

# 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

岩井大輔<sup>†</sup> 金谷一朗<sup>†,††</sup> 日浦慎作<sup>†</sup>  
井口征士<sup>†††</sup> 佐藤宏介<sup>†</sup>

本論文では、熱画像を用いたタブレット型入力装置とそれを用いた描画システム ThermoPainter を提案する。センサ面上にセンサ面と異なる温度を持ったオブジェクトが接触した際、面上の温度変化領域を接触領域として検出する入力装置を構築する。提案システムでは、温・冷水を利用することで絵筆やエアブラシといった実世界での描画作業で使用する画材や、体温を持つ手指・呼吸を直接用いて描画することが可能である。これによって、使い慣れた画材の操作感と従来のデータタブレットのスタイラスの操作感が異なることから、コンピュータでの創作活動を行わなかったアーティストによる作品制作が可能となる。提案システムでは、接触するオブジェクトの温度情報を利用して、温度変化量を濃淡データとして利用する温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具、熱感覚メタファによる描画像の膨張縮小変形の直観的な操作手法を提案する。これによって、メディアアート展などで、一般の複数ユーザが同時に絵筆や手指・呼吸を用いた描画や直観的な描画像変形を楽しんで行うことができる。アーティスト（書道家）による作品例を示してシステムの描画性能を確認し、提案する入力装置と従来のデータタブレットの比較をまとめ、最後に提案手法に関する被験者実験を通じてシステムの評価を行う。

## ThermoPainter: A Tablet Type Input Device Using Thermal Vision and Its Interactive Drawing System

DAISUKE IWAI,<sup>†</sup> ICHIRO KANAYA,<sup>†,††</sup> SHINSAKU HIURA,<sup>†</sup>  
SEIJI INOKUCHI<sup>†††</sup> and KOSUKE SATO<sup>†</sup>

In this paper we propose a tablet type input device using a thermal vision and its interactive drawing system "ThermoPainter". We develop an input device which can detect temperature change regions on a sensing surface as touch regions when objects hotter or colder than the surface touch it. In the system, users can use a physical paintbrush and an airbrush with hot water in spite of paint as they use in the real world, and even use their own fingers, hands, and breaths directly. Therefore, artists who are not familiar to conventional data tablets become to use computer to expand their graphical art works because they can use their own painting tools directly in the system. This system also can detect input object's temperature information. "Virtual Watercolor" transforms the temperature information into a variation of painting. We also propose an intuitive interface for modifying paints as expansion and contraction of images through the metaphor of heat. We evaluated the effectiveness of the proposed system through usability tests by a calligrapher and a conference demonstration.

### 1. はじめに

コンピュータによる描画作業支援は今日、小学校の情報教育からプロのグラフィカルアーティストの制作

現場まで広く利用されている。このようなグラフィカルなアート制作に多用されるデータタブレットは、センサ面上のスタイラスの接触点の二次元座標値を時系列で出力する。また、一部のタブレットでは同時に筆圧情報も取得することで、絵筆やエアブラシのような多種多様な画材のタッチの再現を試みている。

しかし、その操作感に関してはいくつかの問題をかかえている。従来の硬質なスタイラスによる入力では、実際の描画作業で行うような絵筆を回したり倒したりといった筆先のコントロールは不可能であるうえ、筆

<sup>†</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

<sup>††</sup> 科学技術振興機構さきがけ  
PRESTO, JST

<sup>†††</sup> 宝塚造形芸術大学  
Takarazuka University of Art and Design

先形状の変化を見たり筆先からの毛の弾力を感じたりすることはできないという問題が存在する。また、スタイラスとセンサ面とを接触させて入力を行うため、描画面と非接触で用いるエアブラシとの操作感の相違は大きい。

そのため、システムの特性を把握するような訓練が必要であり、今までに感性と経験によって体得してきた伝統的な描画技法をそのまま用いて仮想キャンバス上に絵を描くことはできない。絵筆やエアブラシといった画材を使い慣れたアーティストにとって、その操作感、作品制作において作品の質を決定する非常に重要な要因である。従来の描画システムにおける硬質なスタイラスでの操作感と、特別な教育をうけ、長年使い慣れてきた画材の操作感が大きく異なることで、発想を自由に形にすることが困難となり創造性が抑えられてしまう。このことから、アーティストの中にはこのようなシステムに抵抗を感じているユーザが存在する。実世界の画材を直接用いてコンピュータ上に入力することができればよいが、それには画材のセンサ面への接触領域形状を検出する必要がある。

ところで近年、ポスト・タブレットとでもいうべき入力装置が多く提案されている<sup>1)~3)</sup>。これらのシステムでは、従来の1点入力型のタブレットに対し、センサ面への複数の入力を領域単位で認識することができる。特に、研究事例3)では、入力を行う手指やオブジェクト(入力オブジェクト)のセンサ面上の二次元座標値に加え、その属性情報としてセンサ面からの距離情報を同時に取得できる。これを利用し、より直観的なデジタルオブジェクトの移動を行う対話技法が提案されている。

本論文では、実世界の画材のセンサ面との接触領域形状を取得することのできる入力装置を構築し、その上でインタラクティブな描画アプリケーションを提案する。これによって、実世界の絵筆やエアブラシを仮想空間の描画作業に用いることができる。そこで、これらの画材を使いこなしているアーティストやイラストレータ、書道家による作品制作の支援を行うことを1つ目の目標とする。次に、提案する入力装置は、入力オブジェクトのセンサ面上の接触領域形状の座標値に加え、その属性情報として温度情報を同時に取得可能であることから、熱感覚メタファを利用した熱画像の直観的な変形操作を試みる。そして、身近な環境にある道具や手指・呼吸を直接用いて描画できるという特長から、メディアアート展などにおいて、来訪者が簡単にインタラクティブな描画環境を楽しむことができるメディアインスタレーションの構築を目指す。

画材のセンサ面への接触領域形状の取得には、画像入力による手法を適用する。入力オブジェクトの温度情報を接触領域形状の座標情報と同時に取得するため、オブジェクトとセンサ面が接触するとき生じる面上の温度分布の変化を赤外線カメラを用いて熱画像として取得する。これより、絵具の代わりに温・冷水を用いることで絵筆やエアブラシといった画材を直接用いたり、人間の体温を利用して手指や呼吸を用いた入力を行ったりすることが可能となる。

次章では、描画作業支援システムと領域入力検知型タブレットに関する関連研究について述べる。次に、本論文で提案する入力装置の計測原理とその特長を述べる。また、その入力装置に実装するインタラクティブ描画アプリケーション ThermoPainter について述べ、さらに、書道家による作品例を示して提案システムの描画性能を示す。従来のデータタブレットとの比較、熱感覚メタファを利用するインタラクションの検証、メディアインスタレーションとしての評価を通じて提案システムの有効性について考察を行い、最後にまとめを述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 描画作業支援システム

1点入力型の入力装置を利用した描画作業支援システムの限界を拡張する研究が行われている。これらでは、高精度な筆のシミュレーションを行うことで、現実感の高い描画を実現するシステムが提案されている<sup>4),5)</sup>。また、操作の現実感も高めるため、触覚フィードバックを付加して実世界での描画作業と同様の操作感を得ることを目的とした研究がなされている。絵筆の触覚フィードバック機構を持つ描画システム DAB<sup>6)</sup>では、描き心地感をかえす直観的な仮想画材の操作インタフェースを持つ。

このように高度なシミュレーションを施すことで、データタブレット上で実世界での描画と同様の表示結果を得ることは可能である。また、触覚フィードバック機構を利用すればその操作感も実世界での描画環境と同様のものを提供することが可能である。しかし、画材は絵筆以外にも多種多様なものが存在するため、それらの特性をすべてモデル化し、シミュレートするシステムを構築するのは現実的ではない。

I/O Brush<sup>7)</sup>は、コンピュータでの描画作業において、あらかじめプログラムされたインクを用いて絵を描くのではなく、実世界の身近な環境中にある実物体の色、パターン、テクスチャをインクの素材として使うというシステムである。絵筆の形状を模したインタ

フェースで、パレットから色をとるように実世界のオブジェクト上の色情報を直観的に取得することができるようになってきている。このシステムは子供の教育用として開発されており、子供たちが容易に様々な色を使いこなして描画しているということが報告されている。

I/O Brush の、身近な環境中の実物体の色を直接用いるという概念を応用し、本研究では色ではなく、実世界の画材を直接仮想空間の描画作業に用いる。そして、その描画結果が高度なシミュレーションなしで実世界でのものと同様であるようなシステムを構築する。こうすることで、あらかじめ画材の詳細なモデル化を行う必要がなくなるうえ、フィードバックを与える機構も必要でなくなる。

直観的なインタフェースと今までにない表現を可能とするアート制作ツールの提案がなされている。Body Brush<sup>8)</sup>では、身体のポリウレームの軌跡を用いた3次元空間での描画作業を行うことができる。つまり、身体を動かすことで直観的に3次元CGを描くことができる。Sumi-Nagashi<sup>9)</sup>では、コンピュータの二次元平面に描いた絵を仮想の水の流れに従って流すことで、色が混ざり合い美しいマーブル模様風の作品が仕上がる。水の流れの中ではペンダバイスに水流の触覚フィードバックがかかる。

これらのシステムを用いることで、絵を描けない人もみな描画の楽しさを味わえ体験できる。本研究においても、メディアアートに関わりを持ってこなかったようなユーザが、直観的な描画作業を通じて自由な表現が可能となるようなシステムの構築を目指す。

## 2.2 領域入力検知型タブレット

近年、実世界での机や壁などをインタラクティブな空間として使うシステムに関する研究が多くなされている。これらの研究では、手指やオブジェクトの複数の入力を領域単位で検出できる入力装置が提案されている。

EnhancedDesk<sup>1)</sup>では、ユーザの手領域を熱画像より抽出し、指先追跡やジェスチャ認識を安定に行い、机上に投影されたコンピュータ画面を指先などで操作する。これまでの研究事例<sup>10)</sup>が持っていた、ジェスチャ認識が外界の光や照明条件などの影響を受けやすいという問題を、人体と机面の温度差を利用することで解決している。しかし、オクルージョン(体や頭によって手先の映像が隠れる)や、接触の検出が困難であるという問題点をかかえている。

HoloWall<sup>2)</sup>は、近赤外線を透過する半透明なスクリーンの背面より近赤外光を投光し、前面にある物体からの反射光を近赤外カメラで取得し、処理結果をス

クリーンへ投影するというシステムである。スクリーンから近距離にある物体のシルエットのみを選択的に領域単位で取得することができる。このシステムでは、身体全体によるジェスチャを利用したインタラクションが実装されている。しかし、このシステムでは環境中の近赤外光の影響を受けやすいため、厳密に物体とスクリーンとの接触を検出することは困難である。

SmartSkin<sup>3)</sup>では、面に敷設された網状の電極と人体との静電容量変化から複数ユーザの面への接触を同時に測定し、その複数入力でのジェスチャを用いて机上に投影されたオブジェクトの移動などの操作を行うことができる。カメラを使用しないため、前述のオクルージョン問題は生じない。また、静電容量の変化量を利用することでセンサ面と入力オブジェクトの距離が認識されるため、それを利用したインタラクションが提案されている。しかし、格子状のセンサ点から得られる値を内挿処理することで接触位置の推定を行っているため、読み取り分解能は低い。

SmartSkinと比べて、提案する入力装置は、入力オブジェクトの属性情報として、センサ面からの距離情報ではなく、温度情報を取得することで直観的な描画像変形操作を可能にする。また、実世界の物理的な画材を直接用いた描画作業支援ということを考慮した場合、画材とセンサ面との接触領域形状のみを選択的にかつ高精度に計測することが必要であるが、本研究では、背景・照明条件・オクルージョンなどの影響を受けずにこれを実現するシステムを構築する。上記のシステムと同様に複数入力を同時に検出することで、複数人が同時にインタラクション可能であるシステムを目指す。

## 3. 熱画像を用いたタブレット型入力装置

### 3.1 熱画像を用いた接触領域形状計測手法

本論文で提案する、入力オブジェクトの接触領域形状の座標値と、その温度情報を同時に取得するタブレット型入力装置のセンシング手法について述べる。センサ面に温度の異なる物体が接触すると、熱エネルギーの移動が生じ、面上の接触領域において温度変化が生じる。このことから、センサ面の温度変化領域を接触領域であると見なし、赤外線カメラを用いてその温度分布を取得することで、接触領域形状を二次元で計測することができる。面上の接触領域に生じる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。このことから、高温・低温の双方の変化を同時に取得可能である。熱画像中であらかじめ決めておいた閾値よりも大きな輝度値変化を生

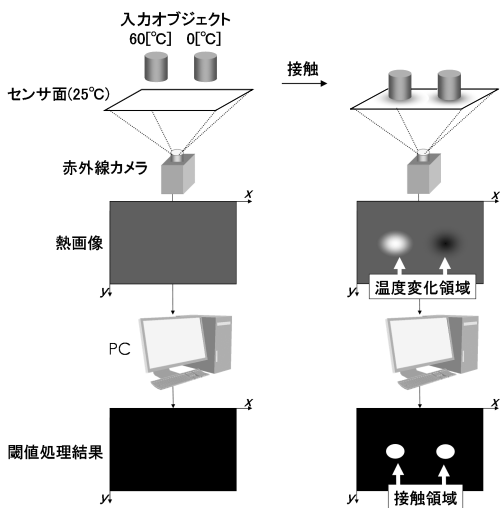


図 1 接触検出手法

Fig.1 Principle of touch sensing.

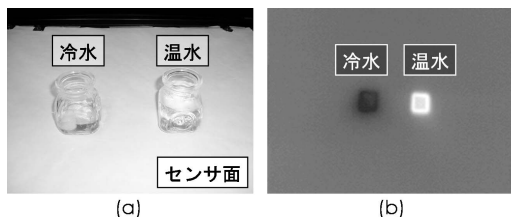


図 2 接触検出例：(a) 高温低温オブジェクト接触風景，(b) 熱画像（背面撮影）

Fig.2 Example of touch sensing: (a) touch of high/low temperature objects, (b) thermal image (captured from backside).

じた画素を接触領域であると判定する（図 1）。

提案システムにおける仮定として、センサ面は十分薄いものとする。このとき、手指や画材といった入力オブジェクトの接触する面（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センサ面の裏側の温度変化領域を検出することで、表側の接触領域形状を計測することが可能である（図 2）。そのため、赤外線カメラに画材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。

### 3.2 特長

センサ面に温度変化を生じさせることができれば、身近な環境中にある任意の道具を用いて入力することができる。センサ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・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。複数の接触があった場合でも、二次元画像中に温度変化領域が複数生じるため、それぞれの接触領域を同時かつ

独立に計測することが可能である。このことから、従来の研究例<sup>(3),(11),(12)</sup>で行われてきたような 2 入力点の動きを利用した画像の移動・拡大縮小・回転操作の直観的な操作インタフェースの構築が、本システムでも可能となる。また、複数人が同時に入力を行うことができる。

センサ面上の接触領域形状に加え、入力オブジェクトの温度情報の連続値を画素ごとに取得することができる。温度変化は、高温と低温の双方向に生じさせることが可能であることから、座標情報とユーザの持つ熱感覚メタファとを組み合わせた直観的操作によるインタラクションが可能となる。

原理的にセンサ面の大きさに制約はない。様々な大きさのセンサ面に従来の画材を用いることができるため、コンピュータを用いた描画でありながら、その表現の幅を広げることができる。また、センサ面は平面である必要もなく、図 8 のように曲面にすることも可能である。

## 4. インタラクティブ描画アプリケーション

上記入力装置を用いてインタラクティブな描画アプリケーションを構築した。通常の PC 用データプロジェクタを用いてセンサ面の裏側へ処理結果を投影することで、センサ面をそのまま投影スクリーンとして利用する。センサ面の裏側への投影であるため、投影光の遮蔽がなくなる。熱画像は投影可視光に影響を受けないことから、接触位置の計測と処理結果の表示を同時に独立して行うことができる。アプリケーションの核となる、描画作業支援と熱感覚メタファによる描画像の膨張収縮操作について述べる。

### 4.1 描画作業支援

身近な環境中にある任意の道具を直接入力に用いることができる描画作業支援アプリケーションを構築する。センサ面上の入力オブジェクトの接触領域に、プロジェクタより描画パターンを投影する。温・冷水を用いることで、絵筆やエアブラシを直接用いて仮想空間での描画作業が可能となる。特にエアブラシの場合、実世界では、飛散した絵具の粒子がキャンバスに付着した部分が描画されることになるが、この入力装置では、飛散した温・冷水の粒子がセンサ面に接触した部分が接触領域と判定され、描画パターンが投影されることから、シミュレーションなしで、キャンバスと非接触に入力する画材による描画が可能であることが分かる。また、体温を有する手指や呼吸も描画作業に利用することが可能である。以下、投影描画パターンと色の変更について述べる。

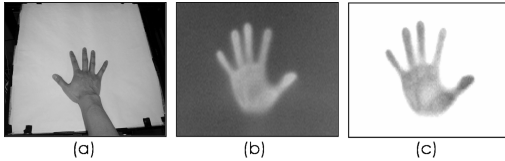


図3 温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具原理: (a) 手の接触, (b) 熱画像, (c) 投影パターン  
 Fig.3 Principle of virtual watercolor: (a) touch by hand, (b) thermal image, (c) projective pattern.

4.1.1 温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具  
 入力オブジェクトの温度情報を取得できることから、温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具という描画パターンを提案する。接触領域において温度の変化量に合わせて、投影する描画グラフィックスの濃淡を制御し、従来の研究例<sup>4)~6)</sup>で行われているような高度な物理シミュレーションなしで水彩画のような効果を得る。

本論文では、水彩画の濃淡は、染料のキャンパスに対するアルファ値の大小によって表現されるとする。仮想キャンパスに対する、任意の描画基準色の描画グラフィックスのアルファ値を、高温(低温)変化領域において、検出できる輝度値の最大(小)値に対する検出された輝度値の割合とすることで、温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具を実現する。

今、求める投影光のRGB値をそれぞれ  $b_R, b_G, b_B$ 、任意の描画基準色のRGB値を  $B_R, B_G, B_B$ 、キャンパスの色のRGB値を  $C_R, C_G, C_B$ 、求めるアルファ値を  $\alpha$  とする。高温変化領域において、熱画像中の任意画素における輝度値を  $v$ 、輝度値の最大値を  $v_{max}$ 、接触判定で設定する閾値を  $v_{thres}$  とすると、温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具は次のように表される(図3)。低温変化領域についても同様に描画パターンを計算する。

$$\alpha = \frac{v - v_{thres}}{v_{max} - v_{thres}} \quad (1)$$

$$b_{R,G,B} = \alpha B_{R,G,B} + (1 - \alpha) C_{R,G,B} \quad (2)$$

絵筆に温水をつけ空気中にさらすと、筆先の内部は高温を保っていても、表面は空気によって冷却され室温近くまで下がる。手指に関しても、同様のことがいえる。ここで、接触圧力が小さければ表面の熱がセンサ面に伝わるが、大きければ内部の熱が表面を通して伝わる。また、画材の接触時間が短いと伝わる熱は少なく、逆に長いと多い。このため、絵筆や手指で熱画像を変化させる場合、温度の変化量は接触圧力や接触時間によってセンサ面上で自由にコントロールすることができる。

#### 4.1.2 色の変更

色の変更、もしくは混色に関しては、仮想のパレットを用意し、その上で行うものとする。減法混色による色の混色を行うことができ、パレット上の作成した色に触れることでその色が描画基準色として選択される。これによって、実世界でのパレットと同様の作業環境をユーザに提供する。

#### 4.2 熱感覚メタファによる描画像の膨張収縮操作

入力オブジェクトの温度情報を利用した描画像変形の直観的操作手法を提案する。すでに画像の変形に関するアルゴリズムは多く提案されているが、その操作はいまだに、従来のポインティングデバイスで行われている。これでは、操作領域と操作量を別々に指定する手間がかかるうえ、画像の変形という現象は実世界では起こりえないため、ユーザは操作入力によって引き起こされる表示出力を直観的に把握することは困難である。

領域入力を検知することのできる研究事例<sup>3)</sup>では、その領域形状の座標値に加えて、センサ面との距離情報を利用して直観的な仮想オブジェクトの移動操作を実現している。提案する入力装置においても、接触領域形状と入力オブジェクトの温度情報を同時に取得することから、これを利用して、直観的な画像変形操作インタフェースを構築する。

気体の体積は一般に熱を持つと膨張し失うと収縮するという熱感覚メタファを操作に利用する。メタファを利用することで、操作のメンタルモデルの構築が容易になり、直観性が増す<sup>13)</sup>。投影されている描画像に対して、暖かいものが接触すればその接触領域の描画像が膨張し、逆に冷たいものが接触すれば収縮するというように歪ませる。高温・低温温度変化領域は同時に取得できることから、高温・低温の状態の切替えはただ入力オブジェクトを交換するだけでよい。

この操作の特長としては、ユーザは入力を行いながら、受動的に温度情報のフィードバックを受けられるため、直観的に操作内容を理解することができるということがあげられる。また、1動作で操作領域と操作量が指定できるため、手間の少ない操作が可能である。

実装方法としては、隣接格子点間の連結線にばね・ダンパモデルとして扱うメッシュモデルを採用する(図4)。各格子点に対し、接触領域の重心位置から高温変化領域では反発力を、低温変化領域では引力を与え、メッシュを変形させる。これに描画像をテクスチャとしてマッピングすることで変形効果を得る。

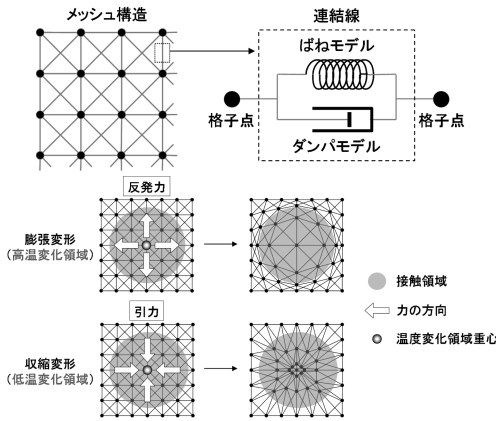


図 4 熱感覚メタファによる描画像操作原理

Fig. 4 Principle of paint bending through the metaphor of heat sensation.

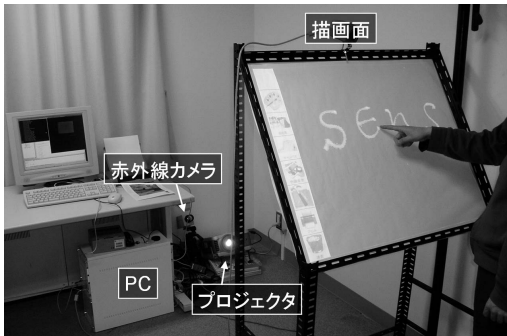


図 5 ThermoPainter 外観 (大センサ面)

Fig. 5 Overview of ThermoPainter.

### 5. 実 験

ThermoPainter を用いて、絵筆やエアブラシ、手指や呼気を利用した描画作業と、描画像の膨張収縮操作の動作確認実験を行う。また、書道家に作品制作を行ってもらい、そして、学会のシンポジウムにおけるデモ発表中に行ったユーザへのヒアリング調査結果を示す。

#### 5.1 実験環境

提案システムのハードウェア構成を図 5 に示す。赤外線カメラとして(株)三菱電機のサーマルイメージャ IR-SC1 を用いる。空間解像度 320 × 240 [pixel]、フレームレート 30 [fps]、出力幅 8 [bit]、検出する最小の温度差である雑音等価温度差 (NETD) 0.2 [°C] 以下という性能を持つ。処理を行うコンピュータは、CPU 2.4 [GHz] の PC 1 台を用い、リアルタイムに描画結果を示すことが可能である。

なお、図 5 のセンサ面上に表示されている GUI のアイコンの多くは 5.4 節のデモ発表において使用した

もので、5.2 節の動作確認実験では使用されていない。アイコンとして表示されていたのは、仮想パレット、現在の描画基準色の表示、変形操作への切替え、消去、プリントアウトといった機能を割り振ったものである。これらは、触れると ON/OFF が切り替わるボタンの機能を有している。仮想パレットは、この GUI のアイコンに触れることで表示される。選択した描画基準色は、パレットボタンの隣に表示される。また、描画・画像変形モードの切替えも同様にセンサ面に投影されているアイコンに触れることで行われる。これらの操作は、ただアイコンに触れるだけで可能であり、ユーザの学習コストは少ない。

センサ面の素材の選択は、薄いことと赤外線放射率が十分高いこととの 2 点を考慮に入れて行う。プランクの法則により、ある絶対温度を持つ物体の赤外線放射量は、その物体の持つ赤外線放射率に比例する<sup>14)</sup>。つまり、赤外線放射率が十分に高くなければ、その温度変化が熱画像の輝度値に反映されにくくなる。金属は一般に熱を伝えやすいが、赤外線放射率が低いため温度変化を観測することが困難である。そこで、赤外線放射率が高く、強度を保持したまま十分に薄くすることのできる素材として紙をセンサ面に採用する。

大きさが 300 × 200 [mm] と 1,900 × 750 [mm] である 2 種類の平面センサ面と半径 150 [mm] の半球型ドームセンサ面を用意した。平面センサ面のうち、前者を小センサ面、後者を大センサ面と呼ぶことにする。赤外線カメラの空間解像度は 320 × 240 [pixel] であるため、小センサ面で 1 [mm] 以下の読取分解能を実現できる。

以下の実験は温水の温度 60 [°C]、冷水の温度 0 [°C]、室温 25 [°C] の環境下で行った。なお、赤外線カメラ IR-SC1 は、12.5 ~ 100.0 [°C] の範囲の温度計測が可能であることから、高温・低温双方の温度変化を検出できる。

#### 5.2 動作確認実験

##### 5.2.1 描画実験

小センサ面を用いたときの、絵筆・指・エアブラシの各画材による描画結果と、水彩絵具を用いて実世界の紙に描いた描画結果との比較を図 6 に示す。図 6 (a) では、絵筆には温水を含ませ、エアブラシからは冷水を吹き付けるようにしている。

図 7 に、大センサ面を用い、手指や呼気による描画作業を行った結果を示す。図 7 (a) では、道具は何も使用せず、ただ手指を用いるだけで描画作業を行っており、掌をセンサ面に押し付けるだけで、手形の絵が描け、手や指にまるで絵具が付いているかのように、

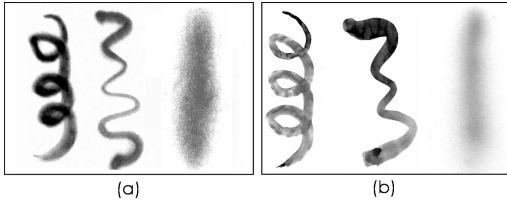


図6 絵筆(左)・指(中)・エアブラシ(右)による描画比較:(a) ThermoPainter, (b) 実画材  
Fig. 6 Comparison of strokes between (a) ThermoPainter and (b) physical painting tools, (left: paintbrush, middle: finger, right: airbrush).

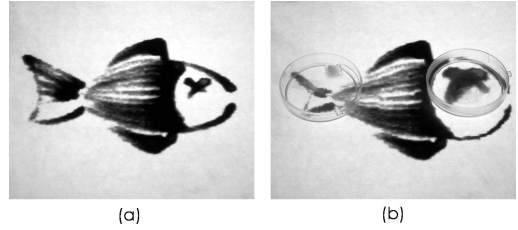


図9 熱感覚メタファを利用した描画像操作:(a) 元画像,(b) 膨張操作, 収縮操作  
Fig. 9 Bending of paint through the metaphor of heat sensation: (a) original, (b) contraction/expansion.

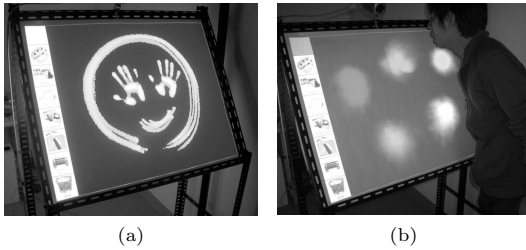


図7 大センサ面での描画:(a) 手指による描画,(b) 呼気による描画  
Fig. 7 Paints in big surface: (a) finger/hand, (b) breath.

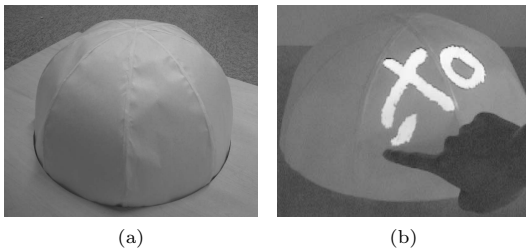


図8 ドームセンサ面での描画:(a) ドームセンサ面外観,(b) 描画結果  
Fig. 8 Paint in hemisphere surface: (a) overview of hemisphere surface, (b) paint example.

手指のセンサ面への接触面積を変えるだけで、簡単に線の太さを変えている。図7(b)では、同様に道具は何も使用せず、ただ呼気を吹きかけるだけでエアブラシで描画したかのような描画効果を得ている。

ドームセンサ面での描画結果を図8に示す。立体形状のセンサ面においても、ただ面に触れるだけで、その接触領域に光が投影され、描画結果が表示される。

提案システムを用いたこれらの操作はすべて1分以内に行われており、身体の一部を使うだけで簡単に様々な描画効果を得ることが可能であることが示されている。

### 5.2.2 熱感覚メタファを利用した描画像の膨張収縮操作実験

熱感覚メタファを利用した描画像の操作を行った結果を図9に示す。魚の描画像に対して操作を行った。図9(a)に示す描画像中の目の部分に高温変化、尾の部分に低温変化を与えた結果を図9(b)に示す。半径40[mm]の円形のプレートに温水、冷水をそれぞれ入れて入力オブジェクトとし、小センサ面で動作確認を行った。

プレートを描画像が投影されているセンサ面にのせるだけで、膨張と収縮の操作が同時に行われている。この操作では、入力オブジェクトを把持した時点で温度のフィードバックが受動的に受けられることから、どのような操作が行われるかを直観的に把握することが可能となっている。操作領域や操作量を指定する必要なしに、ただ入力オブジェクトを接触させるだけで画像の変形が行うことができる直観的な操作が実現されている。

### 5.3 書道家による作品制作

データタブレット使用経験のある書道家に毛筆を用いて、小センサ面で作品を制作してもらった。筆に湯をつけて描画するということを知らせた。システムを使用するための練習を行うことなく、1筆目で作品を完成した(図10)。制作後、「筆を直接用いることができるため今までと同じように作品制作できた」「タブレットでは書道を行おうとは思わなかったがこれならできると感じた」「実世界での書道と同様に書き始めは濃く終わりは薄いというタッチが再現されている」「温水と墨では粘性の違いが少し気になった」といったコメントを受けた。

### 5.4 デモンストレーションでのヒアリング調査

2004年3月に行われた情報処理学会主催シンポジウム「インタラクション2004」で行ったデモ発表<sup>15)</sup>中に、提案システムの操作性に関するアンケート調査を行った。会場では、本システムを参加者に開放してお

り、描画方法に関して事前の説明なしに、自由に触ってもらおうという環境で、大センサ面で描画作業を行ってもらった。被験者ごとに1人ずつ使用してもらのではなく、複数人が同時に描画できるような環境であった。画材としては絵筆と温水を、熱感覚メタファによる変形操作用に冷水を用意した。その中で、20代以上の男女15人のHCI研究者にデモ体験後、アンケート調査を実施した。

まず、描画作業の操作性に関するものを示す。被験者が描画したのは、単純なストローク程度であったが、実世界の画材を直接使った描画作業の操作性の評価を受けるには十分であると考えられる。デモ体験者のうち、93%が本システムを用いて思いどおり絵が描けると感じたと答えた。今までにディスプレイ付きタブレットのような描画システムの使用経験を持つ被験者の90%が、本システムの方がそれらに比べて思いどおりの絵を表現しやすいと答えた。その理由としては、「自分の指先で形を作れるのが良い」「筆先の感触があるのが良い」「描画したいところを直接触るだけで描けるのが良い」「指の先に絵具をつけて絵を描いているようだ」といった意見が得られた。

熱感覚メタファを用いた描画像操作に関しては、回答を得ることのできた4人中、直観的であったという意見は50%であった。これに関しては、分かりやすいといった肯定的な意見が得られた反面、「処理している箇所が手で隠れてどうなっているかが分からない」

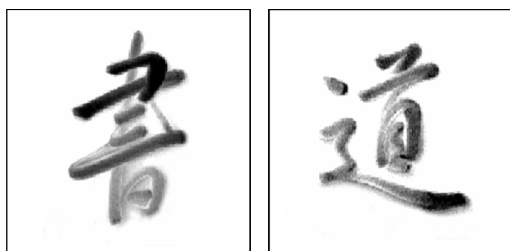


図 10 書道家による作品  
Fig. 10 Art work by calligrapher.

「無理に熱感覚メタファを利用する必要はない」といった否定的な意見も受けた。

そのほか、「温度による濃淡表現が水彩絵具に近くおもしろい」「子供やお年寄りにも使えて良い」「書道をしているみたいでおもしろい」「自分がアーティストになった気分だった」といった意見も得られた。また、センサ面の紙については、「触れたときの感触が良い」という感想を得た。複数人が同時に使用できる環境であったため、友人と一緒に描画を楽しむユーザが多く見受けられた。

## 6. 考 察

ThermoPainter とデータタブレットとの比較を行い、提案システムの限界や従来のタブレットよりも優れている点について考察する。次に、熱感覚メタファを用いた画像変形操作の有効性を検討し、最後に、メディアインストールとしての評価を行う。

### 6.1 データタブレットとの比較

表1に提案する入力装置と電磁誘導方式のデータタブレットとの比較をまとめる。可搬性、実装面、取得情報、読み取り分解能、描画性能の各観点から行う。

#### 可 搬 性

データタブレットは、可搬性に優れ、PDA やノートブック型PCに应用されている。それに対し、提案システムは、背面投影・撮影型であるため、大がかりなシステムとなる。しかし、提案するシステムは、アーティストの作品制作現場やメディアアート展での展示といった場所での使用を見込んでいることから、このような用途においては、大きさは問題とはならないと考えられる。また、温度センサをセンサ面に密に分布させることで薄く可搬性のあるシステムを構築することが可能になるものと考えられる。

#### 実 装 面

従来のタブレットは、透明にすることが可能であることから、CRT や液晶ディスプレイと組み合わせる

表 1 ThermoPainter とデータタブレットの比較  
Table 1 Comparisons between ThermoPainter and data tablet.

		ThermoPainter	データタブレット
可搬性		巨大	持ち運びできる
実装面		面の大きさが自由	透明にできる
読取分解能		1 [mm]	0.005 [mm]
取得情報	入力オブジェクト 座標情報 属性情報	センサ面と温度差のある任意オブジェクト 複数接触領域形状 温度情報	スタイラス 1 接触点 筆圧情報
描画性能	画材 絵具 非接触	実世界画材 温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具 可能	スタイラス 高度なシミュレーション 不可能



ことで、紙とペンのメタファを具現化した直観的なインタフェースを構築することが可能である。それに対し、提案システムでは、センサ面へはプロジェクタより映像を投影することでしか表示ができない。また、センサ面は紙製であり、強度に問題がある。しかし、ヒアリング調査において、紙の質感が良いとの意見があったうえ、面の取替えが容易であることや、図7、図8に示すように様々な大きさ・形状の面を作成しやすいという利点を持つ。

#### 読み取り分解能

描画作業支援を前提にシステムを構築する場合、読み取り分解能は重要なパラメータである。データタブレットには、0.005 [mm] の分解能を持つ機種が存在する。一方、提案システムでは、読取分解能はセンサ面の大きさとカメラの空間解像度に依存する。今回試作したシステムでは、1 [mm] の分解能を実現している。これは今後の赤外線カメラの高解像度化によって、改善することが可能である。

#### 取得情報

提案システムでは、センサ面に温度変化を与えることのできる身近な環境中の任意の道具の接触領域形状を二次元座標値として取得する。また、それだけでなく、その温度情報を低温から高温までの連続値で取得することができる。これにより、熱感覚メタファを利用した直観的なインタラクションが設計可能である。それに対し、タブレットは規格の決められたスタイラスのセンサ面上の接触点1点のみの二次元座標値を取得することしかできない。属性情報としては、筆圧情報が取得される。

#### 描画性能

操作感に関しては、提案システムでは画材を直接用いることができるため、実世界での描画と同様の環境を提供することが可能である。それに対し、データタブレットでは硬質なスタイラスでの入力であり、操作の現実感は乏しい。特に、エアブラシのようなキャンバスと非接触に用いる画材の操作感の差は大きい。また、提案システムでは、描画作業中の画材の切替えに関しては、画材をただ取り替えるだけでよく、従来の描画システムでは画材の選択に加えて描画する線の属性の選択など、選択すべき項目が複数あったのに対し、直観的な交換が可能である。

図6の描画結果より、2つの画像を比較すると、絵筆では、描き始めと終わりの部分の線の太さの変化が実世界でのそれと同様である点や、絵筆を回した際の絵筆への力のかかり具合によって微妙な線の太さの表現が可能であることが見てとれる。また、指による

描画では、指先のセンサ面に対する角度を制御することで様々な太さの線が描画されている。エアブラシでは、線の中心部から周辺部に向かって、濃淡が淡く変化しており、エアブラシの描画効果が得られていることが確認できる。このことから、十分に実世界の描画環境を提供できているといえる。

また、ヒアリング調査より、温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具に関しては、水彩画のようであるとの評価を受けたことから、その表現力の有効性が示されている。それに対し、データタブレットでは、精度の高いシミュレーションを行えば実世界での描画結果と同等のものを提供することが可能であるが、多種多様な画材に対するモデリングは非現実的である。

使い慣れた道具を直接用いて、図10に示されるような作品をコンピュータ上に描くことが可能である。また、タブレットでは書道を行おうとは思わなかったがこれならできると感じたといったコメントを受けたことから、アーティストの使用に耐えうる描画環境を構築することが可能であることが示された。書き始めは描画パターンが濃く終わりになるにつれて薄くなるというタッチの再現が、提案システムで可能であることが示された。これは、描き始めは筆先が高温であるが、描いていくうちにその熱が奪われ室温状態に収束していくことから可能となる、温度を手がかりにしたバーチャル水彩絵具ならではの表現力であるといえる。また、墨と同様の粘性を持ったものを用いれば、水との粘性の違いは解決されるものと考えられる。

そのほか、提案システムでは、図7に示されるように、手形を絵の一部にしたり、呼吸を使って描画することができ、前衛芸術的な表現が可能である。しかし、絵筆を使用する際、筆先の温度を視覚的に認識にくいという問題点がある。また、同時に複数の接触入力を検出することはできるが、2色以上同時に使うことはできない。これは、接触前より入力オブジェクトの追跡を行う必要があることから、現行のシステム構成では困難であり、今後解決すべき課題である。

#### 6.2 熱感覚メタファを用いた画像変形操作の有効性の検討

図9より、魚の描画像の目の部分が膨張し、尾の部分が収縮していることが確認できることから、温度情報による描画像の変形操作が可能であることが示された。この操作では、熱感覚メタファを利用していることから、直観的なインタラクションが可能であると考えられるが、ヒアリング調査では、この操作に対しては賛否半々であった。そこで、これらが直観的であるかどうかの心理実験を行った。

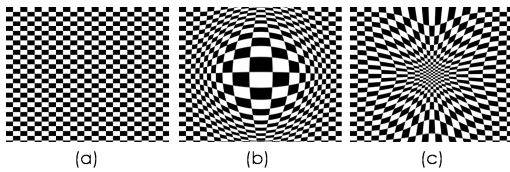


図 11 心理実験の提示画像

Fig. 11 Stimulus image in psychophysical test.

表 2 心理実験結果 : (a) 元画像, (b) 膨張操作, (c) 収縮操作  
Table 2 Result of psychophysical test: (a) original, (b) expansion, (c) contraction.

	高温	低温	選択不可	選択時間 (平均)
膨張操作	12 [人]	0 [人]	0 [人]	6 [s]
収縮操作	5 [人]	6 [人]	1 [人]	10 [s]

膨張操作と収縮操作を施した画像とその元画像の 3 枚の画像と、高温・低温の温度選択オブジェクトとして小さな容器に温水 (60 [°C]), 冷水 (0 [°C]) を入れたものを用意する (図 11)。そして、元画像を膨張・収縮それぞれの操作後画像にするためにはどちらの温度選択オブジェクトで元画像に接触するかを選択してもらう。被験者の目の前に画像を提示した後、温度選択オブジェクトにそれぞれ触ってもらい、選択を行ってもらう。画像提示から選択までの時間を計時した。

被験者は、20 ~ 50 代の男女 12 人である。その結果を表 2 に示す。選択不可とは、高温低温のどちらを用いてもその操作は行われないと判断されたものである。これより、膨張操作では被験者の 100% が平均で 5 [s] 程度で高温を選択したのに対し、収縮操作では低温を選択した被験者は 50% であることが示された。収縮操作において高温を選択した被験者より、「画像が一度柔らかくなってからそれが真ん中に引っ張られた」というコメントを得た。実験後、収縮操作であると口頭で伝えたところ、すべての被験者が低温を選択すると答えた。このことから、収縮操作自体には熱感覚メタファと強い相関があることが認められたが、変形操作の実装に問題があったことが分かった。しかし、膨張操作が熱感覚メタファと強い相関があり、直観的であることは証明されたため、熱感覚メタファを利用した画像操作の直観的操作インタフェースの有用性が示された。

### 6.3 メディアインスタレーションとしての評価

メディアインスタレーションとしての有効性をヒアリング調査より得られた知見をもとに評価する。93% のユーザが思い描いた絵を容易に描けると感じたこと、そして従来の描画システムに比べて、より思いどおりの絵が描けると評価されたことから、提案システムを

用いることで、アーティストだけではなく、特別な教育を受けたことのないようなユーザでもだれもが簡単に描画の楽しさを楽しむことができると考えられる。

また、事前の説明がなかったにもかかわらず、手指を用いた描画では、描き始めるとすぐに手指のセンサ面に対する角度を変える技法を体得し、接触面積を自由に変えて様々な太さの線を描画していた。また、呼吸を用いたり手形を作るといった描画手法が、ユーザ自身が新たな描画方法を開拓しようとした結果、自然に生み出されていった。これらの創発的な使用例は、本システムにおいて、ユーザが創作意欲やアイデアを刺激され、意欲的にアート制作に没頭できることを示すものである。

これらに加え、複数人が同時に描画作業を行うことが可能であり、デモ発表において、友人と描画を楽しむユーザが多く見受けられたことから、来訪者を、彼ら自身による描画芸術へ素直に導くことのできるメディアインスタレーションとしての有効性が示されている。

## 7. おわりに

本論文では、熱画像を用いたタブレット型入力装置とそれを用いたインタラクティブ描画システム ThermoPainter を提案した。描画作業に硬質のスタイラスペンしか用いることができない既存のシステムに対し、筆やエアブラシといった画材や、前衛芸術的に手指や呼吸を直接用いて描画することが可能であることを示した。提案システムにおいて、温度変化量を濃淡データとして利用する温度を手がかりにしたパースナル水彩絵具、熱感覚メタファによる直観的な画像の膨張縮小操作を提案した。

動作確認実験、書道家による作品制作、ヒアリング調査を行った。そしてこれらをもとに、ThermoPainter とデータタブレットとの多面的な比較、熱感覚メタファを用いた画像変形操作の有効性の検討、メディアインスタレーションとしての評価を行った。

今後は、熱感覚メタファと画像操作の相関について調査を行い、他の画像操作にも利用していき、直観的な画像操作インタフェースの構築を行っていく。また、様々な場にシステムを持ち込み、子供からお年寄りまでの幅広い層のユーザに使用してもらい、メディアインスタレーションとしての可能性を多面的に解析していく。

## 参考文献

- 1) Koike, H., Sato, Y. and Kobayashi, Y.: In-

- tegrating paper and digital information on EnhancedDesk: A method for real-time finger tracking on augmented desk system, *ACM Trans. Computer-Human Interaction*, Vol.8, No.4, pp.307-322 (2001).
- 2) Matsushita, N. and Rekimoto, J.: HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall, *Proc. 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.209-210, ACM (1997).
  - 3) Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, *Proc. SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp.113-120, ACM (2002).
  - 4) Chu, N.S.H. and Tai, C.-L.: Real-time Painting with an Expressive Virtual Chinese Brush, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.24, No.5, pp.76-85 (2004).
  - 5) Strassmann, S.: Hairy brushes, *Proc. 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.225-232, ACM (1986).
  - 6) Baxter, B., Scheib, V., Lin, M.C. and Manocha, D.: DAB: Interactive Haptic Painting with 3D Virtual Brushes, *Proc. 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.461-468, ACM (2001).
  - 7) Ryokai, K., Marti, S. and Ishii, H.: I/O Brush: Drawing with Everyday Objects as Ink, *Proc. 2004 conference on Human factors in computing systems*, pp.303-310, ACM (2004).
  - 8) Ip, H.H.S., Hay, Y. and Tang, A.C.C.: Body-Brush: A body-driven interface for visual aesthetics, *Proc. 10th ACM international conference on Multimedia*, pp.664-665, ACM (2002).
  - 9) Yoshida, S., Kurumisawa, J., Noma, H., Tetsutani, N. and Hosaka, K.: Sumi-nagashi: Creation of new style media art with haptic digital colors, *Proc. 12th annual ACM international conference on Multimedia*, pp.636-643, ACM (2004).
  - 10) Wellner, P.: Interacting with paper on the DigitalDesk, *Comm. ACM*, Vol.36, No.7, pp.87-96 (1993).
  - 11) Ullmer, B. and Ishii, H.: The metaDESK: Models and prototypes for tangible user interfaces, *Proc. 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.223-232, ACM (1997).
  - 12) Matsushita, N., Ayatsuka, Y. and Rekimoto, J.: Dual Touch: A two-handed interface for penbased PDAs, *Proc. 13th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.211-212, ACM (2000).
  - 13) 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, Vol.7, No.3, pp.339-345 (2002).
  - 14) 赤外線技術研究会(編): 赤外線工学—基礎と応用, オーム社 (1991).
  - 15) 岩井大輔, 佐藤宏介: Thermo-Painter: 熱画像と熱メタファによるインタラクティブ描画システム, インタラクシオン 2004 論文集, pp.21-22, 情報処理学会 (2004).

(平成 16 年 9 月 27 日受付)

(平成 17 年 5 月 9 日採録)



岩井 大輔

1980 年生。2002 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2004 年同大学大学院修士課程修了。現在, 同大学院博士課程在学中。ヒューマンコンピュータインタラクシオンに関する研究に従事。2004 年情報処理学会ベストインタラクティブ発表賞受賞。IEEE 会員。



金谷 一朗

1973 年生。1995 年関西大学工学部電気工科学科卒業。1997 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士課程修了。同年 ATR 人間情報通信研究所研修研究員。1999 年同大学院博士課程修了。同年和歌山大学システム工学部助手。2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手, 2003 年大阪大学基礎工学部助手。2004 年 JST さきがけ研究員兼任。デザイン理工学に関する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, VR 学会, IEEE 各会員。



日浦 慎作(正会員)

1972 年生。1993 年大阪大学基礎工学部制御工学科飛び級中退。1997 年同大学大学院博士課程短期修了。同年京都大学リサーチアソシエイト。1999 年大阪大学基礎工学部助手。2003 年助教授。三次元動画像計測・処理とその VR・コミュニケーション応用の研究に従事。1993 年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞, 2000 年画像センシングシンポジウム優秀論文賞受賞。工学博士。電子情報通信学会, VR 学会各会員。



井口 征士 (正会員)

1940年生. 1962年大阪大学工学部電気工学科卒業. 1964年同大学大学院修士課程修了. 1965年同大学基礎工学部助手. 1969年助教授. 1984年教授. 2005年宝塚造形芸術大学教授. イメージ情報科学研究所関西研究センター所長兼務. パターン計測, 感性情報等の研究に従事. 著書『三次元画像計測』『感性情報処理』. 工学博士. 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, IEEE ほか各会員.



佐藤 宏介 (正会員)

1961年生. 1983年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業. 1985年同大学大学院修士課程修了. 1986年同大学助手. 1988~1990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年大阪大学基礎工学部教授. 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, VR学会, 色彩学会, IEEE ほか各会員.