではできないことの VR 体験	触感体験 快感の取得	3	3	3
1	環境の VR 体験	触感体験	3	2	2.5
2	遠隔触覚コミュニケーション	安心感の取得	3	2	2.5
7	ネットショッピング	触感情報の調査	2	3	2.5
12	触感のシミュレーション	触感情報の調査	2	3	2.5
11	VR 空間上での痛みの提示	危険の学習 回避行動の誘発 危険部位の通知	1	3	2
13	気温のシミュレーション	触感情報の調査	1	3	2
15	快感覚の増幅	快感の取得	1	3	2
17	快触感による触行動の促進	快感の取得	1	3	2
18	不快触感による触行動の抑制	危険の学習 回避行動の誘発	1	3	2
14	危険警告の抑制	危険の学習 回避行動の誘発 危険部位の通知	0	3	1.5
16	操作感の最適化	作業の補助 安心感の取得	1	2	1.5
5	触感の定量的表現	触感情報の調査	1	1	1
10	操作フィードバック	作業の補助	1	1	1

得られた 11 の目的を各用途に当てはめ、それらの目的を達成するための代替技術の分析結果および各用途の皮膚感覚提示技術の非代替性の評価結果を表 4.5 に示す。用途番号 14～18 までは、3.2.1 項の分類において、「カスタマイズして提示」および「異なる皮膚感覚情報に変換して提示」に分類された触感ディスプレイの用途であるが、非代替性の評価はいずれも 1 以下となった。カスタマイズして提示する触感ディスプレイの場合には、補正分を皮膚感覚ではなく、視覚・聴覚情報などで代替することが可能であると考えられる。また、異なる皮膚感覚情報に変換して提示する触感ディスプレイの場合には、皮膚感覚情報に変換するのではなく、視覚・聴覚情報などに交換するなどの方法で目的とした機能を果たせる可能性がある。例として、用途番号 17 の「快触感による触行動の促進」を挙げる。この用途は、本来は触れたくないモノの触感を快触感に変換

することで、触りたいという気持ちを誘発することが目的であるが、快感を必ずしも触感で提示する必要はない。階段をピアノのように音が出るようにすると、通常より66%多くの人がエスカレータではなくて階段を使ったという知見からも推定できるように、視覚・聴覚情報によって快感を提示しても触行動を誘発できると考えられる。基となる皮膚感覚情報を「リアルに再現して提示」する触感ディスプレイの用途に関しては、半数以上が他技術では代替できなかった。皮膚感覚を提示する目的が「触感情報の調査」である用途は、数値などの文字情報として提示すれば機能として十分であるため、非代替性を1とした。ただし、用途番号7の「ネットショッピング」については、皮膚感覚を提示する目的は「触感情報の調査」であるものの、着心地などの高次の皮膚感覚情報の取得が中心になると考えられ、数値情報などを用いた提示では直感的な判断が困難であるため、非代替性を2と評価した。また、用途番号11の「痛みの提示」については、危険警告自体は痛みではなく視覚・聴覚などを用いた警報などでも実現できるため、非代替性の評価を1とした。

次に、各用途の皮膚感覚依存度の推定結果を表4.6に示す。表4.6をみればわかるように、ほとんどの用途において、皮膚感覚への推定依存度は2以上であった。用途番号5の「触感の定量的表現」のみは、再現する情報として想定される情報の多くが力覚情報であったことから、皮膚感覚の依存度は低く評価した。その他については、2.3.2項で述べたとおりである。

最後に、各用途の代替性の評価および皮膚感覚への推定依存度を統合することで、総合的な皮膚感覚付与効果を評価した。それぞれの重みを1対1とすると、各用途の皮膚感覚依存度の大小は、表4.5と表4.6の得点の平均を求めることで比較できる。表4.4と表4.5の得点の平均を求め、平均が大きい順に用途を並べ替えた結果を表4.7に示す。表4.7をみてわかるように、皮膚感覚を提示する目的が等しくても、代替性の評価結果に差があるために、皮膚感覚付与効果にはばらつきがある。皮膚感覚を用いて達成する機能が「触感体験」である用途は、全て皮膚感覚付与効果が高い。一方で、「危険の学習」、「回避行動の誘発」など不快感覚を提示する用途は、他感覚低技術を用いて代替できるために、皮膚感覚依存度が高いにも関わらず皮膚感覚付与効果が低くなった。

4.2.4 実現可能性の評価

(a) 方法

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。表4.8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、1.2.3項で述べたように、表4.8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、デバイスのサイズの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。

表4.8 実現可能性に影響する要素の評価基準

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

表4.9 総合的な実現可能性の評価基準

得点	評価基準（目安）	評価の意味
0	技術的難易度が中、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	技術的難易度が中、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	技術的難易度が小、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

表 4.10 実現可能性の評価

	用途	技術的 難易度	デバイスの サイズの制約	触運動 自由度	総合 評価	評価理由
1	環境の VR 体験	中	小	小	2	既に実用化されているものも存在するが、コストに課題を残す
2	遠隔触覚コミュニケーション	大	中	中	1	触感の再現が困難
3	遠隔触感体験	大	中	中	1	触感の再現が困難
4	携帯触感再生機	大	大	中	0	触感の再現が困難である上に、携帯可能なサイズでなくてはならない
5	触感の定量的表現	中	小	中	2	単一の触感因子のみの提示でも実現可能であるが、コストに課題を残す
6	快感覚の定常的提示	大	大	小	0	現時点では、薄着でも温かい感覚などを提示するための理論が明らかでない
7	ネットショッピング	大	小	中	1	触感の再現が困難
8	快感覚の VR 体験	大	小	大	0	触感の再現が困難であることに加え、コストに大きな課題がある
9	現実ではできないことの VR 体験	大	小	大	0	触感の再現が困難であることに加え、コストに大きな課題がある
10	操作フィードバック	小	大	小	3	単純な刺激で実現できる。既に実用化されたものも存在する
11	VR 空間上での痛みの提示	中	大	小	2	危険部位を通知するためには、全身がデバイスで覆われている必要がある
12	触感のシミュレーション	大	小	中	0	触感の再現が困難であることに加え、触感情報を予測することが非常に困難
13	気温のシミュレーション	中	小	小	2	触感の再現自体は実現可能だが、普及させるためにはコストに課題を残す
14	危険警告の抑制	大	大	小～大	0	どのようにして不快感覚のみを選択的に抑制するのか、理論が明らかでない
15	快感覚の増幅	大	大	小～大	0	どのようにして快感覚のみを選択的に増幅するのか、理論が明らかでない
16	操作感の最適化	中～大	大	中	1	最適な操作感の提示が少々困難。デバイスの簡素化に課題を残す
17	快触感による触行動の促進	中～大	大	大	1	触行動を促進するほどの快触感の生成が少々困難。デバイスの簡素化も課題
18	不快触感による触行動の抑制	中	大	大	2	不快触感の提示自体は可能だが、デバイスの簡素化に課題を残す

次に、各要素の評価をもとに、表 4.9 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。表 4.9 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、必ずしも表 4.9 に示す評価基準に従わないものとした。

(b) 結果および考察

表 4.10 に、各要素の評価結果と、総合的な実現可能性の評価結果を示す。用途番号 14 の「不快感覚の抑制」および 15 の「快感覚の増幅」については、能動的に触運動を行うかどうかは、目的によって異なることから、触運動自由度を「小～大」のように評価した。また、用途番号 16 の「操作感の最適化」および 17 の「快触感による触行動の促進」については、ユーザによって要求される触感が異なると考えられ、技術的難易度を正確に推定できないため、「中～大」のように評価した。総合的な実現可能性については、表 4.9 の評価基準に従っていないものは、その理由を評価理由の欄に記述した。

表 4.10 より、実現可能性が 3 と評価された用途は、用途番号 10 の「操作フィードバック」のみであった。1.2.1 項で述べたように、単純な振動刺激による操作フィードバックは既に実用化されているため、本評価結果は妥当であると考えられる。実現に向けた課題をわずかに残す用途は、

- ・ 環境の VR 体験
- ・ 触感の定量的表現
- ・ VR 空間上での痛みの提示
- ・ 気温のシミュレーション

であった。いずれも触感の提示自体は現状の技術レベルで実現可能であるが、デバイスの簡素化や普及させるためのコストの低下に課題を残している。一方で、実現可能性が 0 と評価された用途は、

- ・ 携帯触感再生機
- ・ 快感覚の定常的提示
- ・ 快感覚の VR 体験
- ・ 現実ではできないことの VR 体験
- ・ 触感のシミュレーション
- ・ 危険警告の抑制
- ・ 快感覚の増幅

であった。評価の理由としては、デバイスサイズの制約などに大きな課題を有することや、要求される触感の提示の実現が理論的に明らかでないことなどが挙げられる。こうした用途は、ニーズがよほど高くない限りは、開発にコストをかけることは有効ではないと考えられる。

4.2.5 考察

前項までの分析結果をもとに、総合的に価値が高いと考えられる皮膚感覚提示技術の用途を明

確にした。表 4.11 に、各観点の評価が高い用途を示す。本研究では、簡単のため、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、皮膚感覚付与効果に関しては表 4.7 の推定値が 5 以上、実現可能性に関しては表 4.11 の総合評価値が 2 以上の用途を抽出した。

表 4.11 ニーズ，皮膚感覚付与効果および実現可能性の評価値が高い用途

	用途	ニーズ	皮膚感覚付与効果	実現可能性	図 4.11 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

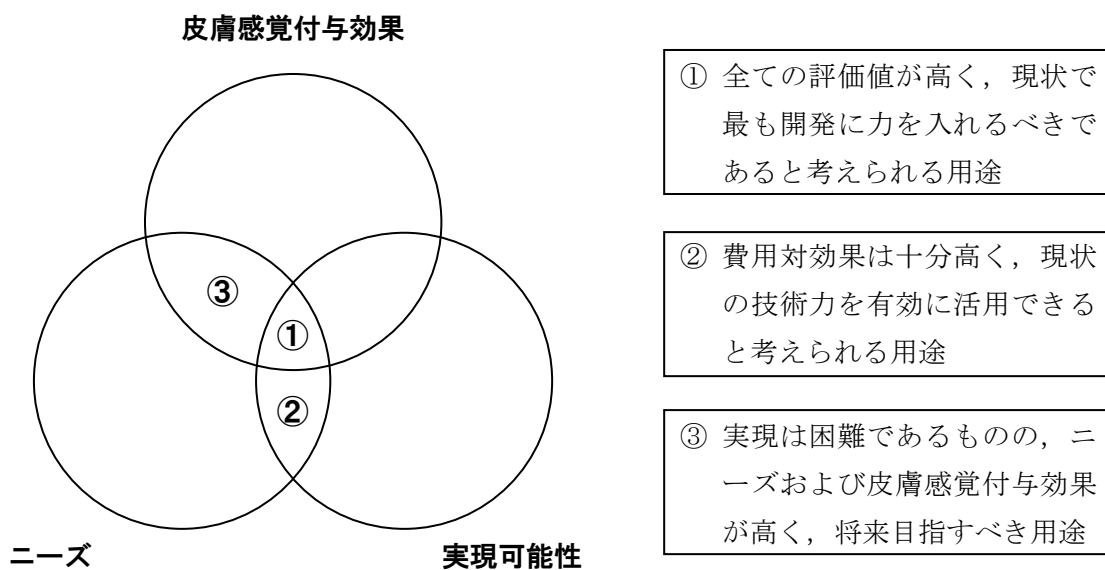


図 4.11 各要素の評価値と用途の価値の関係

表 4.11 に示した結果を基に、皮膚感覚提示技術のあり方について考察した。図 4.11 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、皮膚感覚提示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、皮膚感覚を用いる恩恵が劣るものの、実現に向けた課題がほとんどないことを考慮すれば、費用対効果は「環境の VR 体験」に決して劣らないと考えられる。皮膚感覚付与効果が決して高くはないとはいえ、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。

以上から、

- ・ 現状の技術力を有効に活用した用途
- ・ 将来的に価値が高いと考えられる用途

を明確にすることができた。今後は、各用途に特化したニーズ調査およびコスト分析を行うことで、各用途の実現のために投じるべきコストを明確にすることができると考えられる。また、これらの用途の実現を前提とすることで、開発の指針が明確になり、従来よりも効率的な技術開発を行うことができると考えられる。

4.3 情報ディスプレイの価値の分析

4.3.1 他感覚提示による情報ディスプレイとの比較分析

(a) 方法

本研究では、9つの観点で、視覚・聴覚・力覚・皮膚感覚提示による情報ディスプレイを比較分析した。図4.6に、比較項目の概要を示す。以下に各々の項目の詳細を述べる。

(1) 情報の多様性

各感覚提示デバイスのパラメータの多さを比較した。パラメータが多いほど、多様な情報が表現できるため有利であると考えられる。

(2) デバイスのサイズ

提示デバイスのサイズは、提示する情報の種類や目的によって異なるため、単純に比較することはできないため、本研究では、実現可能な最小のサイズを比較した。小型でも多様な情報を提示できる感覚提示デバイスがサイズの側面ではメリットが大きいと考えられる。

(3) デバイスとの距離

情報を提示するために必要なユーザと各感覚提示デバイスとの距離を比較した。デバイスの設置場所の自由度を考慮すると、デバイスとの距離に対する制約が少ないほうが望ましいと考えられる。

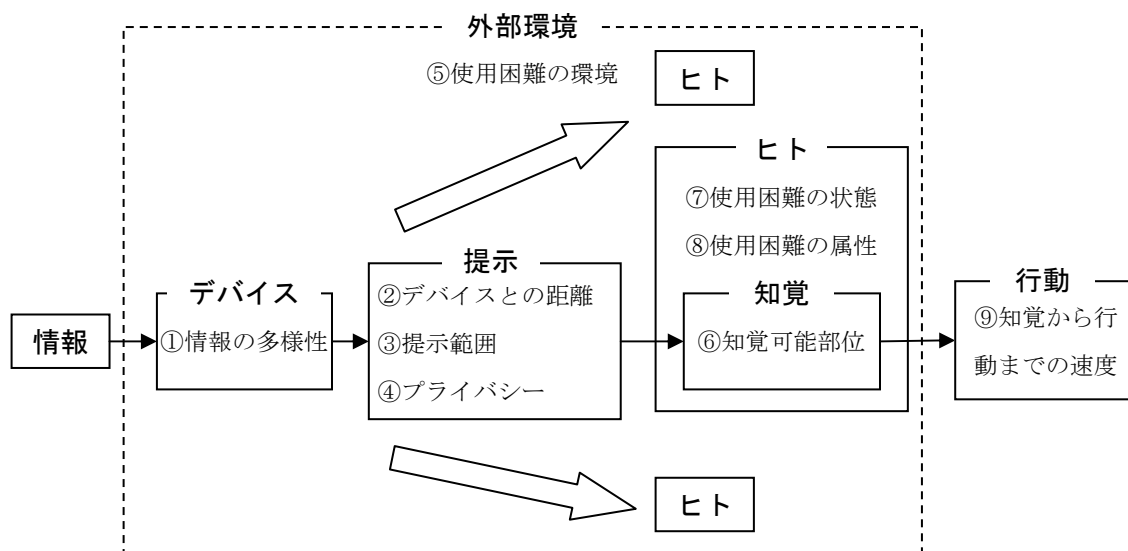


図4.6 情報ディスプレイの比較項目

(4) 提示範囲

一つの提示デバイスを用いて情報を提示可能な範囲を比較した。少ない要素でより広範囲に提示できた方が有利であると考えられる。

(5) プライバシー

各感覚提示デバイスを用いて情報を提示する際のプライバシーを比較した。提示する情報の機密性が高い際には、想定していない人に情報が伝達してしまうリスクが少ない方が望ましいと考えられる。

(6) 使用困難の環境

各感覚提示を行うことが困難な外部環境を比較した。挙げられた環境が少ないほど、使用環境の側面で有利であると考えられる。

(7) 知覚可能部位

各感覚を知覚可能な部位を比較した。携帯電話のように身体に密着させることが多いデバイスでは、知覚可能な部位が多いほどデバイスの設置場所の自由度が大きいため有利であると考えられる。

(8) 使用困難の状態

各感覚提示デバイスを用いるのが困難なユーザの状態を比較した。例えば、ユーザが目を閉じている状態では視覚提示デバイスを用いることができない。このような使用困難なユーザの状態が少ないほうが有利であると考えられる。

(9) 使用困難の属性

各感覚提示デバイスを用いるのが困難なユーザの属性を比較した。例えば、視覚障害者は視覚提示デバイスを用いることができない。より多くの方が同様のデバイスを用いることができるため、使用困難な属性の人口は少ない方が望ましいと考えられる。

(10) 知覚から行動までの速度

例えば、危険警告の提示は回避行動を誘発することが主目的であるように、なんらかの行動を誘発する目的で情報提示を行う場合がある。そうした用途では、提示された情報を知覚してから、行動に至るまでの速度が重要であると考えられる。

(b) 結果

比較分析結果を表 4.12 に示す。各比較項目において、最もメリットが大きいと考えられるものを濃く、最もデメリットが大きいと考えられるものを薄く着色した。以下に、それぞれの項目の比較分析結果について詳細を述べる。

表 4.12 情報ディスプレイの比較分析結果

	比較項目	視覚	聴覚	力覚	皮膚感覚
1	情報の多様性	多	多	少	中
2	デバイスのサイズ	中	小	大	中
3	デバイスとの距離	離れていても可	離れていても可	接触が必要	接触が必要
4	提示範囲	中	広い	狭い	狭い
5	プライバシー	周囲にも見える 可能性がある	周囲にも聞こえ る可能性がある	触った人のみに 伝わる	触った人のみに 伝わる
6	使用困難の環境	暗闇、公共の場な ど	騒音時、公共の場 など	特になし	特になし
7	知覚可能部位	目のみ	耳のみ	全身どこでも	全身どこでも
8	使用困難の状態	目を閉じている ときなど	耳を塞いでいる ときなど	特になし	手袋着用時など
9	使用困難の属性	視覚障害者 0.25%	聴覚障害者 0.25%	触覚障害 稀 肢体不自由者	触覚障害 稀 肢体不自由者
10	知覚から行動までの速度	一度認識してか ら反応	一度認識してか ら反応	一度認識してか ら反応	反射を促すこと が可能

(1) 情報の多様性

視覚・聴覚提示の場合は、それぞれ文字・音声などを用いることによって多様な情報を表現することが可能であるが、触覚の場合はパラメータ数が少ない。特に、力覚提示のみでは、パラメータが力情報しかないため、多様な情報の表現は困難であると考えられる。

(2) デバイスのサイズ

力覚提示デバイスは原理的に小型化が困難であるのに対し、視覚、聴覚および皮膚感覚提示デバイスは小型化が比較的容易である。また、視覚および皮膚感覚提示デバイスは、多様な情報を提示するためには提示部の面積がある程度大きい必要があるのに対し、聴覚提示デバイスは小型でも多様な情報の提示が可能である。

(3) デバイスとの距離

力覚・皮膚感覚提示の場合には、提示デバイスとユーザは必ず接触している必要があるが、視覚・聴覚提示の場合は、両者の距離はある程度離れていてもよい。したがって、デバイスの設置場所の自由度の観点では、視覚・聴覚提示の方が有利だと考えられる。

(4) 提示範囲

視覚・聴覚提示の場合は、一つのデバイスで複数人に情報を提示可能であるが、力覚・皮膚感

覚提示の場合には、デバイスとヒトとが接触する必要があるために、複数人に情報を提示することは困難である。

(5) プライバシー

提示する情報の機密性が高い際には、提示範囲が狭い方が周囲に情報が漏れるリスクが小さいと考えられる。したがって、プライバシーの側面では、力覚・皮膚感覚提示の方が視覚・聴覚提示と比較して有利であると考えられる。

(6) 使用困難の環境

視覚および聴覚提示デバイスは、公共の場では周囲に迷惑をかけるため使用が制限される。これは、携帯型の提示デバイスを用いる際には大きなデメリットである。一方で、力覚・皮膚感覚提示デバイスは使用が制限される環境は特にない。

(7) 知覚可能部位

視覚および聴覚提示は、それぞれ目および耳に対して行う必要があるため、携帯型の提示デバイスを用いる際には装着部位が制限される。また、目や耳に装着した場合は、デバイスを隠すことが困難であるというデメリットがある。それに対し、力覚・皮膚感覚提示は提示部位に制限がない。

(8) 使用困難の状態

視覚、聴覚および皮膚感覚提示は、それぞれ目を閉じる、耳をふさぐおよび手袋をはめることなどによって各感覚の知覚能力を抑制された場合には使用が困難である。一方で、力覚提示は、使用が制限されるユーザの状態は特にない。

(9) 使用困難の属性

視覚および聴覚提示技術をそれぞれ使用することが困難な視覚障害者および聴覚障害者は日本国内でそれぞれ約30万人存在することが知られている[@情報通信研究機構]。これに対し、力覚および皮膚感覚提示技術をそれぞれ使用することが困難な触覚障害を患う人は世界的にみても非常に稀である。したがって、力覚・皮膚感覚提示技術の方がよりユニバーサルな技術であると考えられる。

(10) 知覚から行動までの速度

視覚・聴覚・力覚提示によって危険警告を提示する場合は、ヒトは脳内で危険警告を認識してから回避行動に移る。一方で、皮膚感覚によって危険警告を提示する場合は、痛みなどの感覚を提示することで反射を促すことが可能である。したがって、回避行動に移るまでの速度は皮膚感覚を提示した場合が最も速いと考えられる。また、単純な反応時間においても、触覚は五感の中で優れていることが知られている[Sato 92]。

表 4.13 皮膚感覚による情報提示の適正

情報の種類	情報の多様性	デバイスのサイズ	デバイスとの距離	提示範囲	プライバシー
視覚代行	多い	小さい方が望ましい		狭い	重要
聴覚代行	多い	小さい方が望ましい		狭い	重要
着信情報	少ない	小さい方が望ましい		狭い	
時刻情報	多い	小さい方が望ましい			
道案内情報	少ない	小さい方が望ましい		狭い	
状態の悪化	中	小さい方が望ましい		狭い	
残量情報	中	小さい方が望ましい		狭い	
心理情報	多い	小さい方が望ましい			重要
操作フィードバック	少ない	小さい方が望ましい		狭い	
危険な対象に感覚情報を付与	少ない	小さい方が望ましい	離れていた方が望ましい	広い	
周囲の危険情報	少ない	小さい方が望ましい	離れていた方が望ましい	広い	

情報の種類	使用困難な環境	知覚可能部位	使用困難な状態	使用困難な属性	知覚から行動までの速度
視覚代行	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
聴覚代行	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
着信情報	少ない方が望ましい	多い方が望ましい	少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
時刻情報	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
道案内情報	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
状態の悪化	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
残量情報	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
心理情報	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	
操作フィードバック	少ない方が望ましい		少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	速い方が望ましい
危険な対象に感覚情報を付与	少ない方が望ましい	多い方が望ましい	少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	速い方が望ましい
周囲の危険情報	少ない方が望ましい	多い方が望ましい	少ない方が望ましい	少ない方が望ましい	速い方が望ましい

4.3.2 考察

前項の比較分析結果をもとに、どのような情報に皮膚感覚提示を用いるのが適しているかを分析した。本研究では、特に重要性が高いと考えられることから、3.2.2 項の表 3.6 に示す情報を用いて分析を行った。各情報の適性を表 4.12 における比較項目ごとに分析した結果を表 4.13 に示す。皮膚感覚提示技術が適していると思われる項目は濃く、適していないと思われる項目は薄く着色した。なお、未目的によって適性が異なるために正確な適性を判断することが困難な項目は、未記入とした。

表 4.13 より、

- ・ 着信情報
- ・ 道案内情報
- ・ 状態の悪化
- ・ 残量情報
- ・ 操作フィードバック

は、全ての項目において皮膚感覚提示技術が適しているため、皮膚感覚提示によってこれらの情報を提示することは非常に有効であると考えられる。ただし、表 4.13 では未記入であるが、デバイスとの距離については状況次第では接触しなければ知覚できないことが不利になる場合もあり得る。例えば、電話の着信情報などは、携帯していない際には、離れていても情報が知覚できなくてはならない。こうした場合には、聴覚提示に切り替えたり、聴覚と皮膚感覚情報を統合して提示する必要があると考えられる。

- ・ 危険な対象に感覚情報を付与
- ・ 周囲の危険情報

など、危険警告を目的とした情報については、危険な対象から離れていた方がよいため、デバイスとの距離においては皮膚感覚による提示は不利である。一方で、知覚から行動までの速度に関しては有利である。このため、危険警告を目的とした情報については、視覚・聴覚情報と皮膚感覚情報を統合して提示することで、互いのデメリットを補完することが可能であると考えられる。

- ・ 視覚代行
- ・ 聴覚代行

など、感覚代行を目的とした情報については、文字・音声を用いることができる視覚・聴覚情報

表 4.14 皮膚感覚提示が適した情報のまとめ

皮膚感覚のみで提示することが適した情報	状況に応じて視覚・聴覚提示と皮膚感覚提示を切り替えることが適した情報	視覚・聴覚と皮膚感覚を統合して提示することが適した情報	皮膚感覚以外の感覚で提示することが適した情報
<ul style="list-style-type: none"> ・ 道案内情報 ・ 状態の悪化 ・ 残量情報 ・ 操作フィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 視覚代行 ・ 聴覚代行 ・ 着信情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 危険な対象に感覚情報を付与 ・ 周囲の危険情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 時刻情報 ・ 心理情報

が情報の多様性では最適であるが、その他の項目に関しては皮膚感覚提示の方がメリットが大きい。訓練が必要であるが、点字を用いることによって、最低限の文字情報は皮膚感覚提示でも表現可能である。このため、視覚・聴覚提示を用いることができない環境では、皮膚感覚提示によって感覚代行を行うなどの工夫が必要である。

以上の考察を、表 4.14 のようにまとめた。表 4.14 に示すように、本研究にて行った分析により、皮膚感覚提示技術を用いた情報ディスプレイと視覚・聴覚・力覚など他感覚提示技術との使い分けおよび統合のあり方が明らかになった。本研究にて適性の分析を行った情報は、ほんの一例であるが、他の情報についても同様に分析を行うことで、どの感覚情報によって提示するのが最適であるかを判断できると考えられる。

用途の価値の検証

本章では、前章にて分析した皮膚感覚提示技術の用途の価値を検証する。まず、5.1 節にて価値の検証方法について述べる。5.2 節では、これまでに実用化された用途の事例を用いて価値を検証する。5.3 節および 5.4 節では、前章にて価値が高いと分析された用途のプロトタイプを構築し、実験およびアンケートによってニーズおよび皮膚感覚付与効果を検証する。

5.1 価値の検証方法

前章にて価値を分析した用途のうち、すでに実用化された用途に関しては、事例分析によって価値の検証を行った。実用化されていない用途に関しては、用途のプロトタイプを構築し、構築したプロトタイプを用いてニーズ、皮膚感覚付与効果および実現可能性を評価した。しかし、本研究で価値を分析した用途の大半は実用化されていないため、全ての用途のプロトタイプを構築することは困難である。したがって、本研究では、価値の検証の第一段階として、ニーズ、皮膚感覚付与効果および実現可能性の三つの観点から価値を分析した結果、総合的な価値が高いと評価された

- ・ 操作フィードバック
- ・ 遠隔触感体験

のプロトタイプを構築した。「操作フィードバック」については、タッチパネル操作において使用頻度の高いボタン押下操作およびページ送り操作に対して、皮膚感覚によって操作フィードバックを提示可能なシステムのプロトタイプを構築した。構築したプロトタイプに関して、官能評価実験を行うことによって、提示した皮膚感覚のリアリティと操作性を検証した。詳細は 5.3 節にて述べる。「遠隔触感体験」については、直接接触することはできないが間接的であれば触ってみたい対象として最も票を集めた動物に着目し、マスタ・スレーブ型触感伝達システムを用いて動物の皮膚感覚を伝達可能なシステムのプロトタイプを構築した。構築したプロトタイプを用いて被験

者に動物の触感を体験してもらい、その際の満足度を評価した。詳細は 5.4 節にて述べる。以上によって、前章における用途の価値分析結果の妥当性を検証した。

5.2 実用化された事例による検証

本節では、これまでに実用化されるとともに、普及している皮膚感覚提示技術の用途である (a) 環境の仮想体験アトラクション、(b) 携帯電話のバイブレーション機能および (c) 点字ディスプレイの三つに着目し、それぞれの用途が普及している要因を、前章にて行った価値の分析結果に基づいて考察する。

(a) 環境の仮想体験アトラクション

前章にて、「環境の VR 体験」がニーズ、皮膚感覚付与効果および実現可能性の全ての面において、高い評価を得た。一部の環境を仮想的に体験することのできる装置はすでに実用化されている。例として、ニュージーランドの国際南極センターでは、南極の極寒を仮想的に体験することができるアトラクションが人気を集めている。このアトラクションでは、気温を再現するだけでなく、図 5.1 に示すように 30 分ごとに南極の嵐をシミュレートして風が吹き荒れるなど、南極におけるさまざまな気候を体験することができる。国際南極センターは、クライストチャーチで最も人気のある観光施設となっている。その要因としては、南極の極寒を、単に映像だけでなく、皮膚感覚を介して体験することができるからであると考えられる。一方で、デバイスが大型・複雑であることや、生産・運営コストなどを考慮すると、普及を目指した場合にはいくつか課題がある。以上から、4.2.5 項における「環境の VR 体験」のニーズ、皮膚感覚付与効果および実現可能性の調査結果は妥当であるといえる。



図 5.1 南極の極寒を体験できるアトラクション
[www.iceberg.co.nz より転載]

(b) 携帯電話のバイブレーション機能

1.2.1 項で述べたように、携帯電話のバイブレーション機能は、現在最も普及している皮膚感覚提示技術を用いたアプリケーションである。本研究で洗い出した用途に当てはめると、携帯のバイブレーション機能は、主に着信情報を皮膚感覚によって提示する情報ディスプレイであると考えられる。バイブレーション機能が普及した要因が、

- ・ 公共の場でも使用可能であること
- ・ 接触している身体の一部によらず情報が提示可能であること
- ・ デバイスに接触しているユーザのみに情報が提示されるため、プライバシーの面で優れていること

などであることや、状況に応じて聴覚提示と皮膚感覚提示を切り替えて利用している現状を考えれば、4.3.2 項における分析結果は妥当であると考えられる。

(c) 点字ディスプレイ

点字ディスプレイは、OPTACON に代表されるように、視覚障害者を中心に現在広く普及している。点字ディスプレイは、文字という視覚情報を点字という皮膚感覚情報に変換して提示する情報ディスプレイである。点字の読解に熟達していれば、健常者が文字を読むのと同等の速度にて、点字で表現される文章を読むことが可能である。視覚障害者は、音声を主要な情報取得源としているが、状況に応じて点字ディスプレイを使用する。このことから、4.2.3 項における視覚代行情報の分析結果は妥当であると考えられる。視覚障害者が主要なユーザである一方で、聴覚障害者にはほとんど用いられない。聴覚障害者は、音声情報の代替として点字ではなく文字情報を用いる。これは、文字情報の方が、点字と比較して利便性が大きいためであると考えられる。しかし、聴覚障害者の言語情報の代替として皮膚感覚提示が用いられることはないものの、危険警告情報などは皮膚感覚によって提示される場合もある。したがって、4.2.3 項における聴覚代行情報の分析結果も妥当であると考えられる。

5.3 タッチパネル上での皮膚感覚提示による検証

本節では、「操作フィードバック」の一例として、タッチパネル上でリアルな皮膚感覚フィードバックを提示することのできるシステムのプロトタイプを構築し、リアルな皮膚感覚フィードバックが操作性に及ぼす効果を官能評価実験によって評価する。

5.3.1 概要

4.2.2 項の分析結果より、皮膚感覚提示技術を「操作フィードバック」として用いることに対するニーズが高いことがわかった。この背景には、近年のタッチパネルの急速な普及がある。タッチパネルは、表示画面を指で触れることにより操作可能な入力インタフェースとして近年注目されている。最近では、タッチパネルはATMなどの公共システムをはじめ、Apple社 iPhone や電子

ブックなどの携帯機器，カーナビゲーションシステムなどに搭載され，ますます普及が進んでいる．しかし，タッチパネルでの操作は，従来の機械式ボタンと比べて触覚を介した操作感フィードバックに乏しいという問題を抱えている．このため，現在ではタッチパネル入力に対するフィードバックとして，確認音や画面効果など聴覚および視覚に訴える手法が多く採用されている．しかし，効果音を用いた聴覚による情報提示は，公共空間や外部騒音など環境上の制約によっては利用できないという問題がある．また，画面効果を用いた視覚による情報提示では操作者自身の手指によって画面の一部が隠されてしまう問題がある．また，視覚の単純反応時間は触覚および聴覚に比べて遅く，認知に多少の労力と時間が必要となる[Sato 92]．視線を手元に集中させてしまうと，周囲への注意が疎かになり，例えば自動車の運転中の危険につながるおそれがある．このように，聴覚および視覚による操作感フィードバックは，操作者に対する情報フィードバックとして十分ではない．操作に対する操作感フィードバックの欠如は，無自覚の誤入力や作業速度の低下に繋がると考えられる．以上から，皮膚感覚提示による操作フィードバックに対する需要は極めて高いと考えられる．

ボタン操作に特化した触覚フィードバックを付与した例として，タッチパネル上に設置可能な，長谷川らが開発した CC スイッチ[Hasegawa 96]や新井らの透明スイッチ[Arai 05]が挙げられる．これらは，タッチパネル上にスイッチ要素を設置することによって，タッチパネルの触覚フィードバックの欠如を補っている．しかし，このような機構要素を利用すると，タッチパネルの利点である画面レイアウトの変更などの運用に対応出来ない．その他，筐体全体あるいは表示パネルを振動させることにより，手指に触覚を介して刺激を与える手法も提案されている．Fukumoto らの Active Click[Fukumoto 01]や赤羽らの Tactile Panel[Akabane 06]では，ボタン押下触感を提示するための振動波形について検討している．また，Samsung Mobile 社のスマートフォン OMNIA では，振動によって各種触覚フィードバックが与えられる．しかし，これらの触覚は，実際にボタンを押したり，物を動かしたりした際とは異なり，機械的な振動感であるため，機械式ボタンを有するインタフェースと同等の操作性を実現できてはいない．以上から，実際のボタンを押したような違和感のない動作をタッチパネル上で実現する技術の確立が求められている．

本研究では，タッチパネル操作において使用頻度の高いボタン押下操作およびページ送り操作について，現実に近い皮膚感覚フィードバックを提示可能なシステムのプロトタイプを構築する．本研究で構築するシステムのポイントは二つある．まず，操作速度に対しロバストな操作性を実現するために，押下力および接線力を検出し，操作トリガとして用いることである．つぎに，実際にボタン操作した際およびページを繰った際に指に伝達される力の振動を，リアルに再現することである．これらのポイントを踏まえた上で実現したシステムのプロトタイプを用いて，ボタン押下操およびページ繰り操作の操作性についてそれぞれ検証する．

5.3.2 プロトタイプの構築

(a) 構築したシステムの概要

構築したボタン押下触覚提示システムおよびページ繰り触覚提示システムのプロトタイプをそれぞれ図 5.2 に示す．図 5.2 (a) に示すように，構築したシステムは，金属板ばねとひずみゲージ

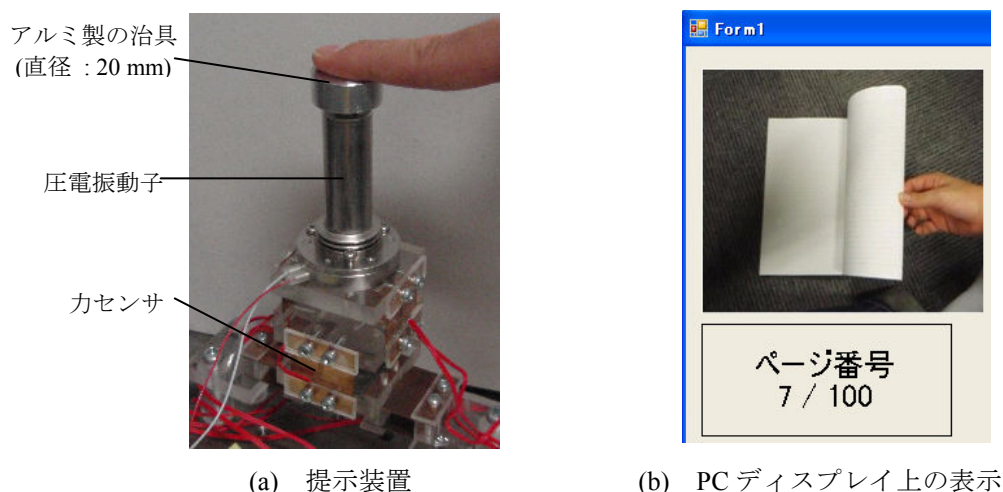


図 5.2 構築した触感提示システム

からなる力センサおよび圧電振動子によって構成される。圧電振動子は、触感提示面に対して法線方向に振動する。なお、両システムの制御周期は 5 ms とした。振動子には、振動提示面積増大のため、アルミ製の治具が設置されている。治具上に一定の法線および接線方向の力を加えると、ユーザにはボタン押下触感およびページ繰り触感がそれぞれ提示される。本システムの目的は、タッチパネルの操作性向上のため、皮膚感覚提示部が映像などと統合可能なパネルで構成されていることが望ましい。しかし、本研究では原理確認を主目的とするため、図 5.2 (b) に示すように、ボタン押下およびページ繰り操作と同期して、PC のディスプレイ上でページ番号やページが繰られる画像などが表示されるシステムによって代替した。

本システムのポイントは、

- 皮膚感覚を提示するタイミング
- 提示する刺激

を、実際の機械式ボタンの押下およびページ繰り動作の力学的特徴に基づき決定したことにある。これによって、従来のシステムと比較して、より違和感なくボタン押下およびページ繰り動作を行えることが期待できる。以下に、ボタン押下およびページ繰り触感提示手法の詳細を述べる。

(b) ボタン押下感提示手法

実際のボタンを押したような感覚を提示するためには、(1) 皮膚感覚を提示するタイミングおよび (2) 提示する刺激の二つが重要な要素であると考えられる。本研究では、複数の官能評価実験を行うことによって、最もボタンらしい感覚を実現可能な提示タイミングと提示刺激を決定した。

まず、どのような情報を用いて皮膚感覚提示のタイミングを規定するべきかを検討した。これまでに提案されているタッチパネルのボタン操作に伴うフィードバックタイミングの設計としては、おもに、

- タッチ時およびリリース時の 2 回あるいはいずれか 1 回は刺激を提示

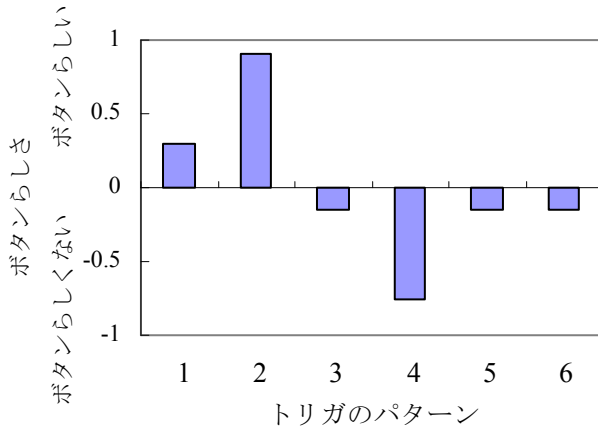


図 5.3 ボタンらしさの評価結果

表 5.1 トリガパターン

トリガパターン	押下		開放	
	法線力 [N]	振動時間 [ms]	法線力 [N]	振動時間 [ms]
1	1.1	-	-	-
2	1.1	-	1	-
3	-	50	-	-
4	-	50	-	80
5	-	80	-	160
6	-	120	-	240

・ タッチ検出から一定時間経過後にボタン押下時のクリック感に相当する刺激を提示する方法が挙げられる。タッチパネルはタッチに敏感に反応するため、前者では、触感刺激が触れた直後および離れる直前に与えられる。このときの押下力は小さいため、ボタンを押し込んだような感覚は得られない。一方、後者のような時間遅れによるボタン振動刺激では、不自然なタイミングでフィードバックが与えられる可能性がある。すなわち、クリック触感は、押下力あるいはストロークに依存するため、ボタン操作速度によってはタイミングがずれることとなる[Fujimoto 85]。本研究では、複数のフィードバックタイミングパターンを有する擬似ボタンを製作し、官能評価実験によってそれぞれを比較することにより、適切なフィードバックタイミングを決定した。比較パターンとして、

- ・ フィードバックタイミング：タッチ検出からの時刻遅れ，押下力
- ・ フィードバックの提示回数：押下時，開放時，押下時および開放時

からなる 6 つの触感フィードバックパターンを製作した。6 パターンの各パラメータ値を表 5.1 に示す。触觉刺激には、 $20 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ 、200 Hz の正弦波振動を 1 周期提示した。被験者 7 名に、制約を与えずに各皮膚感覚提示パターンを触らせ、ボタンらしい操作感が得られるか、4 段階で評価させた官能評価実験の結果を図 5.3 に示す。図 5.3 には、各被験者の評価データを正規化した後、平均化したものを示している。図 5.3 より、押下力に基づき、座屈および開放時のクリック触感を与えることにより、高評価のボタンらしい操作感を付与できることがわかる。

次に、ボタンらしい感覚を提示するために、どのような刺激を生成すべきかについて検討した。著者らは、ヒトはボタンの違いを触感から弁別できるが、2.3.1 項よりボタンのストローク変化を知覚することは困難であることを実験的に明らかにした[Tashiro 09]。これより、ヒトは、ボタンの座屈に伴う急激な反力およびストローク変化により生じる振動によって、クリック触感を想起していると考えられる。以上より、ボタンが座屈および復元する際の振動を測定し、その振動を提示装置で再現すれば、リアルなボタン押下触感が提示できると考えられる。

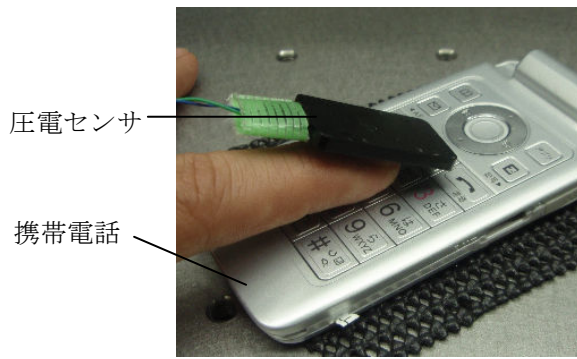


図 5.4 ボタン押下振動の計測方法

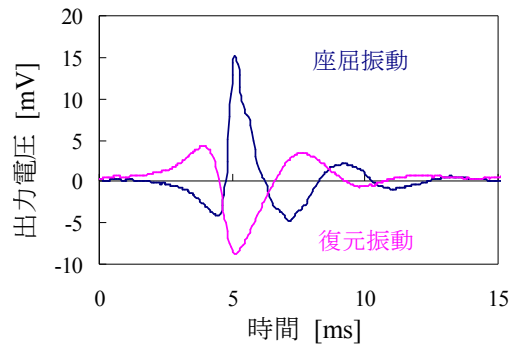


図 5.5 ボタン押下時の振動波形

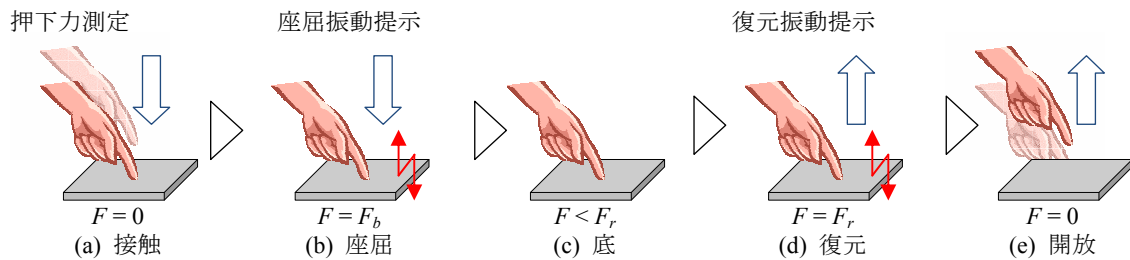


図 5.6 ボタン押下触感提示手法の概要

ボタン操作を行った際に指に伝わる座屈時および復元時の振動を、図 5.4 のように測定した。すなわち、示指の爪上に圧電センサを両面テープで接着することにより、指腹側で与えられる振動を、爪側で電圧として検出する。ただし、振動子が検出しているのは爪の振動であるため、指の周波数特性によるフィルタの影響を考慮する必要がある。このため、事前に、指腹側に与えられる変位振動および爪側で検出される電圧振動の周波数特性の関係を求めた。すなわち、指腹にインパルス状の振動を与え、このとき爪側で検出される振動特性を測定し、周波数フィルタを解析した。この際、触覚受容器では知覚できないとされる 1 kHz 以上の高周波成分[Maeno 02]については除去した。測定およびフィルタ効果の逆演算より得られた、ボタン座屈時および復元時の振動波形を図 5.5 に示す。

以上の検討によって決定した本研究のボタン押下触感提示手法の概要を図 5.6 に示す。まず、図 5.6(b)に示すように、力センサが座屈荷重の押下力に達したことを検出すると、圧電振動子により測定した座屈振動(図 5.5)が提示される。ただし、座屈振動および復元振動の振動変位は、圧電センサおよび提示振動の関係より、それぞれ $22 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ 、 $17 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ とした。これによって、ヒトはボタンを押下した感覚を想起し、ボタンを開放する過程に向かう。やがて、指の押下力が復元荷重に達すると、復元振動(図 5.5)が提示され、図 5.6(d)に示すようにボタン操作を終えた感覚が得られる。

(c) ページ繰り触感提示手法

我々は辞典などで目的のページを探索する際、図 5.7 のように小口に当てた親指をページの辺に対して直交方向に徐々にずらし、摩擦力を与える具合を変化させることによって、ページを開放するように目的のページまで繰っていく。書籍のページ繰り動作のように、指を動かす具合を若干変化させるだけで、ページを一枚ずつ送る動作および大量に送る動作を選択的に行えれば、スクロールの操作性は格段に向上すると考えられる。

書籍のページ繰りにおいて重要な力学要素としては、ページの屈曲による復元力、指先の摩擦力、および摩擦力の荷重位置などが考えられるが、本研究では、指がタッチパネルに与える接線

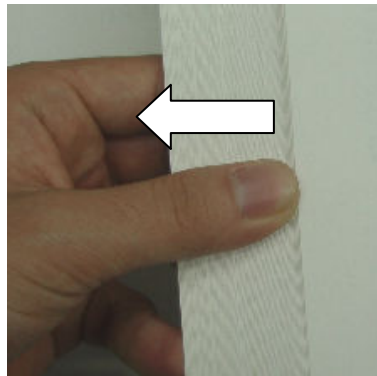


図 5.7 ページ繰り動作

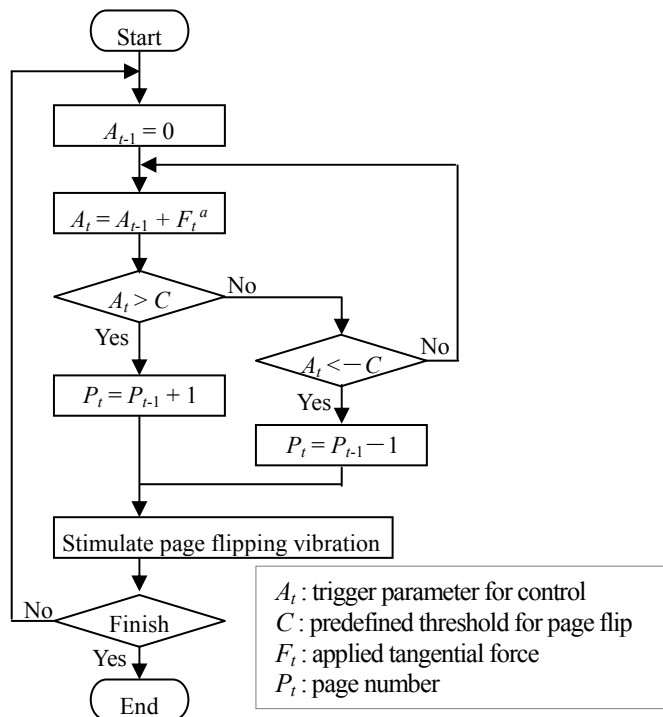


図 5.8 ページ繰り触感提示システムの動作フローチャート

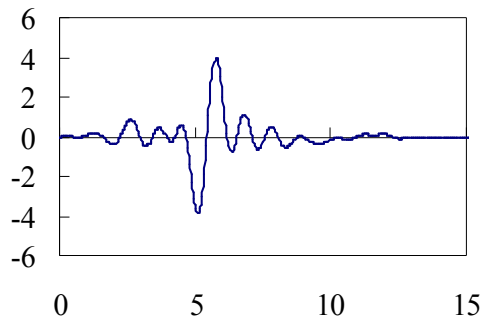


図 5.9 ページ繰り時の振動波形

力を変化させることによるページ繰り操作を実現する。また、この際、ソフトウェア上でページが送られると同時に、実際にページを繰ったような触感を提示することにより、触覚を介する操作フィードバックを与える。従来のスクロール操作では、ボタンやジョグダイヤルの操作、タッチ位置検出、機器の加速度／傾き検出などが用いられている。しかし、これらのいずれかをを用いた操作のみで、少量および大量のスクロールを選択的に扱うことは困難である。このため、新たな操作自由度として、パネル面に働く接線力を提案する。単純なオン／オフのみでなく、大小および方向も入力できる接線力は、直感的なスクロール操作に活用できると考えられる。すなわち、操作者がパネル面に加えた摩擦力の大きさによって、送り速度を変化させることが可能である。接線力は、指の位置変化とは独立であるため、スクロール操作などのタッチパネルの新たな操作トリガとして用いる上で、重大なコンフリクトは生じないと考えられる。

本研究では、接線力の時間的な累積値を判定のトリガとし、図 5.8 のように動作するページ繰り操作を実現した。図 5.8 に示すように、パネルに与える接線力の方向によって、ページを進ませたり戻したりすることが可能である。そして、ページの変化に伴い、ヒトの指に振動フィードバックを与える。また、時間的な累積値を用いることにより、小さい接線力でも一定時間負荷し続ければ、やがてページを送ることができる。さらに、トリガ変数として、力を累乗した値を累積することにより、力の大きさに重みをつけることが可能である。例えば、図 5.8 中の指数 a を 1 から 2 へと変化させれば、力と線形関係だったページ送り速度は、2 乗に比例することとなる。すなわち、接線力に応じてページ送り速度の感度が変化するような特性を持たせることができる。

ボタン押下感提示と同様に、ページ繰りを行った際に指腹に与えられる振動を測定した。指爪に圧電センサを接着した状態で、図 5.7 のようにページを 1 枚ずつ繰る際の振動を測定した。測定した結果を図 5.9 に示す。図 5.9 は、1 ページ繰った際に圧電センサで検出した電圧信号をもとに、指の周波数フィルタ効果を逆演算したものである。図 5.9 の振動が、ページ繰り時の振動としてユーザに提示される。ただし、振動変位は、圧電センサおよび提示振動の関係より、 $5 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ とした。

5.3.3 検証実験

(a) システムの技術的検証

まず、提示するボタン押下触感がどれだけ実際のボタンに近いかが、官能評価実験により評価した。視覚および聴覚を遮断した状態の被験者に、実際のボタンあるいはボタン押下感提示装置を操作させ、提示した対象がどちらであるかを回答させた。評価に用いたボタンは、実際のボタン2種および構築システムで提示する擬似ボタン触感3種である。被験者は20代男性5名とし、それぞれランダムに25回ボタンを提示し、ボタンを提示する度に評価させた。この際、1つのボタンにつき5回程度の押し込み動作を行わせた。なお、被験者には、提示するボタンの半数以上が擬似ボタン触感であると事前に告知した。実際のボタンA、Bは携帯電話2種とし、擬似ボタン触感はボタンAおよび別のボタンCの特性を2章で述べた手法で模倣した擬似触感A(図4)および擬似触感C、さらに、170Hzの正弦波振動を与えたものとした。ただし、1波長の正弦波振動については、周波数170Hzが最もボタンAに似ているとの予備実験結果に基づいている。

実際のボタンとの回答を1、擬似ボタン触感との回答を0として、各ボタン評価の平均値および標準偏差を算出した結果を図5.10に示す。図5.10より、擬似ボタン触感であると明らかであったボタンはない。特に、擬似ボタンAの平均評価は、本物のボタン程ではないものの、高い評価を得ている。また、170Hzの単振動に比べ、振動を再現した擬似ボタンAは、危険率0.10で優位に高い評価が得られた。以上より、押下力に基づくタイミングで、ボタン座屈および復元時の振動を用いて触感提示することにより、リアルな触感提示が実現できることを示した。

次に、ページ繰り触感提示システムを用いて提示した触感について、本のページを繰った感触に似ているかについて、似ていない(-1)、どちらとも言えない(0)、似ている(+1)の3段階で評価させた。この結果、提示したページ繰り触感の平均評価値は約0.5と、約半数の被験者が似ていると評価した。以上より、本システムにより、実際にページを繰るような感覚に近い触感を提示できることを確認した。

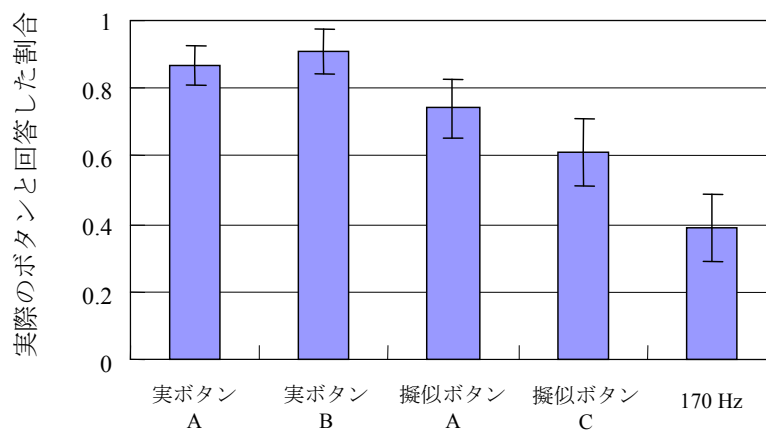


図 5.10 ボタン押下感の触感評価

(b) システムの有効性検証

まず、ボタン押下操作システムの有効性を検証した。複数のフィードバックタイミングおよび提示振動パターンを有する擬似ボタンを製作し、官能評価実験によってそれぞれの操作性を比較した。比較パターンとして、

- ・ フィードバックタイミング：タッチ検出からの時刻遅れ，押下力
- ・ フィードバックの提示回数：押下時，押下時および開放時
- ・ 提示振動：実ボタン押下時の振動を再現（図 5.5），170 Hz

からなる 6 つの擬似ボタンを製作した。触感フィードバックパターンを製作した。6 パターンの各パラメータ値を表 5.2 に示す。表中の法線力とは振動を開始する押下力，振動時間とはタッチ検出から振動開始までの時間を示す。フィードバックタイミングがタッチ検出からの時刻遅れの際には，フィードバックの提示は押下時のみとした。被験者 5 名に，6 パターンの擬似ボタンおよび実ボタンの計 7 種のボタンを自由に操作させ，操作しやすさを 7 段階で評価させた。

官能評価実験の結果を図 5.11 に示す。図 5.11 には，各被験者の評価データを正規化した後，平

表 5.2 トリガパターン

トリガパターン	提示振動	押下		開放	
		法線力 [N]	振動時間 [ms]	法線力 [N]	振動時間 [ms]
1	図 5.5	1.0	-	0.8	-
2	170 Hz	1.0	-	0.8	-
3	図 5.5	1.0	-	-	-
4	170 Hz	1.0	-	-	-
5	図 5.5	-	50	-	-
6	170 Hz	-	50	-	-

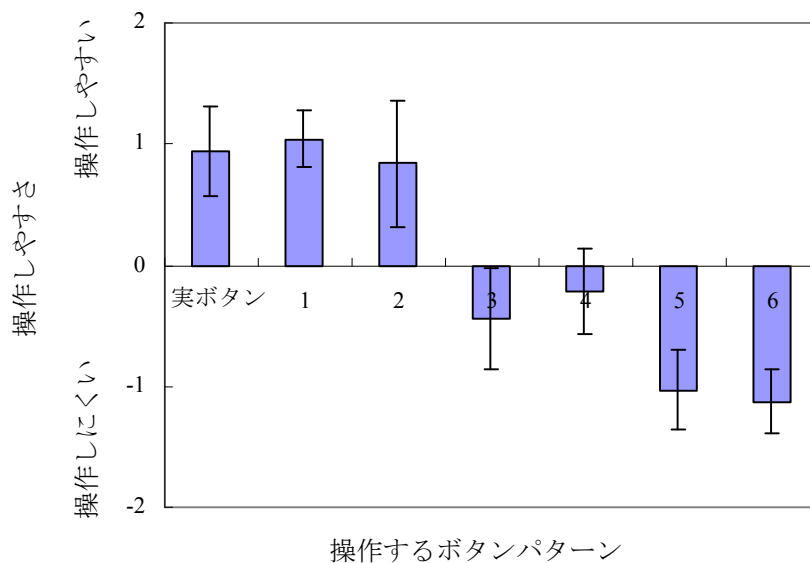


図 5.11 擬似ボタンの操作性評価結果

均化したものを示している。図 5.11 より、押下力に基づき、座屈および開放時のクリック触感を与えた擬似ボタン 1 および 2 が、操作性において高い評価を得ていることがわかる。タッチ検出からの時刻検出に基づきクリック触感を与える擬似ボタン 5 および 6 や、押下力に基づくものの座屈時のみにクリック触感を与える擬似ボタン 3 および 4 と比較して、擬似ボタン 1 および 2 は、危険率 0.10 で優位に高い評価が得られた。このことから、操作性の観点においても、フィードバックタイミングを押下力とし、座屈および開放時にクリック触感を与える提案手法の有効性が確認できた。一方で、実ボタン押下時の振動を再現した擬似ボタンは、同じフィードバックタイミングおよび提示回数条件では、操作性の評価に有意差はみられなかった。このことから、実ボタン押下時の振動を再現したほうがボタンのリアリティは増すものの、操作性には大きな影響を与えないことがわかる。これに関して被験者にヒアリング調査した結果、実ボタンに似ている方が親しみやすさから操作性においても高評価を与えたという意見と、似ていない方が新鮮でよかったという意見に分かれた。これは、ユーザごとに好みの触感が異なるということを示唆していると考えられる。本手法では、さまざまなボタンの振動を測定することで、さまざまなクリック触感を生成することができる。本実験では、図 5.5 の振動のみを用いたが、ユーザごとに最も操作しやすいボタンの振動を測定して提示振動として用いることで、ユーザによらず最適なクリック触感を提示することが可能であると考えられる。すなわち、ユーザごとにクリック触感をカスタマイズすることが可能な本手法は、従来の機械変形を伴うユーザインタフェースを有する携帯端末にはない新たな価値である。

次に、ページ送り操作システムについて、操作性の観点から評価した。まず、標準的なスクロール操作方法 2 種と比べて、ページ移動タスクを完了するまでの時間を調べた。比較する操作方法およびその特徴を表 5.3 に示す。被験者は 20 代男性 5 名である。事前に、被験者にそれぞれの操作方法の特徴を把握するための時間を与えた後、それぞれの操作について 10 回ページ移動タスクを行わせた。評価タスクは 4 ページの移動および 29 ページの移動である。なお、本実験では、操作フィードバックは、ページ番号表示に加え、ページ繰りに伴う音および触感を提示した。優位水準 0.1 の t 検定の結果、29 ページの移動について、提案手法の方が短時間でタスクを達成できた。

さらに、操作者に提示するフィードバックの効果について検証した。接線力の累積値をトリガとした操作において、音および触感、音のみ、触感のみ、および音および触感のフィードバックなし、の計 4 条件で 29 ページの移動タスクを行わせた。優位水準 0.1 の t 検定の結果、触感を付与した場合、音および触感のフィードバックがない場合に比べて、短時間でタスクを達成できた。

表 5.3 ページ繰りのための操作方法

操作方法	説明
なぞり	1 なぞりごとに 1 ページめくれる
一定速度	所定の接線力が加えられている状態で、一定時間経過するごとにページがめくれる (1 page / 0.15s)
提案手法	接線力の時間的な累積値が所定の閾値を上回るとにページがめくれる

以上から、リアルな皮膚感覚フィードバックをタッチパネル上で提示することの有効性が検証された。本研究で提案した手法を用いることにより、操作性を向上することができるだけでなく、提示する触感をカスタマイズすることにより、ユーザによらず最適な操作触感の提示が可能になり、タッチパネル端末に新たな価値を創出したと考えられる。

5.4 遠隔皮膚感覚伝達システムを用いた動物との触れあい体験による検証

本節では、「遠隔触感体験」の一例として、遠隔地の動物に間接的に触れて触感を体験できるシステムのプロトタイプを構築し、皮膚感覚の付与がヒトの好奇心に与える影響を官能評価実験によって評価するとともに、ステークホルダに対するインタビューによってシステムのニーズおよび実現可能性を検証する。

5.4.1 概要

皮膚感覚提示技術の用途の一つである「遠隔触感体験」とは、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という欲求を持つ生物・モノに、触感伝達システムを用いて間接的に触れることでその触感を体験することが目的である。4.2.2 項の分析結果より、「遠隔触感体験」はニーズが高いだけでなく、皮膚感覚付与効果が高いことから、皮膚感覚をリアルに再現する技術の価値を広く知らしめるために有効な用途であると考えられる。リアルな皮膚感覚情報の再現が必要であることから、実現する上での技術的難易度が高いことが難点であるが、現状の技術力でも再現できる触感的特徴を持つ触対象を選定することができれば、用途のプロトタイプの実現は可能であると考えられる。

本研究では、「遠隔触感体験」のプロトタイプとして、動物に触感伝達システムを用いて間接的に触れることでその触感を体験できるアプリケーションを構築した。間接的に触れる対象として動物を選択した理由としては、直接触れることはできないが間接的であれば触ることのできる対象としてブレインストーミングなどを用いて挙げられた、危険な動物、美術品、危険な薬品などのうち、予備調査で最も触ってみたいという票を集めたためである。複数の被験者に構築したアプリケーションを体験してもらい、その際の満足度を、力覚のみを伝達した場合および本物に直接触れる場合とで比較することで、皮膚感覚を付与することの有効性を評価した。さらに、主要なユーザとなりうる動物園の来園者にインタビューを行うことで、同システムのニーズおよび実現可能性を検証した。

5.4.2 プロトタイプの構築

(a) 構築したシステムの概要

本研究では、山内らの構築したマスタ・スレーブ型触感伝達システムを用いる[山内 09]。マス

タ・スレーブとは、操作者が自身の動作を計測するマスタ装置を装着し、計測された操作者の運動をロボットハンド等のスレーブ装置に伝え、スレーブ装置に対し操作者の運動を再現するように制御するシステムである[香田 08]. 山内らのシステムは、粗さ感・摩擦感・圧覚を複合的に提示することが可能である. 5 種類の素材（エンボス紙，アクリルで制作したグレーディング・スケール，紙，フリース，ボア）を用いた弁別実験では表 5.4 に示すように優れた結果が確認さ

表 5.4 山内らのシステムを用いた素材弁別実験の正答率

	エンボス紙	グレーディング・スケール	紙	フリース	ボア
正答率	0.95 ± 0.071	0.95 ± 0.071	0.95 ± 0.071	0.95 ± 0.071	0.95 ± 0.071

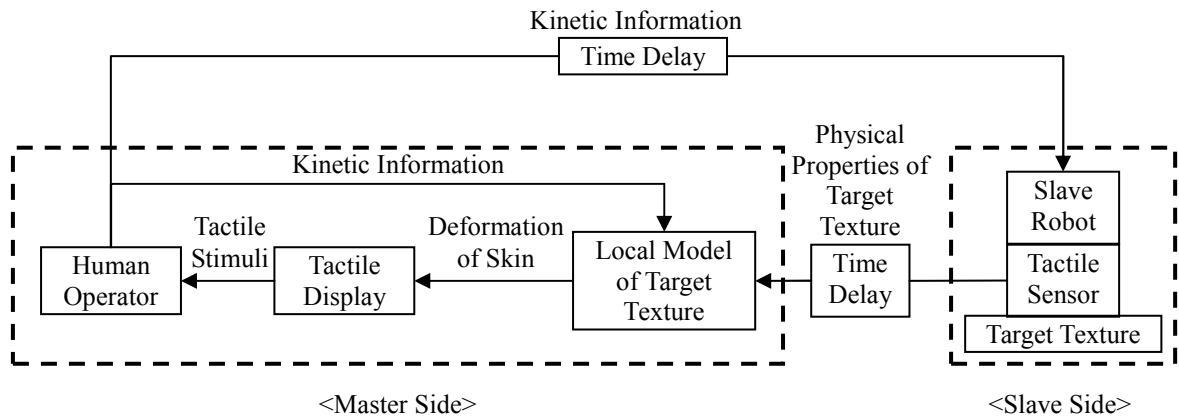


図 5.12 マスタ・スレーブ型触覚伝達システムのブロック図

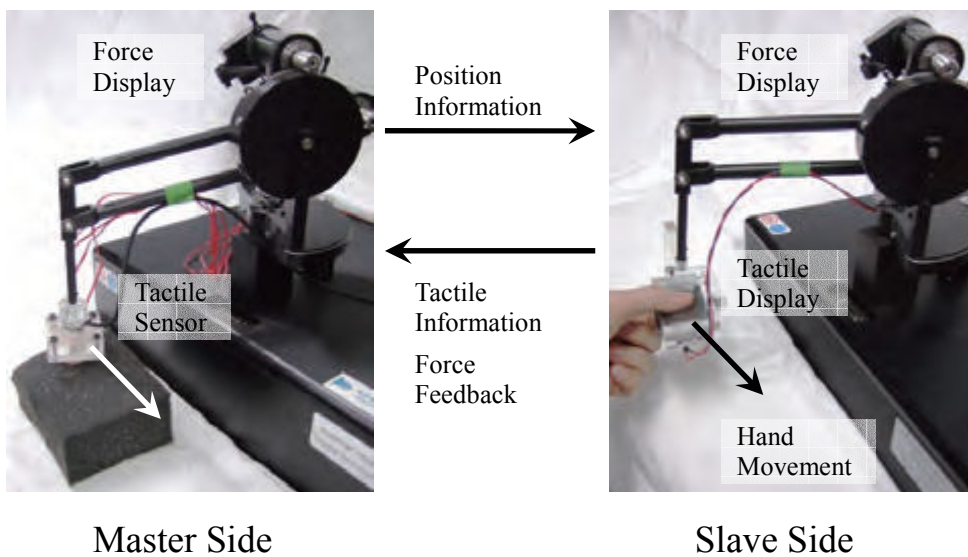


図 5.13 マスタ・スレーブ型触覚伝達システムの構成

れており、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の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。

図 5.12, 図 5.13 に本研究で使用するマスタ・スレーブ型皮膚感覚伝達システムを示す。マスタ側のロボット・アーム(SensAble technology, PHANToM Premium) には皮膚感覚ディスプレイ、スレーブ側のロボット・アームには皮膚感覚センサが接続される。操作者の手が動くときマスタ側のロボット・アームが動く。それに同期してスレーブ側のロボット・アームも動き、手先に接続された皮膚感覚センサが触対象の皮膚感覚情報を計測する。計測された皮膚感覚情報と反力を操作者側に伝達し、伝達された皮膚感覚情報を元に振動刺激を用いて皮膚感覚を提示する。皮膚感覚ディスプレイには、ボイスコイルを用いた。この皮膚感覚ディスプレイは、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、図 5.14 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提示する。皮膚感覚ディスプレイは、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。図 5.15 に、センサとし



図 5.14 ボイスコイルを用いた皮膚感覚ディスプレイ

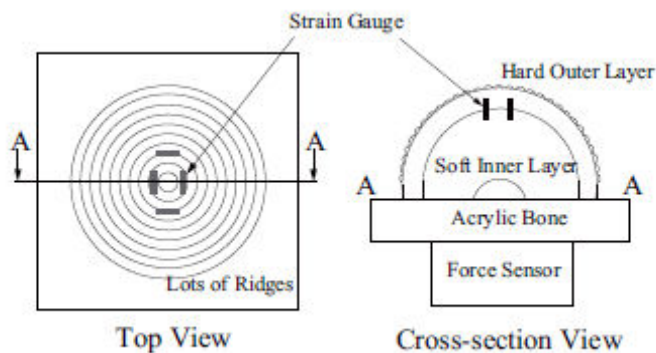


図 5.15 ヒト指模倣型センサの構造

て使用したヒト指模倣型皮膚感覚センサ[Hidaka 09]を示す。内部にはひずみゲージを4本埋め込み、触刺激の生成に必要な触対象の情報を取得する。センサの保持部には力覚センサ(NITTA, EFS-18M20A25-M10)を搭載している。このセンサは、ヒト指に近い弾性・層構造・指紋を有しており、ヒトが物体をなぞった際と同様の変形挙動・インタラクションを対象物との間で生じる。

以下に、皮膚感覚提示法および皮膚感覚情報の推定法の詳細をそれぞれ述べる。

(b) 皮膚感覚提示法

山内らのシステムでは、機械振動刺激によって、粗さ感・圧覚・摩擦感を提示する手法を採用している[Konyo 05]。これらの機械振動刺激を重畳することによって、振動刺激のみによって複数の皮膚感覚因子を同時に提示することが可能である。山内らのシステムでは、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。

まず、粗さ感提示法について述べる。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 $\lambda(t)$ を有する物体を触速度 $v(t)$ でなぞった際の振動周波数 $f(t) (= v(t) / \lambda(t))$ が粗さ感に大きく影響を与えている。山内らのシステムでは、皮膚感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提示する。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している。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している。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している。

摩擦感の提示については、昆陽らの提案した摩擦現象の一つである固着・滑りに注目した摩擦感提示法を採用している[Konyo 08]。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、皮膚感覚受容器 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提示する手法である。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5msかけて直線的に増幅させる。その後、30msかけて放物線上に減衰させて自然な摩擦感を提示している。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。山内らのシステムでは、皮膚感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、これまでの研究結果を引用している。

圧覚の提示については、皮膚感覚受容器 SAI のみが活動しやすい周波数帯域を利用した圧覚提示法を採用している[昆陽 06]。5Hz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。提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が確認されている。山内らのシステムでは、対象物のヤング率と提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5Hzの正弦波振動刺激を提示する。

(c) 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

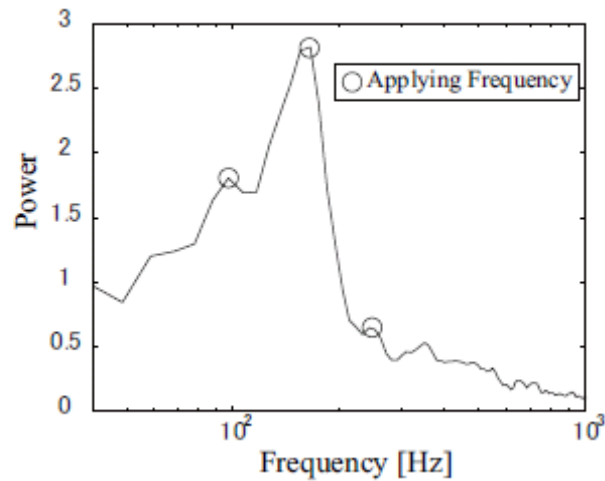


図 5.16 波長推定で用いる周波数

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 (5.1) 式より推定する．

$$\lambda = \frac{f}{|v_s|} \quad (5.1)$$

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． $\Delta\mu$ を，動摩擦係数に比例した値とし，素材ごとに異なる摩擦感を実現する．なお，動摩擦係数 μ_d は運動方向の力成分 F_t とそれに対する法線方向の力成分 F_n から (5.2) 式より推定する．

$$\mu_d = \frac{|F_t|}{|F_n|} \quad (5.2)$$

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

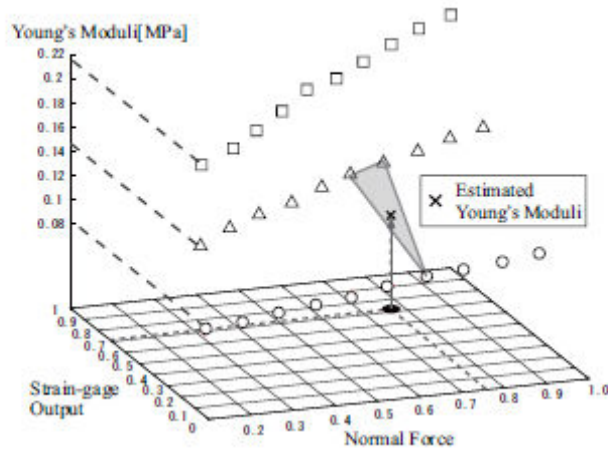


図 5.17 ヤング率推定モデル

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，ヤング率と押し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 V_{get} と押し付け力 F_{get} を正規化し(5.3) 式に代入する．

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

$V_i, F_i (i = 1, 2, \dots, 30)$ 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し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。

5.4.3 検証実験

(a) 実験に用いる動物の選定

本研究では、システムを用いて間接的に触れる対象となる動物として、図 5.18 に示すクサガメを用いた。クサガメを触対象とした理由は、

- ・ システムの可動域に収まるサイズであること
- ・ システムは防水を施されていないため、陸上で活動できる生物であること
- ・ 触る部位によって触感の特徴が異なること
- ・ 実験にて直接触れる必要があるため、直接触る事に危険がないこと
- ・ 実験期間中に飼育できること
- ・ システムに破損を生じさせることのない、おとなしい生物であること
- ・ ヒトが触りたくないと思わない動物であること

といった条件を満たしたためである。なお、上述の条件を満たす動物は限られるため、システムの実用化を検討する際には、可動域、耐久性、使用可能環境などを改善する必要がある。

(b) システムの有効性の検証

動物を触ってみたいと思う理由をアンケートによって調査した結果、

- ・ 動物とインタラクションしたい
- ・ 動物の皮膚感覚自体に興味がある



図 5.18 実験で用いたクサガメ

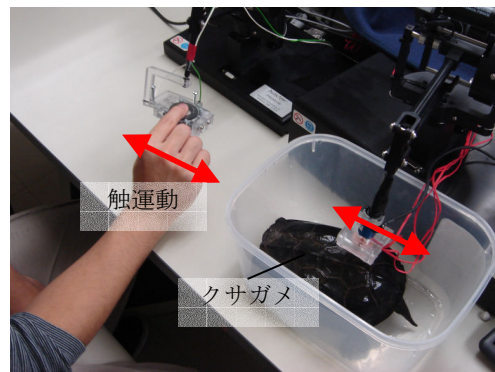


図 5.19 実験風景

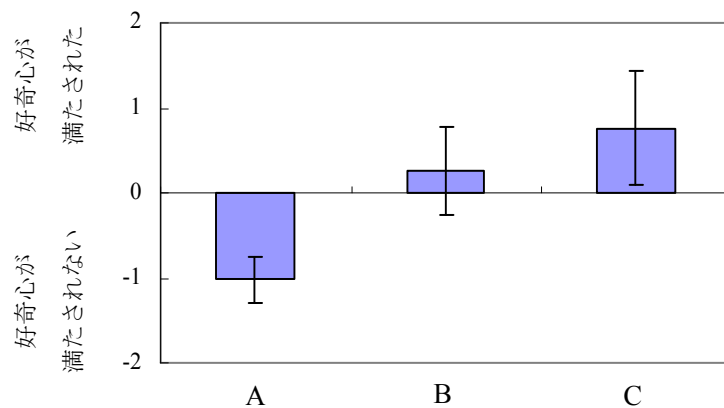


図 5.20 各インタラクションにおける満足度の評価

の二つが主な理由であった。前者の要求である動物とのインタラクション自体は、従来の力覚のみを伝達するマスタ・スレーブシステムでも可能である。しかし、後者の好奇心を満たすためには、皮膚感覚提示技術が必要不可欠である。また、前者の要求に対しても、皮膚感覚が提示されなければ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ず、好奇心が十分に満たされない可能性もある。このため、本研究では、構築したプロトタイプと比較対照として、力覚のみを伝達するシステムのプロトタイプを構築した。直接動物に触れた際と両者によって動物に触れた際に好奇心がどの程度満たされたかを比較することで、皮膚感覚を付与することの有効性を評価した。

実験方法は以下の通りである。図 5.19 に示すように、(A) 力覚のみを伝達したシステム、(B) 皮膚感覚および力覚を伝達したシステムおよび (C) 直接触れるの順番に、クサガメに自由に触れてもらった。その際、好奇心がどの程度満たされたかを、(A) ~ (C) それぞれについて 7 段階で評価させた。さらに、アンケートによって、以下に挙げる質問にそれぞれ 7 段階評価で回答してもらった。

- (1) 本システムによって提示されたクサガメの触感が、本物の触感と似ていたか
- (2) 満足感を得るためには、高いリアリティが必要だと思うか
- (3) クサガメのはく製に直接触る場合と、本システムのように間接的ではあっても本物のクサガメに触る場合とを比較して、どちらの方がより満足感が得られると思うか
- (4) 今後のシステムの発展に期待するか

なお、アンケートは、実験の後に回答してもらった。実験の被験者およびアンケートの回答者は、20 代から 30 代の男女 9 名である。

まず、本システムにおいて皮膚感覚を付与することの効果について述べる。図 5.20 に、(A) ~ (C) それぞれについてどの程度好奇心が満たされたかを回答してもらった結果を示す。なお、評価値に関しては、個人差を軽減するため、各被験者の評価値を正規化した値を用いた。図 5.20 より、(B) の皮膚感覚および力覚を伝達したシステムを用いて動物に触れることによって得られる満足度は、(C) の直接触れることと比較すると劣る傾向にあるものの、(A) の力覚のみを伝達したシステムを用いて触れることと比較すると好奇心がより満たされていることがわかる。多重比

較法を用いた検定を行なった結果、99%の信頼区間において (A) と (B) との満足度の差が有意であった。以上から、マスタ・スレーブシステムを用いて動物とインタラクションする際に皮膚感覚を付与することの有効性が検証された。一方で、本システムを用いても、動物に直接触れるほど好奇心を満たすことはできなかった。その要因の分析結果について述べる。図 5.21 および図 5.22 に、設問 (1) および (2) の回答結果をそれぞれ示す。図 5.21 に示すように、回答者の多くが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、図 5.22 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。言い換えれば、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。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

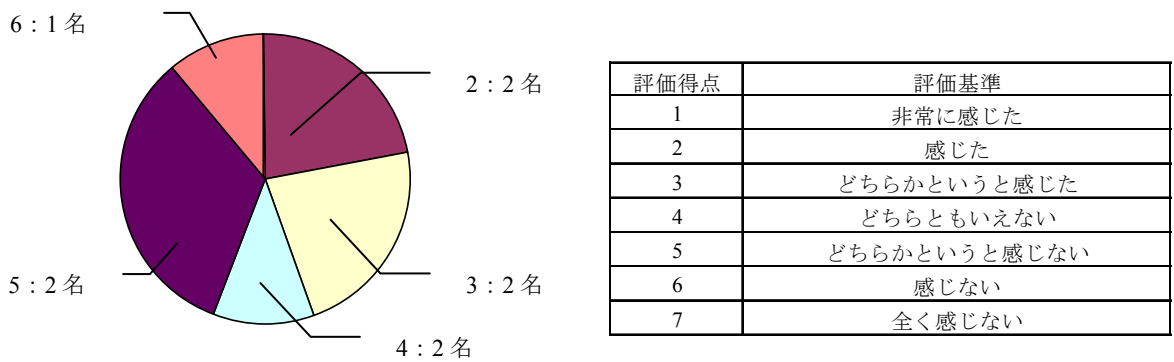


図 5.21 提示した触感にリアリティがあると感じたか

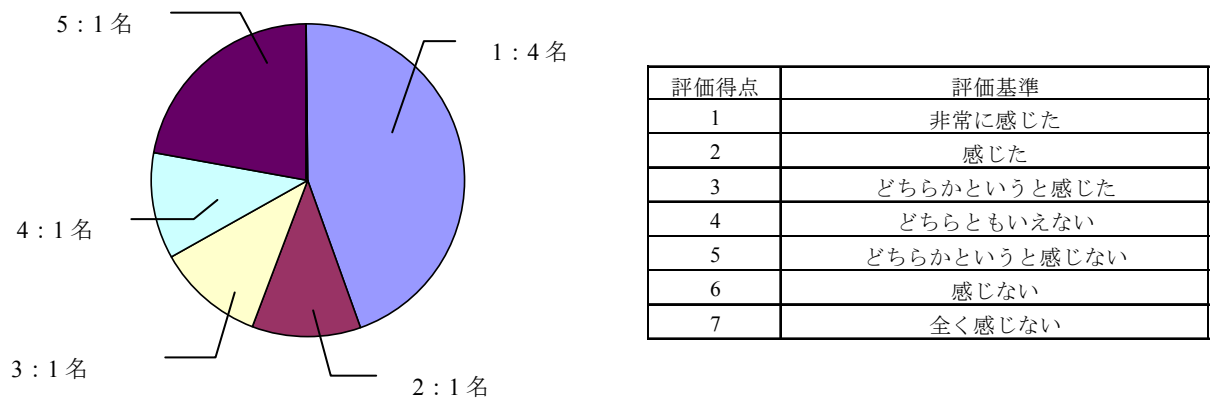


図 5.22 満足するにあたり、リアリティが必要であると感じたか

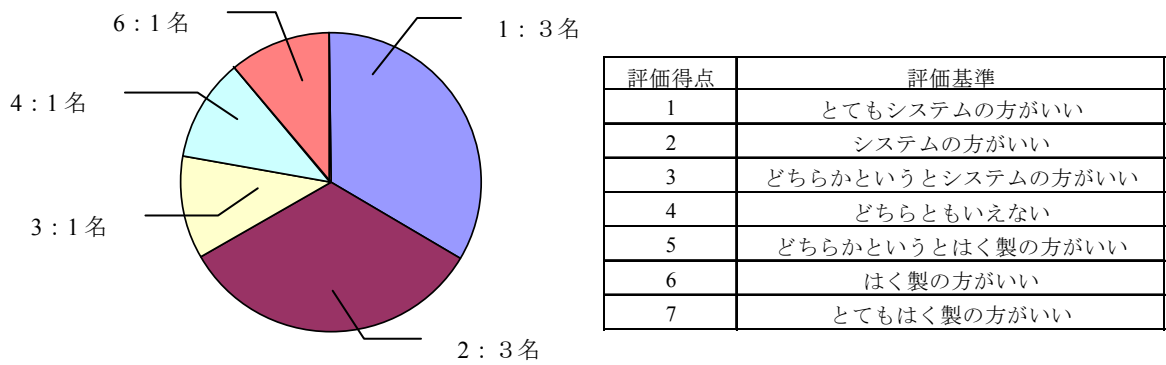


図 5.23 はく製に直接触れるのと、システムを介して本物の動物に触れるのとどちらがいいか

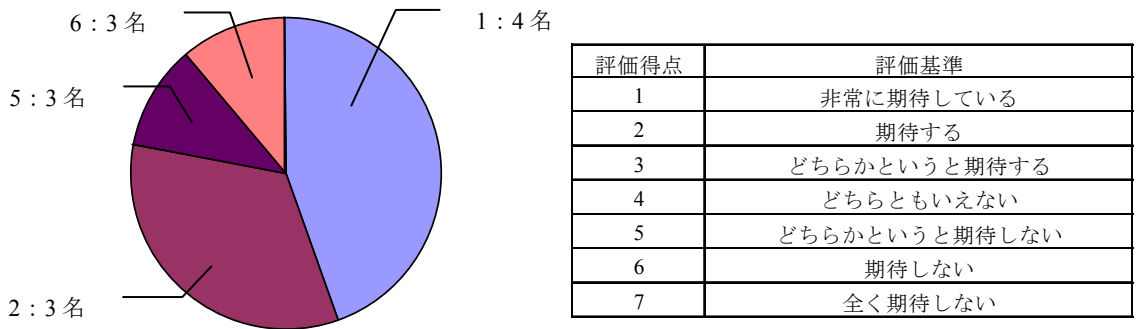


図 5.24 今後のシステムの発展に期待するか

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、最も特徴的な感触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の評価について述べる。図 5.23 および図 5.24 に、設問 (3) および (4) の回答結果をそれぞれ示す。図 5.23 に示すように、クサガメのはく製に直接触る場合と、本システムのように間接的ではあっても本物のクサガメに触る場合とを比較した場合、9名中7名の被験者が、後者の方が高い満足感が得られると回答した。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、動物が触られた際にリアクションすることによって、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。また、図 5.24 に示すよう

に、設問（5）の回答結果から、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。

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。

今後の展望

6.1 課題

本研究の課題として、

- ・ ヒトの日常動作・状態を達成する上での皮膚感覚への依存度のより詳細な分析
- ・ ユーザが限定的な用途の価値分析
- ・ 本研究では扱っていない用途の価値の検証

が挙げられる。本項では各々の詳細について述べる

ヒトの日常動作・状態を達成する上での皮膚感覚への依存度のより詳細な分析

本研究では、日常動作・状態を達成する上でヒトが皮膚感覚に依存する度合いを、アンケートによって調査した。しかし、得られた結果は回答者の主観に基づいているため、正確な依存度を求めることはできていない。皮膚感覚が直感的には重要でないと思われる動作・状態でも、実際には重要な役割を果たしている可能性は十分ありうる。したがって、正確な依存度を求めるためには、主観に基づいた調査ではなく、なんらかの客観的な指標が必要である。これについては、三つのアプローチを検討している。すなわち、

- (1) 各動作・状態を行う際の依存度を直接測定する
- (2) 皮膚感覚を遮断した状態での各動作・状態の達成度合いを測定する
- (3) VR環境での各動作・状態の達成度合いを測定する

アプローチである。

(1) については、依存度を求めたい動作・状態を複数の被験者に行わせ、その時の脳の活動をMRI (Magnetic Resonance Imaging system ; 磁気共鳴画像装置) などを用いて測定するなどの方法が考えられる。しかし、各感覚の知覚と脳の活動との関係は十分に解明されていないため、MRIを用いた手法でも正確な依存度を求めることは困難であると考えられる。(2) については、皮膚感覚をいかにして遮断するかが重要である。皮膚感覚を遮断する方法として、TMS (Transactional

Magnetic Stimulation ; 経頭蓋磁気刺激法) を用いて、皮膚感覚の知覚能力を神経レベルで抑制するなどが考えられる。この状態で被験者に依存度を求めたい動作・状態を行わせることで、皮膚感覚の有無による達成度合いの違いを求めると考えられる。しかし、TMS では、皮膚感覚のみを遮断することは現状では困難であることに加え、仮に遮断することができたとしてもなんらかの副作用が働く可能性があることから、安全面を考慮すると現実的な方法であるとは言いがたい。より簡易的かつ安全に皮膚感覚を遮断する方法として、手袋の装着などがある。手袋の装着のみでは、皮膚感覚を完全に遮断することはできないが、視覚・聴覚・深部感覚に影響を与えずに皮膚感覚のみをある程度抑制することができるので、有効な手段であると考えられる。

(3) については、実際にこのアプローチで、単純な手指動作の達成において皮膚感覚を付与することの効果を検査した研究などが報告されている[佐藤 07]。しかし、複雑な動作・状態において同様の調査を実現するためには、高度な皮膚感覚提示技術の確立が求められる。以上のように、複数のアプローチを検討しているが、いずれのアプローチも問題を抱えており、現状では正確な皮膚感覚依存度を求めることは困難である。

また、皮膚感覚への依存度は環境によって大きく異なると考えられる。本研究では、各動作・状態を、健常者が視界良好の環境のもとで行うという前提で調査を行ったが、暗闇などの状況下では、皮膚感覚への依存度は大きく変化すると考えられる。皮膚感覚への依存度に影響を与える要因を図 6.1 のようにまとめた。図 6.1 に示す要因ごとに依存度を調査することによって、どのような環境において皮膚感覚が重要となるかが明らかになり、皮膚感覚提示技術の設計指針に役立つ

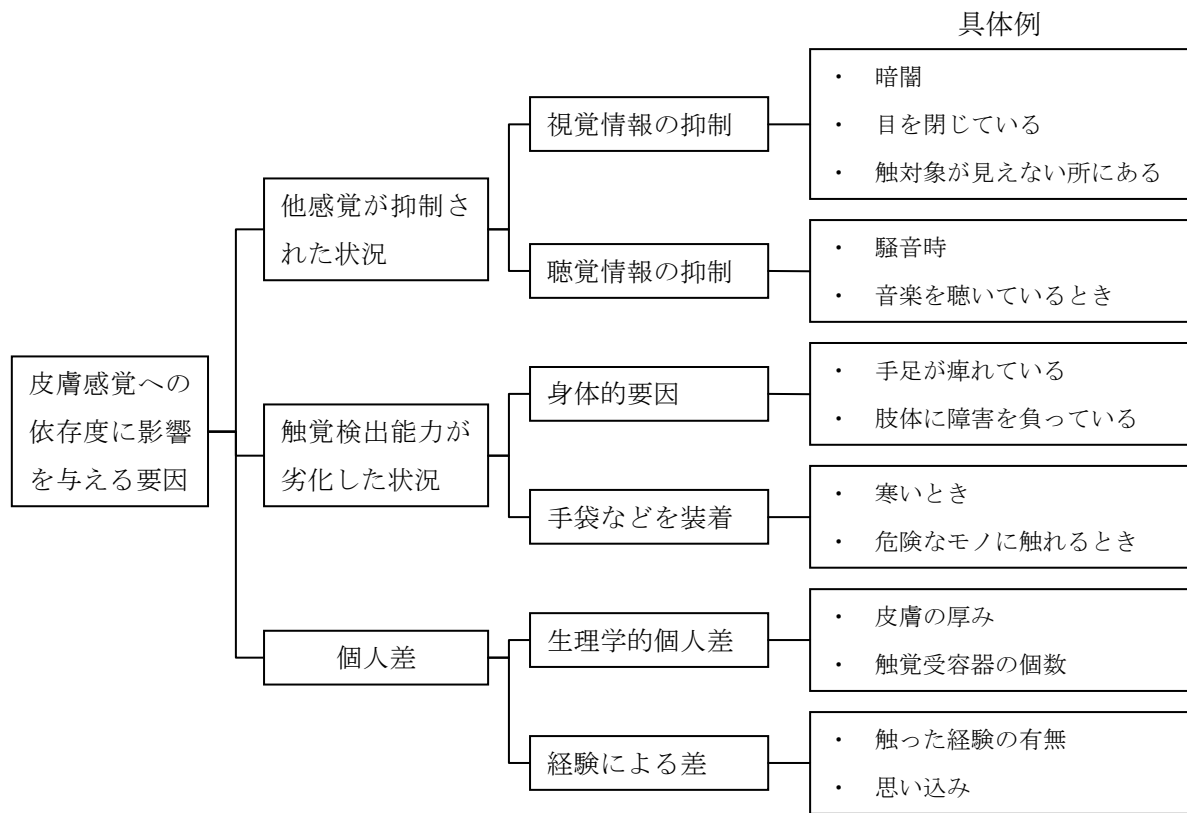


図 6.1 皮膚感覚への依存度に影響を与える要因

ることができると考えられる。

ユーザが限定的な用途の価値分析

本研究では、市場規模を考慮して、得られた皮膚感覚提示技術の用途のうち、ユーザを特に限定しない18の用途のみに対して価値の分析を行った。しかし、市場規模が小さいことと価値が低いことは等価ではない。例えば、CADに皮膚感覚情報を付与することによって製品を製作する前段階で手触りをシミュレーションするといった用途は、製造業で求められているだけでなく、資源を節約できることから環境にも良い影響を及ぼすと考えられる。その他の用途についても、市場規模自体は小さくても高い価値を有する可能性は大いにありうる。

また、本研究では、「提示する基となる情報が存在しない」用途に関しては価値の分析を行っていない。しかし、このような用途も高い価値を有している可能性はある。例えば、「触感のアート」は、絵画を楽しむことができない視覚障害者でも体験できるエンターテインメントとしての価値を有すると考えられる。また、「皮膚感覚知覚特性の解明」は、皮膚感覚を用いた技術の発展に役立てられるため、間接的に高い価値を創出すると考えられる。

以上のように、本研究では扱っていない皮膚感覚提示技術の用途の中にも、高い価値を有している可能性があるものは多数存在すると考えられる。これらの用途についても価値を分析することによって、皮膚感覚提示技術の発展をより促すことができると考えられる。

本研究では扱っていない用途の価値の検証

本研究では、18の用途の価値を分析したが、価値の検証を行った用途は一部のみである。全ての用途の価値を検証するためには、他の研究機関などとの連携が必要不可欠である。本研究では、

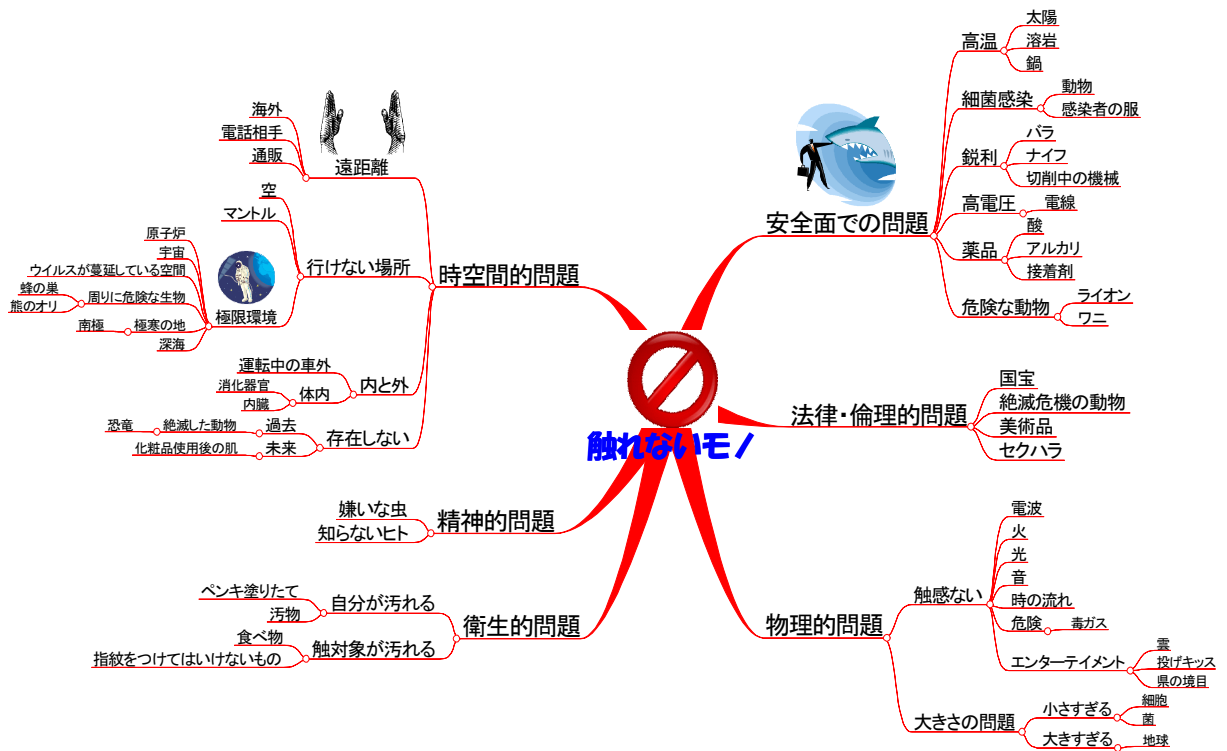


図 6.2 触ることができないモノのマインドマップ

「触覚遠隔伝達システムを用いた動物の触感体験」を実現するために、山内らの構築した触感の伝達システムを用いた。このように、各研究機関の強みを生かすことによって、用途の実現を効率的に行っていく必要がある。

また、本研究では「遠隔触感体験」の用途の一例として、動物の触感を間接的に体験するシステムのプロトタイプを構築したが、遠隔触感体験によって触れるようになる対象は、図 6.2 に示すように、動物にとどまらない。同様に、「操作フィードバック」においても、本研究で有効性を評価したボタン押下およびページ繰り以外にも、さまざまな動作をタッチパネル上で実現できる（付録 D 参照）。このように、同じグループの用途であっても、さまざまなコンテンツが考えられる。これらのコンテンツごとに価値を分析することで、各用途の価値がより明確になると考えられる。

6.2 今後の展開

本研究の今後の展開として、

- ・ 価値が高いと評価されたアプリケーションの実世界への適用
- ・ 本研究で提言した皮膚感覚提示技術のあり方に乗っ取った技術開発の推進
- ・ 皮膚感覚提示技術以外の価値が不明確な技術に対する本研究のアプローチの適用が挙げられる。本項では各々の詳細について述べる。

価値が高いと評価されたアプリケーションの実世界への適用

本研究にて価値が高いと評価された皮膚感覚提示技術の用途は、実世界で適用して初めて価値を持つ。特に、実現可能性とニーズの両方が高い「操作フィードバック」などの用途は、すぐにも製品として実現すべき用途であると考えられる。これによって、開発した企業が製品の差別化によって高い利益をあげることが期待できるだけでなく、より多くの研究機関や企業などが皮膚感覚提示技術に注目するようになり、皮膚感覚提示技術がさらに発展していくというポジティブなスパイラルを生み出すことができると考えられる。

本研究で提言した皮膚感覚提示技術のあり方に乗っ取った技術開発の推進

本研究で提言した技術開発の方向性に基づいて技術開発を行うことにより、皮膚感覚提示技術の発展を効率的に促進できると考えられる。そのためには、まず、触覚研究に携わる研究機関や企業などが、1.2.4 項で指摘した皮膚感覚提示技術の問題点を認識・共有することが重要である。

皮膚感覚提示技術以外の価値が不明確な技術に対する本研究のアプローチの適用

本研究では、既に多額のコストが開発に費やされながらも技術的に立ち遅れていることから、皮膚感覚提示技術に焦点をあてたが、同様の問題を抱える技術は多いと考えられる。例として、BMI (Brain Machine Interface ; 脳介機装置) が挙げられる。BMI の方式の一つに、脳に直接電極を埋め込む侵襲式と呼ばれる方法がある。侵襲式では、精度の高い読み取りが可能だが、技術が

まだ安定していない上に手術による感染症・脳の損傷といったリスクも伴う。しかし、リスクが高いにも関わらず、有効な用途が提案されていない。こうした技術の開発にコストを投じ続けるかを判断するために、本研究の価値分析のアプローチが有効であると考えられる。侵襲式のBMIの用途を洗い出すとともに、それらのニーズ、非代替性などを分析することで、価値を明らかにすることができ、今後の技術開発の方向性を定めるために役立てられると考えられる。

このように、技術開発が困難でありながらも有効な用途が提案されていない技術に対して、本研究のアプローチを適用することで、その技術の価値を明確にすることができると考えられる。本研究のアプローチによる価値分析の事例を増やしていけば、より効果的な価値分析手法を体系化できる可能性もある。

結論

本研究では、皮膚感覚提示技術の用途を洗い出すとともに、得られた用途の価値を複数の観点から分析・検証することによって、皮膚感覚提示技術のあり方を提言した。まず、皮膚感覚提示技術の用途を考案する上で必要不可欠となるため、ヒトの日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割を明確化した。次に、さまざまな発想法を用いて、従来想定されていなかった用途を含む、約 160 の皮膚感覚提示技術の用途を洗い出した。さらに、得られた用途を約 40 の MECE なグループに分類し、それぞれのグループに対してニーズの調査、皮膚感覚付与効果の推定、実現可能性の評価および視覚・聴覚・力覚提示技術との比較分析を行った。その結果、

- ・ 現状の技術力の価値ある活かし方
- ・ 将来的に価値の高いと考えられる用途を実現するための今後の技術開発のあり方
- ・ 視覚・聴覚・力覚など他感覚提示技術との使い分けおよび統合のあり方

が明らかになった。最後に、皮膚感覚提示技術の実用化された事例、および価値が高いと評価された用途の一部である「触覚遠隔伝達システムを用いた動物の触感体験」および「タッチパネル上での皮膚感覚提示」のプロトタイプを用いて、価値の検証を行った。その結果、各用途の本研究における価値の分析結果が妥当であることを確認した。本研究の成果を実世界に適用することにより、皮膚感覚提示技術の発展が促進されることが期待できる。

以下に、本研究で得られた知見を挙げる。

2章：ヒトの日常動作・状態における皮膚感覚の役割

- ・ 皮膚感覚を用いた日常動作・状態は、知覚する皮膚感覚の特徴（識別感覚/快感覚/不快感覚）、皮膚感覚を知覚する部位（特定部位/特定部位でない）および知覚した皮膚感覚に向ける注意（意識/無意識）の3つの軸で表される空間上にプロットすることにより、12の論理的に異なるグループに分類できる。
- ・ ヒトの日常動作・状態において皮膚感覚が果たす役割は、(1) 触対象の特徴の認識、(2) 作業の補助、(3) 周囲の変化の感知、(4) 周囲の定常の認識、(5) 能動的な快感の取得、(6) 能

動的な安心感の取得, (7) 受動的な快感の取得, (8) 受動的な安心感の取得, (9) 危険の学習, (10) 能動的な不快感の取得, (11) 危険の感知および (12) 受動的な不快感の取得の 12 種類である

- ・ 能動的な快感の取得, 受動的な快感の取得, 危険の学習および危険の感知に含まれる動作・状態は, 5 割以上が皮膚感覚がなければ達成できないと回答された
- ・ 作業の補助, 周囲の定常の認識, 能動的な不快感の取得および受動的な不快感の取得に含まれる動作・状態は, 8 割以上が皮膚感覚がなくても達成できると回答された

3 章：皮膚感覚提示技術の用途の体系化

- ・ 皮膚感覚提示技術の用途は, 提示する基となる情報に着目すると, 基となる情報が (1) 皮膚感覚で知覚できるもの, (2) 皮膚感覚で知覚できないものおよび (3) 存在しないものの 3 種類に大別することができる
- ・ 提示する基となる情報が皮膚感覚で知覚できる用途は, 皮膚感覚の提示方法に着目すると, 基となる皮膚感覚情報を (1) リアルに再現して提示する用途, (2) カスタマイズして提示する用途および (3) 異なる皮膚感覚情報に変換して提示する用途の 3 種類に細分化することができる

4 章：用途の価値の分析

皮膚感覚で知覚できる情報が提示基となるディスプレイ (触感ディスプレイ) において,

- ・ ニーズの高い用途は, 「環境の VR 体験」, 「遠隔触感体験」, 「快感覚の定常的提示」, 「ネットショッピング」, 「操作フィードバック」などである
- ・ 皮膚感覚付与効果が高い用途は, 「遠隔触感体験」, 「携帯触感再生機」, 「快感覚の定常的提示」, 「快感覚の VR 体験」, 「現実ではできないことの VR 体験」などである
- ・ 実現可能性が高い用途は, 「環境の VR 体験」, 「触感の定量的表現」, 「操作フィードバック」, 「VR 空間上での痛みの提示」, 「気温のシミュレーション」などである

皮膚感覚で知覚できない情報が提示基となるディスプレイ (情報ディスプレイ) において,

- ・ 「道案内情報」, 「状態の悪化」, 「残量情報」, 「操作フィードバック」などの情報は, 皮膚感覚のみで提示することが適している
- ・ 「視覚代行」, 「聴覚代行」, 「着信情報」などの情報は, 状況に応じて視覚・聴覚提示と皮膚感覚提示を切り替えることが適している
- ・ 「危険警告」は, 視覚・聴覚と皮膚感覚を統合して提示することが適している

5 章：用途の価値の検証

- ・ マスタ・スレーブ型触覚伝達システムを用いて, 触りたいと思う動物に間接的に触れることで, ユーザの好奇心をある程度満たすことができる
- ・ タッチパネル上で, ボタンの押下感およびページめくり感をリアルに再現して提示することで, タッチパネルの操作性を向上させることができる

謝辞

自主的に楽しみながら世界最先端の研究に挑戦する先輩方の姿に魅せられ、前野研究室への所属を志望してから早3年が過ぎました。本日、本論文の謝辞を書くにあたり、前野研究室での生活が私の過ごしてきた24年間の人生の中で、最も密度の濃い時間であったこと確信しております。このような時間を過ごすうえで、本当に多く人に支えられてきました。

特に、前野隆司教授には、本研究の主査として多大なる御指導を賜って参りました。初期に掲げる大きな理想と相反して、直面する課題の困難さから、研究方針が右往左往する私に、時に厳しく、時にやさしく、そしてなにより辛抱強く指導をしていただいたことに心より感謝いたします。研究に追われ、苦しい生活を強いられることもありましたが、一方で、数々の国内学会や国際学会への参加など本当に貴重な思い出深い経験を積むことができました。このような経験は前野先生の御指導なしには到底実現し得ないことでした。また、専門性を極めながら、その領域を次々に拡大していく前野先生の生き方は、今後も私にとっての目標であります。前野研究室での「世界で誰も実現していない課題に挑戦し、仮説をたて、課題を解決した」という経験を自信にして、今後も社会に貢献していきたいと思っております。3年間本当に有難うございました。

また、本研究の副査をしていただいた日比谷孟俊教授と高野研一教授に深く感謝いたします。先生方から受けたご指摘は、慣れ親しんだ研究室のメンバーとの議論のみでは見逃していたであろう鋭いものでした。的確な指摘と温かいコメントによって、本論文をよりよいものにすることができました。

牧野泰才特別研究助教には、触覚に関する知識だけでなく、研究の基本的な進め方や文書の添削、実験装置などの使用方法、研究生活のあり方など、なにからななまで御指導を賜って参りました。ときには数時間に渡って議論していただいたこともありました。本研究への多大なる寄与だけでなく、牧野先生の発想力や好奇心旺盛さには大きな刺激を受けていました。牧野先生のように尊敬すべき研究者のもとで研究を行った学生最後の1年間は、自分にとって貴重な人生経験となると確信しております。

前野研究室では、素晴らしい先輩・同輩・後輩に恵まれました。特に、研究室所属当初の私のつたない文章の添削に始まり、研究方針の指導までしていただいた田蔵淳史君には深く感謝いたします。田蔵君と二人で同じ研究テーマに取り組み、二人で悩み、毎日のように議論し、そして喜びを共に分かち合った経験は、大きな成果をあげることにつながっただけでなく、自分自身を大きく成長させてくれました。また、公私ともに充実した3年間を過ごすうえで、同輩の日高佑輔君、河津功典君、村尾将和君、田代郁君の存在は欠かせませんでした。田代君の直面する課題に対し常に最高の完成度を追い求める姿から、村尾君の目標を迅速かつ的確に達成するとともに

プライベートも充実させる姿から、河津君の自らも着実に課題をこなしつつ面倒見よくみなをまとめる姿から、日高君の穏やかな物越しの中に潜める高い能力を生かし物事を深く理解する姿から、私は常に刺激を受けていました。苦楽を共にでき、尊敬できる素晴らしい仲間に出会えて本当に幸運でした。共に国内外を思い切り遊びまわったことも良い思い出ですが、研究の合間の息抜きに励んだことも、今では良い思い出です。後輩にも恵まれました。ブレインストーミングやアンケートを行う際に、度重なるあつかましいお願いに対しても快く引き受けてくださり、心より感謝しております。この他にも多くの優秀な緒先輩、諸後輩にお世話になったこと、この場をお借りして御礼申し上げます。

最後に、24年間、私を育ててくれた両親と家族に、心から感謝の意を表し、この修士論文を締めくくりたいと思います。

2010年2月

参考文献

- [Akabane 06] Akabane, A. et al., Examination on Signal Generating the Sensation of Depressing for a Touch Panel with a Tactile, Journal of Human Interface, Vol.8, No.4, (2006), pp. 591-598
- [Arai 05] Arai, H. et al., Transparent Switch Structure Having A Feeling of Click for Touch-Screen Interface, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.71, No706, (2005), pp.193-199.
- [Azuma 1997] R. T. Azuma, A survey of augmented reality, Presence, Vol. 9, No. 4, pp. 355-385, 1997
- [Bliss 70] J.C.Bliss, et.al. : Optical-to-Tactile Image Conversion for the blind, IEEE Transactions on ManMachine Systems, MMS-11-1, pp.58-65 (1970)
- [Cutkosky 89] Mark R. Cutkosky, On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing, IEEE Transactions of Robotics and Automation, Vol.5, No.3, pp.269-279, 1989
- [Dweck 75] Dweck : The Role of Expectations and Attributions in the alleviation of learned helplessness, Journal of Personality and Social Psychology, 31, pp. 674-685, 1975
- [Fujimoto 85] T. Fujimoto, Quantification and improvement of the touch in switch operation, Statistical Quality Control (in Japanese), Vol.36 (1985), Extra Edition November, pp. 1837-1843
- [Fukumoto 01] Fukumoto, M., et al., Active Click: Tactile Feedback for Touch Panels, Conference on Human Factors in Computing Systems, (2001), pp.121-122.
- [Hasegawa 96] Hasegawa, H. et al., Development of multimedia objective terminal incorporating click mechanism, Human Interface Symposium, (1996), pp.477-482.
- [Hidaka 09] Yusuke Hidaka, Yuta Shiokawa, Kaoru Tashiro, Takashi Maeno, Masashi Konyo and Takahiro Yamauchi, Development of an Elastic Tactile Sensor Emulating Human Fingers for Tele-Presentation Systems, Proc. IEEE SENSORS 2009 Conference, pp. 1919-1922, 2009
- [Ikeda 04] A. Ikeda, Y. Kurita, J. Ueda, Grip Force Control for an Elastic Finger Using Vision-Based Incipient Slip Feedback , in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.810-815, 2004
- [Ikei 02] Y. Ikei and M. Shiratori: Texture Explorer: A Tactile and Force Display for Virtual Textures, Proc. 10th Symposium on Haptics Interfaces For Virtual

- Environment & Teleoperator Systems(HAPTICS ' 02), pp. 327- 334 (2002)
[Immersion] <http://www.immersion.com/>
- [Iwamoto 08] Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, and Hiroyuki Shinoda: Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, Haptics: Perception, Devices and Scenarios: 6th International Conference, Eurohaptics 2008 Proceedings (Lecture Notes in Computer Science), pp.504-513, 2008
- [Johansson92] Roland S. Johansson, Charlotte Hager-Ross, L. Backstrom : Somatosensory control of precision grip during unpredictable pulling loads. III. Impairments during digital anesthesia, *Exp Brain Res*, Vol.89, pp204-213, 1992
- [Johansson96] Roland S. Johansson : Sensory Control of dexterous manipulation in humans, *Hand and Brain*, edited by A. M. Wing, P. Haggard, and J. R. Flanagan, New York: Academic, pp.381-414, 1996
- [Konyo 05] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro and N. Saiwaki," A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch" , *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1121-1127, (2005)
- [Konyo 08] 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 83] S. Lederman : Tactual Roughness Perception: Spatial and Temporal Determinants, *Canadian Journal of Psychology*, Vol. 37, No. 4, 1983
- [Lemmens 2009] Lemmens et al., A Body-Conforming Tactile Jacket to Enrich Movie Viewing, *World Haptics Conference* pp. 7-12, 2009
- [Macefield 96] Vaughan G. Macefield, Charlotte Hager-Ross, Roland S. Johansson : Control of grip force during restraint of an object held between finger and thumb : responses of cutaneous afferents from the digits, *Exp Brain Res*, Vol.108, pp155-171, 1996
- [Maeno 00] T. Maeno, S. Hiromitsu, T. Kawai, Control of Grasping Force by Detecting Stick/Slip Distribution at the Curved Surface of Elastic Finger , in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3896-3901, 2000
- [Maeno 02] Maeno, T., Tactile Sensation of Humans - Mechanical Dynamics, Analogy and Illusion-, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, Series E, No.10, (2002), pp.469-473
- [Massie 94] T. Massie and J. Salisbury : The PHANToM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects, *Proc. ASME Winter Annual Meeting*, 1994
- [Okamoto 07] Shogo Okamoto, Masashi Konyo, Satoshi Saga, and Satoshi Tadokoro, Identification of Cutaneous Detection Thresholds against Time-delay Stimuli for Tactile Displays, *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference*

- on Robotics and Automation, pp. 220-226, 2008
- [Philips] <http://www.philips.co.jp/>
- [Prytherch 03] D. Prytherch and R. Jerrard, "Haptics, the Secret Senses; The Covert Nature of the Haptic Senses in Creative Tacit Skills," *Proc. Eurohaptics*, Trinity College, pp. 384-395, 2003
- [Robles-De-La-Torre 06] G.Robles-De-La-Torre: The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments, *IEEE Multimedia*, Vol. 13, No.3, 24, 2006
- [Samsung] <http://www.samsung.com/>
- [Sato 92] Sato, M. et al., *Human Engineering Ergonomics Standard Parameter and Function Handbook (In Japanese)*, First Edition, (1992), pp.163-165
- [SensAble] <http://www.sensable.com/>
- [Suzuki 1995] Suzuki, Y., Kobayashi, M., "Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, pp. 44-47, Issue 1, 2005
- [Tashiro 09] Kaoru Tashiro, Yuta Shiokawa, Tomotake Aono and Takashi Maeno : Realization of Button Click Feeling by Use of Ultrasonic Vibration and Force Feedback, *The third Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System*, 2009, pp.1-6
- [@Wikipedia] <http://ja.wikipedia.org>
- [Yamada 02] D. Yamada, T. Maeno, Y. Yamada, Artificial Finger Skin having Ridges and Distributed Tactile Sensors used for Grasp Force Control, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 140-146, 2002
- [Yamamoto 04] Akio Yamamoto, Benjamin Cros, Hironori Hashimoto and Toshiro Higuchi : Control of Thermal Tactile Display Based on Prediction of Contact Temperature, *Proceedings of the 2004 International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1536-1541, 2004
- [Yokota 07] Hideaki Yokota, Akio Yamamoto, Hiroaki Yamamoto, and Toshiro Higuchi : Producing Softness Sensation on an Electrostatic Texture Display for Rendering Diverse Tactile Feelings, *Proceedings of World Haptics 2007*, pp. 584-585, 2007
- [Yoshioka 01] 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
- [青木 09] 青木孝文, 三武裕玄, 長谷川晶一, 佐藤誠 : ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイスの検討, *日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集*, 2009
- [赤井 99] 赤井亮二, 和田親宗, 井野秀一, 伊福部達 : 表面粗さ感を惹起させるための触感ディスプレイに関する基礎的研究, *日本バーチャルリアリ*

- ティ学会第4回大会論文集, pp. 447-450 (1999)
- [浅村 98] 浅村直也, 横山望, 篠田裕之: 選択刺激子による触感の呈示, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 3, pp. 15-18, 1998
- [安藤 04] 安藤英由樹, 渡辺淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎: Augmented Realityのための爪装着型触覚ディスプレイの研究, 電子情報通信学会誌, Vol. J87-D-II, No. 11, pp. 2025-2033, 2004
- [池田 04] 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, 2004
- [岩村 01] 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
- [大岡 02] 大岡昌博, 毛利行宏, 杉浦徳宏, 古賀宏嗣, 三矢保永: 分布圧覚ディスプレイ装置による仮想形状呈示, 日本機械学会論文集, Vol. 68, No. 674, pp. 130-135 (2002)
- [音川 05] 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 01] 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
- [鎌倉 89] 鎌倉矩子, 手のかたち 手のうごき, 医歯薬出版, 1989
- [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
- [ケージーエス] <http://www.kgs-jpn.co.jp/piezo.html>
- [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ウム講演論文集, 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, 田所諭ら: 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
- [香田 08] 香田祐太, 前野隆司: 局所滑りセンサと仮想滑り提示を用いたマスター・スレーブシステムにおける把持力制御, 日本機械学会論文集 74 巻 740 号 C 編, pp. 876-883, 2008
- [サックス 1992] オリバー・サックス: 妻を帽子とまちがえた男, 昌文社, 初版, pp. 91-110, 1992
- [佐藤 07] 佐藤 克成, 梶本 裕之, 川上 直樹, 舘 暲: 器用な物体操作のための電気式皮膚感覚と力覚の統合, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニ

- クス講演会論文集, 2007
- [佐野 04] 佐野明人, 西恒介, 宮西英樹: 触覚情報に基づく遠隔高臨場感多指ハンドシステムの構築, 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 2, pp. 164-171, 2004
- [佐野 05] 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 09] 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
- [篠田 08] 篠田裕之: 皮膚デバイス技術の応用事例, 計測と制御, Vol. 47, No. 7, pp. 611-615, 2008
- [下条 99] 下条, 石田, 渡: 視覚障害者用 Tactile Display の開発, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp. 101- 102, 1999
- [@情報通信研究機構] <http://barrierfree.nict.go.jp/>
- [@情報通信総合研究所] www.icr.co.jp/
- [白土 04] 白土寛和, 前野隆司: 触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 235-240, 2004
- [ソニー・コンピュータ・エンタテインメント] <http://www.scei.co.jp/>
- [電気通信事業者協会] <http://www.tca.or.jp/>
- [任天堂] <http://www.nintendo.co.jp/>
- [東山 01] 東山篤規, 宮岡徹, 谷口俊治, 佐藤愛子: 触覚と痛み, ブレーン出版, 2001
- [ブザン 05] トニー・ブザン: ザ・マインドマップ, ダイヤモンド社, 2005
- [藤田 00] 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
- [星野 89] 星野匡: 発想法入門, 日経文庫, 1989
- [前野 04] 前野隆司: 脳はなぜ「心」を作ったのか, 筑摩書房, 2004
- [山内 09] 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 一第 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 06] 山口創: 皮膚感覚の不思議, ブルーバックス, 講談社, 2006
- [山本 02] 山本晃生, 石井利樹, 飛弾信崇, 樋口俊郎: 静電気力による摩擦力制御とフィルム移動子を用いた薄型皮膚感覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集, pp. 157- 160, 2002

付録 A 皮膚感覚を用いた日常動作・状態一覧

皮膚感覚の役割	特徴	動作・状態	
触対象の 特徴の認識	テクスチャ	手首に指を当てて脈拍を測る 自分のひげが伸びているかどうか触って確認する 布の手触りを確認する	
	硬さ	箸を通して煮物の煮え具合を柔らかさで確認する 果物が熟しているかどうか柔らかさで判別する 腹をつまんで脂肪のつきを把握する	
	温度	洗濯物が乾いたかどうか触って確認する 風呂が適温になったかどうか確認する おでこに手をあてて熱を測る	
	重さ	スイカの中身がどれくらい詰まっているか重さで判別する	
	全体の形(体積)	鞆の中から所望の物を取り出す	
	全体の形(細部の形)	スボンのボケットのの中から鍵を探し出す	
	作業の補助	静的動作(把握)	包丁を把持する
			うちわを把持する
			編み機を把持する
			受け皿を把持する
ミニホッチキスを把持する			
鉛筆その他の筆記具を把持する			
ライソングラスの脚を把持する			
茶筒の蓋を把持する			
輪ゴムを把持する			
トイレットペーパーを把持する			
たばこを把持する			
錠に差し込んである錠を抜き取る			
キリを用いて穴を開ける			
紙の皺を伸ばす			
消しゴムを使う間、紙を押える			
線を引く間、物差しを押える			
トッチボールを片手に載せて支える			
書類袋を抱える			
つり革に手をかける			
電話機のダイヤルをまわす			
指印をつく			

動的動作(手指)	
ライターをつける	ライターのつまみながら、握んでいる手でキャップを外す
ノック式のボールペンをカチカチする	ライソングラスの脚を片手で二個持つ
鉛に糸を通す	針に糸を通す
シヤツのボタンをとめる	たばこの灰を落とす
紙を折る	紙を折る
缶のプルタブを開ける	缶のプルタブを開ける
床の上の硬貨を拾う	床の上の硬貨を拾う
スプーンを押す	スプーンを押す
ペーシをめぐる	ペーシをめぐる
割れ目のあるゆで卵の殻をむく	割れ目のあるゆで卵の殻をむく
カードをきる	カードをきる
包丁でりんごの皮をむく	包丁でりんごの皮をむく
カッターの刃を押し出す	カッターの刃を押し出す
ドライバーでねじを締める	ドライバーでねじを締める
ペットボトルの蓋を開け閉めする	ペットボトルの蓋を開け閉めする
鉛筆で字を書く	鉛筆で字を書く
手袋をはめる	手袋をはめる
スポンジを圧縮する	スポンジを圧縮する
はさみで紙を切る	はさみで紙を切る
床においてあるカードをつかむ	床においてあるカードをつかむ
ピンをつまむ	ピンをつまむ
茶筒をつかむ	茶筒をつかむ
ポリ袋を開く	ポリ袋を開く
テープをはがす	テープをはがす
ペシ回しをする	ペシ回しをする
ネットレスを装着する	ネットレスを装着する
指輪をはめる	指輪をはめる
鍵盤楽器を演奏する	鍵盤楽器を演奏する
弦楽器を演奏する	弦楽器を演奏する
打楽器を演奏する	打楽器を演奏する
野球のバットを振る	野球のバットを振る
野球のボールを投げる	野球のボールを投げる
ゴルフのスイングをする	ゴルフのスイングをする
柔道で対戦相手を投げる	柔道で対戦相手を投げる

動的動作 (手指以外の特定部位)	ダーツを投げる		
	将棋の駒を打つ		
	ハンドルを操作する		
	携帯のボタンを押す		
	折りたたみ式携帯を開け閉めする		
	フランスパンを噛みきる		
	歯をみがく		
	リップクリームを塗る		
	自分で耳かきをする		
	ボールを蹴る		
	靴を履く		
	口紅を塗る		
	ペスカラを使用する		
	服の着脱		
耳掃除する			
鼻毛をぬく			
鼻をほじる			
コンタクトレンズを入れる			
アイシャドウを入れる			
舌で歯の隙にはさまったものを取り出す			
周囲の変化の感知	振動	地震がおきたことに気づく 床が脆いことに気づく 携帯のバイブがなったことに気づく 外に出た瞬間の気温の変化に気づく	
	温度	突風が吹いたことに気づく 何かにぶつかったことに気づく 後ろから触られたことに気づく	
	圧力	汗をかいていることに気づく 体に虫がとまったことに気づく 雨が降り始めたことに気づく	
	微小刺激	服を着ている 下着をはいている 時計をはいている ネックレスを身に付けている	
	周囲の定常の把握	装着していることの認識	何かを握っている
		歩いていることの認識	
		横になっていることの認識	
	自身の状態の認識		

能動的な 快感の取得	外部環境の認識	椅子に座っている
		ベッドで寝ている
		水中を泳いでいる
	日が当たっている	
	風に吹かれている	
	ふわふわの毛皮を触る	
	手触りの良い布を触る	
	耳たぶに触れる	
	ぶちぶちをつぶす	
	ノック式のペンをカチカチする	
犬の肉球に触れる		
女性に触れる		
ナタデココを食べる		
サンドバックを殴る		
キャンベツをザクッと切る		
好きな人と手をつなぐ		
子供の頭をなでる		
グリッソンの良いペンで字を書く		
グリッソンの良いラケットを使用する		
切れ味の良い包丁で切る		
触感を重視したキーボードを使用する		
触感を重視したキーボードを使用する		
暑い時に扇風機にあたる		
クーラーの効いた部屋に入る		
夏のプールで泳ぐ		
サウナの後に水風呂につかる		
うちわで扇がれる		
かゆいところを掻く		
痛いところをさする		
マッサージを受ける		
性感を刺激される		
ジェットコースターの落下感		
温泉に入浴する		
柔らかい布団にくるまる		
着心地の良い服を着る		
温泉に入浴する		
能動的な 安心感の取得	ストレス軽減	ないし物足りない
		不快感の排除
		触られ方に依存
受動的な 快感の取得	心地よい感触のモノ	心地よい感触のモノ

		砂風呂に入る		
受動的な 安心感の取得	安心感	頭をなでられる		
		抱きしめられる		
危険の学習	危険	頭を無意識的に掻く		
		熱したフライパンに触れる		
		ドライアイズに触れる		
		ヘアのトゲに触れる		
		金属に触れた際に放電する（静電気が発生する）		
		危険な薬品に触れる		
		べたべたしたもの（シールをはがした痕など）に触れる		
		ぬめぬめした感触のモノ（阿生類など）に触れる		
		ごつごつしたモノに触れる		
		手に油が付着する		
能動的な 不快感の取得	身体に付着	手に油が付着する		
		犬の糞などの汚物に触れる		
	嫌いな対象と接触	固くて押しにくいキーボードを使用する		
		切れ味の悪い包丁で切る		
		狭いひじおきを使用する		
		嫌いな虫に触れる		
		注射を打たれる		
		強く叩かれる		
		骨折する		
		靴擦れをおこす		
危険の感知	危険	蚊に刺されて痒くなる		
		暑い部屋にこもる		
		濡れた服を着る		
		くすぐられる		
		知らない人に触られる		
		痴漢される		
		嫌いな虫が体を這っている		
		受動的な 不快感の取得	嫌いな対象と接触	痴漢される
				嫌いな虫が体を這っている

付録 B 皮膚感覚技術の用途一覧

用途	具体例	詳細説明
遠隔操作ロボットによる作業代行	遠隔触診	
	遠隔マツサージ・エステ	
	遠隔介護	
遠距離伝達	遠隔地の家族・恋人・ペットと触れ合う	
	死に間際のヒトの手を握る	
遠隔触感コミュニケーション	遠隔突っ込み	通話相手に突っ込みを入れるテレビに出ている嫌いなタレントなどに打撃を加える
	遠隔攻撃	
	極限環境などで、特殊な作業服に覆われている	
外部環境の問題による接触不可の解消	清潔な環境で、手袋をしなければならぬ	
	野球の試合でグローブをはめなければならない	
	運転中に車外のモノに触れる	
近距離伝達	自身の問題による接触不可の解消	感染症を患っているため直接触れられない 潔癖症のため直接触れられない
	危険なため直接触れられない	肉食動物 毒を持った生物
	法的・倫理的問題で直接触れられない 衛生的・精神的な問題で直接触れられない	美荷品 排泄物
保存した情報の触感提示	所望のタイミングでの触感提示	快感・気に入った触感の保存・提示 覚えておきたい触感の保存・提示
	快感の定常的提示	厚着でも温かい感覚を得る 厚着でも涼しい感覚を得る 着心地の悪い服を着ていても心地よい感覚を得る
	ネットショッピング	服の試着 触り心地の確認
	快感覚のVR体験	着心地 バーチャル風俗

	バーチャル温泉 バーチャルプール バーチャルアトラクション バーチャル落下感・浮遊感	
現実ではできないこととのVR体験	直接は触れることのできないものに触れて好奇心を満たす	内臓など、体内のモノ 女性に触れる バーチャル通り魔 バーチャル痴漢
	法的・倫理的にはできないことを仮想空間上で行い欲求を満たす	絶滅した猫の肉球 10代の頃の肌の触感を提示 禿げているヒトに髪の毛の触感を提示
	現実には存在しないものに触れる	ライケルジョーダンのシェーフト感 タイガーウツスのスウイング感
他人の触感体験	有名な人の触感体験	
	異性の性感体験	
環境のVR体験	無重力感の体験 南極の極寒の体験	
	職業訓練シミュレーター	ナシ職人育成シミュレーター 手術訓練シミュレーター ドライビングシミュレーター
操作フィードバック	タッチパネル上で触感提示	クリック感 筆跡感 ページ繰り感
	触感マウス エア入力インタフェース	
	仮想滑り提示による把持力増加の誘発 遠隔操作の際の危険に一步手前で行動を停める	
特定の行動の誘発	VR空間上で痛みへの提示	VR 似のめり込みのを防ぐ為に痛みを フィードバック
	VR空間上で痛みへの提示	反射の誘発
暗黙知のデータ化	「耳たぶのかたさ」の定量化	
	職人の暗黙知の定量化 性感情報の定量化	
画面の触れる化	卓上ゲームの触感	囲碁・将棋を打つ際のバチン感

		火に触れる	時の流れを触る	投げキックスに触る	果の境目に触れる	音に触れる	おいおいに触れる	時の流れに触れる		
触感のアート	音楽や映像に同期させて呈示									
	新触感の創出	触感提示で健康にする	触感提示で農作物の味を良くする	家畜の歩行の誘導	動物に性行為を促す	触感提示で心を落ち着かせる	触感提示で暗記力を増加させる	触感提示でゴミゾリを駆除する		
その他提示 技術の用途	特定の状態の誘発	触感で心を制御する	触感提示で心を増加させる	触感提示で心を増加させる	触感提示で暗記力を増加させる	触感提示でゴミゾリを駆除する	電線に不快な触感を提示して、鳥がとまらないようにする			
		触感で脳を活性化								
		触感で家畜の行動抑制								
		触感で心を知覚する								
		触感で心を知覚する								
触感センサ の応用	触対象の特徴の識別	皮膚感覚知覚特性の解明	刺激バースターと知覚する触感の関係	解析	触対象の品質の判別	果物の熟れ具合を判別	肩こりの検出	偽札の判別	ゲーミング牌判別	
			状態の判別	ロボットハンドの把持力制御	料理ロボット					
				マッシャーロボット						
			過去の知見の保存	職人技の保存	絶滅した動物の触感を保存					
				ライオンゾグ	し忘れ防止					
			触れたモノの記録	ライオンゾグに利用	ヒトの日常動作の調査					
				放牧中の動物の管理	馬の歩行状態					

触感認識機 構の解明の 応用	触感知覚能力が無 いヒトに触感提示	義手でも触感を知覚できるようにする	神経が切断された後でも触感を知覚できるようにする	
		モノの不快感を排除	モノの不快感を排除	尻の痛くならない椅子
触感関連デバイス 開発への応用	触感センサの開発	触感ディスプレイの開発	触感センサの開発	
		触感センサの開発		

触感認識機 構の解明の 応用	触感知覚能力が無 いヒトに触感提示	義手でも触感を知覚できるようにする	神経が切断された後でも触感を知覚できるようにする	
		モノの不快感を排除	モノの不快感を排除	尻の痛くならない椅子
触感関連デバイス 開発への応用	触感センサの開発	触感ディスプレイの開発	触感センサの開発	
		触感センサの開発		

センサー出力値をインタフェースの入力値として利用	あらゆる触感の排除	悟りを開く
装着感の排除	痛み・痒みの排除	腕時計の装着感の排除
	不快感覚の排除	生理用品の装着感の排除
		カマメラの装着感の排除
		胃カメラを入れる感覚の排除
		魚を食べる時の骨の感覚の排除
		痲痺されていることに気付かなくする
		書きやすいいペン
		持ちやすいいペットボトル
		寝やすいい枕

付録C ニーズ調査のためのアンケートシート

触感提示技術のアプリケーションのニーズ調査

慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 前野研究室

修士2年 塩川雄太

私達は、「つるつる」「温かい」「冷たい」「心地よい」「痛い」などといった触感情報をリアルに再現する新しい技術である「触感提示技術」の研究開発を行うとともに、この技術の有効な用途を模索しています。提示技術の用途として考えられるアプリケーションの一部を抜粋し、それらのニーズがどの程度あるかを把握するために実施させていただきます。アンケートの回答は本研究の目的のみに利用いたします。blinkslip@z.keio.ac.jpに添付の上ご返送ください。回答後は塩川雄太がご返信いたします。

基本情報をご記入下さい。

年齢層(例: 20代)

性別

職業

下の表に示した、触感提示技術を応用して実現できると考えられる20のアプリケーションの説明文をよく読み、それぞれのアプリケーションについて、以下の設問に対する回答を、表内の回答記入欄に数字でご記入下さい。

問①: このような、またはこれに近いアプリケーションを、これまでに**欲しい・使ってみたく**思った**こと**がありますか?
 1. 全く思ったことがない 2. 少しだけ思ったことがある 3. 時々思うことがある
 4. たびたび思うことがある

問②: このような、またはこれに近いアプリケーションが実現したとして、**欲しい・使ってみたく**と思いませんか?
 1. 全く**思わない** 2. **そう思わない** 3. **どちらかという**と**そう思わない** 4. **どちらともいえない** 5. **どちらかという**と**そう思う** 6. **そう思う** 7. **非常に**と**そう思う**

問③: このような、またはこれに近いアプリケーションが**社会的に必要である、または今後必要になる**と思いますか?
 1. 全く**そう思わない** 2. **そう思わない** 3. **どちらかという**と**そう思わない** 4. **どちらともいえない** 5. **どちらかという**と**そう思う** 6. **そう思う** 7. **非常に**と**そう思う**

また、各用途に対するコメント(こういう風に考えたら使ってみたいetc)がもしございましたら、回答記入欄右側の自由記入欄に記入してくださいと大変助かります(任意)。説明文の内容が理解できなかった場合につきましては、自由記入欄にその旨をご記入ください。その際、回答欄は未記入のままにしてください。

なお、説明文中の(※)の用語は以下の定義に従うこととします。

名称	定義
手袋型デバイス	手袋のように手に装着するデバイス。手袋の内側に触感が提示される。コントラクトンズのように、装着者は装着感をほとんど感じることなく使用できるものとする

衣類型デバイス	衣類のように全身に装着するデバイス。衣類の内側に触感が提示される。装着者は装着感をほとんど感じず、また、外見も普通の衣類のような違和感のないものとする。
触感遠隔伝達デバイス	音声を伝送する電話のように、触感情報を遠隔地にリアルタイムに伝送するデバイス。利用者は、デバイスをかいて遠隔地の対象と触れ合うことができる。触れている感覚、触れられている感覚がリアルタイムに再現されており、立体映像と統合することで利用者は遠隔地の対象が目の前に実在するかのように感じられるものとする。
VR空間	映像、音声、触覚情報などがリアルタイムに再現されている高臨場感3D空間

また、特に記述のない場合、触感 は本物とほぼ同様のリアリティで再現されているものとします。

用途名	説明文	回答記入欄
		問① 問② 問③
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かいて間接的に触れる。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 携帯触感プレイヤー	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量的表現(料理本における「耳たがらいのかたさ(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 快感の定量的提示	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 ネットコミュニケーション	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を体験することができる(例: VR温泉、VRサッカー、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、ボタンや押下感、形状などの触感を提示する。	
11 痛みの提示	VR空間上で危険なモノに触れた際、痛みをリアルタイムに提示すること、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、髪への触感を、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、湿度などをリアルタイムに再現する。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	不快感覚の遮断	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)を遮断する。遮断する不快感覚は事前に選択可能であるものとする。			
15	不快感覚の抑制	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。			
16	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。			
17	触感コントラクトレンズ	手袋型・衣類型デバイスを介して得られた触感情報を増幅して装着者に提示することで、コントラクトレンズを着用するように、装着者の触知覚を鋭敏にする。			
18	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ー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ソフトウェアとして提示される。			
19	快触感による行動の促進	本来は触れたくないモノ(不快な触触のモノ、嫌な手作業)に手袋型デバイスを介して触れると、触対象の触感を快触感に変換して装着者に提示し、触りたいという気持ちに提示し、触りたいという気持ちを誘発する。			
20	不快触感による行動の抑制	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。美飾品の保護、痴漢などの犯罪防止に利用。			

問④ 上記の20の用途の中から、実現してほしいものを最大3つまで選び、右のボックスに用途番号(1~20)を記入してください。選定基準は自由です。特に実現してほしい用途がなければ記入しなくても結構です。

--	--	--

問⑤ 上記の20の用途以外で、これならば欲しい・使ってみたいと思う触感アプリケーションのアイデアがございましたら、下の記入欄にご記入下さい(任意)。

質問は以上となります。ご協力ありがとうございました。

付録D タッチパネル上で行うことのできる動作一覧

動作	動作方向	動作種類	対象物の例
触れる	なし	基本動作	
うつ	なし	触れるを速く	将棋の駒、囲碁
貼る	なし	触れる	シール
押す	法線	基本動作	ボタン ノック式ペン
つぶす	法線	押すを強く継続	虫
割る	法線	押すを強く継続	氷 薄い膜
はめる	法線	押すを強く継続	財布の留め具 コネクター
刺す	法線	押す	画鋸
なぞる	接線(滑り)	基本動作	点字 境界
ひっかく	接線(滑り)	小面積でなぞる	
なでる	接線(滑り)	なぞるを弱く繰り返す	ペット
さする	接線(滑り)	なぞるを弱く繰り返す	
書く	接線(滑り)	ペンでなぞる	鉛筆 マジック 習字
塗る	接線(滑り)	なぞる	絵の具 パテ
磨く	接線(滑り)	なぞるを強く繰り返す	歯磨き 紙やすり
こする	接線(滑り)	なぞるを強く繰り返す	消しゴム
切る	接線(滑り)	なぞる	包丁
そる	接線(滑り)	なぞる	ひげそり かみそり しばかり
はじく	接線(滑り)	なぞるを速く	弦楽器
ひっかける	接線(滑り)	なぞる	
消しゴムのカス丸める	接線(滑り)	特殊動作	消しゴムのカス
つまむ	法線+接線(固着)	基本動作	
ひねる	法線+接線(固着)	つまむを強く	
もむ	法線+接線(固着)	つまむを連続に	
絞る	法線+接線(固着)	つまむを強く継続	フルーツ
ページめくり	法線+接線(固着)	特殊動作	ページ
プルタブ開ける	法線+接線(固着)	特殊動作	プルタブ
シャンパンの栓開ける	法線+接線(固着)	特殊動作	シャンパンの栓
折る	法線+回転(固着)	基本動作	チョコレート
ずらす	法線+接線(滑り)	基本動作	スクロール
ピーラーで皮むき	法線+接線(滑り)	特殊動作	
ジップロック閉める	法線+接線(滑り)	特殊動作	
紙に折り目付ける	法線+接線(滑り)	特殊動作	
ティッシュ取る	法線+接線(滑り)	特殊動作	
テープをはがす	法線+接線(滑り)	特殊動作	
ポストイットをはがす	法線+接線(滑り)	特殊動作	
まわす	法線+接線(固着)+回転(滑り)	基本動作	キャップ ダイヤル
ねじる	法線+接線(固着)+回転(滑り)	まわすを強く	ぜんまい
特殊動作			
包丁で皮むき	法線+接線(固着)+接線(滑り)	特殊	
ジッパー開け閉め	法線+接線(固着)+接線(滑り)	つまむ+滑り	