

3次元触覚装置の普及支援システムの開発

報 告 書

平成23年3月

財団法人 ニューメディア開発協会

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

序

わが国の経済・社会構造の高度化にあたり、情報・機械産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、ゆとりと豊かさを実感できる社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する情報・機械システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人ニューメディア開発協会では、財団法人JKAから自転車等機械工業振興事業に関する補助金の交付を受けて、ニューメディアを開発・普及する補助事業を実施しております。

本「3次元触覚装置の普及支援システムの開発」は、ニューメディア情報システムの開発事業の一環として、当協会がソフトキューブ株式会社に委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方にお役に立てれば幸いです。

平成23年3月

財団法人 ニューメディア開発協会

3 次元触覚装置の普及支援システムの開発

目 次

1.	はじめに	1
2.	開発の背景および技術動向	2
2.1	開発の背景	2
2.2	人間の触知行動	3
2.2.1	触様相	3
2.2.2	触知覚動作	3
2.2.3	パターン認知	3
2.3	関連研究	4
3.	普及支援システム	6
3.1	3次元触覚装置	6
3.2	普及支援システムの構成	6
3.3	提示する触力覚情報	7
3.4	提案手法の実現方針	7
3.5	色情報に基づいたインピーダンス情報の生成	8
3.5.1	色彩感情	8
3.5.2	インピーダンス情報の設定方法	8
3.6	エッジ情報に基づいた凹凸情報の生成	9
3.6.1	エッジ情報	10
3.6.2	凹凸情報の設定方法	10
3.7	変形レンダリング	10
3.7.1	仮想環境	10
3.7.2	ピンチ変形	11
3.7.3	アルゴリズム	12
3.7.4	ピンチレンダリング	13
3.8	画像可触化の問題点	15
3.9	触覚コンテンツの自動抽出手法	16
3.9.1	輪郭の抽出	16
3.9.2	インピーダンス情報の設定	16
3.9.3	形状情報の設定	17
3.10	画像可触化システムの開発	18
3.10.1	システムの構成	18
3.10.2	VR 世界の構築	19

3.10.3	力覚レンダリング	19
3.10.4	実行例	20
4.	画像可触化の評価実験	22
4.1	インピーダンス情報の設定手法の評価	22
4.1.1	予備実験	22
4.1.2	本実験	22
4.2	形状情報の設定手法の評価	23
4.2.1	輪郭の提示手法の評価	23
4.2.2	距離情報を提示した場合	24
4.2.3	画像可触化評価実験の結果のまとめ	25
4.2.4	今後の展望	26
4.3	変形レンダリングの評価実験	26
4.3.1	実験	26
4.3.2	変形レンダリングの評価実験結果のまとめ	29
5.	評価	30
5.1	技術面からの評価	30
5.2	市場面からの評価	31
	【参考文献】	34
	(付録)	38
6.	【提言】	41
6.1	触覚装置	41
6.2	触覚オーサリングシステム	41
6.3	触覚サービス	41
6.4	ハプティック業界の育成	42
6.5	事業化に向けた体制作り	43

1. はじめに

平成 22 年は、家電業界から 3D テレビが続々と発表された。最近では、眼鏡なし 3D テレビも出現した。3D 化の波は、パソコンやモバイル機器に波及し、ゲーム機も出現した。

3D がこれほど騒がれる理由の一つは、それが従来にない新しいメディアを提供するからで、映像のカラー化、ハイビジョン化の次の試みが 3D 化の流れである。技術革新が進む映像、音像メディアに対して、触覚(力覚)メディアは、手術シミュレーション、理科教育といった特殊な分野で限定的に利用されているだけで、研究段階のレベルであり、家電のような民生機器による一般へのサービスは提供されていない。しかし、メディアの種別で見ると、ビジュアル、オーディオ (A/V) に続くものとして触覚 (ハプティック (H)) が人間の感覚器官としても重要であり、触覚メディアに対するニーズは高い。

本開発の目的は、触覚メディアを A/V 機器と連携させることで、ハプティックの重要性、面白さを広く世界に伝達することである。その際、3D 映像はタイミング的に連携の相手として相応しいと判断した。つまり、3D による高臨場感が、触覚メディアを併用することで一層リアルな効果を演出できることが期待できるからである。A/V+H の相乗効果を示すことで、触覚装置が民生機器として普及し、経済的な効果も期待できると考えた。

このような目的のために、触覚コンテンツを制作するためのソフトウェア基盤として普及支援システムの試作及び評価を行う。

第 2 章では、触覚に関連する研究開発の背景および技術動向を記述した。それを踏まえて、第 3 章では、普及支援システムの技術開発について述べる。今回の開発の中心となる技術は画像可触化であり、それについて詳細に述べる。第 4 章では、第 3 章の普及支援システムの評価実験について実験内容を説明する。第 5 章では開発した普及支援システムの性能的な面およびユーザの観点から評価する。第 6 章では、今回の開発を踏まえて今後の課題や進め方について事業プランを検討した。

2. 開発の背景および技術動向

2.1 開発の背景

触覚メディアは、画像映像メディア、オーディオメディアに続く第3のメディアと捉えることが可能である。触覚を扱うデバイスとして、米国 MIT の研究者が開発した PHANTOM が世界で最も利用されているが、その分野はかなり専門的な用途に限定され、ユーザも研究者が中心である。今回の開発は一般向けの触覚提示の切り口を見つけることであった。触覚メディアを普及させるためには図1に示すような幾つかの項目について課題を解決する必要がある。

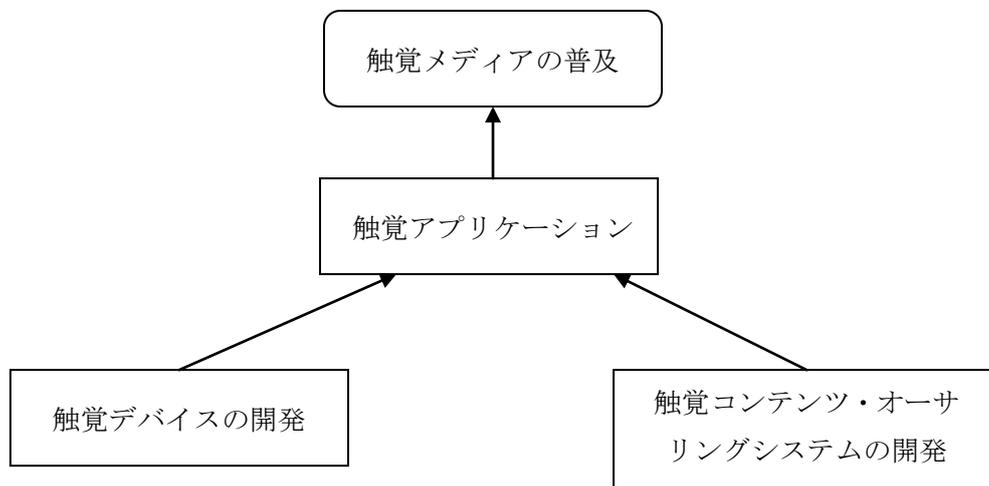


図1 触覚メディア普及のための開発関連図

触覚メディアの普及をトップダウン的に考えると、まずは触覚アプリケーションを検討しなければいけない。それが決まると、そのアプリケーションが求める触覚デバイスや触覚コンテンツ・オーサリングシステムの開発が続く。

触覚アプリケーションの具体的なイメージはどのようなものであるのか。特にキラーアプリケーションを探さなければならない。これは触覚メディアの普及のための第一の関門になる。本事業では、3D 立体画像を自由に触れるようなサービスを想定した。現状では具体的なキラーアプリケーションは探索段階である。そのために、触覚デバイスは汎用的なものを想定する。触覚コンテンツ・オーサリングシステムは、触覚コンテンツを制作するシステムであるが、これもアプリケーションが未定のため仕様の絞込みは今後の検討課題である。ここでは、自動的に触覚コンテンツを制作できる画像可触化の開発を重点的に行った。

2.2 人間の触知行動

2.2.1 触様相

触覚を分類すると、皮膚感覚としての触知覚(tactile perception)、運動感覚による知覚(kinesthetic perception)、これら両者を含む触運動知覚(haptic perception)がある。また、知覚者が知覚状況下で、能動的か受動的かという問題がある。Gibson[3]は、パターン認知のために対象に触る過程を受動的触知(passive touch)と能動的触知(active touch)に分類した。受動的触知(passive touch)とは、触覚を生起する手指の皮膚を物体に固定して、それが何であるかを認識するものである。一方、能動的触知(active touch)とは、手指を対象に触れるということの他に、その特徴を把握するために手指を随意的に動かすという触運動が伴う様態である。LoomisとLederman[22]はこれらの組み合わせにより、触様相を触知覚(tactile perception)、受動的運動知覚(passive kinesthetic perception)、受動的触運動知覚(passive haptic perception)、能動的運動知覚(active kinesthetic perception)、能動的触運動知覚(active haptic perception)に分類した。人間の日常生活における触覚情報のほとんどは能動的触運動知覚(active haptic perception)に依存しているといっても過言ではない。

2.2.2 触知覚動作

触覚によって対象を認識する際、まず大まかに手指を動かして全体情報を把握し、さらに、注目する部分に触れてそこから詳細情報を得るという過程が繰り返される。触運動知覚とは、このような触認識の様態を表し、いくつかの動作に分類することができる。

Ledermanら[36]はこのような動作を図2のように分類した。これらを知覚する触知覚情報の観点から分類すると、Lateral Motion(並進運動)は対象の質感を知るために用いられ、Pressure(押し込み動作)は対象の硬さを、Static Constant(接した状態で静止)は対象の温度を、Unsupported Holding(掴み動作)は対象の重さを、Enclosure(握り動作)は対象の外形と大きさを、Contour Following(なぞり動作)は対象の外形と正確な形を知るために用いられる動作であるといえる。

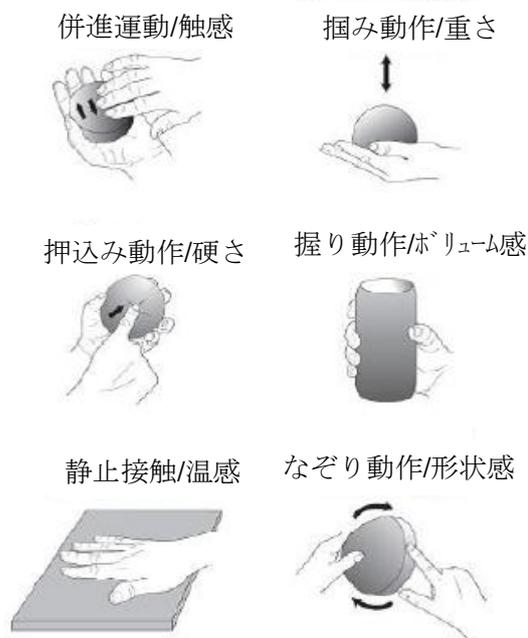


図2 6つの手の動作と対象物の属性[38]

2.2.3 パターン認知

人間は複数の感覚モダリティから得た情報

をどのように処理しているのかという問題は古くから議論されてきた。初期の心理学における実験的な研究では、視覚は他の感覚を支配するという結果がほとんどだったため、視覚優位性の見解が支持されてきた[9]。しかし、近年の心理学では、触覚の役割が大きいことが明らかになってきて、一般の晴眼者においても能動的触知の重要性が示されている。Gibsonは形を知覚する際に能動的触知が重要であることを示した[3]。また、Katz[17]はテクスチャーを知覚するときに、受動的触知ではなく、能動的触知によって弁別できるようになることを実験的に明らかにし、日常生活では能動的に触れることで外的環境を知覚していることを指摘した。さらに、視覚よりも触覚が優位になる場合があることも報告されている[23][32]。このように、これまでの研究で、外界を知覚する上で能動的触知が重要であることが明らかにされてきた。

2.3 関連研究

可触化に関する研究はこれまでも数多くなされてきた。特に、画像に関連する研究としては、視覚障害者に画像情報を触覚提示した[11][12]が挙げられ、製品化されたものとして Optacon[20]がある。これらはピン型の触覚ディスプレイであったため、力覚を感じることはできず、触運動知覚についても考慮されていなかった。また、力覚インタフェースを用いて物体形状の認識を行うことを目的とした研究[21]では、3次元計測装置で物体の形状情報を取り込み、得られた距離画像から適切な力覚情報を生成することで、操作者が滑らかに触ることのできる可触化システムが開発された。しかし、これも視覚障害者を対象としたシステムで、汎用性のある画像可触化手法ではなかった。

一般の晴眼者を対象とした、力覚インタフェースによる画像可触化に関する研究としては、[13][43]が挙げられる。[13]は画像編集の操作性向上を目的としており、[43]は画像に触れられるようにすることでユーザの関心を高めることを目的としている。しかし、どちらも可触化に必要なパラメータ値を自動的に適切な値に設定する手法までは考えられていなかった。

可触化は、インタラクティブ教育システムで使用されている。HaptiChem[37]は、分子間力を学習するための教育システムである(図3)。SPIDAR-Gのグリップを操作し、分子間の距離に応じてファンデルワールス力を可触化し、ユーザに反発力を提示することによって分子間力の理解をより深くすることができる。

INSTILL[42]は、単語の発音の訓練のインタラクティブシステムである(図4)。単語の発音を再生するとともに、適切なところに学習者に垂直な力を提示することによって、単語のアクセントを強調している。実験では、力覚刺激が正しい発音を覚えるに役立つことを示されている。

境界/テクスチャ増強のための触覚ディスプレイ[4]は図5に示されている。このデバイスは、境界やテクスチャに対応する触感を指に提示することができる。

可触化は、データを理解するためにデータ解析システムでも使用されている。[8][14]

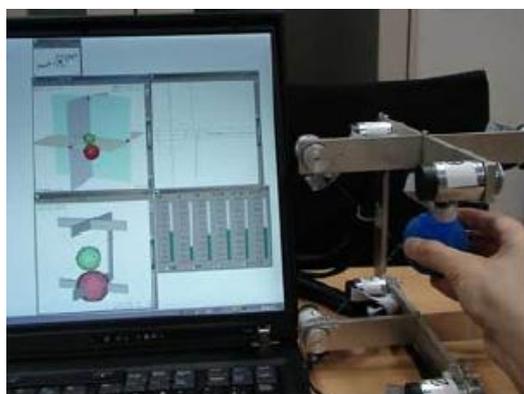


図 3 触化学 HaptiChem [37]

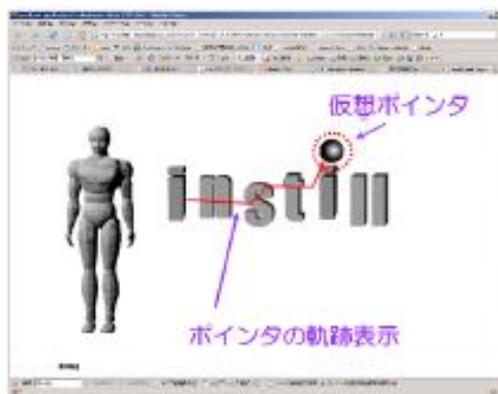


図 4 発音訓練 INSTILL [42]

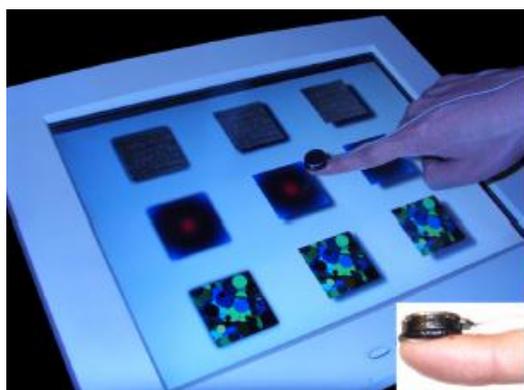


図 5 爪装着型触覚ディスプレイ[4]

3. 普及支援システム

3.1 3次元触覚装置

3次元触覚装置とは、ユーザに触覚や力覚を提示することによって、VR世界の中の物体に触れた感覚を得ることのできるデバイスである。本開発では、SPIDAR [34]を使用する。SPIDARは、力覚提示部に糸を結びつけ、その糸をモータで制御し、引っ張ることで力を発生させ、ユーザが力覚を感じることができる並進・回転計6自由度の力覚デバイスである。SPIDARには様々な種類があるが、本開発ではSPIDAR-G [15][16] [35]のフレーム構造を改良した、SPIDAR-GCC(図6)を用いる。



図6 SPIDAR-GCC(指先提示用)

3.2 普及支援システムの構成

普及支援システムの構成は、図7に示すようにPC内に構築されている。PC環境は、Windows7、Visual C++を使用した。触覚の対象となる映像コンテンツは、暫定的にOpenGLで作成した。

本普及支援システムは、任意の画像に対して、人間にとって違和感のない可触化を実現するところに特徴がある。これによって、力触覚の自動生成システムが開発され、触覚コンテンツを大量に提供することが可能になり、民生応用への第一歩となる。

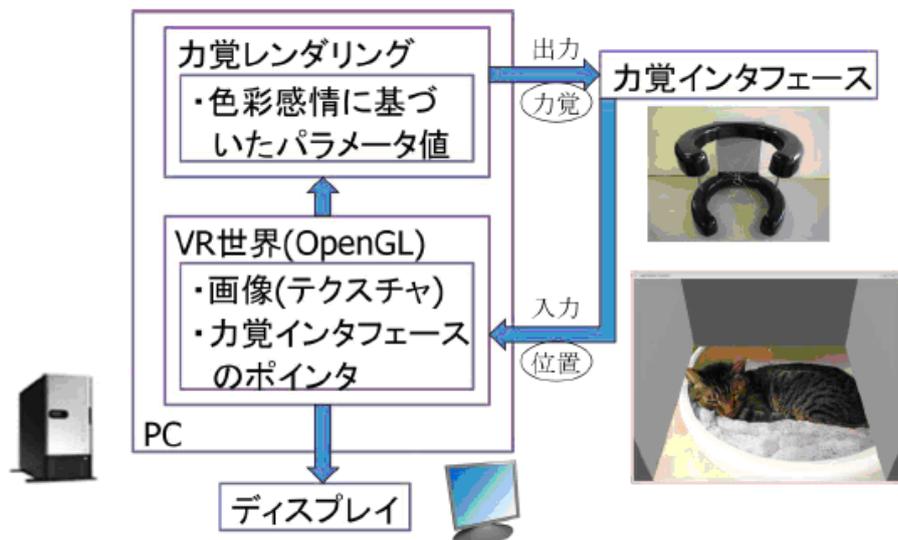


図7 普及支援システム(試作版)

3.3 提示する触力覚情報

本開発の可触化対象は一般の画像であり、3次元形状情報は持っていないため、画像中の物体を3次元で掴んだり摘まんだりすることはできない。また、力覚インタフェースでは、温度を提示することは困難である。したがって、Lederman らの人間の触知覚動作の分類の中で、実現可能な動作は押し込み動作(反力)と並進運動(摩擦力)である。これらは対象の材質を識別するものであるため、並進方向の力と接触位置(凹凸情報)を利用して、さらに対象の形状も表現することを試みる。

SPIDAR をはじめとする、インピーダンス型の制御方式の力覚インタフェースでは、インピーダンス情報(一般にバネ定数とダンパ定数を表す)によって仮想壁の硬さを設定する。そのため、本開発では、インピーダンス情報のパラメータ値を自動的に生成することが求められる。なお、インピーダンス制御では、位置を入力し力を出力するため、摩擦係数を設定することによって、画像に触れたときの反力から、摩擦力を提示することが可能である。

3.4 提案手法の実現方針

本開発において最も理想的な手法は、画像中に含まれる物体、背景を全て認識し、それぞれの物体の現実の材質に基づいたインピーダンス情報を設定することだと考えられる。これが可能であれば、これ以上なくリアルな画像可触化を実現することができる。しかしながら、現状の技術では任意の画像に対して一般物体認識を行うことは非常に難しく、認識された物体の中でも、部位によって材質が異なるため、実際にはさらに細かく認識を行う必要があり、現実的ではない。また、それ以外にも、触ることのできないものや架空の物体に対しては、どのように設定するか考えなくてはならないという問題もある。そこで、本開発では視覚情報から力覚情報を生成することを考える。

現実の材質に基づいたインピーダンス情報を設定することだと考えられる。これが可能であれば、これ以上なくリアルな画像可触化を実現することができる。しかしながら、現状の技術では任意の画像に対して一般物体認識を行うことは非常に難しく、認識された物体の中でも、部位によって材質が異なるため、実際にはさらに細かく認識を行う必要があり、現実的ではない。また、それ以外にも、触ることのできないものや架空の物体に対しては、どのように設定するか考えなくてはならないという問題もある。そこで、本開発では視覚情報から力覚情報を生成することを考える。臨場感を高める上で、人間の感覚統合の特性を考慮した感覚提示を行うことは重要であり[1]、そのためには異なるモダリティ間の情報の変換手法が求められる[28]。本開発では、視覚から受ける印象に即した触力覚情報を提示すれば、それがリアルではなくても人間にとって違和感のないマルチモーダル環境が実現できるのではないかと考え、画像の色情報を用いることにより、視覚から受ける印

象に即した力覚情報を生成する手法を提案する。

3.5 色情報に基づいたインピーダンス情報の生成

視覚情報は人間が五感で得られる情報の約8割を占めているが、特に色の効果は人間の判断に常に大きな影響を与えているといわれている。また、色の心理的効果は、VR空間においても成り立つことが示されている[25]。そこで、本開発は色の心理的効果である色彩感情に着目し、これを応用することで視覚から受ける印象に即した力覚情報を生成する。

3.5.1 色彩感情

色彩の感情効果の元となる要素として、個人レベル、文化的レベル、普遍的レベルがあることは古くから知られている[26]。個人レベルというのは、色にまつわる個人の生活体験に由来する色彩感情を意味する。文化的レベルというのは、慣習、文化が投影された色彩感情を表す。これは民族、地域、国、気候、宗教など様々な要因によって生まれる。普遍的レベルというのは、人間であれば誰にも共通する色への感じ方を表し、古来から続く人間の生活体験の中で培われてきた色彩感情である。これらの色彩感情の中でも、見る人の主観によって強く規定されるものを表現感情といい、対象とする色の客観的な性質によって強く規定されるものを固有感情という。

表現感情は色にまつわる個人の生活体験に由来する感情なので、色を見る人の生まれ育った環境や過去の経験や知識などを基準とした主観や完成に強く規定される。これは、好き、嫌いといった個人の情緒に関するものである。一方の固有感情は、民族や文化を超えた人間としての共通感覚で、人間の深層心理に普遍的に備わっているものである。例えば、暖かい、寒いといった感情は、人間の聴覚、味覚、触覚、嗅覚といった感覚と視覚との共感覚として獲得してきたものである。これは、人間にとって普遍的な共通感覚を備えている。そこで、本開発では、この固有感情を応用することで、任意の画像に対して、一般に有効な手法が提案できるのではないかと考えた。なお、固有感情の具体例としては、暖寒感、軽重感、硬軟感、動静感などが挙げられる。

3.5.2 インピーダンス情報の設定方法

材質の剛性を表すバネ定数(K)に対しては、色の硬軟感に基づいて設定する。これは、硬く感じる色に対しては K を大きくし、軟らかく感じる色に対しては K を小さく設定するという考え方である。同様に、材質の粘性を表すダンパ定数 B に対しては、色の動静感を用いて設定する。物体の粘弾性(B/K)を動静感に対応付けることにより、 B の値は K の値に依存して決定される。この考え方に基づいて計算するために、色彩感情の定量化に関する研究を行った、中村らの研究成果[40]を利用した。これによると、硬軟感(SH)の評価式、動静感(DYP)の評価式はそれぞれCIE $L^*a^*b^*$ 表色系で、

$$SH = [(1.9L^*)^2 + 1.5(1 - \Delta h_{290}/360)C^{*2}]^{1/2} - 115 \quad (1)$$

$$DYP = [0.2(L^* - 50)^2 + 2.5(1 - \Delta h_{290}/360)C^{*2}]^{1/2} - 55 \quad (2)$$

のように表される。なお、この評価式は、視感評価によって得られた結果と色表の測色値との関係を比較検討することによって導き出されたもので、測色値から各色彩感情の度合いを求めることができる。SH の値は、大きいほど軟らかく、小さいほど硬く感じることを意味し、DYP の値は、大きいほど動的な、小さいほど静的な印象を受けることを表している。式(1)、(2) をコンピュータで一般に扱われる8 ビットRGB に対応させるために、RGB の範囲で最も硬いと感じる色が0、最も軟らかいと感じる色が1 となるように補正すると、次のようになる。

$$SH_{RGB} = (SH - (SH_{min}(RGB))) / (SH_{max}(RGB) - (SH_{min}(RGB))) \quad (3)$$

$$DYP_{RGB} = (DYP - (DYP_{min}(RGB))) / (DYP_{max}(RGB) - (DYP_{min}(RGB))) \quad (4)$$

SH_{min}(RGB)、SH_{max}(RGB)、DYP_{min}(RGB)、DYP_{max}(RGB) は、それぞれRGB の範囲における、式(1)、(2) の最小値と最大値を表している。これより、K とB は次のような計算式で求めることができる。

$$K = \text{Offset}_K - SH_{RGB} \times \text{Range}_K \quad (5)$$

$$[\text{Offset}_K : K_{max}, \text{Range}_K : K_{max} - K_{min}]$$

$$B = \text{Offset}_B + DYP_{RGB} \times \text{Range}_B \quad (6)$$

$$[\text{Offset}_B : B_{min}, \text{Range}_B : K \times B_{max_k} - B_{min}]$$

ここで、式(5) のOffset_K はKの最大値を、Range_KはK の最大値と最小値の差を表す。また、式(6) のOffset_B はB の最小値を、Range_B はB の最大値(Kに依存) と最小値の差を表す。B_{max_k} はK に対するB の最大値を求めるための係数である。これらは、使用する力覚インタフェースの力覚提示能力に依存する。

3.6 エッジ情報に基づいた凹凸情報の生成

色情報からインピーダンス情報を設定する式を提案したが、対象を認識する上で、材質だけでなく形状情報も重要な手掛かりになる。そこで、本開発では、画像のエッジ情報を利用して、力触覚により対象の形状を表現する手法を提案する。なお、本論文では、設定する仮想壁の基準から変化量(画像平面に対する奥行き方向)を表す、微小な高さのことを

凹凸情報と定義する。

3.6.1 エッジ情報

人間は外界から視覚情報を得る際、物体の仮想的な輪郭線を、物体の形状を認識するための重要な情報源としている[33]。そこで、本開発では画像からエッジを抽出し、抽出されたエッジの部分に凹凸情報を設定することで、エッジの可触化を実現する。

これによって、画像に対する人間の情報認識力を向上させることができるのではないかと考えた。なお、エッジの検出には、ノイズに強く、人間の脳内のエッジ検出処理にも近い、Canny アルゴリズム[10] を用いた。

3.6.2 凹凸情報の設定方法

エッジが検出された画素に対して、微小な凹凸情報を設定する。これにより、力覚インタフェースを用いて画像に触れる際、仮想壁に接触する位置が非エッジ部の画素より手前になるように設計することが可能となる。すると、画像平面に対して並進運動を行ったときに、非エッジ部からエッジ部に触れたときに反力が強くなるため、ユーザは触力覚でエッジを認識することができる。

3.7 変形レンダリング

画像の物体が押し込まれたように見えるには、3Dメッシュを作成しなくても、対応する画素の周りの小さな地域に適当な変形を適用することで、押し込まれたように見える。

3.7.1 仮想環境

仮想環境では、力覚デバイスを介し、ユーザ入力すなわちグリップの位置を取得する。可触化レンダリングが連続的に計算され、SPIDAR-G に出力する。変形レンダリングが同時にされている。

図5 は仮想環境の座標系を示している。原点は床の中心部にある。床に垂直する縦軸がy 軸で、ディスプレイに垂直する軸がz 軸である。もう一つはx 軸。これがOpenGL の座標系と同じである。視点は床の上に設定され、床との角度は45 度になる。

仮想世界では、床以外にも4 つの面が描かれている：手前の壁、後ろの壁、および2 つの側

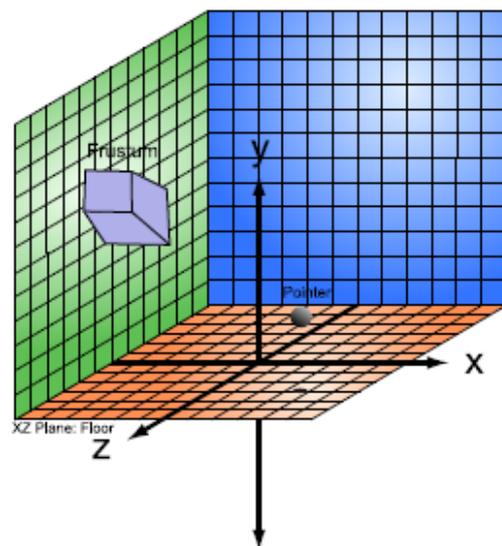


図8 仮想環境の座標系

壁。これらの4つの垂直壁、床の各エッジで立っていて、床とひとつの箱を構成している。その内側の領域は、ポインタの移動可能な範囲である。つまり、ポインタは壁を通して箱の外側に移動することはできない。ユーザは、壁や床にポインタを突き当たろうとすると、反力を感じることができる。図6に示している小球は、ポインタを表すために描かれている。3Dマウスのように、リアルタイムでSPIDAR-Gからユーザの入力に応答する。画像



図9 床に投影された人形

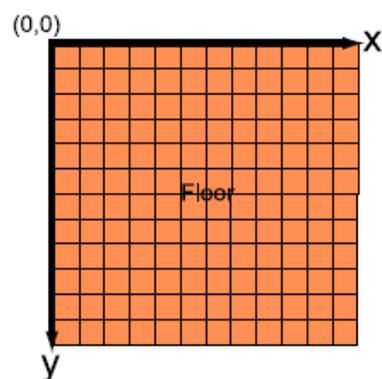


図10 画像の座標系

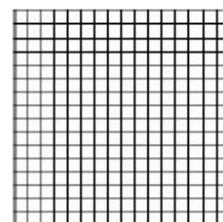
はテクスチャとして仮想空間の床の上にマッピングされている。(図9)

図6が実行している可触化システムを示している。

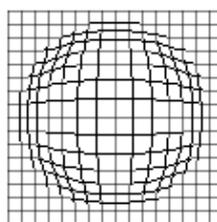
3.7.2 ピンチ変形

可触化レンダリングとともに、変形レンダリングがユーザが床を押しているときにポインタの現在位置の対応するピクセル領域に適用される。有効半径とピンチ量が侵入量に比例している。

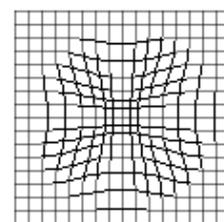
ここではピンチ変形を使用する。ピンチ変形は、2つのパラメータ、有効半径とピンチ量が必要である。ピンチ量の絶対値は0と1の間の実数で、図11のようにピンチ量に応じていくつかの効果を示している。ピンチ量が負に設定されている場合は表面がラウンドオブジェクトを画面に向かって押されたように見える。ピンチ量が正に設定されている場合は表面に押し



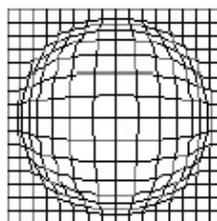
(a) グリッド



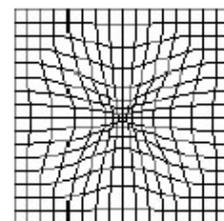
(b) ピンチ量-0.6



(c) ピンチ量 0.6



(d) ピンチ量-1.0



(e) ピンチ量 1.0

図11 ピンチ変形の効果

下げられるように見える。この2つのパラメータがポインタの侵入量および対応する仮想剛性係数で決める。これは、変形レンダリングの節で説明する。

ピンチ変形は、一般的な手法なので多くの画像処理ソフトで使用され、例えば、GNU 画像処理プログラムGIMP [7] では実装されている。

0 より大きいピンチ量のピンチ変形は、図11(c) および図11(e) に示すように、押されるように見える結果になる。

3.7.3 アルゴリズム

ピンチ変形のアルゴリズムは、左から右へ、上から下にスキャンする。スキャンする領域は対応するピクセルを中心とし、 $2R$ を辺長とする正方形である。画像の解像度が非常に大きいかもしれないが、圧力によってローカルの小さい領域でしか変形が発生しない。図12の例では、元画像とそのスキャン領域を示している。

ピンチ変形の有効半径変形のサイズが変わると、スキャン領域も変化する。スキャン領域の内接円は、ピンチの領域である。つまり、画素 $(x; y)$ からセンター $(x_0; y_0)$ までの距離 d (式7) が半径 r に未満の場合である(図13)。その場合は、ピンチ画像の画素 $(x; y)$ の値が原画像の $(x'; y')$ の値になる。そうでない場合、ピンチ画像の画素 $(x; y)$ の値が原画像の $(x; y)$ の値になる。これは、式(6)に示されている。



図12 スキャン領域

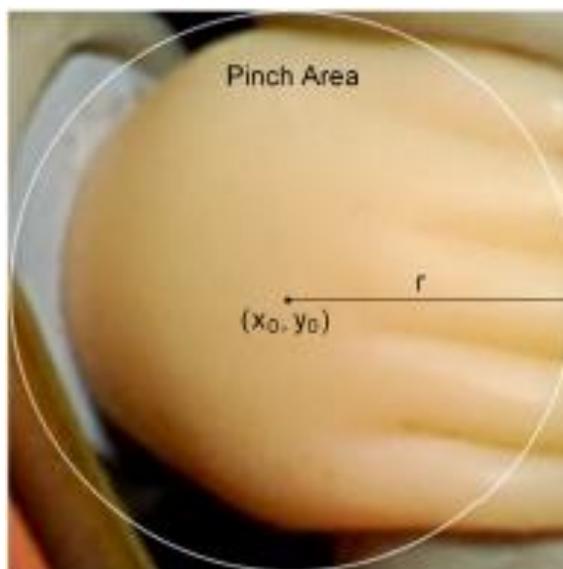


図13 ピンチ領域

$$C'(x, y) \begin{cases} C(x, y) & d > r \\ C(x', y') & d \leq r \end{cases} \quad (7)$$

x' 、 y' の計算は式(9) に示されている。 因子 f は式(10) から算出される。 a はピンチ量である。

$$d = \text{SQRT}((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2) \quad (8)$$

$$\begin{cases} x' = f \cdot x + (1 - f) \cdot x_0 \\ y' = f \cdot y + (1 - f) \cdot y_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$f = \sin^{-a}(\pi/2 \cdot r/d) \quad (10)$$

ピンチ変形のアルゴリズムの擬似コードが下記になる。

Input: 画像 *img*, ピンチセンター $(x_0; y_0)$, 半径 r , ピンチ量 a

Output: ピンチを適用した画像 *pinched*

```

pinched = img;           // 原画像からコピー
1 // Scan from top to down
2 for y = y0 - r to y0 + r
3     // Scan from left to right
4     for x = x0 - r to x0 + r
5         // Calculate the distance
6         d = SQRT((x - x0)2 + (y - y0)2)
7         if d ≤ r      // ピンチ範囲の内
8             // Inside the pinch area
9             // Calculate the factor
10            f = sin-a(π/2 · r/d)
11            x' = f · x + (1 - f) · x0
12            y' = f · y + (1 - f) · y0
13            pinched[y][x] = image[y'][x']
14        else          // ピンチ範囲の外
15            // Outside the pinch area
16            pinched[y][x] = image[y][x]
```

3.7.4 ピンチレンダリング

ピンチ変形の2 つのパラメータは、有効半径 r とピンチ量 a が侵入量と仮想剛性係数で

決められる。よって、式(11) が得られる。ピンチ変形は、圧力によって起こされることで、侵入量が負またはゼロの場合、関数 ϕ_r と ϕ_a がゼロになることが知られている。また、これら二つの関数 ϕ_r と ϕ_a はさまざまな状況で最適化のマッピングに調整することができる。

$$\begin{cases} r = \phi_r(s) \\ a = \phi_a(s) \end{cases} \quad (11)$$

$$\phi_r(s) = \begin{cases} \phi_r(s) & s > 0 \\ 0 & s \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\phi_a(s) = \begin{cases} \phi_a(s) & s > 0 \\ 0 & s \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

計算とレンダリングはOpenGL のディスプレイ関数で実装されており、描画が行われているときに実行される。

図12、13 と14 は効果の例である。 r と a が式14 と15 から計算され、サイズが100x100ピクセルの各画像に適用された効果を示す。

$$r = \begin{cases} 30 & s > 2r_p \\ 25 + (30-25)s/2r_p & 0 < s \leq 2r_p \\ 0 & s \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$a = \begin{cases} 1 & s > 2r_p \\ s/2r_p & 0 < s \leq 2r_p \\ 0 & s \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

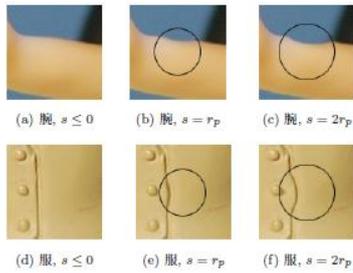


図 12 ピンチ変形の効果 1

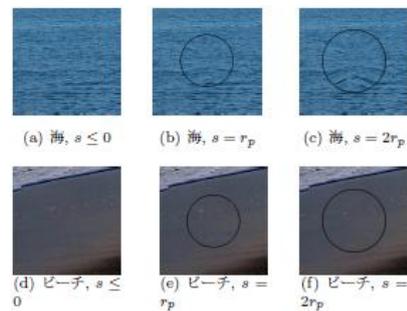


図 13 ピンチ変形の効果 2

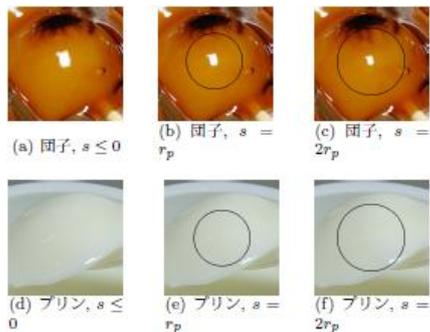


図 14 ピンチ変形の効果 3

3.8 画像可触化の問題点

以上が提案する画像可触化手法の基本方針だが、この方法にはいくつかの問題点がある。まず、インピーダンス情報の設定では、ある色に対して一意にパラメータ値が決まってしまうため、例えば画像中の物体と背景が同じ色だった場合、それを区別することはできない。そして、現実世界の物体の色というのは、基本的に単独で存在することはなく、配色されているため、配色から受ける印象も考慮したパラメータ値を設定することが望ましいと考えられる。

また、凹凸情報の設定では、エッジ部とそれに隣接する非エッジ部の画素のインピーダンス情報によっては、エッジ部に触れたときの反力が強すぎたり、逆に弱すぎてエッジが認識できない場合がある。さらに、エッジが綺麗に(連続的に)抽出できない画像や、抽出されるエッジが多すぎる画像の場合に、対象の形状を理解できないばかりでなく、不要な凹凸によって、材質感にも悪影響を与えてしまう恐れがある。そこで、これらの問題に対処した提案手法を考案する。

3.9 触覚コンテンツの自動抽出手法

3.9.1 輪郭の抽出

提案手法では、まず始めに輪郭の抽出を行う。これは、画像中の物体と背景、または重要なエッジを抽出するためである。具体的な処理の手順は次のようになる。

1. Canny エッジ検出
2. クロージング
3. 輪郭抽出
4. ラベリング

まず、画像に対してエッジ検出を行う。そして、クロージング処理を行ってから輪郭を検出し、各輪郭の特徴量を計算しておく。最後に、検出された輪郭で囲まれた領域の中で、一定以上の面積を有するものに対してラベリングを行い、残りの全ての画素は背景領域とする。これは、画像中の重要な物体(背景)の輪郭のみを可触化するためである。なお、クロージングとは同じ回数分だけ膨張と収縮を行い、画像の小さな穴を取り除く処理のことである。これによって、物体のエッジが連続的に抽出できないような場合でも、ある程度は物体の輪郭部分をエッジとして認識することができるようになる。以上が提案手法を実現するために必要な前処理になる。

3.9.2 インピーダンス情報の設定

異なった色が組み合わせあったときには、最も面積比の大きい色の影響を受けやすくなることが知られている[27]。そこで、輪郭で囲まれた領域を一つの物体と考えることによって、物体の配色を考慮したインピーダンス情報の生成を行う。具体的には、各領域に対して、式(5)、(6)のOffsetとRangeを設定することで実現する。Offsetは領域内の画素に対域の面積の大きさに応じて設定する。これは、小さい領域の場合、ある物体の一部分だと考えられるため、材質感がそれほど大きく変化しない方がよいと考えたからである。なお、検出された輪郭の中に入れ子構造のものが含まれていた場合には、それらに含まれる画素のインピーダンス情報は、一番外側の輪郭の情報を用いて設定する。また、ラベリングされた領域を形成する輪郭上の画素に対しては、インピーダンス情報のパラメータ値を、式(5)、(6)で計算される最大値よりも大きい値に設定しておく。これにより、輪郭の識別が安定かつ確実に行えるようになる。

3.9.2.1 バネ定数の設定方法

バネ定数は次のように求めることができる。

$$K = \text{Offset}_K - (\text{SHRGB} - \text{SHRGB}_{\text{avg}}) \times \text{Range}_K \quad (16)$$

[Offset_K: K_{avg}, Range_K: (K_{max} - K_{min}) × a]

ここで、 $Offset_k$ は領域内の画素の硬軟感の平均値から式(16) によって求められ、 $Range_k$ は K の最大値と最小値の差に、輪郭の面積の大きさに応じて設定する係数 $a(0 < a < 1)$ を掛けたものである。

3.9.2.2 ダンパ定数の設定方法

ダンパ定数は次のように求めることができる。

$$B = Offset_B + (DYPRGB - DYPRGB_{avg}) \times Range_B \quad (17)$$

[$Offset_B : B_{avg}$ 、 $Range_B : (K_{avg} \times B_{max_k} - B_{min}) \times a$]

ここで、 $Offset_B$ は領域内の画素の動静感の平均値から式(17) によって求められる。また、 $Range_B$ は、領域内の画素の画素の硬軟感の平均値から求められる K_{avg} の値を用いて計算された、 B の最大値と最小値の差に、輪郭の面積の大きさに応じて設定する係数 $a(0 < a \leq 1)$ を掛けたものである。

3.9.3 形状情報の設定

3.7.3.1 輪郭の提示方法

輪郭抽出の結果から得られた、各領域のラベル情報を利用することで、エッジを超えて異なる領域に侵入したかどうか判定できるようになる。そして、異なる領域に侵入しようとした際に、元の領域に戻すような並進方向の力を提示することで、輪郭を認識することが可能となる。これにより、エッジ部とそれに隣接する非エッジ部の画素のインピーダンス情報に依存せず、エッジ(輪郭) を任意の力覚で表現できるようになる。ただし、得られた輪郭の中には、図15 のように、一部が線のように細い形状になっているものもある。このとき、この部分の輪郭(矢印の位置) に侵入しようとする、その輪郭で形成される領域を超えて、元の領域に戻ってしまうため、この方法では輪郭を認識することができない。また、面積が小さく、ラベリングされなかった輪郭の中にも、細長い形で、周囲長の大きい重要なエッジが存在する場合があるため、無視することはできない。proxy 法[2] を用いれば、このような状況にも対応することができるが、実装が複雑になってしまうため、本開発では、凹凸情報の設定も併せて行うことで対処する。

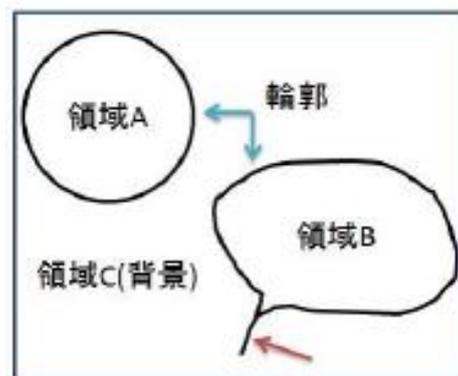


図 15 領域の提示が行えない状況

3.9.3.2 凹凸情報の設定方法

凹凸情報の設定は、抽出された全ての輪郭について、輪郭を構成する画素に対して行う。ただし、凹凸情報は、その最大値を設定しておき、各輪郭の周囲長に応じて、長さが一定以上であれば最大値に、短かければ0 に近づくように値を決定する。これにより、面積が小さくても周囲長の大きい輪郭に対しては、輪郭を認識することができ、周囲長の短い輪郭に対しても、システム上の設定をインタラクティブに変更することによって、必要に応じて認識するといったことが可能になる。

3.9.3.3 画像の奥行き情報がある場合

近年、液晶シャッター方式の3D ディスプレイが普及しつつあり、それに伴って、既存の単眼画像から、奥行き画像や左眼用画像、右眼用画像を生成する2D-3D 変換技術の研究が盛んに行われている。

NICT が開発した2D-3D 変換ソフトウェア[6][44]もその一つで、これは無償で一般公開されているものである。このようなソフトを用いると、精度はそれほど高くないものの、既存の単眼画像から簡単に奥行き画像を生成することができる。可触化する画像に奥行き情報がある場合、奥行き情報に応じた位置に仮想壁を提示することで、物体の形状だけでなく、距離情報も触覚で表現可能になる。ただし、画素間の高さに大きな変化があると、強い反力が提示されてしまい、滑らかに触ることはできないため、ラベリングされた各領域に対して、その領域に含まれる画素の奥行きを平均値を設定する。このようにすることで、画像中の物体に対してはこれまで通りの材質感で触れることができ、さらに物体間の前後関係も触覚で提示することが可能となる。なお、奥行き情報は凹凸情報と同じ意味を持つが、ここでは輪郭の提示に用いる微小な高さのことを凹凸情報、領域の前後関係の表現に用いる高さのことを奥行き情報と定義する。

3.10 画像可触化システムの開発

3.10.1 システムの構成

以上の方法で、可触化する画像の各画素に対して、自動的に各種パラメータ値の設定を行う、画像可触化システムを開発した。システム構成は図7 に示すように普及支援システムの試作版と位置付けている。VR 世界には、可触化対象の画像とその各画素に対応した仮想壁、力覚インタフェースに対応したポインタが存在している。ユーザは力覚インタフェースを操作してポインタで画像に触れることで、触力覚フィードバックを受けることができる。本システムを使用している場面を図16 に示す。

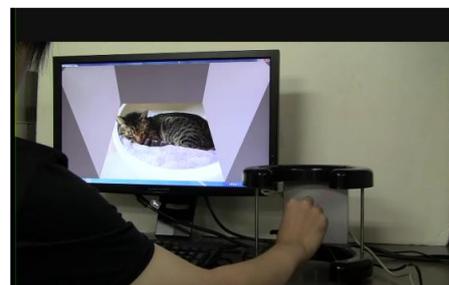


図16 システムの操作場面

3.10.2 VR 世界の構築

OpenGL ライブラリを用いて、平行投影で画像と画像を触るためのポインタを描画した。なお、画像はOpenCV ライブラリを用いて読み込み、アスペクト比を保ったまま、画像の解像度を縦横のサイズの小さい方を512画素にリサイズした上で使用した。これは解像度の大きい画像では、画像処理に時間がかかってしまうためである。そして、読み込んだ画像に対して、提案手法に基づいた処理を行い、各画素に対応した仮想壁を自動的に生成した。

また、NVIDIAの3D VISION システムとOpenGL Quad Buffer を用いることによって、液晶シャッター方式の3D ディスプレイで立体視できる画像可触化システムも開発した。

3.10.3 力覚レンダリング

力覚レンダリングは、拘束違反した侵入量に応じた力を加えるペナルティ法で実装した。設定したインピーダンス情報のパラメータ値を以下に示す。

- バネ定数: $K_{max} = 3000$ 、 $K_{min} = 300$
- ダンパ定数: $B_{maxk} = 0.018$ 、 $B_{min} = 0.5$

3.10.3.1 反力

ペナルティ法では、バネ・ダンパモデルを用いて次のように反力が計算される。

$$N = Kx + Bv \quad (18)$$

ここで、 K はバネ定数、 B はダンパ定数、 x はポインタの侵入量、 v はポインタの速度を表す。本システムにおいては、 K 、 B は各画素のインピーダンス情報に対応し、 x は各画素に対応した仮想壁からの、ポインタの z 方向の侵入量を表す。

3.10.3.2 水平方向の並進力

ポインタが仮想壁に接触している状態で領域を越えようとした際に、領域を超える直前の位置と現在の位置の差を侵入量と考えて、式(18)に基づいた力を水平方向(xy 方向)に提示するようにした。その際、侵入量が一定以上になったとき、この力を解放することで、画像の材質感を感じながら輪郭も認識することが可能になる。なお、この侵入量は、使用する力覚インタフェースの力覚提示能力に依存して、小さな値に設定することができるため、実際には輪郭を超えたときに力が発生するが、輪郭を触っているものとして認識することができる。

また、奥行き情報が設定されている場合には、ポインタが仮想壁に接触している状態で、低い位置から高い(z が大きくなる) 方向に領域を越えようとした際に、元の領域の奥行き値と現在の領域の奥行き値の差が一定以上であれば、その領域間には前後関係があるとみなし、仮想壁を設定することによって、現在の領域には侵入できないようにした。これにより、ユーザは触力覚でその領域間に前後関係があることを認識でき、大きな反力が提示

される恐れもなくなった。なお、奥行き値の差が一定以下のときは、奥行き情報が設定されていない場合と同じように、水平方向の力を解放するが、その際に、提示する反力の計算における奥行き値を、侵入量に応じて、前の領域の値から現在の領域の値に変わるように設定することで、領域間の移動を行った際に、突然大きな反力が提示されることなく、滑らかに触ることができるようになった。

3.10.3.3 摩擦力

さらに、各画素に対して静止摩擦係数、動摩擦係数を設定したときに、クーロンの摩擦法則に基づいた摩擦力(水平方向)を提示できるようにした。摩擦力は、以下のような計算式で求めることができる。

$$\text{静止摩擦力: } F \leq -\mu N \quad (19)$$

$$\text{動摩擦力: } F = -\mu' N v / |v| \quad (20)$$

ここで、 μ は静止摩擦係数、 μ' は動摩擦係数、 N は反力、 v はポインタの速度を表し、静止摩擦力は輪郭の提示方法と同じ考え方で実装した。また、動摩擦力から静止摩擦力に移る際には、次のような条件で判定を行った。

$$v(t - \Delta t) \cdot v(t) < 0 \quad (21)$$

$$|v(t)| < \mu < \varepsilon \quad (22)$$

ここで、 $v(t - \Delta t)$ は1ステップ前のポインタの速度、 $v(t)$ は現在のポインタの速度を表す。これは、安定した静止判定を行うために必要なものであり、式(21)がなければ、動摩擦力を提示している状態からユーザがポインタを静止させようとしても、発振が発生してしまい、静止させることができない。この2つの条件で判定を行うことにより、ユーザの意思通りに、動摩擦力から静止摩擦力への移行が可能になる。ただし、本研究では、任意の画像に対して有効な、摩擦係数の設定手法を考案できなかったため、本論文の評価実験では、摩擦力を提示しないで行った。

3.10.4 実行例

図17の画像を例に、提案手法を用いて生成された各種パラメータ値の様子を示す。図18、19はそれぞれ式(3)、(4)から求められる硬軟感(SH)、動静感(DYP)の値を、図20、21はそれぞれ式(16)、(17)から求められるバネ定数(K)、ダンパ定数(B)の値を表している。これらは、取り得る値の最大値を白色、最小値を黒色としたときのグレースケール画像である。ただし、動静感(DYP)とダンパ定数(B)については、全体的に値が小さいため、見やすいように補正している。なお、抽出された輪郭とラベリングされた領域は、それぞれ図22、図23のようになっている。



図 17 サンプル画像 (SH)



図 18 硬軟感



図 19 動静感 (DYP)



図 20 バネ定数 (K)

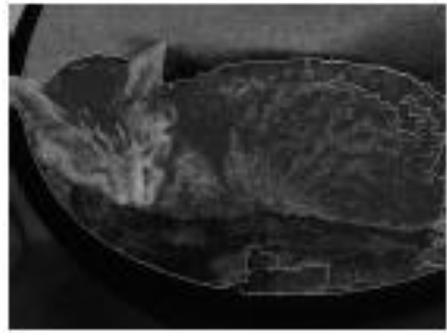


図 21 ダンパ定数 (B)

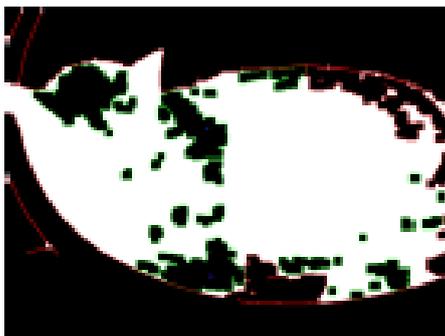


図 22 抽出された輪郭



図 23 ラベリング結果

4. 画像可触化の評価実験

画像可触化手法の有効性を評価するために、開発した画像可触化システムを用いて評価実験を行った。実験は大きく分けて、インピーダンス情報の設定手法の評価と、形状情報の設定手法の評価の2種類について行った。なお、実験の被験者は全て6名である。

4.1 インピーダンス情報の設定手法の評価

4.1.1 予備実験

まず、特徴的な9つの色から構成されるパターン画像(図24)に対して、色彩感情に基づいた提案手法と、色彩感情の反対に対応付けた場合と、インピーダンス情報を一定にした場合の、3種類の手法で触知してもらい、一対比較法を用いて、どちらの手法の方が違和感が少ないか評価してもらった。なお、このパターン画像の色の配置はランダムになっていて、色と色の境目に凹凸を設定することで、インピーダンス情報を一定にした場合でも、異なる色に移動したことが認識できるようにして実験を行った。この結果を表1に示す。

表1 選択されたインピーダンス情報設定手法

選択された可触化手法	選択されなかった可触化手法			合計	比率	順位
	A	B	C			
A		6	5	11	0.92	1
B	0		0	0	0.00	3
C	1	6		7	0.58	2



図24 パターン画像

表1より、インピーダンス情報は、色の色彩感情に基づいた設定を行ったときに、最も違和感がなく、色彩感情の反対に対応付けたときに、最も違和感があるという結果が得られた。このことから、提案する色彩感情に基づいたインピーダンス情報の設定手法の有効性が示唆された。

4.1.2 本実験

次に、提案手法が、実画像においても有効であることを確かめるために、同じ構図で色だけが異なる画像(図25)を用意し、それぞれの画像に対して、その画像から生成されたインピーダンス情報と、もう一方の画像から生成されたインピーダンス情報の2つのうち、どちらの設定で触ったときの方が違和感がないかを評価してもらった。この結果を表2に示す。



図 25 昼と夕焼けの富士山

表 2 同じ構図で色だけ異なる画像を用いた場合

		選択されたインピーダンス情報		
		A	B	比率
画像	富士山(昼) 生成インピーダンスA	5	1	0.83
	富士山(夕焼け) 生成インピーダンスB	2	4	0.67

表2 の結果から、それぞれの画像において、見ている画像の色情報から生成されたインピーダンス情報の方が、違和感がないことが解った。これにより、実画像に対しても、提案する色情報に基づいたインピーダンス情報の設定手法の有効性が示唆された。

4.2 形状情報の設定手法の評価

4.2.1 輪郭の提示手法の評価

提案した形状情報の設定手法で、輪郭を認識することができるか、輪郭の場所や触力覚に違和感はないか、またそれによって、画像に対する認識力が向上するか、材質感に悪影響はないか調べるための評価実験を行った。実験には、図25 の昼の富士山画像を用いて、提案するインピーダンス情報の設定に加えて、形状情報の設定を行った状態で触知してもらった。



図 26 抽出された輪郭

まず、提案手法で正しく輪郭を認識することができるかを確かめるために、画像を印刷したアンケート用紙を用意して、認識できた輪郭に線を引いてもらった。その結果、

被験者全員が提示されている輪郭を正しく認識できていたことが解った。そこで、輪郭の場所や触力覚に違和感はなかったか、形状情報の設定を行わなかった場合と比較して、画像に対する認識力が向上したと感じたか、材質感に悪影響はなかったかという質問に答えてもらった。この結果を表3 に示す。図26 は、抽出された輪郭の様子である。赤色で囲まれた輪郭線を触力覚で提示している。なお、赤い輪郭に含まれている緑の輪郭は、輪郭の面積、周囲長が共に小さいため、ユーザにはほとんど提示されていない。

表3 形状情報の設定手法の評価

		回答		
		Yes	No	比率
質問	輪郭の場所、触力覚に違和感はなかった	6	0	1.00
	画像に対する認識力がさらに向上した	6	0	1.00
	材質感に悪影響はなかった	6	0	1.00

表3 より、インピーダンス情報の設定のみを行った場合に対して、画像に対する認識力が向上し、材質感に与える悪影響もないという結果が得られた。この結果から、インピーダンス情報の設定に加えて、エッジ情報に基づいて形状情報の設定を行う、提案する画像可触化手法の有効性が示唆された。

4.2.2 距離情報を提示した場合

画像の奥行き情報のある場合に、提案手法でさらに距離情報を提示することによって、画像に対する認識力が向上するか確かめた。実験は、図25 の昼の富士山画像を用いて、形状情報に加えて、さらに奥行き情報を設定することによって、画像に対する認識力が向上したと感じたか、材質感に悪影響はなかったかということについて評価してもらった。この結果を表4 に示す。なお、この実験で設定した奥行き情報は進出後退現象(図27) を利用することで求めた。この奥行きの値は、図28 のようになっており、それを用いて提案手法では、図29 のような距離情報が設定されている。

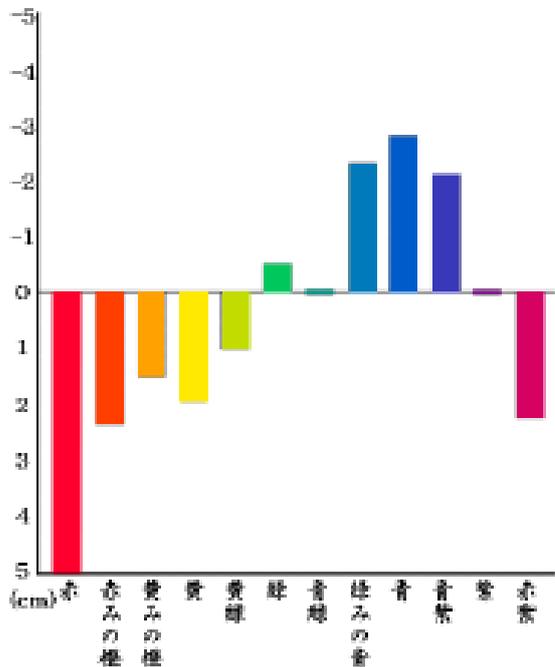


図 27 進出後退現象[30]



図 28 奥行き値(白色は手前、黒色は奥)



図 29 仮想壁までの距離の様子

表4 画像の奥行き情報を利用して、各領域の距離情報を提示したとき

		回答		
		Yes	No	比率
質問	画像に対する認識力がさらに向上した	6	0	1.00
	材質感に悪影響はなかった	4	2	0.67

表4 より、画像の奥行き情報があるとき、提案手法によって領域の前後関係を提示すると、画像に対する認識力がさらに向上するという結果が得られた。しかしながら、これによって材質感に悪影響があると回答した被験者もいた。その理由は、図29の黒い領域からグレーの領域に移動する際に、提示される反力が大き過ぎるというものだった。これについては、提案手法では、領域間に一定以上の奥行き差がある場合には、侵入できないように設定するため、その閾値を適切な値に変更することで対応可能だと考えられる。

4.2.3 画像可触化評価実験の結果のまとめ

任意の画像に対して、材質感に違和感がなく、情報の理解力を向上させることが可能な可触化を、画像情報のみを用いて自動的に実現することを考えた。本研究では、色情報に基づいたインピーダンス情報の生成と、エッジ情報に基づいた形状情報の生成によって、

これを実現する手法を提案し、実際に画像可触化システムを開発して、提案手法の有効性を検証した。その結果、提案したインピーダンス情報の設定手法を用いると、パターン画像に対して違和感のない材質感を提示することができ、実画像に対してもその有効性が確認された。また、その上で、提案した形状情報の設定手法を用いると、材質感に悪影響を与えることなく、画像に対する認識力を向上させることができた。

4.2.4 今後の展望

今回提案した画像可触化手法は、任意の画像に対して適用できることが一つの特徴だが、特にどのような画像に対して有効なのか、そうでないのかを調べる必要がある。また、画像中の各物体に対して、現実の材質に基づいたインピーダンス情報の設定を行った場合と比較して、提案手法がどの程度有効なのか確認する必要もある。特に、インピーダンス情報の設定手法の評価における、本実験の結果から、本来同じ材質感であるべきはずの、同じ構図で色だけが異なる画像に対しても、色情報に応じて変化させた方が、人間にとって違和感がないことが解ったため、この結果によっては、提案手法の応用可能性が広がると考えられる。

また、可触化を自動化する一方で、ユーザやコンテンツ提供者が、望んだ材質感を提示するため

に、自分でも力覚モデリングを行いたいという需要も考えられるので、本システムを、誰でも簡単にインピーダンス情報を設定、編集可能な力覚コンテンツ作成支援ツールとして開発していく方向性も考えられる。

4.3 変形レンダリングの評価実験

4.3.1 実験

この実験で我々は可触化レンダリングと変形レンダリングがユーザの画像に対する興味の影響を評価する。

参加者は三つのグループ、A、BおよびCに分かれる。

比較のために、3つのグループが違う条件でシステムを経験させる。グループAの参加者は、可触化レンダリングと変形レンダリング両方無しでシステムを体験する。グループBの参加者は可触化レンダリングだけでシステムを体験する。グループCの参加者は、可触化レンダリングと変形レンダリング両方ありでシステムを体験する。

ここでは、ユーザが無意識にシステムを体験する時間を画像内容に対する興味の程度とする。体験時間の長いユーザは、画像内容により多くの興味を持っていると考えられる。事前の告知をせず、各参加者の体験時間が無制限で、自主的に停止するまで記録される。

また、評価実験は実験内容の異なるカテゴリの3つのサブ実験が含まれている。内容を表5に示す。

結果は表6、 7、 8、 9 に示されている。図30 が結果のデータでプロットしたチャートである。

表5 実験で用いたコンテンツとカテゴリ

内容(コンテンツ)	カテゴリ
1	人形
2	風景
3	お菓子

表 6 実験(人形)の体験時間

体験者	画像のみ	可触化のみ	可触化と変形
1	15.0	99.4	245.5
2	12.3	117.5	140.4
3	7.5	144.0	182.9
4	12.9	109.1	103.5
5	8.3	131.0	154.2
6	12.0	83.0	129.7
7	17.2	108.1	145.3
平均	12.2	113.2	157.4

表 7 実験（風景）の体験時間

体験者	画像のみ	可触化のみ	可触化と変形
1	13.4	63.2	73.2
2	9.5	27.9	61.8
3	9.9	54.3	55.8
4	15.1	59.8	65.2
5	8.9	72.1	86.3
6	14.4	76.4	93.7
7	21.1	30.8	77.4
平均	13.2	54.9	73.3

表 8 実験（お菓子）の体験時間

体験者	画像のみ	可触化のみ	可触化と変形
1	9.0	65.7	90.4
2	10.3	76.4	98.3
3	12.7	46.0	83.1
4	7.3	63.3	74.0
5	6.9	82.3	65.9
6	13.3	38.7	84.7
7	7.8	69.7	68.2
平均	9.6	63.2	80.7

表 9 総合結果 平均時間の和

可触化のみ	画像のみ	可触化と変形
231.2	35.0	311.4

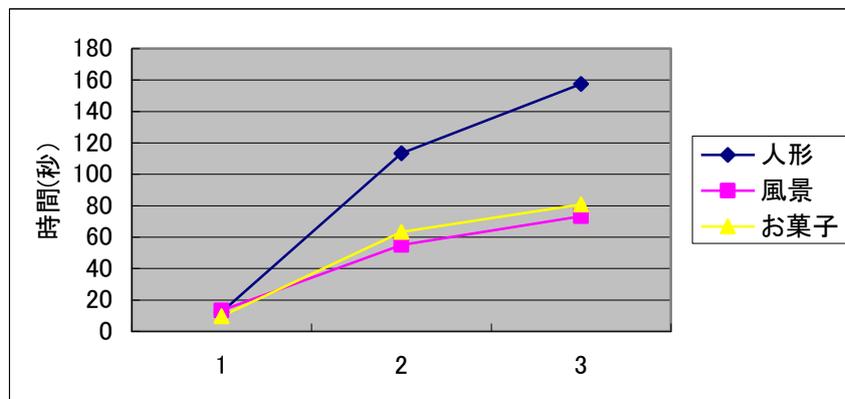


図30 平均体験時間の比較

4.3.2 変形レンダリングの評価実験結果のまとめ

図30 から、グループA(画像のみ) とグループB(可触化のみ) それぞれの平均時間を比較すると、可触化レンダリングを有効にすることによってグループB の参加者の体験時間がグループA より大幅に増加していることが分かる。可触化レンダリングでは、グループB の参加者は画像の興味のある部分を触ることができ、体験時間が伸びた。特にフィギュアを内容としたサブ実験1 では、参加者は髪、顔、手、腕、足、衣服などの領域に触って、非常に興味を持っている。

グループB(可触化のみ) とグループC(可触化と変形)の平均時間を比較すると、グループC の体験時間はまた伸びていく、そこから変形レンダリングもユーザが画像へ対する興味を高めることができると考えられる。

グループA(画像のみ) の体験時間に対し、それぞれ2 つの平均時間の差が小さいことが分かる。実際には、可触化レンダリングと変形レンダリングをせずに、グループA の参加者は、単に写真を見ていた。画像内容と人によって体験時間が違ってくるが、画像を見る時間が短いであった。

グループB(可触化のみ) の体験時間に対し、それぞれ2 つの平均時間の差がグループA より比較的長くなっている。平均時間のチャートから見るとフィギュアが内容としたサブ実験1 の体験時間が、風景やお菓子よりも長くなっている。フィギュアの写真は風景やお菓子の写真より、面白くて触れるポイントが多く持っているためだと考えられる。この時間差はグループC(可触化と変形) ではさらに顕著になり、変形レンダリングを加えることによって、グループC の参加者の体験時間が伸ばされた。

表5 に示されている平均時間の合計が、可触化レンダリングと変形のレンダリングがユーザの画像の内容への興味を高めることができると示している。

5. 評価

5.1 技術面からの評価

事業開始にあたり、以下（１）、（２）のような２つの目標が設定された：

３次元触覚コンテンツの制作環境の支援システムを構築することにより、コンテンツ制作効率が 20%向上されることとし、コンテンツ制作者の満足度 75%を得ることとした。

（１）指標：コンテンツの制作効率 20%アップ

本開発では、画像から触覚情報を自動的に取得する方式をとったため、原理的には制作効率は無限大に効率化したことになり、無尽蔵に触覚コンテンツを制作することが可能になる。実際は、自動化の結果だけでは望みの触覚が提示できるとは限らない。細かい設定(エッジ抽出方法、使用する閾値、インピーダンス情報の MAX、MIN 値等)を変更することで、その画像に適した可触化が行える場合があると思われる。

図 31 は、実験時に使用するもので、実行中に各種情報の表示(デバッグ用)や各種パラメータの変更を行うためのものである。具体的には、インピーダンス情報の設定手法、凹凸情報の設定手法(研究の過程で不要になった)、奥行き情報の設定手法(奥行き画像がない場合にも、進出後退現象を利用して設定が可能)、摩擦係数の設定手法(論文では触れていない)、

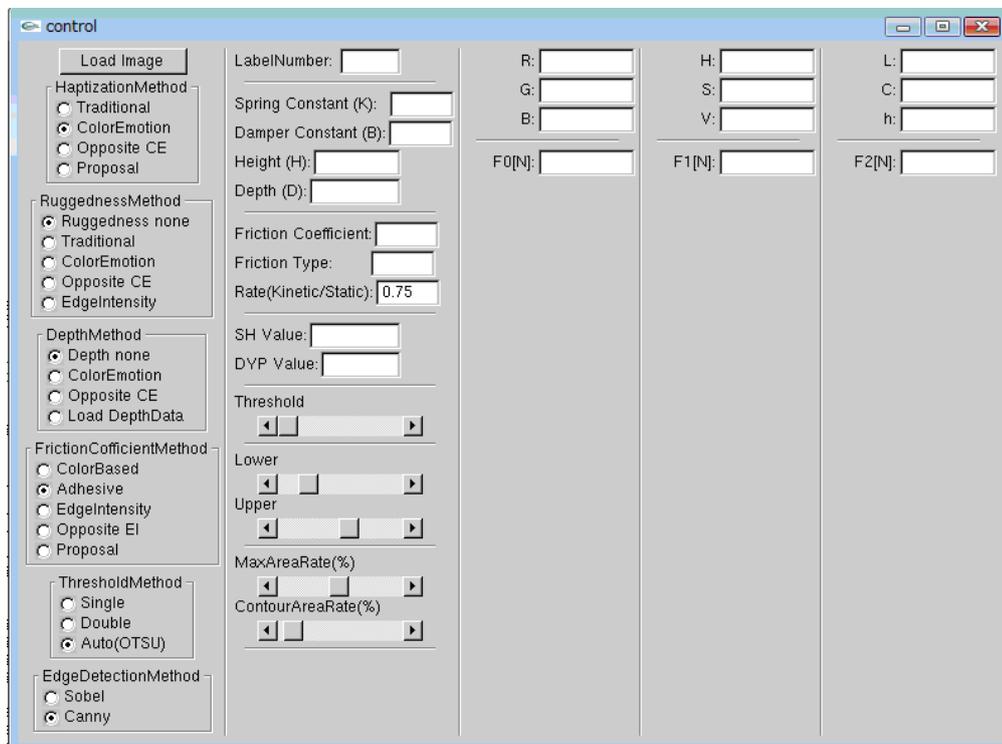


図 31 システムチューニング画面

静止摩擦係数 μ と動摩擦係数 μ' の関係(デフォルトでは $\mu'=0.75\mu$)、Canny エッジに使用する閾値、エッジ検出の方法(Canny 又は Sobel)、輪郭を提示する領域の大きさの閾値(画像全体に占める割合)、領域に対するインピーダンス情報の Range の大きさが設定可能である。ただし、実用上は "Load Image" ボタンの押下だけでも問題ないと考える。

より品質の高い可触化が必要な場合があると思われるが、それは、従来の様にコンテンツそのものに触覚情報を指定する方法をとり、実用化にあたっては、画像可触化との折衷案が検討課題となる。

(2) 指標：コンテンツ制作者の満足度 75%

触覚コンテンツは画像から自動的に触覚情報を得るためコンテンツ制作者の出番は少ないが、個別アプリケーションが求める触覚を得るためには触覚の編集を行う必要が生じることになる。今回は、具体的な応用目的を持った触覚コンテンツをオーサリングする状況には至っていないが、そのときには、色やテクスチャと触覚の対応をデータベース化(ライブラリ化)して、分かり易いインタフェースで対応可能にすればよい。基本となる触覚コンテンツを生成できることから満足度 75% は達成できたと考える。

5.2 市場面からの評価

触覚メディアの普及を最終目標としている。そのためにはハプティック・サービスが実用化されることが市場面からの評価の条件であるので、その時点での普及支援システムを想定した。

(1) 実用化に向けた性能評価

(1-1) 画像可触化における触覚情報生成処理速度

開発した普及支援システムでは、画素数の大きな画像でも処理できるように、画像を読み込んだ際に、画像の画素数を 512(小さい方)×(大きい方)のようにリサイズ(アスペクト比は維持)するように設計した。

例えば、猫の画像(図 17)では 682×512、富士山の画像(図 25)では 1136×512 とした上で処理している。

[普及支援システムの実行環境]

OS : Windows Vista CPU : Q9550 2.83GHz メモリ : 4GB ビデオカード : GT240

このとき、触覚情報を生成するために要する処理時間は、

猫 : 3.36 秒

富士山 : 2.94 秒

画素数の小さい猫の画像の方が処理に時間がかかっている理由は、抽出される輪郭の数

やその中の一定以上の面積を有する輪郭の数によって、計算量が増えるためである。

ただし、提案手法の中でエッジ情報に基づいた形状情報の生成を行わず、色情報に基づいたインピーダンス情報の設定のみを行う場合には、リアルタイムで処理できる。ユーザが好みの触覚に加工したりする必要がなく、単純に触って楽しむだけであれば、これだけで問題はないと思われる。

A4 サイズの画面とすると、

$$A4 = 21 \times 29.7 \text{cm} = 8.26771 \times 11.69291 \text{ インチ (1 インチ} = 2.54 \text{cm で換算)}$$

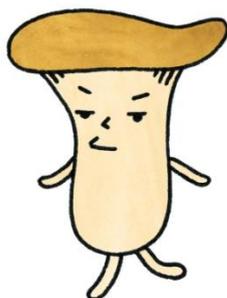
$$\text{ディスプレイ表示用の解像度} = 72 \text{dpi}$$

$$A4 = 8.26771 \times 11.69291 \times 72 = 595 \times 842 \text{ ピクセル (実際には } 512 \times 724 \text{ で処理)}$$

このとき、

画像 1(595×842) 可触化時間： 3.13 秒

画像 2(595×842) 可触化時間： 7.37 秒



画像 1



画像 2

なお、画像 1、画像 2 は、処理時間の計測のためにネットから拾ってきたものであり、可触化を試したものではない。

(1-2) 触覚情報の記憶容量

触覚情報の記憶容量は、

インピーダンス情報(反力)： float 型(4 バイト)×2(バネ、ダンパ)×画素数

輪郭 (ラベル情報)： int 型(4 バイト)×画素数

必要な記憶容量の合計は、

$$4 \text{ バイト} \times 3 \times \text{画素数}$$

であり、RGB の容量と同じと考えてよく、容量的に問題となるサイズではない。ネット上の画像 1 (595×842)、画像 2 (595×842)では共にでは 6MB になる。

(2) 操作性

現状の普及支援システムは、画像入力から一連の処理がボタン操作で行われているので、操作性の問題点はないが、より高精度な触覚情報を制作するには、普及支援システムに操作性向上のための追加機能が必要となる。このためには普及支援システムの画面設計を AVH を含めた観点で構成して、より汎用的にする必要があると考える。

以上、普及支援システムの評価は、実用的なサービスを提供する環境が設定されることで定着したものになる。そのためにも、触覚サービスの機会を一つでも見つける努力が必要であり、そのことによって普及支援システムの改良評価が進むことになる。

【参考文献】

- [1] 赤松幹之, 石川正俊: 形状知覚における視-触覚の感覚統合過程の解析, バイオメカニズム, Vol.10, No.10, pp.23-32, 1990.
- [2] D. C. Ruspini, K Kolarov, O. Khatib: The haptic display of complex graphical environments, Proc.of SIGGRAPH 97, pp.345-352, 1997.
- [3] Gibson J. J.: Observations on active touch, Psychological Review, Vol.69, No.6, pp.477-491, 1962.
- [4] Hideyuki Ando , Eisuke Kusachi , Junji Watanabe, Nailmounted tactile display for boundary/texture augmentation, Proceedings of the international conference on Advances in computer entertainment technology, June 13-15, 2007, Salzburg, Austria
- [5] Hiroshi Sasaki, Kinya Fujita: Experimental Analysis of Role of Visual Information in Hardness Cognition Displayed by a ForceDisplay System and Effect of Altered Visual Information, TVRSJ, Vol.5, No.1, 2000.
- [6] <http://3d-contents.nict.go.jp/>
- [7] <http://manual.gimp.org/en/plugin-whirl-pinch.html>
- [8] Iwata, H. Noma, H. Volume haptization, Virtual Reality 1993. Proceedings. IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, 1993.
- [9] I. Rock and J. Victor: Vision and touch, Science, Vol.143, pp.594-596, 1964.
- [10] J. Canny. : A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and MachineIntelligence., 1986.
- [11] J. C. Bliss. : A relatively high-resolution reading aid for the blind, IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol. MMS-10, No.1, pp.1-9, Mar 1969.
- [12] J. C. Bliss, M. H. Katcher, C. H. Rogers, and R. P. Shepard. : Optical-to-tactile image conversion for the blind, IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol. MMS-11, No.1, pp.58-65, Mar 1970.
- [13] 賀川経夫, 島村直樹, 西野浩明, 宇津宮孝一:触覚デバイスを併用する画像処理ツールの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.398, pp.9-14, 2006.
- [14] Kashiwabara Shintaro, Tanaka Yutaka, Suzuki Ryuushi. Visualization and Haptization for Swirling Flow in a Pipe. Bulletin of Computational Science Research Center, Hosei University. Vol.15, Page.11-15, 2002.
- [15] Katsuhito Akahane, Shoichi Hasegawa, Yasuharu Koike, Makoto Sato. A Development of High Definition Haptic Controller. First Joint Eurohaptics Conference And Symposium On Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems(World Haptics), PP.576-577, 2005 3.18-3.20.
- [16] Katsuhito Akahane, Shoichi Hasegawa, Yasuharu Koike, Makoto Sato. A Proposal

of a High Definition Haptic Rendering for Stability and Fidelity. ICAT2006, pp.162-167, 2006 11-12.

[17] Katz, D.: Der Aufbau der Tastwelt. Z. Psych., Erg.Bd.11, 1925 (translated by Krueger, L. E. The world of Touch. Lawrence Erlbaum Associates)

[18] Keiko Omori, et al.: The Effect of Haptic Information on Vision: Using Geometrical Patterns With and Without Visual Illusion, Technical report of IEICE. HIP, Vol.105, No.358, pp.143-147, 2005.

[19] Kenneth Salisbury, Federico Barbagli, Francois Conti: Haptic Rendering: Introductory Concepts, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.24, No.2, pp.24-32, 2004.

[20] Kent Stein, Deborah. : The Optacon: Past, Present, and Future, <http://www.nfb.org/Images/nfb/publications/bm/bm98/bm980506.htm>, Retrieved 2009-01-25.

[21] 河野芳郎, 石井雅博, 小池康晴, 佐藤誠: 視覚障害者のための可触化システムの提案, 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, Vol.99, No.10, pp.33-38, 1999.

[22] Loomis J. M. & Lederman S. J.: Tactual perception. In Boff, K., Kaufman, L., & Thomas, J. (Eds.), Handbook of Perception and Human Performance, Vol.2, Chapt.31, 1986.

[23] Marc O. Ernst & Martin S. Banks: Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion, Nature, Vol.415, pp.429-433, 2002.

[24] M. A. Srinivasan, G. L. Beauregard and D. L Brock.: The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments, Proc. ASME Dynamic Systems and Control Div., Vol.58, pp.555-559, 1996.

[25] 松家伸一, 山川聡子: 仮想空間において物体の色が力覚に及ぼす影響, 第14回日本ヴァーチャルリアリティ学会大会, 2009.

[26] 松崎雅則, 入門色彩学, 織研新聞社, ISBN 978-4-88147-102-8

[27] Moon, P. & Spencer, D.E. : Geometric Formulation of Classical Color Harmony. & Area in Color Harmony & Aesthetic Measure Applied to Color Harmony, Journal of Optical Society of America, 34, pp.46-59, pp.93-103, pp.234-242, 1944.

[28] 大脇崇史, 中坊嘉宏, 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: 視触覚モダリティ変換を用いたリアルタイム実環境仮想接触システム, 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J81-D-II, No.5, pp.918-924, 1998.

[29] 大山正, 色彩心理学入門, 中央公論新社, ISBN4-12-101169-4

[30] Oyama, T., & Yamamura, T.: The effect of hue and brightness on the depth perception in normal and color-blind subjects, Psychologia, Vol.3, pp.191-194, 1960.

- [31] Peer, P., Kovac, J., and Solina, F. Human skin colour clustering for face detection. In submitted to EUROCON 2003 - International Conference on Computer as a Tool, 2003.
- [32] Robert J. van Beers, Daniel M. Wolpert, & Patrick Haggard: When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation, *Current Biology*, Vol.12, No.14, pp.834-837, 2002.
- [33] Rock I, Anson R: Illusory contours as the solution to a problem, *Perception*, Vol.8, No.6, pp.665-681, 1979.
- [34] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置SPIDAR の提案, 信学論(D-II), J74-D-II, No.7, pp.887-894, 1991.
- [35] 佐藤誠, 金時学, 小池康晴: 8 本糸を用いた7 自由度力覚ディスプレイの提案, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.2, No.2, pp.85-90, 2000.
- [36] Seahak Kim, Shoichi Hasegawa, Yasuharu Koike, Makoto Sato. A Proposal of 7 DOF Force Display : SPIDAR-G. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.7, No.3, 2002 9 pp.403-412
- [37] Shimizu Hiromi, Murayama Jun, Sato Hiroko, Chang.S.Nam, Sato Makoto. Learning Tool aided by Haptics for Intermolecular Understanding. *NICOGRAPH international 2007*, 2007.
- [38] S. J. Lederman & R. L. Klatzky.: Hand movements: A window into haptic object recognition, *Cognitive psychology*, Vol.19, No.3, pp.342-368, 1987.
- [39] S. J. Lederman & R. L. Klatzky.: Haptic perception: A tutorial, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.71, No.7, pp.1439-1459, 2009.
- [40] Taeko Nakamura et al.: The Attempt of Quantitative Expression for Colour, *FIBER*, Vol.56, issue.11, pp.508-517, 2000.
- [41] 高濱敦, 赤羽克仁, 佐藤誠: 色彩情報に基づいた画像可触化手法の提案, 2010 年映像情報メディア学会冬季大会.
- [42] Tomoya Kawakami, Takehiko Yamaguchi, Masaharu Isshiki, Makoto Sato. INSTILL:Proposal of a Haptic Interaction System for English Study. *Information Processing Society of Japan Interaction Vol.2008, No.4*, pp.71-72, 2008.
- [43] Xiangning Liu, Katsuhito Akahane, Masa-haru Isshiki, Makoto Sato: A Proposal of Image Haptization System with Local Deformation, *Asiagraph2009 Proceedings*, Vol.3, No.1, pp.33-36, 2009.
- [44] 山本健詞, 妹尾孝憲, 栗田泰市郎: OpenCV を用いた2D/3D 変換ソフトウェア, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.34, No.36, pp.21-24, 2010.
- [45] 吉田翼, 木谷クリス真実, ベロンジーサージ, シュレイケビン: EdgeSonic: 視覚障がい者のための画像特徴の可聴化, インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワーク

ショップ(WISS2010).

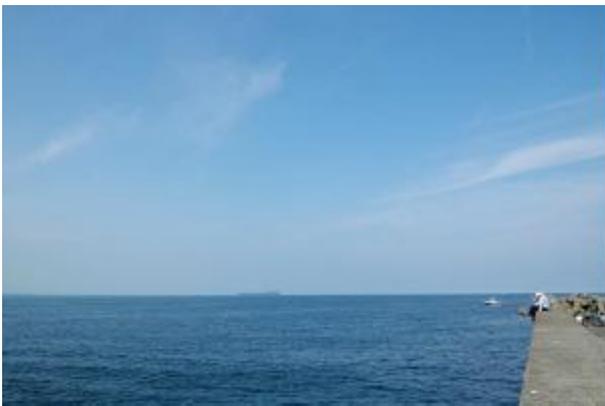
(付録)

実験でを使用した画像コンテンツの一部

人形



風景



お菓子



6. 【提言】

触覚メディアの普及を図るためには、装置面、システム面、コンテンツ面、サービス面等、多方面からの検討が必要になる。ここでは、普及支援システムの開発の先につながる次期普及支援システムを想定しながら研究開発の課題を記述する。

6.1 触覚装置

(1) 簡易版触覚装置の開発

一般民生機器としての普及を意識したもので、低コストが条件となる。通常の PC 周辺機器程度の価格帯（数千円から数万円）が望ましい。

(2) 高性能な触覚装置

現物の触覚を忠実に反映する High Fidelity Haptic 機器の研究

触覚装置は、USB 等の標準インタフェースで利用できるようにし、利便性を高めるために、ワイヤレスで PC につながることを望ましい。

6.2 触覚オーサリングシステム

普及支援システムの拡張版であり、映像と音楽メディアのオーサリングシステムにアドオンする形で利用できる AVH コンテンツオーサリングシステムの開発

汎用形態よりも個別のアプリケーション毎に作られて、それらが成長してゆく過程でユニバーサルなオーサリングシステムに統合されると考える。

成長性を維持するには、オープンソフトとして多数のエンジニアが開発に参加できるようにし、インタフェースを統一することが望ましい。国際的な共通規格を提案することも必要と考える。

6.3 触覚サービス

触覚コンテンツを一般に普及させるには、大衆を惹きつける独自の触覚サービスを工夫しなければいけない。現状は、そのようなキラーアプリケーションと呼ばれるものは出現していない。

(1) 触覚コンテンツ付き写真（画像）および動画

開発した普及支援システムを改良して写真から触覚コンテンツを制作することは、写真材料によっては面白い利用が考えられる。デジタルカメラや携帯カメラで撮影したものに

ハプティックを付加するサービスも可能にする。

ネット通販、ネットオークション等では、感触を得たいという要求が高いと思われる。現状は、3D の移動・回転・拡大等の画像処理が中心であるが、これからは、触覚コンテンツも付けて、できるだけ実物に近い感覚を提供できるようなサービスが必要となる。

普及支援システムを改良拡張することで、動画から触覚コンテンツを制作し、映像信号と同期した触覚信号を記録することも今後の研究課題である。触覚効果が出るような場面を的確に選択する必要がある。このような触覚メディア付き動画に、識別し易くするために「ハプティックマーク」をつけて、新しいコンテンツビジネスを創出する可能性が大きい。

(2) ハプティック付き CGM

ハプティック付き動画サービスの一つとして、「ニコニコ動画」のような一般人が投稿できる Web サイトからハプティック付きの CGM (Consumer Generated Media) が生まれる可能性が高い。AVH に興味を持った若者が、このようなサイトに新しいメディアコンテンツとして発信すると、「初音ミク」のように国内外に大きな反響を呼ぶことになる。これはハプティックの普及のための有効な手段と考える。

(3) 3D テレビ、3D Web 等との連携システム

民生機器としての用途が広いサービスであり、最初は、美術品等の静物に対して提供することから始める。3D 放送に同期する触覚放送は魅力的な実験になるが、触覚装置の現状を考えると一般のテレビよりも、インターネット放送が個人の自由度が高く早い時期に可能となろう。

(4) ゲーム

ゲームに対する触覚メディアの適用も重要な研究テーマである。多人数参加型のような集団場面での触覚作用は新しい触覚の世界を開いてくれると予測する研究者もいる。今後の研究テーマである。

6.4 ハプティック業界の育成

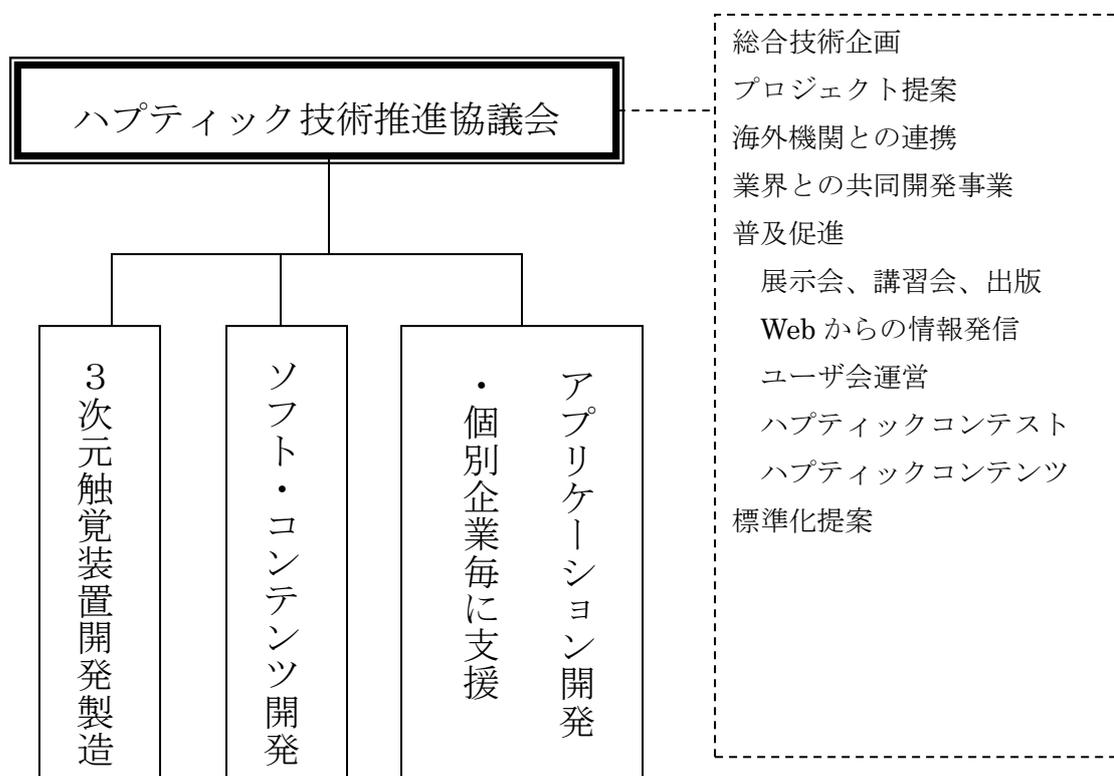
ハプティック産業も AV 産業と同じような広がりを持つ。ハプティック事業を推進するためには、触覚のニーズが高い業界との連携が必要になる。主だった業界に向けて、業界毎のコンテンツ、サービス、ビジネスモデルを提案して行くことが必要になる。

家電業界

ゲーム・エンタテインメント業界
小中高の教育界
産業界
医薬品業界

6.5 事業化に向けた体制作り

本事業で利用した3次元触覚装置 SPIDAR は、東京工業大学の佐藤研究室で開発されているものである。佐藤研究室では、SPIDAR の研究開発を進めると同時に、その利用に向けた産学の情報共有を図る目的で、平成 21 年に任意団体のハプティック技術協議会を設置した。普及支援システムも、このような組織の中で検討することで、普及が促進されると考えている。



— 禁無断転載 —

3次元触覚装置の普及支援システムの開発

平成 23 年 3 月

作 成 財団法人 ニューメディア開発協会
東京都文京区関口一丁目 4 3 番 5 号
委託先名 ソフトキューブ株式会社
大阪府守口市京阪本通二丁目 3 番 5 号