

## ThermoRetouch & ThermoModeler: 熱感覚を利用した画像創作支援

岩井 大輔<sup>\*1),\*2)</sup>, 佐藤 宏介<sup>\*1)</sup>

<sup>\*1)</sup> 大阪大学 大学院基礎工学研究科, <sup>\*2)</sup> 日本学術振興会特別研究員

E-mail: iwai@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, sato@sys.es.osaka-u.ac.jp

**あらまし:** 本論文では, 熱情報の入力を VR 空間と物理空間との間を繋ぐチャネルとして利用した画像創作支援システムを提案する. 筆者らはこれまで, 赤外線カメラから入力されるスクリーン上の温度変化を絵道具の接触判定に利用して描画作業を支援するシステムを構築してきた. 本論文では, このシステムを発展させ, 赤外線カメラより取得される熱情報を積極的に利用して, 心理マッピングモデルに基づいたユーザの持つ熱感覚を利用した画像創作支援を行う. 熱印象を介して彩度・色相といった画像パラメータを直観的に操作する ThermoRetouch と, 熱現象を介して 3 次元形状モデルの塑性パラメータを操作し形状を変形させる ThermoModeler を提案する. これらのシステムでは, 自らの熱感覚が画像に反映されるため, 直観的で発想を重視するような画像創作が可能となる.

**キーワード:** 熱画像, 熱感覚, 画像創作支援, プロジェクタ カメラシステム, 感性工学

## ThermoRetouch & ThermoModeler: Heat Sensation in Image Creation with Thermal Vision

Daisuke Iwai<sup>\*1),\*2)</sup> and Kosuke Sato<sup>\*1)</sup>

<sup>\*1)</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University, <sup>\*2)</sup> JSPS Research Fellow

**Abstract:** In this paper, the authors discuss how to involve the heat sensation in image creation by using thermal vision. The past work of the authors presents a novel input system which can detect temperature change on a sensing surface when objects hotter or colder than the surface touch it. This can be a promising user interface platform involving the heat sensation interaction in image creation. Applications of image modification and 3D shape model deformation are implemented on the platform. The image modification application aims to achieve an intuitive user interface for color saturation and hue modifications which are strongly related to heat sensations. Using the analogy of thermal plasticity, the authors propose an intuitive manipulation method of deforming 3D shape models as making glassworks in the 3D shape model deformation application.

**Keywords:** thermal image, heat sensation, computer aided image creation, projector-camera system, Kansei engineering

### 1. はじめに

コンピュータを用いた VR(Virtual Reality) 空間での画像創作では, 従来のマウスやペンタブレットといった入力インタフェースに加えて, 力覚フィードバックが付与されたり 3 次元空間を直接操作するようなシステムが提案されている. これらのシステムでは, 物理空間と仮想空間とをシームレスに繋ぐチャネルを増やすことで, 実世界のルールやメタファを操作に組み込み, 初めて使うユーザにとっても馴染みやすい操作体系を実現している.

本論文では, 近年 VR 空間での情報操作の新たなチャネルとなりつつある熱情報の入力を利用した画像創作支援システムを提案する. 筆者らはこれまで, 赤外線カメラから入力されるスクリーン上の温度変化を絵道具の接触判定に利用して描画作業を支援するシス

テムを構築してきた<sup>[1]</sup>. 本論文では, このシステムを発展させ, 赤外線カメラより取得される熱情報を積極的に利用して, ユーザの持つ熱感覚を利用した画像創作支援システムの構築を目指す.

実世界には, 熱可塑性・黒体放射・熱膨張といった熱現象が多々存在する. 人はこのような熱現象を観察すると熱さや冷たさを感じる, つまり熱感覚を得る. これはたとえ仮想空間の中であっても, 仮想物体の像が熱現象に従って変化しているように見える場合, 人は同様に熱感覚を得ると考えられる. このとき, 仮想物体の物理モデルパラメータと熱感覚との間には熱現象を介するノンバーバル(非言語的)な心理的マッピングが存在すると考えられる. また, 例えば色相に関するもの(暖色 寒色)のように, 画像パラメータと熱感覚との間には熱印象を介する同様の心理的マッピ

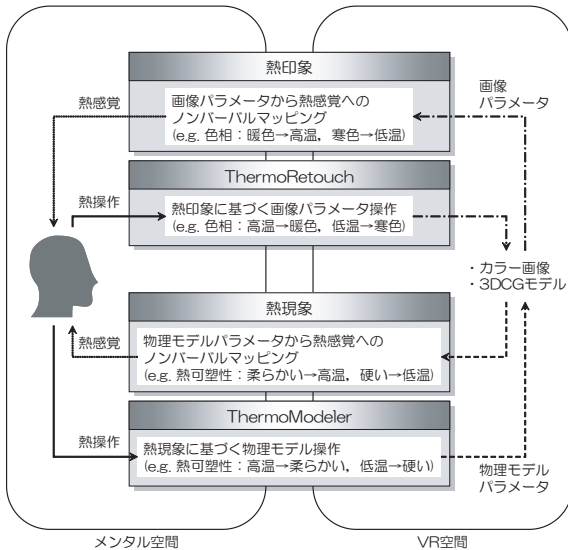


図 1 熱感覚を利用した画像創作支援システム

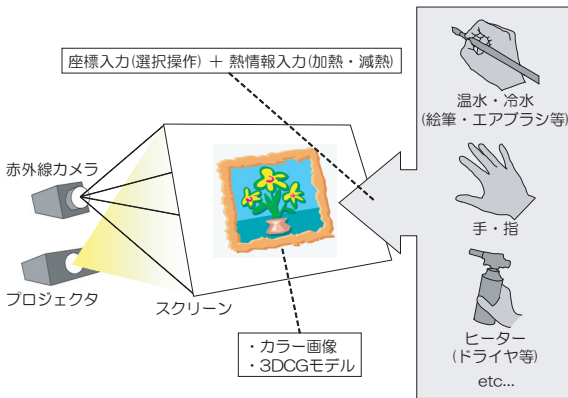


図 2 システム概観

ングが存在すると考えられる。本論文では、画像から熱印象や熱現象を介して熱感覚が得られるのとは逆方向に、つまり熱を入力することで画像パラメータや物理モデルパラメータを操作することを目指す(図1)。

筆者らは、カラー画像を対象として、その画像パラメータを熱印象を介して直観的に操作する ThermoRetouch と、3次元形状モデルを対象として、その物理モデルパラメータを熱現象を介して操作する ThermoModeler を提案する。提案システムでは、操作対象のカラー画像・3次元形状モデルはスクリーンに投影されており、そのスクリーン上の温度分布の変化を熱画像より取得する。そして、その温度変化領域に投影されている投影像のパラメータを操作する(図2)。ユーザは、手や指、ドライヤ、温水・冷水をつけた絵筆といった道具を用いて、スクリーン上の操作領域を指定すると同時に、その領域に高温・低温どちらかの温度変化を引き起こし、熱操作を行うことができる。

提案する画像創作支援システムは長町らの感性工学モデルに基づいたものである<sup>[2]</sup>。感性工学システムと

は、ユーザのイメージ(感性)を解釈してそれに百パーセント近い形のものを具現化するシステムのことである。感性工学システムによる画像創作支援では、詳細なパラメータ設定や汎用的な機能はないものの、ユーザは操作のために訓練・学習を行って知識を獲得する必要はない。自らの感性が画像に反映されるため、直観的で発想を重視するような画像創作が可能となる。

本論文ではまず従来研究について述べ、本研究の位置づけを示す。次に、ユーザが、提案する操作体系を容易に使えるかどうかを調べるため、熱感覚と画像パラメータとの間の心理的マッピングを調査する。そして、提案する熱感覚を介する画像創作支援システムの概要、処理の流れについて述べる。実機を使ったシステム構築と、動作確認のための実験を行い、提案システムの操作の直観性を確認するための評価実験を行う。最後に、考察と今後の展望を述べる。

## 2. 関連研究

本章では、直観的な画像創作支援システム、熱情報のチャンネルを利用した VR システム、熱画像を利用した画像創作支援システムについてそれぞれ述べ、本研究の位置づけを明らかにする。

### 2.1 直観的な画像創作支援システム

煩雑な操作体系を覚える必要のない、画像創作支援のための直観的なインターフェースが多く提案されてきている。I/O Brush<sup>[3]</sup>では、あたかもパレットにある絵具を筆につけるかのように、実世界の身近にある物の色を写しとって使うというインターフェースが提案されている。このシステムは子供の教育用として開発されているが、子供達が様々な実世界中の色を自由に使いこなして画像創作を行った、ということが報告されている。

Khronos Projector は、柔軟なスクリーンに投影された画像の情報を、そのスクリーンを押すことで操作することができる<sup>[4]</sup>。スクリーン裏側に設置された近赤外線カメラで、スクリーンに投光されている近赤外光の分布を取得し、スクリーンが押されたかどうかを認識する。スクリーンが柔軟なため押す量が力覚としてフィードバックされる上、スクリーンを押す量によって操作量が変わる直観的な操作体系を実現している。

3次元形状モデルの操作インターフェースとして、SenseAble Technology 社は、PHANToM を利用した3次元モデリングシステム FreeForm を提案している<sup>[5]</sup>。仮想の3次元空間内でモデルを削る・引っ張るといった操作をする際に、PHANToM から与えられる触覚フィードバックによって、バーチャルなモデルにあたかも接触して操作を行っているかのような感覚をユーザに与え、操作の直観性を向上させている。

また、ユーザが曲面を指で押ししたり引っ張ったりする単純で直観的な動作でラフな形状を創成できるようなシステムが提案されている<sup>[6]</sup>。このシステムでは、データグローブと3次元位置センサを用い、実世界で粘土変形を行うように3次元モデルの形状変形を行える入力インタフェースが実現されている。

これらのシステムでは、実世界のテクスチャを入力するチャンネルや力覚フィードバックを出力するチャンネルで仮想空間と物理空間とをシームレスに繋ぐことで、直観的な操作を実現している。これらに対して本論文では、仮想空間と物理空間とを熱情報によって繋ぐチャンネル(以下、熱情報チャンネル)を通して、ユーザが画像から熱印象や熱現象を介して得る熱感覚を利用し、カラー画像の画像パラメータ操作や3次元形状モデルの物理パラメータ操作を行うインタフェースを構築する。

熱感覚を画像創作に利用している例として、熱可塑性を利用してVR空間で形状モデル変形を行う研究が行われている<sup>[7]</sup>。この研究では、ガラス細工のメタファを利用することで、直観的に形状モデリングを行うことに成功している。しかしながら、VR空間への熱入力が行われていない。本論文では、熱感覚を介する直観的な画像創作を実現するために、熱画像を利用して熱情報の入力を可能にする。

## 2.2 熱情報チャンネルを利用したVRシステム

近年、物理空間と仮想空間とを繋ぐ新たなチャンネルとして、熱情報が注目されている。VR空間内の仮想オブジェクトの材質感を提示するために、金属や木材などの熱伝導特性をシミュレートしてユーザの指先に温度変化を与える研究が多く行われてきている<sup>[8]</sup>。また、メディアアートの領域でも、映像と熱情報を同時にユーザに提示する新たなマルチメディア環境を構築し、雪の結晶が表示されるとその領域の温度が低くなるといったアプリケーションを実装した作品も提案されている<sup>[9]</sup>。また、情報の性質を温度で表現する試みもなされている。道具の形をしたデバイスによってファイルデータの授受などの操作を直観的に行うことのできるシステムToolDevice<sup>[10]</sup>では、情報の新しさに関して、新しければ暖かく、古ければ冷たいという熱感覚メタファを利用し、熱による情報の新旧の提示が実現されている。

これらの研究では、熱情報チャンネルを介することで、仮想空間にある情報が直観的に理解できることが示されている。しかしながら、これらの研究では熱情報のチャンネルは、仮想空間から物理空間へ方向に向けられたものに限られている。これに対して本論文では、熱情報を仮想空間へ入力することで画像創作を支援するシステムを構築し、熱情報チャンネルを利用するVR

システムの可能性を広げる。

## 2.3 熱画像を利用した画像創作支援システム

熱情報を媒介する特殊な波長域である遠赤外線領域の光を捉えることのできる赤外線カメラは、これまで検査・医療・災害救助といった分野での利用がなされてきている<sup>[11]</sup>。近年では、人物シルエットを様々な背景からでも取得することが可能であるという赤外線カメラの特長を活かした画像創作支援システムが提案されてきている。

EnhancedDeskでは、あたかも両手で画像を掴んで伸ばすかのように画像を変形させるインタラクション技法が提案されている<sup>[12]</sup>。このシステムでは、頭上に取り付けられた赤外線カメラで取得された熱画像から、投影光の影響を受けることなくユーザの手が握られたかどうかを認識し、手の下に表示されている画像を手の動きによって自由に曲げ伸ばしすることができる。

Thermo-Keyでは、人物領域を背景から切り出して、画像合成を行う<sup>[13]</sup>。熱画像を利用することで人物領域のみを安定的に切り出すことができることから、特殊なホリゾンセットの不要な自由度の高い画像合成が可能となっている。

筆者らは既に、赤外線カメラとプロジェクタを組み合わせ、身体の接触・液体塗布・気体の吹き付けによるスクリーン上の熱の変化を熱画像によって検出し、その温度変化領域へ任意色の光を投影することで直観的な描画作業を支援するシステムを提案している<sup>[1]</sup>。近年では、同様の原理に基づくアート制作支援環境も提案されてきている<sup>[14]</sup>。

これらの研究では、2次元画像として取得された温度分布を入力として用いているにも関わらず、人物領域の背景からの切り出しや接触領域の検出といった閾値処理によって、豊富な熱情報のほとんどを切り捨てている。本論文では、より積極的に熱の変化量の情報を利用して画像パラメータを操作することのできる画像創作支援インタフェースを構築する。筆者らは既に先行研究<sup>[1][15]</sup>にてこのようなインタフェースに関する報告を行っているが、本論文では熱感覚を利用する画像創作支援システムの体系的な枠組み作りを行う。

## 3. 熱感覚と画像パラメータのノンバーバルマッピング調査のための心理実験

ユーザが、熱を利用した画像パラメータ操作を容易に理解でき使えるようになるかどうかを、心理実験により明らかにする。本論文では表1に示す、4種の画像パラメータ(彩度・明度・色相・空間周波数)と1種の物理モデルパラメータ(粘性)について調査を行う。

心理実験の手法としてはまず、これら5種のパラメータの操作前と操作後の画像を用意する(図3)。被

表 1 調査対象となる画像パラメータと物理モデルパラメータ

	パラメータ	操作	
画像パラメータ	彩度	彩り豊か	モノトーン
	明度	明	暗
	色相	暖色	寒色
	空間周波数	ぼけ	鮮明
物理モデルパラメータ	粘性	硬	柔

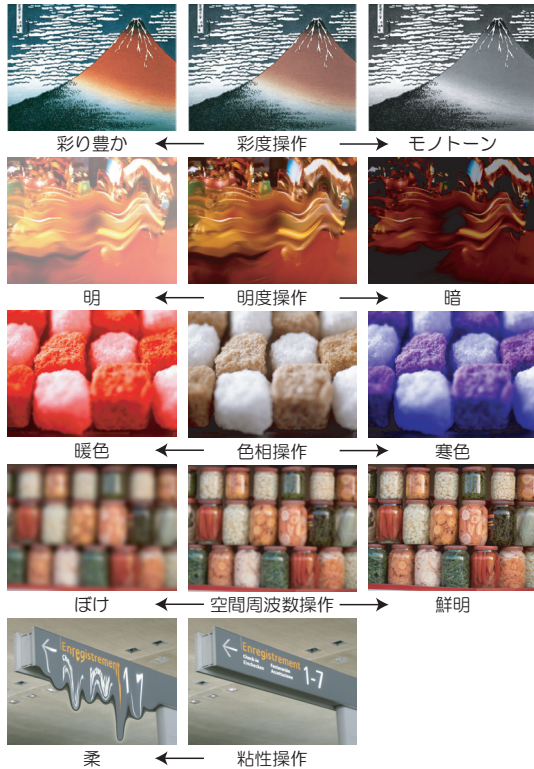


図 3 心理実験で使用した画像群：中央が操作前，左右端が操作後

験者（実験参加者）にこれら操作前・操作後の画像を同時に見せて、操作前の画像を操作後の画像に変化させるためには、熱を与えて高温にするか、熱を奪って低温にするか、のどちらの操作を行うべきかを選択してもらう。このとき高温・低温を選択するユーザの比率に偏りがあれば、そのパラメータは熱感覚と相関を持ち、熱による操作と関連付けやすいものと言える。

温度の選択には、表 2 に示すような温度の水を入れた小容器（温度選択オブジェクト）を 5 個用いる。本実験で対象としているのは、熱感覚と画像パラメータ・物理モデルパラメータとのノンバーバルな心理的マッピングであるため、言語での回答を避け、温度選択オブジェクトに直接触れることで手に熱を感じながら選択を行ってもらう。実験の手順は次の通りである。

1. 被験者に操作前画像と操作後画像を同時

表 2 温度選択オブジェクトの保持温度

低温	中間低温	常温	中間高温	高温
0[ ]	10[ ]	20[ ]	40[ ]	100[ ]

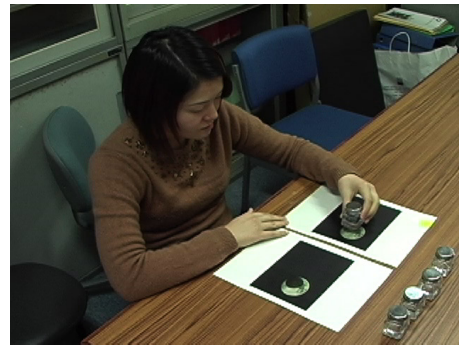


図 4 心理実験風景

表 3 心理実験結果（単位：人）

パラメータ操作	高温選択	低温選択	選択不可
彩度操作：彩り豊か	20	0	0
彩度操作：モノトーン	0	18	2
明度操作：明	9	5	6
明度操作：暗	1	11	8
色相操作：暖色	20	0	0
色相操作：寒色	0	19	1
空間周波数操作：ぼけ	14	3	3
空間周波数操作：鮮明	3	15	2
粘性操作：柔	18	1	1

に見せる

2. 被験者に操作前画像を操作後画像にするための温度選択オブジェクトを一つ選択してもらう
3. 1, 2 の繰り返し（全パラメータ分、順番はランダム）

なお、粘性操作に関しては、「柔」への変化のみを調査した。このため、繰り返し回数は、粘性操作を除く 4 種の画像パラメータ操作で 2 回と、粘性パラメータで 1 回の計 9 回となる。全ての被験者に対して同じ画像が使われれば、画像の内容のもつ情報によって、被験者の感覚が影響を受けることを考慮して、複数種類の画像を用意し、被験者毎に異なる画像を提示する。また、何のパラメータを操作する前後の画像であるかということは被験者に教示しなかった。

20 代から 50 代までの男女 20 名の被験者に対して実験を行った（図 4）。表 3 に、被験者が中間温度も含め、高温か低温のどちらを選択したかを示す。ここで、「選択不可」とは、被験者から「どの温度を用いてもその操作はできない」と回答されたものである。これより、明度操作を除く全てのパラメータで高温・低温の選択に偏りがあることが確認できる。特に、彩度・色相・粘性パラメータ操作は、9 割以上の被験者が一



致した回答を行っていることから、ユーザは熱によるこれらのパラメータ操作を戸惑うことなく利用することができると考えられる。そこで本論文では、彩度・色相・塑性の各パラメータを熱入力によって操作することとする。塑性パラメータ操作は、今回の実験対象であった粘性パラメータに対応しており、熱を与えると柔らかくなるという性質を用いたインタラクションを実現する。

#### 4. 熱感覚を利用する画像創作支援システム

先行研究<sup>[1]</sup>で提案したシステム構成を基に、熱入力によって画像パラメータを操作するシステム ThermoRetouch と、形状モデルを変形操作するシステム ThermoModeler を構築する。本章ではまず、システムのセンシング原理について述べた後、ThermoRetouch・ThermoModeler それぞれについて、システム構成と処理の流れについて述べる。

##### 4.1 センシング原理

スクリーン面に温度の異なる物体が接触したり、温風や冷風が吹き付けられたりすると、スクリーン面の一部に温度変化が生じる。赤外線カメラを用いてスクリーン面の温度分布を観察し、この温度変化領域を抽出する。面上の温度変化は熱画像の各画素の輝度値の変化(高温:白,低温:黒)として現れる。熱画像中であらかじめ決めておいた閾値よりも高温もしくは低温となる画素を温度変化領域とする。

このシステムの仮定として、スクリーン面は十分薄いものとする。このとき、室温よりも高温もしくは低温の入力オブジェクトが接触したり温風が吹き付けられたりする側の面(以下、表側とする)と同様の温度分布がその反対側(以下、裏側とする)にも比較的短時間で生じる。そこで、赤外線カメラを用いてスクリーン面の裏側の温度分布を計測することで、表側の温度変化領域を検出することができる。これによって、赤外線カメラに入力オブジェクトや人間の手が撮像されるオクルージョンの影響を受けずにすむ(図5)。

スクリーン面に温度変化を生じさせることができるのであれば、身近な環境中にある任意の道具を用いることができる。スクリーン面は室温状態に保たれているので、体温である手指や呼吸はもとより、温水・冷水を使うことで絵筆やエアブラシも利用することができる。複数の温度変化領域を同時かつ独立に計測することが可能であり、複数人が同時に入力を行うことができる。また、原理的にスクリーン面の大きさに制約はなく、平面だけではなく曲面であってもよい。

##### 画像パラメータ操作量の算出

抽出された高温・低温双方の温度変化領域において、後述する画像創作アプリケーションで利用する、温度

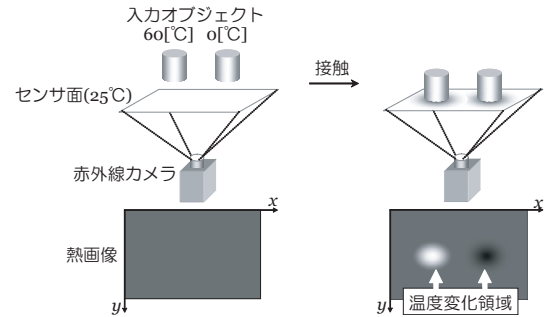


図5 センシング原理

変化量に基づく画像パラメータ操作量を画素毎に算出する。高温・低温の操作量をそれぞれ  $\alpha_H$  と  $\alpha_L$  と表す。これらは、赤外線カメラ入力画素値の高温・低温それぞれの閾値からの変化量を正規化したものである。熱画像中の閾値処理によって抽出された任意画素の画素値を  $v$ 、高温・低温の閾値をそれぞれ  $v_{HT}$ 、 $v_{LT}$ 、赤外線カメラの画素値の最大値・最小値をそれぞれ  $v_H$ 、 $v_L$  とし、 $\alpha_H$  と  $\alpha_L$  を次のように設定した。通常の 8bit 出力の赤外線カメラであれば、 $v_H = 255$ 、 $v_L = 0$  となる。

$$\alpha_H = \frac{v - v_{HT}}{v_H - v_{HT}} \quad (1)$$

$$\alpha_L = \frac{v_{LT} - v}{v_{LT} - v_L} \quad (2)$$

熱感覚を用いて直観的な画像創作を実現するという本研究の目的にとっては、このような閾値処理を行わずに、入力する熱画像を直接、後述の画像創作アプリケーションで利用することが望ましいと考えられる。上記の閾値処理でも、高温・低温双方の閾値を、赤外線カメラの画素値の中央値とすることで ( $v_{HT} = v_{LT} = (v_H + v_L)/2$ )、実質的に閾値処理を行わずに画像パラメータ操作量を求めることが可能である。以降の画像操作処理を考慮に入れ、室温状態で操作画像に変化が生じないようにするためには、室温状態の物体の観測値が中央値となるという前提が必要となる。しかしながら、使用する赤外線カメラによってはこの前提を満たすことのできない場合が存在する。このため、提案する手法では閾値を可変としている。

同様に、赤外線カメラの仕様によってはオートゲインコントロール等で同一温度の画素値が一定であるという保証はない。また、システムの設置環境によっては、室温が変化することも考慮しなければならない。このような状況では、高温・低温の閾値を同値としてしまうと、同一温度に対しても変動する画素値による影響により、後述する画像操作において、ユーザが操作を行っていないにもかかわらず、操作対象のグラフィクス上にユーザの意図しない変化を生じさせてしまう。

提案するように、高温・低温双方に別々の閾値を設定することで、ユーザの入力にのみシステムが応答するようなロバストな熱入力検出が可能となる。

このように提案システムでは、閾値処理を行わない場合、高温・低温の閾値を同値として処理する場合、双方の閾値を別々に設定する場合といった様々な入力方法を、用いる赤外線カメラや設置環境、コンテンツといった状況に応じて、ユーザが設定できるような設計としている。

#### 4.2 ThermoRetouch

自然界では気候が暖かければカラフルで寒ければモノトーンな風景となることなどから、人間は経験的に彩度と熱感覚との間に心理的なマッピングを獲得していると考えられる。また、暖色・寒色という言葉が示すように、我々は熱印象を介して色相を熱感覚として捉えることができる。ThermoRetouch では、3. 章で全ての被験者が同一の温度操作を選択した、この彩度と色相の2種の画像パラメータを熱入力によって操作し、画像のもつ印象を変更する。

ThermoRetouch は、熱画像を取得する赤外線カメラ、画像を投影するプロジェクタ、これらを制御するコンピュータ、そしてスクリーンより構成される。処理の流れを図6に示す。高温または低温オブジェクトを、スクリーンに投影されている画像の操作したい領域に接触させ、高(低)温変化させる。熱画像を閾値処理することで、高温・低温それぞれの温度変化領域を検出する。投影画像中の、温度変化領域に対応する画素で彩度(色相)操作を行い、画像を変化させ、その処理結果をプロジェクタよりスクリーンへ投影する。

本論文では、操作後、スクリーン上の温度が平衡状態(室温)へ戻っても、操作された画像パラメータは戻らないように設定する。一度操作された画像パラメータを元に戻す際は、マウスやキーボードのような他のインタフェースよりコマンドを入力することとする。

##### 熱印象を介する彩度操作

スクリーンに与えられた温度変化に応じて画像の彩度を操作する処理について述べる。投影画像の画素毎に、高温変化領域に対応する画素では彩度を上げ、低温変化領域に対応する画素では彩度を下げる。また、温度変化量が大きなところは、彩度変化も大きくする。図7に、図6と同様の熱画像が入力されているとしたときの、提案する彩度操作の概要を示す。

彩度を変化させるため、投影画像の画素値の色空間を一度、RGB空間からHSV空間に変換する。そして、温度変化領域に対応する画素の彩度(S)のみを変化させた後、もう一度HSV空間からRGB空間へ色空間を変換させ、画素に値を格納する。投影画像中の温度変化領域に対応する画素の操作前の彩度をS、操

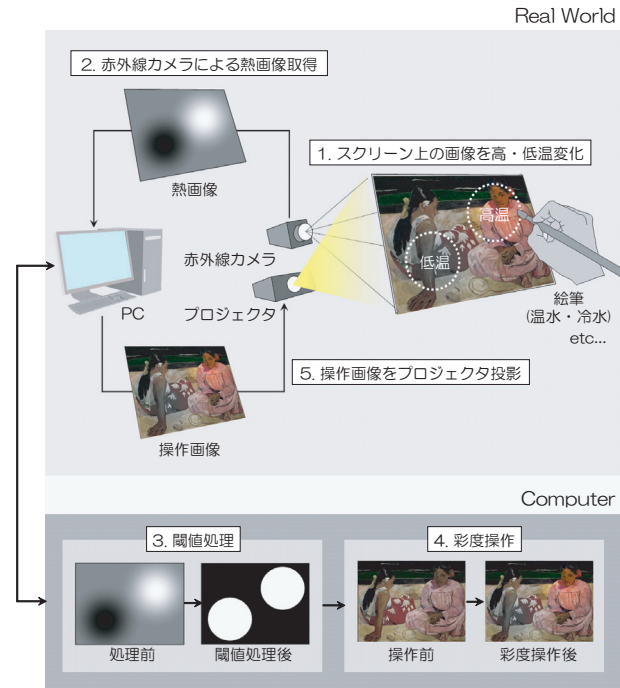


図6 画像パラメータ操作概要(彩度操作)

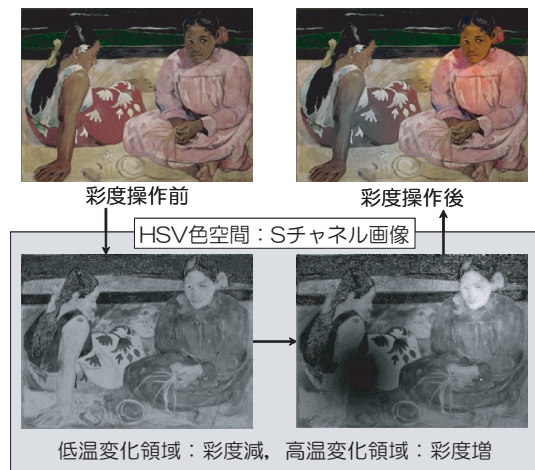


図7 彩度操作

作後を  $S_N$  として、画像パラメータ操作量を用いて彩度操作を次式のように設定した。

$$\begin{aligned} \text{高温変化領域: } S_N &= (1 + \alpha_H)S \\ \text{低温変化領域: } S_N &= (1 - \alpha_L)S \end{aligned} \quad (3)$$

##### 熱印象を介する色相操作

スクリーンに与えられた温度変化に応じて画像の色相を暖色系・寒色系に操作する処理について述べる。投影画像中の高温変化領域に対応する画素を暖色系に、低温変化領域に対応する画素を寒色系にする。図8に、図6と同様の熱画像が入力されているとしたときの、提案する色相操作の概要を示す。

温度変化領域に対応する各画素の明度を保存したまま、カラーバランスを変化させ、暖色ではR成分



図 8 色相操作

を大きくし，寒色では B 成分を大きくする．ここでは，各画素の明度を単純に，RGB 値の平均として扱う．彩度操作の場合と同様に，温度変化量と色相操作量を対応させる．操作前後の画素の RGB 値をそれぞれ  $(R, G, B), (R_N, G_N, B_N)$  としたときに，高温変化領域に対応する任意画素に対する操作は次式のように設定する．ただしこれらの RGB 値は，あらかじめ  $0 \leq (R, G, B), (R_N, G_N, B_N) \leq 1$  と正規化されているとする．

$$R_1 = R^{\frac{1}{1+\alpha_H}} \quad (4)$$

$$G_1 = G - \frac{R_1 - R}{2}, \quad B_1 = B - \frac{R_1 - R}{2} \quad (5)$$

$$\begin{cases} G_N = 0, & G_2 = |G_1| \quad (G_1 < 0) \\ G_N = G_1, & G_2 = 0 \quad (G_1 \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} B_N = 0, & B_2 = |B_1| \quad (B_1 < 0) \\ B_N = B_1, & B_2 = 0 \quad (B_1 \geq 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$R_N = R_1 - (G_2 + B_2) \quad (8)$$

変数  $R_1, G_1, G_2, B_1, B_2$  は，計算の都合上設けたものである．式 (4) ではまず，操作前の R の画素値  $R$  に対して，その画像パラメータ操作量  $\alpha_H$  に応じて増幅された変換画素値  $R_1$  を求める．式 (5) では，操作前後の明度を保存するため，G と B についてそれぞれ，R の変化量の半分ずつを引いて， $G_1$  と  $B_1$  を計算する．式 (6), (7) では，G と B の画素値が 0 を下回らないための処理を行っており，もし下回ってれば， $G_N, B_N$  はそれぞれ 0 となる．このとき，変数  $G_2, B_2$  に  $G_1$  と  $B_1$  をそれぞれ格納する．下回らない場合は， $G_N, B_N$  にそのまま  $G_1$  と  $B_1$  の値が格納される．このときは， $G_2, B_2$  をそれぞれ 0 にする．最後に式 (8) において， $R_1$  より  $G_2, B_2$  を引くことで， $R_N$  を求める．低温接触領域の操作では，上式の R と B を入れ替え， $\alpha_H$  を  $\alpha_L$  とすることで行う．

### 4.3 ThermoModeler

ガラスや鉛は，熱を加えると塑性が変化して変形しやすくなる．この熱現象を 3 次元形状モデルの変形操作に応用し，まるでガラス細工を変形させるような操作体系を実現するシステム ThermoModeler を提案す

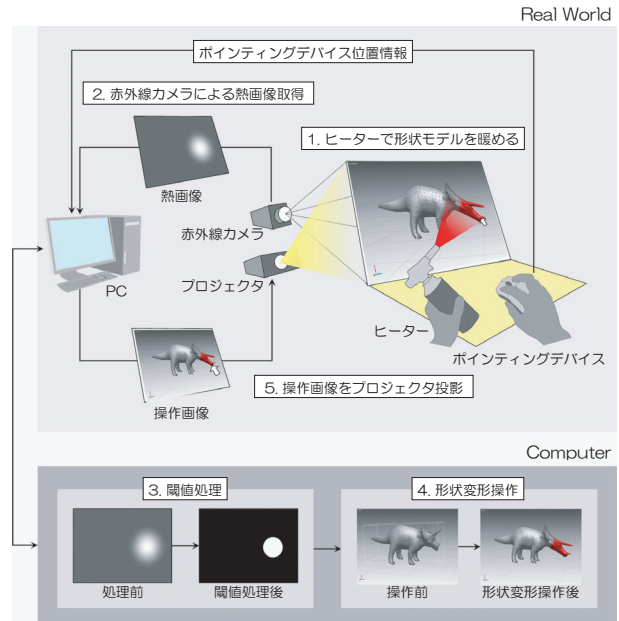


図 9 形状モデル変形操作概要

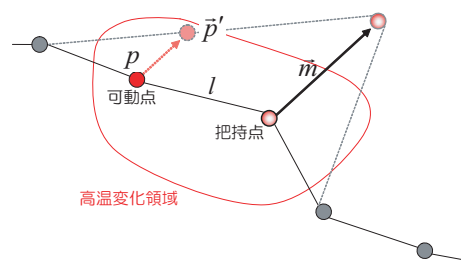


図 10 形状モデル変形原理

る．形状モデル中のポリゴンの頂点やコントロールポイントの移動のしやすさは，モデルの熱可塑性と見做すことができる．そこで，投影 3 次元形状モデルの各ポリゴン頂点 (コントロールポイント) の中で高温変化領域に対応する点を移動可能な可動点とする，形状モデル変形操作インタフェースを構築する．

システム構成は ThermoRetouch と同様であるが，入力インタフェースとして，マウスや PHANToM といったポインティングデバイスを付加する．処理の流れを図 9 に示す．まず，ユーザがスクリーンに高温変化を与える．このとき，投影されている形状モデルの中で，高温変化領域に対応する全てのポリゴン頂点やコントロールポイントを可動点とする．次に，ポインティングデバイスでその可動点の一つをドラッグし移動させる．この点を把持点とする．この際，把持点に追従する形で，その他の可動点も動く．また，可動点の中でも，高温変化量が大きければ大きいほどモデルが柔らかくなるように，移動量を大きくする．

把持点が移動すると，把持点と可動点の距離に反比例し，可動点の高温操作量  $\alpha_H$  に比例する移動量で可



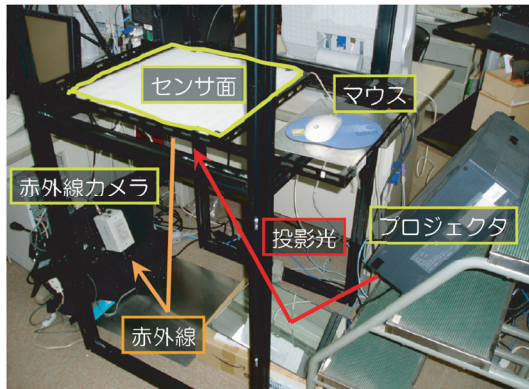


図 11 試作装置外観

動点は把持点の移動方向へ移動する．把持点の移動ベクトルを  $\vec{m}$ ，可動点の移動前と移動後の位置ベクトルをそれぞれ  $\vec{p}$ ,  $\vec{p}_N$ ，移動前の把持点と可動点との距離を  $l$ ，任意の比例係数を  $h_1, h_2$  として，提案する変形操作を以下の式のように設定した (図 10)．なお， $C$  を塑性パラメータと呼ぶ．

$$\begin{aligned} C &= h_1 \frac{1}{l} + h_2 \alpha_H \\ \vec{p}_N &= \vec{p} + C \vec{m} \end{aligned} \quad (9)$$

ThermoRetouch とは異なり，各可動点の塑性パラメータは，温度変化に常時追従するよう設定した．つまり，高温変化領域が室温状態に戻れば，可動点となっていた各ポリゴン頂点 (コントロールポイント) は可動点ではなくなり，それらをマウスドラッグによって移動させることはできなくなる．

## 5. 熱操作による画像創作実験

ThermoRetouch, ThermoModeler をそれぞれ実機に実装し，動作確認を行う．そして，これらの提案システムの操作の直観性を確認するための評価実験を行う．

### 5.1 実験環境

試作システム外観を図 11 に示す．赤外線カメラ (Mitsubishi IR-SC1, 有効画素数: 320(H)×240(V))，プロジェクタ (NEC ViewLight X1035, 最大輝度値: 1,300ANSI ルーメン) を，1 台の PC (CPU: Intel Pentium4 2.4[GHz]) によって制御する．スクリーンとしては紙 (450×450[mm]) を使い，その上にラップをかけて防水仕様とする．ThermoModeler で使用するポインティングデバイスとしてマウスを用意する．

室温 25[ ] の室内環境で実験を行い，高温・低温の閾値をそれぞれ画素値 125 (約 30[ ])・50 (約 20[ ]) とした．なお，使用する赤外線カメラはオートゲイン機能を有しており，画素値と温度との対応は一定ではない．

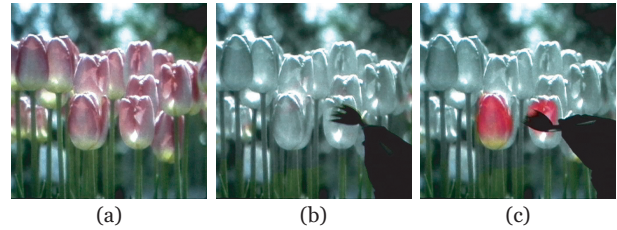


図 12 彩度操作: (a) 操作前, (b) 絵筆に付けた冷水で彩度減操作, (c) 絵筆に付けた温水で彩度増操作

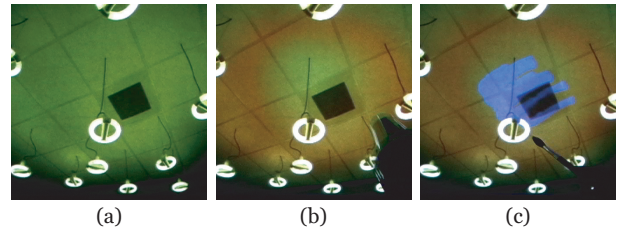


図 13 色相操作: (a) 操作前, (b) ドライヤで暖色操作, (c) 絵筆に付けた冷水で寒色操作

## 5.2 動作確認実験

ThermoRetouch の動作確認実験を行った．はじめに，温水 (60[ ])・冷水 (0[ ]) を含ませた絵筆を用いて彩度操作を行った (図 12)．まず，投影されているカラー画像に冷水を塗ることでその彩度を落とす (図 12(b))．次に，モノクロ画像となった投影画像の一部を温水を含ませた絵筆で塗ることでカラー画像に戻した (図 12(c))．色相操作では，ヘアドライヤと冷水を含ませた絵筆を用いた (図 13)．投影画像にヘアドライヤを吹き付けると，吹き付けられた領域のカラーバランスが変更され，暖色となった (図 13(b))．次に，絵筆で冷水を画像に塗布することで，その領域を寒色に変更した (図 13(c))．

形状モデルの塑性パラメータを熱入力で変化させて柔らかくし，ポインティングデバイスでモデルをドラッグして移動させることでモデルの任意の領域のみを変形させる ThermoModeler の動作確認実験を行った．本実験では，3 次元のポリゴンモデル (トリケラトプス) を変形させる．また，プロジェクタを頭上に取り付けた．

実験結果を図 14 に示す．形状モデルのトリケラトプスの顔領域に掌で接触して暖めた．マウスでその領域中の点をドラッグして変形操作した．高温変化領域はモデル中の赤い領域として表示した (図 14(b))．マウスポインタでモデルの高温変化領域内のポリゴン頂点の一点をドラッグすると，高温変化領域内の他の頂点が一斉に移動し，モデル形状が変形していることが示されている (図 14(c))．

ThermoRetouch, ThermoModeler とともに，今回の



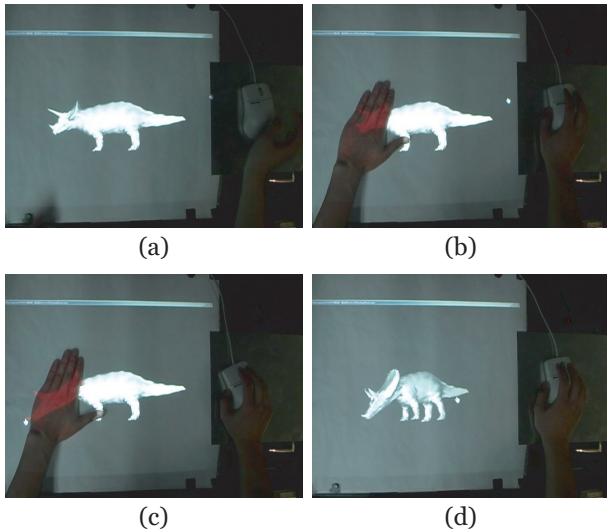


図 14 形状モデル操作：(a) 操作前，(b) 掌で暖めてモデルの塑性変更（赤領域），(c) マウスでモデルをドラッグして変形，(d) 操作後モデルを回転

実験環境における処理レートは 15[frame/sec] であり，ユーザの操作に対して遅延なくグラフィクスを変更することが可能であった．

### 5.3 評価実験

ここまでで述べた実験環境において，提案システムの操作の直観性を確認するための評価実験を行う．実験では，操作作用の高温・低温の物体をそれぞれ用意する．各被験者にこれらを用いてシステム上で自由に画像操作を行ってもらい，その後，操作の直観性を問うアンケートに答えてもらう．

この実験では，被験者に，実装した操作アプリケーションのうち，彩度操作を行ってもらう．3. 章で得られた温度と彩度操作との関係の順対応（高温：鮮やか，低温：モノトーン）と，その逆対応（高温：モノトーン，低温：鮮やか）をそれぞれシステム上に実装し，被験者に操作してもらう．操作作用の物体として，使い捨てカイロ（50[ ]）と保冷材（0[ ]）を用意する．各被験者はこれらの道具を用いて，順対応・逆対応についてそれぞれ 1 分間，自由に画像操作を行う．その後のアンケートでは，順対応・逆対応それぞれについて，高温・低温それぞれの温度変化操作によって引き起こされる画像の変化が直観的であったかどうかを 5 段階評価してもらう（直観的であれば 5，そうでなければ 1 をつけてもらう）．なお，彩度操作であるということは被験者には告げずに実験を行う．

20 代の男女 11 人の被験者に対して行った実験結果を，図 15 に示す．評価のスコアの平均値は，それぞれ順対応の場合で，高温 4.4・低温 4.5，逆対応の場合で，高温 1.8・低温 1.6 であった．

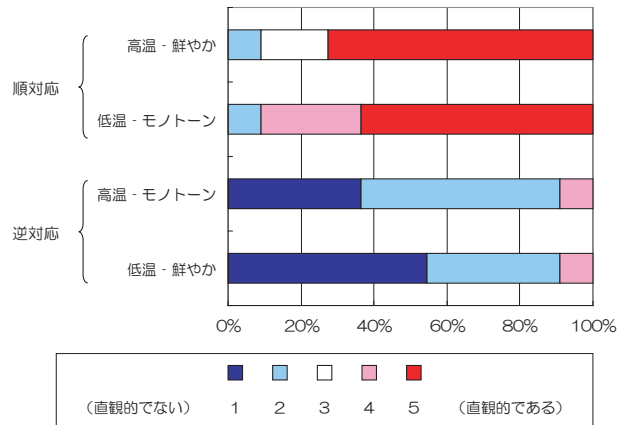


図 15 評価実験結果

順対応の場合の実験結果より，本論文で提案する熱感覚を利用して画像創作を支援するシステムが，直観的な操作をユーザに提供可能であることが確認できた．これに対して，逆対応の場合には操作の直観性が低いという結果が得られた．これにより，3. 章で得られた，熱感覚と画像操作との心理的マッピングを提案システムに適用することが妥当であることが確認できた．また，熱を用いた画像創作支援システムを設計する際には，ユーザの持つこのような心理的マッピングを，あらかじめ調査し適用する必要があることを確認した．

### 6. 考察と今後の展望

5. 章の実験結果より，ThermoRetouch では，熱入力によって画像中の任意領域の彩度・色相パラメータを操作し，画像の印象が変更できることが示された．また，ThermoModeler では，熱入力により 3 次元形状モデルの変形させたい領域の塑性パラメータを変更し，ポインティングデバイスによるドラッグ操作によりモデルを変形できることが示された．これらより，熱感覚を利用して画像創作支援を行うことが可能となったことが確認できた．

先行研究である描画支援システム ThermoPainter<sup>[1]</sup> に，ThermoRetouch と ThermoModeler が加わることで，熱画像を用いたタブレット型インタフェース上で行うことのできる画像創作の幅が広がった．今後は，これらのシステムを統合した際，様々な画像創作を一貫した操作体系の中で行うことができるかどうかを検証する必要がある．

本論文では，特定の画像パラメータ（彩度・色相）の操作を ThermoRetouch に導入したが，3. 章で示した他の画像パラメータである空間周波数に関しても，システムに組み込んでいく．この画像パラメータでは，温度選択で 70% 強の一致をみたことから，熱によるこれらの操作を，教示なしで利用することはできないが，簡単な学習によってユーザは習得できると考えら

れる．また，本論文では対象としなかったが，例えば油脂等の粘性は与えられる熱量によって変化することから，グラフィクスの動きパラメータ（遅速）も熱と相関をもつ可能性がある．これを利用し，今後は動画作品の制作を支援するシステムを構築することも可能であると考えられる．

提案したシステムでは，プロジェクタ・赤外線カメラ共に，システムの大きさが変化しても同じものを使用できるため，スクリーンの大きさ・形を容易に自由に変更することができる．このため，メディアアート展示のような場で，大きなスクリーンに画像を投影して一般来訪者がその画像に触れたり息を吹きかけたりすることで，その画像を操作するというシステムを構築することもできる．

本論文は，熱感覚を利用した画像創作支援のフレームワークの提案である．つまり，今回，式(1)～(9)で設定したパラメータ処理や，スクリーン面上の温度変化領域が室温状態になったときの操作パラメータの挙動の設定などは，ユーザが自由に変更できることを前提としている．例えば，今回 ThermoRetouch では温度変化領域が室温状態になっても，操作されたパラメータは元に戻らないと設定していたが，インスタレーション展示のような場では，逆にスクリーン面上の温度変化をパラメータ操作量に常時反映させるよう設定することも考えられる．これは，このような展示という状況では，温度変化を与える以外の操作を行う必要のないよう設定する方が都合が良いと考えられるためである．

本論文では，ThermoModeler の操作で一般のマウスをポインティングデバイスとして使用したが，触覚マウス<sup>[16]</sup> や PHANToM のように触覚フィードバックを返すポインティングデバイスを使用することで，より直観的な操作が可能となる．つまり，入力デバイスでドラッグする際に，各ポリゴン頂点（コントロールポイント）での塑性に応じてフィードバックを返すことで，あたかもガラス細工や鉛細工を扱うかのような感覚を得ることができるようになる．

## 7. おわりに

本論文では，熱感覚を利用して画像創作支援を行うシステム ThermoRetouch と ThermoModeler を提案した．これらのシステムでは，カラー画像の画像パラメータ（例：彩度・色相）や3次元形状モデルの物理モデルパラメータ（例：塑性）から，人間が熱印象や熱現象を介して熱感覚を獲得していることを利用し，逆にユーザが熱操作によってこれらのパラメータを操作し，画像の印象や形状を変更することを可能とした．これらの熱操作は，熱情報の入力を仮想空間と物理空間と

の間を繋ぐチャネルとして利用することのできるタブレット型インタフェースを発展させることで実現した．これらの提案システムでは感性工学モデルに基づいた操作体系を実現し，自らの熱感覚が画像に反映されるため，直観的で発想を重視するような画像創作が可能となった．今後は画像創作だけでなく，熱感覚を介して他種の情報操作を支援する直観的なインタフェース構築を目指す．

## 参考文献

- [1] 岩井大輔, 金谷一郎, 日浦慎作, 井口征士, 佐藤宏介, “ThermoPainter: 熱画像を用いたタブレット型入力装置とそのインタラクティブ描画システム”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.7, pp.1582-1593, 2005.
- [2] 長町三生 編, “感性商品学 感性工学の基礎と応用”, 海文堂出版, 1993.
- [3] Ryokai, K., Marti, S., Ishii, H., “I/O Brush: Drawing with Everyday Objects as Ink”, Proceedings of CHI'04, ACM, pp.303-310, 2004.
- [4] Cassinelli, A. and Ishikawa, M., “Khronos Projector”, Proceedings of SIGGRAPH'05 (DVD), ACM, 2005.
- [5] SensAble technologies, Inc., “<http://www.sensable.com/>”.
- [6] 前野輝, 岡田稔, 鳥脇純一郎, “直観的自由曲面変形方式に基づく会話型モデリングシステムの構成法”, 芸術科学会論文誌, Vol.3, No.2, pp.168-177, 2004.
- [7] 石井雅博, 榎田英功, 金時学, 長谷川昌一, 小池康晴, 佐藤誠, “ガラス細工メタファによる自由形状モデリング方法の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.4, pp.1063-1070, 2000.
- [8] 井野秀一, 伊福部達, 和田親宗, 敦賀健志, 泉隆, 田中敏明, “触覚の材質感呈示システムのための基礎的研究”, 電気学会論文誌 C, Vol.117, No.8, pp.1062-1068, 1997.
- [9] Kushiyama, K., Inose, M., Yokomatsu, R., Fujita, K., Kitazawa, T., Tamura, M., Shinji, S., “Thermoesthesia”, Proceedings of SIGGRAPH'06 (DVD), ACM, 2006.
- [10] 池田洋一, 木村朝子, 佐藤宏介, “道具の持つアフォーダンスを利用した触覚フィードバックデバイス”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.3, pp.339-345, 2002.
- [11] Burnay, S.G., Williams, T.L. and Jones, C.H.N., “Applications of Thermal Imaging”, Adam Hilger, 1988.
- [12] Oka, K., Sato, I., Nakanishi, Y., Sato, Y., Koike, H., “Interaction for Entertainment Contents based on Direct Manipulation with Bare Hands”, Proceedings of IWEC'02, IFIP, pp.391-398, 2002.
- [13] Yasuda, K., Naemura, T., Harashima, H., “Thermo-Key: Human Region Segmentation from Video”, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.24, no.1, pp.26-30, 2004.
- [14] Katsura, M., Inakage, M., “livePic”, Proceedings of SIGGRAPH'06 (DVD), ACM, 2006.
- [15] Iwai, D., Sato, K., “Heat Sensation in Image Creation with Thermal Vision”, Proceedings of ACE'05, ACM, pp.213-216, 2005.
- [16] 福中謙一, 木村朝子, 佐藤宏介, 井口征士, “力覚フィードバックを与えるパッシブ型力覚マウスの試作と性能

評価”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6,  
No.2, pp.75-82 2004.

[ 著者紹介 ]

岩井 大輔 (学生会員)



2003 年大阪大学基礎工学部システム  
科学科卒。2005 年同大学院博士前期  
課程了。2006 年日本学術振興会特別研  
究員。現在同大学院博士後期課程在学  
中。投影型複合現実感, ヒューマンコン  
ピュータインタラクションに関する研究  
に従事。IEEE, VR 学会, HI 学会他各  
会員。

佐藤 宏介



1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科  
卒。1985 年同大学院修士課程了。1986  
年同大助手。1988-90 年カーネギメロン大  
学ロボット工学研究所客員研究員。1994  
年奈良先端科学技術大学院大学情報科学  
研究科助教授。2003 年大阪大学大学院  
基礎工学研究科教授。画像計測, 仮想現  
実感, デジタルアーカイブ等の映像情報  
メディアの研究に従事。工学博士。電子  
情報通信学会, 情報処理学会, VR 学会,  
色彩学会, IEEE 他各会員。