

## Haptic Canvas : ダイラタント流体を用いた力触覚の生成と調合

吉元 俊輔 濱田 友貴 徳井 隆博 末竹 哲也

井村 誠孝 黒田 嘉宏 大城 理

大阪大学大学院基礎工学研究科

## Haptic Canvas: Generate and Blend Haptic Sensation by using Dilatant Fluid

Shunsuke Yoshimoto Yuki Hamada Takahiro Tokui

Tetsuya Suetake Masataka Imura Yoshihiro Kuroda Osamu Oshiro

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

{yoshimoto, y-hamada, tokui, suetake, imura, ykuroda, oshiro} @ bpe.es.osaka-u.ac.jp

### 概要

本研究では力触覚エンタテインメントの要素として独特な感覚の創出・再現性・インタラクティブ性に注目し、力触覚の生成・調合システム“Haptic Canvas”を構築した。特に粘性や剛性を適度に含む独特な力触覚表現として、ダイラタント流体を用いた力触覚提示装置による触覚の調合を可能にした。ユーザは片栗粉粒子のフィルタ及び水の吸入出機構を備えた装置を手に装着し、水槽中に敷き詰められたダイラタント流体中で力触覚インタラクションを行う。開発した装置によって提示可能な感覚様式である、“粘着感”、“硬さ感”、“粗さ感”を仮想的な触覚のもととして導入することで、ユーザの操作に応じた感覚の生成・調合が可能となった。生成される感覚よりシステムの評価を行ったところ、触覚の調合が可能であることが示唆された。また、多くの体験者によって、力触覚の調合と独特な力触覚表現が高く評価された。

### キーワード

力触覚エンタテインメント, 触原色, 感覚調合, ダイラタント流体

### Abstract

In this study, we developed “Haptic Canvas” which enables users to blend, draw and feel haptic sensations. Especially, we used the haptic device which controls the dilatant fluid to present unique haptic sensation according to the viscosity and stiffness of the fluid. Users wear the haptic glove which consists of the filters of the starch particle and sucking or ejecting components and have experience of the haptic interaction within the shallow pool filled with the dilatant fluid. The generating and blending interaction of the haptic sensation was achieved by introducing the haptic primary colors, including “stickiness”, “hardness” and “roughness” sensations.

### Keywords

Haptic entertainment, Haptic primary color, Sensory blending, Dilatant fluid

## 1 はじめに

ヒトが手でものを触るという行為は大きく分けて二つの意味を持つ。一つは対象の性質を探究すること、もう一つは対象を操作することである。日常生活で不可欠な両者の行為に共通することは、対象物と皮膚が接触することで生じる力触覚が関係するという点である。力触覚は周囲の環境を認識するための重要な機能であると共に、エンタテインメントに関わる要素も持ち合わせている。例えば誰もが幼少時に体験したことがあるような泥遊びはある種の力触覚エンタテインメントであり、体験者の自由なインタラクションと適度な粘性や剛性による力触覚が重要な要素であると考えられる。その他にも日常の様々な操作に伴う力触覚はエンタテインメントの観点から興味深く、近年ではこれらの現象のバーチャルな再現が試みられてきた。

日常の力触覚エンタテインメントを扱った独創的で新しい感覚提示システムとして、虫が這う感覚を提示する“Ants in the Pants” [1] や鉛筆を削る心地よさを無限に体験できる“Eternal Sharpener” [2] が挙げられる。また、“Colorful Touch Palette”は塗り絵の要領で絵に質感を与え、ユーザが触って感じることができるシステムである [3]。従来のシステムにおいては、(1) 独特な感覚の創出、(2) 繰り返し体験できる再現性、(3) インタラクティブ性が触覚エンタテインメントにおける重要な要素であると推測される。本研究ではこれらの要素を考慮して、ユーザが自由に力触覚を生成・調合し、また感じることができると力触覚体験システムの構築を目的とする。特に泥遊びのような力触覚の体験要素として、ダイラタント流体を用いた独創的な力触覚提示を利用する [4]。

ダイラタント流体は、水と片栗粉から作ることができ、力触覚的に魅力のある物質の一つである。ダイラタント流体は、外力によって硬化し、固体のように手に取るができるが、力を解くと流動性を獲得して液体のように振る舞う性質を有している。この性質は、粒子密度の変化によるもので、Jamming 転移のうちの一つである [5]。我々が開発したダイラタント流体を用いた媒体制御型力触覚提示装置 [4] は、粒子のフィルタを介して水の吸入出を行うグローブによって、この Jamming 転移を意図的に発生可能にしたものである。本装置によって表現可能な感覚は“粘着感”、“硬さ感”、“粗さ感”である。本研究ではこの三つの感覚に基づいた、力触覚の生成・調合方法を提案する。視覚との対応によって明確な理解を得るため、三つの基本的な感覚を触原色と表現し、各触原色の混合によって触覚の調合が可能であるという考えを導入する [6]。特に触覚提示装置の駆動パラメータであるポンプの吸引力と提示可能な感覚の関係に基づいて、各触原色を定義する。また、それぞれの触原色に対応する感覚を提示する指を分けることで同時に複数の感覚を提示し、感覚の調合を実現する。

本論文ではまず、従来のバーチャルリアリティ(VR)システムを例に力触覚エンタテインメントに必要な要素について考察する。次に、触原色とダイラタント流体を用いた力触覚提示を想定し、本研究で提案する力触覚の生成・調合方法について述べる。さらに本システムの実現のための構成要素について述べ、最後に感

覚の定量的評価と力触覚エンタテインメントとしての評価を示す。

## 2 力触覚エンタテインメント

我々の周りには力触覚エンタテインメントに関わる行為や現象が数多く存在する。近年の力触覚提示技術の向上に伴い、これらの行為をバーチャルに再現する力触覚提示システムが多数考案されている。本章ではまず、日常的な力触覚インタラクションについて述べ、エンタテインメント性の高い触行為を紹介する。次にいくつかの力触覚提示システムを基に力触覚インタラクションにおける本質的な要素を考察し、新しい力触覚エンタテインメントシステムを設計する。

### 2.1 日常的な力触覚インタラクション

誰もが幼少時に体験したことがあるような泥遊びは力触覚エンタテインメントの一つであると考えられる。泥を手に取り、自由な形に造形する行為は物質との触覚的な対話に基づいており、想像力を駆り立てられる。また、粘土や料理の材料をこねる行為からも同様の感覚が得られる。図 1 に示す水と片栗粉から生成できるダイラタント流体も独特で魅力的な力触覚を提供する物質の一つである。これらの力触覚インタラクションにおけるエンタテインメントな要素として、物質の持つ適度な粘性と剛性が重要であると考えられる。一方で日常的には、物を切るやジッパーを開閉する、ボタンを押すといった行為において、心地よい抵抗力にエンタテインメント性を感じる場合もある。さらに生き物との触れ合いのように、受動的な力触覚によっても魅力を感じることができる。これらの VR システムでの表現は、エンタテインメントを提供するだけでなく、触行為の面白さの本質を理解する上で効果的であると考えられる。



図 1: ダイラタント流体

### 2.2 システムとしての実現

力触覚エンタテインメントを提供するシステムとして、虫が這う感覚を提示する“Ants in the Pants”がある [1]。“Ants in the Pants”は小型のモータに取

り付けた鬚状の回転子によって虫が体表を這う感覚を再現するシステムである。ユーザは視覚的な情報と合わせて虫が腕を這う際の能動的な触覚を楽しむことができる。鉛筆を削る心地よさを無限に体験できる“Eternal Sharpener”では、モータのトルクで鉛筆を削る際の抵抗力を再現することで心地よい感覚の生成を実現している [2]。その他に特徴的な触覚インタラクションが可能なシステムとして、“Colorful Touch Palette”が挙げられる [3]。“Colorful Touch Palette”は、ユーザが自由に質感を塗り、また混ぜることで触感を体験できる、塗り絵と触の面白さに着目したシステムである。特に電気刺激による触覚提示によって質感の表現を行っている点が特徴的である。また、現在では力触覚提示を積極的に取り入れた商品が市場に広まっている。例えば、バンダイ (株) より発売されている「∞(むげん) プチプチ」は、気泡緩衝材をつぶす感覚を無限に楽しむことができるという触覚に着目した商品である [7]。従来のシステムの体験より、力触覚エンタテインメントにおける重要な要素として、(1) 独特な感覚の創出、(2) 何度でも繰り返し体験できる再現性、(3) ユーザが触覚を自由に生成できるインタラクティブ性が考えられる。

本研究ではこの三つの観点から、ユーザが力触覚を自由に生成し、また調査可能なシステムの構築を目指す。特に従来のシステムでは実現できない独特な感覚の生成と繰り返しできるという観点から、ダイラタント流体を用いた媒体制御型力触覚提示装置を利用する [4]。次節では触覚の生成・調合というインタラクションの実現方法について述べる。

### 3 触覚調合のための触原色表現

本章では、力触覚の生成・調合が可能なシステム“Haptic Canvas”における力触覚の表現方法について説明する。特にダイラタント流体を用いた力触覚提示装置による触原色の表現方法を提案し、新しい力触覚インタラクションを可能にする。

#### 3.1 絵画と触覚調合

絵画は視覚的に人々の心を魅了する。また、自らキャンバスに彩を加え、絵画を作成する行為も視覚的なエンタテインメントである。絵画と対応させて力触覚的に絵を描く行為もまたエンタテインメントであり得る。“Haptic Canvas”では絵の具を調合して色を作り出し絵画を描いていく要領で、力触覚を調合しCanvas内に力触覚を配置することができる。ユーザは直接手で力触覚の絵の具に触れながら、Canvas内の空間に様々な力触覚効果を描いていく。最終的に作成された力触覚的な絵画に直接触れることで、ユーザは自ら作り上げた感覚を楽しむことができる。

図2に触覚調合の概念を示す。本研究における触覚調合は Hirobe らが提案する“Colorful Touch Palette” [3]と同様に、いくつかの基本的な触覚を調合することで新たな感覚を生成するという概念に基



図2: “Haptic Canvas”における触覚調合

づいている。しかし、Colorful Touch Paletteでは電気刺激により提示される触覚が絵の具に相当するのに対し、本システムではダイラタント流体を制御することにより提示される触覚が絵の具に相当し、表現可能な感覚が大きく異なる。特に、絵の具で表現できる力触覚から基本力触覚 (触原色, Haptic Primary Color) を定義し、感覚の調合として用いるという点が本システムの特徴である。Kajimotoらは触覚における原色、触原色 (Tactile Primary Color) を各機械受容器が検出可能な刺激に対する感覚であると考え、それらの合成により自然な触覚の生成を目指す電気触覚ディスプレイを開発した [6]。電気刺激による触覚提示と異なり、本システムで用いるダイラタント流体を用いた力触覚提示装置は、力覚と触覚を含む複合的な感覚を生成可能な点が特徴である。Haptic Canvasにおいては、ダイラタント流体を用いた力触覚提示装置により表現可能な力触覚モダリティに基づいて触原色の定義を行う。ユーザは自由な割合で触原色を調合することによって、生成される感覚を様々に変化させながら楽しむことができる。

#### 3.2 触原色の表現

ダイラタント流体を用いた力触覚提示装置によって表現可能な感覚に基づき触原色を定義し、その表現方法を考案する。以下ではダイラタント流体を用いた力触覚提示について述べ、触原色の表現方法について説明する。

##### 3.2.1 ダイラタント流体を用いた力触覚提示

水と片栗粉の高濃度な懸濁液であるダイラタント流体は、外力によって硬化し、固体のように手に取ることができるが、力を解くと流動性を獲得して液体のように振る舞うという特徴的な性質を有している。外力によって固化したものが再び流動し始める様子からは、生物の群衆に似た動きも連想される。この性質は粒子の密度変化によって生じることが知られており、

Jamming 転移と呼ばれる現象の一つである [5]。同様に Jamming 転移を生じる MR 流体や ER 流体は力触覚提示装置として応用されているが、液体が人体に有害であるために直接手で触れることができない [8][9]。一方でダイラタント流体は人体に無害であるため、直接手で触れることが可能である。触覚ディスプレイへの利用として、ダイラタント流体の振動による硬さ制御が提案されているが、幅広い感覚提示や泥遊びのような自由なインタラクションが実現できない [10]。

我々は、複合的で幅広い感覚表現と自由なインタラクションが可能な力触覚提示装置を開発した [4]。本装置はダイラタント流体の構成成分のうち水のみを吸入出することでダイラタント流体の濃度を制御し、力触覚提示に応用した力触覚提示装置である。装置は水の吸入出を行うアクチュエータと、ユーザの手に装着するフィルタ部から構成され、ダイラタント流体中で利用することができる。ダイラタント流体中で水の吸引を行うと、片栗粉粒子がフィルタ周囲に堆積し、周囲の粒子との摩擦力を増すことで感覚の提示が可能となる。従って、提示可能な力の方向は水面に対して水平方向のみである。しかしながら、他の力触覚提示装置によって表現できない、独特な硬さ感と粘着感を提示できる点が特徴的である。硬さ感は吸引によって制御される粒子の結合力、粘着感は吸引による底面との吸着によるものと考えられる。また、水の放出によって生じる振動を利用して、粗さ感を提示できる。つまり、吸引の制御方法によって“粘着感”、“硬さ感”、“粗さ感”の提示が可能である。この三つの感覚はポンプによって吸引を行う水の量に対して一軸で変化するため、一つの指に対して複数の刺激提示を同時に行うことは困難である。

以下では Haptic Canvas における触原色として、粘着感 (Stickiness)・硬さ感 (Hardness)・粗さ感 (Roughness) の三つを定義する。三つの感覚は物体の表面状態を決定する重要な要素であり、これらの触原色を調合することで様々な感覚を表現可能であると考えられる。以下では各触原色をモデル化することで力触覚提示装置の駆動パターンと感覚量の関係性を考察し、システムにおける感覚生成法を決定する。

### 3.2.2 Haptic Color

本論文では、触原色の調合によって生成される感覚を力触覚色 “Haptic Color” と呼ぶ。視覚からの連想として、触原色の混合率によって Haptic Color が決定されると仮定する。つまり、粗さ感  $R$ 、粘着感  $S$ 、

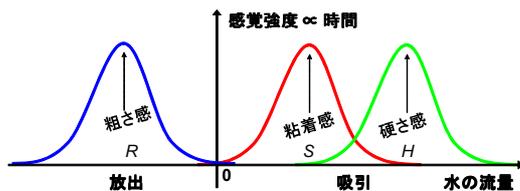


図 3: 触原色の提示方法

硬さ感  $H$  の感覚強度を要素とした三次元のベクトルによって Haptic Color,  $HC$  が決定される。

$$HC = (R, S, H) \quad (1)$$

水の流量と触原色の感覚量の関係を図 3 に示すようにモデル化する。視覚と同様に三つの触原色を近接領域に提示することでその中間の触色を表現する。従って、硬さ感、粘着感および粗さ感の全ての感覚を同時かつ近接領域に提示できる必要がある。複数のチューブを一つの指に取り付けて三つの感覚を同時に提示することは困難であるため、各指先に水の吸入出機構を取り付けたグローブ型の力触覚提示装置を開発し、指ごとに提示感覚を分離して硬さ感、粘着感および粗さ感を分けて提示する。水の水量は吸引または放出の ON と OFF 時間の割合、或いはその周波数によって決まると考えられる。従って、以下では各感覚量の制御を周波数によって制御する方法について説明する。

### 3.2.3 粗さ感

粗さ感覚を物体の凹凸形状が触探索時に与える振動によって生じる感覚であると定義する。Konyo らは粗さの度合いを対象物表面の周期的凹凸の空間周期  $\lambda$  が決定すると考え、手の相対速度  $v$  を考慮することで触探索で生じる振動の周波数  $f_R$  が次式で表されると提案している [12]。

$$f_R = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

本システムではこの粗さの表現手法を採用し、粗さ感の強度  $R$  を  $\gamma$  を定数として次のように定義する。ただし、周波数が特に低い場合は振動を粗さとして知覚しなくなると考えられるため、ある周波数閾値  $f_r$  以上で次式が成り立つと仮定する。

$$R = \gamma \frac{1}{f_R} = \gamma \frac{\lambda}{v} \quad (f_R > f_r) \quad (3)$$

フィルタを介した吸引を空気の放出に変えることでフィルタの振動を生成することが可能である。従って、空気を放出する周波数  $f_R$  を制御することで、粗さ感の感覚強度の制御が可能となる。

### 3.2.4 粘着感

粘着感を対象物から接触を断ち切るうとする際に生じる抵抗力から感じられる感覚と定義する。Yamaoka らは粘着感に関する要素として、対象物に力を与えて取り除く際に生じる皮膚の接触面積のヒステリシス特性が重要であると、触覚ディスプレイとしての応用を提案した [11]。一方で本システムでは、吸着した対象から指が離れるまでに要した時間に着目し、吸引の時間制御により粘着感を表現する。フィルタを介した吸引力の周波数  $f_S$  を用いて粘着感の感覚量  $S$  を  $\alpha$  を定数として次式で導入する。

$$S = \alpha \frac{1}{f_S} \quad (4)$$

液底の沈殿物と吸引機構を取り付けた指先部分の吸着が生じるよう吸引力を高く保ち、吸引の周波数を制御することで様々な粘着感を表現することが可能になる。

### 3.2.5 硬さ感

硬さ感を物質に変形を加える際に生じる抵抗力によって知覚される感覚であると定義する。指先に生じる粒子の堆積物の量が増加するにつれて、流体の底に沈殿した粒子との接触面積が増加する。従って堆積物と沈殿物の間に働くせん断力が増加し、ユーザはより硬い感触であると知覚することが可能である。フィルタを介した吸引によって生じる堆積物の量は吸引力とその時間によって決定される。吸引力が高いと底面との吸着が生じ、粘着感との区別が難しいことから吸引力を低圧に保ち、吸引の時間を制御することでフィルタ周囲の堆積物の量を制御する。従って、硬さ感の感覚量  $H$  を次式で導入する。

$$H = \beta \frac{1}{f_H} \quad (5)$$

ただし  $f_H$  は吸引の周波数、 $\beta$  は定数である。吸引力を低く保ち、その周波数を変化させることで様々な硬さ感を表現することが可能になる。

## 4 インタラクションの概要

ユーザの自由な動きと、独特な感覚の表現を可能にするために、水槽をダイラタント流体で満たし、その中で自由に手を動かしながら視覚・力触覚に基づいたインタラクションを可能にする。ダイラタント流体上にバーチャルな触原色および触原色を調整して生成された Haptic Color を映像として投影し、その色に直接触れることで対応付けられた感覚を体験可能とする。図 4 に体験の手順を示す。具体的にはユーザは触原色の生成・移動・調合が可能であり、下記の手順で体験を行うことができる。

- 生成 触原色の湧き出し源に手を接触させ、感覚の基を発生させる。
- 移動 水槽の底を撫でるように手を動かすことで感覚を感じながら触原色を移動させ、水中から手を出すことで触原色を留める。
- 調合 触原色を連続的に発生させ、配置しておいた触原色に視覚的に接触させることで両者が調合され、感覚も調合される。

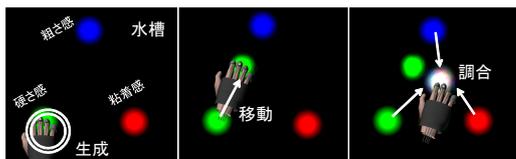


図 4: インタラクションの概要

1 回の操作で湧き出し源から生成される触原色の量(感覚量)は一定であるが、何度でも生成可能であり、複数の触原色を調合させることで感覚量が増加する。また、触原色と視覚における原色が対応しており、力触覚の感覚量は視覚効果の輝度値に対応している。次節ではこれらのインタラクションを可能にするシステム構成を詳細に述べる。

## 5 システム構成

システムの全体像を図 5 に示す。システムを構成する要素は位置計測・力触覚と視覚の計算・触力覚提示の三つである。ユーザの手の位置を入力として Haptic Color の力触覚効果および視覚効果を計算し、提案する力触覚提示装置およびプロジェクタにより各効果の提示を行う。システムでは、手で Haptic Color を生成・調合・消失させることを可能とする。ユーザは Haptic Color をダイラタント流体で満たした浅い水槽である Canvas 内の空間に配置することで、触覚的な絵画を描く。以下では各要素について詳細に述べる。



図 5: システム概要

### 5.1 位置計測

仮想物体とのインタラクションを可能にするため、仮想空間内における手の位置を計測する必要がある。本システムでは指先で仮想物体の形を体験するというよりは、全ての指に提示された感覚を一体のものとして体験するということが重要である。従って、各指先の位置を正確に計測する必要はなく、手の中心の位置のみを計測し、システムへの入力とする。また、提示できる力覚は水平方向の二次元ベクトルであるが、手の着水を判定するために三次元の位置計測が必要となる。

力触覚提示装置の中指の付け根に赤外光 LED を取り付け、二つの赤外線カメラを用いた三角法により LED の三次元位置を計測する。2 台の赤外線カメラを水槽の真上に設置し、予めカメラ座標系と水槽中の水平方向に当たる力覚提示空間の方向を一致させることで、キャリブレーションに必要な位置合わせをスケリングのみに限定しておくことができ、位置計測を単純化する。

## 5.2 可視化と力触覚効果

位置計測の結果に基づいて視覚と触覚の効果が計算される。触覚の可視化として、光の三原色、赤・緑・青を触覚の三原色、粘着感・硬さ感・粗さ感に対応付け、色の輝度値と各触覚の感覚量に対応させる。特に粘着感、摩擦による熱を想定して赤色を、粗さ感、流体の振動によって提示するため、波を想定した青色を、硬さ感、残りの緑色に対応づける。Haptic Canvas 上では触原色は粒子の集まりとして表現される。それぞれの粒子は固有の触原色と色を持ち、粒子の濃度がユーザの手に提示される力触覚の強さを決定する。本システムではユーザの手の動きによって触原色を自由に生成しかつ動かし、他の触原色と接触させることで調合可能な操作を想定している。また、ダイラタント流体の有する生き物感や能動的に動く物体とのインタラクションのエンタテインメント性を考慮して、各触原色を表わす粒子を動的な群集運動を行う色の塊で表現する。さらに、個々の触原色が動く速度や粒子群の結合の度合いを感覚に対応させて表現することが効果的であると考えられる。このような振る舞いを支配する法則として、本システムでは魚や鳥の複雑な群集運動を表現する BOIDS モデルを利用する [13]。BOIDS モデルは、群れを構成する粒子 (BOID) の速度に関する三つの法則によって実装することができる。

- 粒子群の重心に集まろうとする。
- 他の粒子と速度を揃えようとする。
- 他の粒子から一定の距離を保とうとする。

キャンパス内の一つの Haptic Color が一つの BOID 郡に相当し、BOID 郡が有する各粒子が触原色を表す。三つの法則の重み付けによって、粒子の振る舞いが変化するため、動的な振る舞いが各触原色の力触覚効果を連想させるようにパラメータの調整を行う。粘着感の Haptic Color は輝度値の度合いに応じて変形と移動の速度を変化させる。硬さ感の Haptic Color は輝度値に応じて剛性を変化させ、変形の度合いを変化させる。粗さ感は輝度値に応じて振動の度合いを変化させる。本システムに必要なインタラクションの表現として、BOIDS モデルに、以下の生成・移動・調合のルールを付け加える。

**生成** 触原色の生成源に触れた際に、一つの Haptic Color が生成される。

**移動** 水槽に手を挿入した状態で Haptic Color に触れることで手に追従して移動させることができる。

調合 複数の Haptic Color を接触させることで各 Haptic Color を構成する粒子同士を結合する。

また、力触覚の生成としては、手の位置と速度を入力として各 BOID との接触判定を行い、前述の Haptic Color モデルに基づいた計算結果を用いて力触覚提示装置を駆動させる。

## 5.3 力触覚の提示

装置の詳細については [14] に示すが、複数の触原色に基づいた力触覚を同時に提示可能な装置としてダイラタント流体の制御機構を備えたグローブ型力触覚提示装置を開発した。図 6 に作製した力触覚提示装置のプロトタイプを示す。着脱を容易にするため、水の吸入出機構がグローブの各指先に取り付けてあり、各指周囲のダイラタント流体を制御可能とした。先端のフィルタ部分はダイラタント流体の水のみを通す大きさの穴を有している。また、グローブは二重構造であり、内側の使い捨て防水グローブを覆うように着脱可能な機能性グローブが取り付けられている。フィルタは装着型のグローブの指先の表側に取り付けられており、吸引によってその周囲の粒子を堆積させる。

開発した流体制御グローブでは、水の吸入出は真空ポンプによって行い、電磁弁によって吸入と放出を切り替える。吸引を行う際には常に電磁弁が OFF に、放出を行う際には常に ON となる。真空ポンプの制御は PWM 制御によって行い、ポンプの力を制御する Duty 比と、その周波数を前述の力触覚提示のパラメータとして用いる。デューティ比をポンプの力、周期を感覚強度にそれぞれ対応させてデバイスの駆動に用いる。電磁弁は AG31-01-2 AC100V、小指の吸引用および全ての放出用ポンプには DC モーター真空ポンプ DP0125、残りの指の吸引には DP0140 を用いた。フィルタ部分にはダイラタント流体の水のみを通す穴の大きさを有した合成繊維の布地を用いた。また、試作に用いた最大圧力 0.03 MPa の真空ポンプによって十分な吸引力を得るために、チューブの口径は経験的に 3 mm と決定した。



図 6: 力覚提示グローブ

## 6 システムの実装と評価

Haptic Canvas のプロトタイプシステムの実装を行い、展示を行った。本章では体験者の回答をもとに、ダイラタント流体を用いた力触覚表現と感覚の調合という二つの観点からの評価を述べる。

表 1: 実装環境

CPU	Intel Core 2 Duo 2.4 GHz
RAM	4 GB
グラフィックボード	NVIDIA Quadro FX1600M
OS	Windows XP Professional
Infrared Camera	Wii Remote Controller
Dilatant Fluid	8 kg water and 3kg starch

表 2: 駆動パラメータの設定

触原色	粘着感	硬さ感	粗さ感
デューティ比 [%]	20	40	100
周波数 [kHz]	0 - 1	0 - 1	0 - 1
ポンプ	吸引	吸引	放出
主刺激	示指	薬指	中指
補助刺激	中指	小指	薬指

### 6.1 実装環境

表 1 にシステムの構成に用いた装置の仕様を示す。また、式 (2)-(5) におけるパラメータの設定に関しては、PWM 制御の周波数が 0 - 1 kHz となるよう調整し、感覚量は触原色の発生個数の上限に合わせて五段階で表現した。また、各触原色に対するポンプの駆動パラメータは表 2 に示す通りである。各触原色を提示する手の部位は特定の 2 本の指に定めており、複数の駆動方式を同時に用いることを可能とした。複合的な感覚の提示の際に一つの指に複数の刺激が重複する場合は、補助刺激よりも主刺激として設定している指への刺激を優先して提示する。例えば、粘着感と粗さ感の刺激モードの組み合わせでは、示指に粘着感が、中指と薬指に粗さ感の刺激が適用される。

### 6.2 触覚調査に関する定量的評価

提案手法を評価するために、水量と知覚得点の関係、および複数刺激併用時の複合感覚を定量化する。以下ではそれぞれに対する被験者実験について述べる。

#### 6.2.1 水量と知覚特性

図 3 に示すような、水量と感覚の関係を明らかにすることを目的とし、被験者実験による評価を行った。それぞれの触原色ごとの刺激条件において、粘着感・硬さ感・粗さ感に対応する形容詞対をそれぞれ二つずつ用いて回答を得た。各刺激条件における周波数は 5

表 3: 回答に用いた形容詞対

感覚	形容詞対
粗さ	ぼこぼこした/なめらかな 凹凸な/平らな
粘着	粘着性のある/粘着性のない ねばねばした/さらさらした
硬さ	硬い/柔らかい 弾力性のある/弾力性のない

Hz とし、表 3 に示す形容詞対に対して 5 段階で評価点を得た。詳細な評価については [14] において述べているが、周波数の違いによって感覚強度が変化する。5 Hz という周波数は比較的大きな感覚強度が得られる周波数であるということを確認している。

実験に用いるダイラタント流体の条件として、片栗粉 300 g に対し水 600 g を幅 400 mm 奥行き 200 mm の容器に満たしたものを利用した。実験の開始前に水を吸引してチューブを水で満たし、吸引した水を容器に還元する流路を作ることでダイラタント流体の濃度を一定に保った。各被験者ごとに要する実験時間は水が蒸発する時間に比べて十分短いため、水の蒸発による濃度変化に関しては考慮していない。実際の使用を想定し、実験では被験者が自ら手を動かして知覚する感覚を回答した。実験中は被験者の操作によって溶液が適度に攪拌されるため、片栗粉粒子の沈殿を考慮した攪拌は行っていない。また、被験者の姿勢は座位で、被験者自らがモニタに表示した Graphical User Interface(GUI) を操作しながら感覚の回答を行った。各パラメータにおける感覚提示は何回でも可能とし、被験者は (1) 試行の選択、(2) 体験の実施、(3) 質問への回答という作業を繰り返し行った。ただし、実験の順序による影響をなくすために試行の抽出と質問の表示順序は無作為とした。1 回の体験で行う装置の駆動時間は、十分な体験時間が得られる 10 秒間とし、体験中は GUI の操作等を不可能とした。触り方として、指腹で容器の底を撫でる操作を行うよう指示し、手を動かす速度等の制限は設けなかった。

7 名の被験者に対して無作為に提示された刺激における感覚を六つの形容詞対ごとに回答を得た。各パラメータ設定を水量順に並べ、3 種類の感覚ごとに得点の平均値を算出した結果を図 7 に示す。ただし、R は粗さの刺激モード、S は粘着の刺激モード、H は硬さの刺激モードを表わす。実験結果より、視覚の特性に関連付けて提案した 3 原色の知覚領域に関する特性が明らかとなった。また、それぞれの感覚のピークの順序は提案手法である図 3 と同様の順序に並んでいることが確認できる。一方で、粘着感と硬さ感を独立に提示することが難しいことが分かる。しかし、硬さ感に関しては設定パラメータで最大の状態に達していない可能性が考えられるが、全体の傾向としては意図したとおりの特性が得られていることが確認できた。

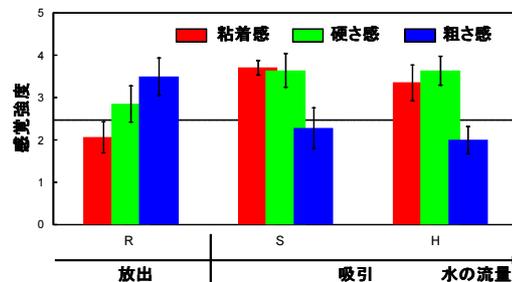


図 7: 水量と知覚特性

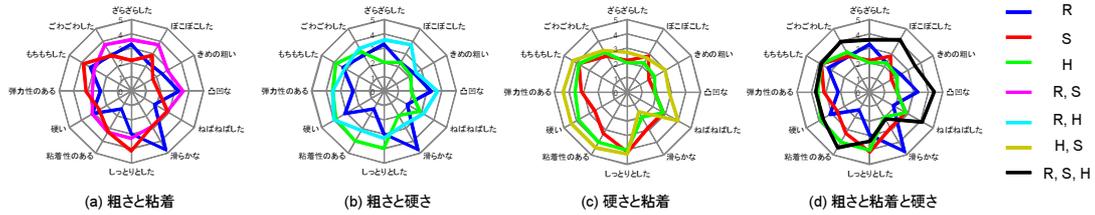


図 8: 触覚調合に関する評価実験の結果

### 6.2.2 触覚調合

前節では、単独の刺激提示が与える感覚を評価したが、本節では、複数の刺激の同時提示によって得られる感覚を評価する。複数の刺激の同時提示によって得られる感覚が、単独に刺激提示の中間的な感覚であったり、全く別の感覚であることが示されれば、異なる指に提示した感覚が合成されて知覚されていることになる。本実験では各評価項目の分布をレーダー図表で表わすことで調合前後の結果を比較する。

水量と知覚に関する実験と同様に、形容詞対における評点を得た。特にパラメータの設定は全ての刺激モードで 5 Hz の周波数とし、単独刺激を含む全ての組み合わせ全 7 通りについて提示を行った。6.2.1 節の実験で使用した形容詞対に、六つの形容詞対(ざらざらした/つるつるした, きめの粗い/きめの細かい, 滑らかな/引っかかる, しっとりとした/ばさばさした, もちもちした/カチカチな, ごわごわした/ふわふわした)を追加した。

複合的な刺激に対する評価を、もとなる単独の刺激に対する評価とともに、図 8 に示す。結果より、いずれの場合も感覚の分布領域は両者を含む領域に分布する傾向にあることが確認できる。これは、単独刺激による感覚を同時に提示できている可能性を示唆しており、複合的な感覚の提示に成功していると考えられる。また、単独では提示できない感覚の得点が高くなっている個所が見受けられた。例えば、粗さと硬さの個別の提示ではぼこぼこしたという感覚の得点は小さいにもかかわらず、両者を併用した際にはぼこぼこしたという得点が高くなる現象が確認できる。特に片側 t 検定を行ったところ、評価点の平均値が有意に異なり、生成される感覚に変化が生じることが示唆された。ただし有意水準は 0.05、標本数は 7 である。つまり、複数の刺激方式の併用によって新しい感覚が発生していると考えられる。従って、個々の指に刺激を提示することでも、感覚の合成が可能であることが示唆される。この結果は、媒体制御型の力触覚提示装置の特徴であり、個々の指に取り付けたフィルタが別の指付近のダイラタント流体にも影響を与えることで、全体として感覚の合成に成功したと考えることができる。

### 6.3 定性的評価と展示の実施

図 9 にシステムの体験風景を示す。ユーザはグローブを装着し、ダイラタント流体で満たした水槽、Canvas 内の空間に投影された仮想物体との視覚・力触覚的なインタラクションを楽しむ。触原色の湧き出し源に手を置くことで触原色を生成し、調合に用いる。生成した触原色は手で動かすことが可能であり、視覚的に表現された触原色同士を接触させることで力触覚の調合が可能である。1 回の操作で湧き出し源から生成される触原色の量(感覚量)は一定であるが、何度でも生成可能であり、ユーザは色合いを手で感じながら感覚量を変化させていくことができる。複数の触原色から調合された力触覚を Canvas 内に配置していくことで、最終的に出来上がった絵の手触りを体験することができる。



図 9: 体験の様子

力触覚エンタテインメントを提供する VR システムとしての評価を得るため、15 人の健康な被験者に対し数分の説明並びにデモンストレーションを行い、システムの体験後に客観的な感想を得た。以下にそのうちのいくつかの例を示す。

- ダイラタント流体の不思議な触感を力触覚提示に使ったという点が面白い。
- 複数の感覚を調合することで新しい感覚を生成するインタラクションが面白い。
- それぞれの色に対応した感覚の違いが明確に分かった。
- 粘着感が最も良い。

- 粗さ感が最も強度が強い。
- 底面の凸凹した形状が感じられた。
- 色と力触覚の対応付けではなく、テクスチャと力触覚の対応付けが良いのでは。
- 感覚の違いが分かり面白いが、狙っている感覚とは異なっている気がした。
- 何かの感触をそれらしく表現するほうが良いのではないか。

被験者の多くが各触原色に対する感覚の違いを述べ、触覚を混ぜて新しい感覚を生成するという行為に高い評価を与えた。「泥遊び」という概念に関して、色のついた泥を混ぜ合わせて、新しい感覚を生成するというイメージを与える上で重要であったと考えられる。粘着感が良いという回答にもあるように、赤色と粘着感の対応付けに関しては体験者の理解が容易であった。粗さ感に関しては提示される感覚に驚く被験者が多く見られたが、これは青色の触原色が与える印象と、提示される感覚に差があったためであると考えられる。硬さ感に関しては最も対応の理解が困難であるように伺えた。硬さ感が質感というよりは物体の変形に由来していることも原因であると考えられる。個別の対応を考慮すると本システムにおける対応付けは適切であったとは言えないが、調合という観点からは、色と対応づけて調合するというインタラクションが操作のアフォーダンスとして良好に働いたと考えられる。またアンケート結果より、色よりはテクスチャや動きで表現する方が感覚をより強調できる可能性があることが分かった。一方でペンティングシステムとしての操作性と、力触覚提示装置によって与えられる触覚の安定化が不十分であると指摘された。ダイラタント流体の濃度制御によって与えられる感覚の安定化が望まれる。本論文では、人の知覚レベルでの評価を示したが、物理現象の定量的な評価も課題の一つである。

また、Laval Virtual ReVolution 2010 および SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies, エンタテインメントコンピューティング 2010 にて本システムの展示を行い、合計 3000 人を超えるユーザに対して体験を実施した [4] [15] [16]。多くの体験者によって、力触覚の調合と独特な力触覚表現が高く評価された。老若男女、さらには国内外を問わず様々な体験者に自然と笑みを与えられる点が本システムにおける特徴の一つであると考えられる。

## 7 おわりに

本研究では、力触覚エンタテインメントの要件として独特な感覚の創出・再現性・インタラクティブ性を挙げ、力触覚の生成・調合システムの構築を目指した。さらに泥遊びの要素を含む力触覚インタラクションの実現として、ダイラタント流体を用いた力触覚提示を本システムの構成要素とした。ダイラタント流体を用いた力触覚提示においては、粘着感・硬さ感・粗さ感という 3 種類の感覚モダリティの表現が可能であることが確認されている。本研究では、これらの三つ

の感覚を触原色とし、装置の駆動方法とその表現方法を示した。提案する力触覚インタラクションを用いたシステム“Haptic Canvas”では、粘着感・硬さ感・粗さ感という三つの触原色をダイラタント流体を満たした水槽中で自由に生成・調合し、複合的な力触覚として感じることができる。多くの体験者によって、力触覚の調合と独特な力触覚表現が高く評価された。従って本研究が提案する力触覚の生成・調合という新しいインタラクションにより、エンタテインメントとしての可能性が広がったと考えられる。

力触覚エンタテインメントの観点からは、装置の駆動方法を工夫し、さらに表現できる感覚のモダリティを拡張することが期待される。触原色を 3 種類に留めず、さらなる感覚を加えることで触覚エンタテインメントとしての可能性が広がると考えられる。また、水槽平面上だけでなく、三次元空間への拡張という点も本システムの新たな展開として興味深い。

## 謝辞

本研究の一部は大阪大学グローバル COE プログラム “*in silico medicine*” の支援を受けて行ったものである。また本研究における被験者実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (21-5) を得て行った。

## 参考文献

- [1] K. Sato, Y. Sato, M. Sato, S. Fukushima, Y. Okano, K. Matsuo, S. Ooshima, Y. Kojima, R. Matsue, S. Nakata, Y. Hashimoto, and H. Kajimoto, “Ants in the Pants”, Proceedings of ACM SIGGRAPH '08, Emerging Technologies, No.3, 2008.
- [2] Y. Kojima, Y. Hashimoto, H. Kajimoto, “Eternal sharpener- A rotational haptic display that records and replays the sensation of sharpening a pencil”, Proceedings of IEEE RO-MAN '09, pp.8-21, 2009.
- [3] Y. Hirobe, T. Yoshida, S. Kuroki, K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami, and S. Tachi, “Colorful Touch Palette”, Proceedings of ACM SIGGRAPH '10, Emerging Technologies, No.10, 2010.
- [4] S. Yoshimoto, Y. Hamada, T. Tokui, T. Suetake, M. Imura, Y. Kuroda, O. Oshiro, “Haptic Canvas: Blending stickiness, hardness, roughness with dilatant fluid based haptic device”, Proceedings of VRIC '10, pp.145-146, 2010.
- [5] A. Liu, and S. Nagel, “Jamming is not just cool any more”, Nature, Vol.396, No.6706, pp.21-22, 1998.

- [6] H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, "Electro-Tactile Display with Tactile Primary Color Approach", Proceedings of IEEE IROS '04, 2004.
- [7] 株式会社バンダイ, "∞ (むげん) プチプチ", <http://www.asovision.com/putiputi/>.
- [8] J. Blake, and H. Gurocak, "Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality", IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.14, No.5, pp.606-615, 2009.
- [9] Y. Han, P. Kang, K. Sung, and S. Choi, "Force Feedback Control of a Medical Haptic Master using an Electrorheological Fluid", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.18, No.12, pp.1149-1154, 2007.
- [10] S. Saga, and K. Deguchi, "Dilatant fluid based tactile display -Basic concept", Proceedings of IEEE Haptics Symposium '10, pp.309-312, 2010.
- [11] M. Yamaoka, A. Yamamoto, and T. Higuchi, "Basic Analysis of Stickiness Sensation for Tactile Display", Proceedings of the 6th International Conference on Haptics, LNCS 5024, pp.427-436, 2008.
- [12] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro, and N. Saiwaki, "A Tactile Synthesis Method Using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch", Proceedings of IEEE IROS '05, pp.1121-1127, 2005.
- [13] C. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, in Computer Graphics", Proceedings of SIGGRAPH '87, Vol.21, No.4, pp.25-34, 1987.
- [14] 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 徳井 隆博, 末竹 哲也, 井村 誠孝, 黒田 嘉宏, 大城 理, "ダイラタント流体を用いた媒体制御型力触覚提示装置", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3, pp.317-325, 2011.
- [15] S. Yoshimoto, Y. Hamada, T. Tokui, T. Suetake, M. Imura, Y. Kuroda, O. Oshiro, "Haptic Canvas: Dilatant fluid based haptic interaction", Proceedings of ACM SIGGRAPH '10, Emerging Technologies, No.13, 2010.
- [16] 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 徳井 隆博, 末竹 哲也, 井村 誠孝, 黒田 嘉宏, 大城 理, "ダイラタント流体を用いた力触覚インタラクション", エンタテインメントコンピューティング 2010, A21, pp.1-9, 2010.

吉元 俊輔



2010 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年同研究科博士後期課程進学。2011 年日本学術振興会特別研究員 (DC1), 現在に至る。力触覚提示および触覚情報処理に関する研究に従事。IEEE, 日本バーチャルリアリティ学会, 電子情報通信学会, 日本生体医工学会等に所属。修士 (工学)。

濱田 友貴



2011 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年 NTT コミュニケーションズ株式会社入社, 現在に至る。在学中, VR, 触覚情報処理に関する研究に従事。修士 (工学)。

徳井 隆博



2011 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年四国電力株式会社入社, 現在に至る。在学中, 医用画像処理に関する研究に従事。修士 (工学)。

末竹 哲也



2011 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年株式会社島津製作所入社, 現在に至る。在学中, 医用画像処理に関する研究に従事。修士 (工学)。

井村 誠孝



2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同研究科助手。2007年同研究科助教。2009年大阪大学大学院基礎工学研究科准教授，現在に至る。人工現実感，コンピュータグラフィクスおよび医用画像処理に関する研究に従事。IEEE，情報処理学会，日本生体医工学会等に所属。博士(工学)。

黒田 嘉宏



2005年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了。同年同大学大学院医学研究科特任助手。2006年大阪大学大学院基礎工学研究科助教，現在に至る。医用VR，触覚情報処理，教育訓練システムに関する研究に従事。ACM，IEEE，日本バーチャルリアリティ学会，生体医工学会，日本VR医学会等に所属。博士(情報学)。

大城 理



1990年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年住友金属工業(株)入社。1993年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。1994年同大学先端科学技術研究調査センタ助教授。2003年大阪大学大学院基礎工学研究科教授，現在に至る。医用画像処理，生体信号処理に関する研究に従事。生体医工学会，システム制御情報学会，電子通信情報学会等に所属。工学博士。