

# プロジェクタ - サーマルカメラ型インタラクティブシステム

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:** 筆者らは、投影型複合現実感技術と熱画像処理による3種のプロジェクタ-サーマルカメラ型インタラクティブシステム (ThermoReality・ThermoPainter・Limpid Desk) を提案している。これらのシステムは、赤外線カメラから得られた熱画像より対象の温度分布情報を得て、それに応じて投影画像を生成し、対象へそれを直接投影するという基本概念に基づいて設計されている。本システムの特徴は、ユーザと実環境との熱情報のやり取りに着目し、これをセンシングし、それを元に投影画像を生成するという点にある。人体は周囲環境より高温であることが多いことから人体による物体への接触を検出することが容易である。また、液体塗布や気体の吹き付けによる熱の変化を利用し、インタラクションやアート制作作業などへの応用も出来る。熱画像では物体表面の熱分布のみが計測されるため、物体表面にのみ像を提示可能で空中像の提示が不可能な投影型複合現実感システムとの相性もよい。提案するシステムにおいて用いられている、投影可視光と遠赤外光との非侵襲性を利用した画像処理手法、熱画像と可視光プロジェクタ間のキャリブレーション手法等を紹介する。

## Projector-Thermal Camera Interactive Systems

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

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

**Abstract:** This paper presents projector-thermal camera interactive systems and their computer vision techniques. These systems, which we call ThermoReality, ThermoPainter and Limpid Desk respectively, are designed based on the following concept: a thermal image of an object scene captured by a thermo-infrared camera is processed for producing a projection image, then the projection image is projected onto the corresponding object. In ThermoReality, the system exposes a temperature distribution of the whole object scene by projection of pseudo color thermal images onto the scene. In ThermoPainter, users can paint on a computer screen, directly using their own hands, breaths and a hair dryer, a paintbrush wetted with hot water. In Limpid Desk, intuitive document search on a real desktop with virtual transparentizing is accomplished; the upper layer of a document stack is disappeared by projection of lower layer documents. As an input interface, the system realizes a vision-based touch sensing method utilizing a thermal image where user touch areas on real documents are detected without any user-worn or hand-held devices.

### 1. はじめに

熱情報を媒介する特殊な波長域である遠赤外領域の光を捉えることのできる赤外線カメラは、対象物体の温度情報を非接触で2次元画像として可視化することが可能であり、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>[1]</sup>。近年では、これらの「なくてはならない」ような用途ではなく、温度情報という馴染み深いアナログ情報を利用し、我々の生活を豊かにするようなインタラクティブシステムへの応用がなされてきている<sup>[2][3]</sup>。

筆者らはこれまで、投影型複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術と熱画像処理とを融合し、ThermoReality, ThermoPainter, Limpid Desk というプロジェクタ-サーマルカメラ型インタラクティブシステムを提

案してきた<sup>[4][5]</sup>。従来研究<sup>[2][3]</sup>では、人体領域切り出しが容易であることを利用していたのに対して、筆者らは、人だけではなく実環境中全ての実物体の温度分布情報に着目し研究をすすめてきている。筆者らの提案するシステムの基本概念は、対象の温度分布情報を処理し、それに応じて投影画像を生成し、対象へそれを直接投影するというものである (図1)。以下、3種のインタラクティブシステムの概要を述べる。

ThermoReality は、熱画像で得られた実物体の温度分布を直接その対象へ投影重畳し、あたかも温度分布情報が実対象上に浮かび上がるかのような効果を得ることのできるシステムである。従来のモニタベースの温度情報の観察は、熱画像と対象との幾何学的な対応をとることが困難であったが、ThermoReality では直観的に把握することが可能である。ThermoReality で

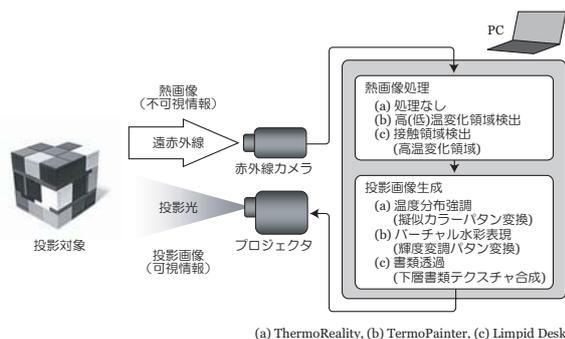


図1 プロジェクタ-サーマルカメラ型インタラクティブシステム概念図

は、熱画像に対して特別な画像処理は必要ない。投影画像生成時に、熱画像を対象の温度分布を直観的に把握させることのできる擬似カラーパタンに変換し、位置合わせのための幾何学補正を施して対象に投影重畳する。

ThermoPainter は、熱で絵を描くことを実現したシステムである。マウスやタブレットといった従来の入力インターフェースでの描画作業ではなく、掌や指といった身体の一部や、絵筆・エアブラシといった道具を直接用いて描画作業を行うことができる。ThermoPainter では、薄面のスクリーンを対象とする。まず、取得された熱画像からスクリーン上の高(低)温変化領域を抽出する。そして、抽出された領域に任意色の光を投影する。このとき、熱画像の輝度情報に基づくバーチャル水彩表現によって水彩画風の効果を実現する。

Limpid Desk は、机上に積まれた書類スタックをプロジェクタ投影によって透過化することで、書類探索の効率化を目指したシステムである。ユーザの書類スタックへの接触を検出し、それをトリガとして透過処理を開始する。熱画像処理時に、同時に可視カメラで取得した可視画像の情報も利用して、ユーザの対象への接触領域を検出する。熱画像を変換して投影画像を生成する上記の2種のシステムとは異なり、あらかじめPC内に取得してある下層書類の画像を合成して書類透過用投影画像を生成し、投影重畳する。

熱画像処理の観点から、それぞれのシステムにおける撮影対象と、取得された熱画像のうちで投影画像生成に利用される情報の差異について述べる(図2)。ThermoReality では、撮影対象は実環境中の任意物体であり、投影画像生成のために、取得された熱画像の全領域を用いる。ThermoPainter では、撮影対象は紙面などの薄い物体に限られる。熱画像中の高(低)温変化領域を、選択的に投影画像生成のために利用する。Limpid Desk では、撮影対象は環境中の任意物体であり、可視カメラと赤外線カメラを同軸設置することで算出される実物体上のユーザの接触位置(高温変化領

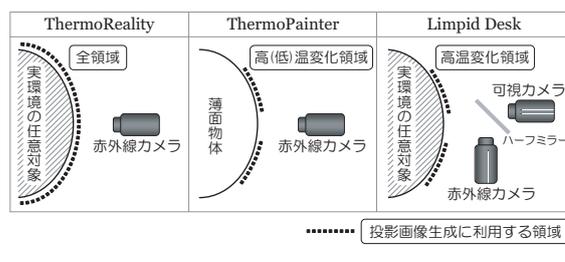


図2 撮影対象と、熱画像処理により検出され投影画像生成に利用される領域

域) からその下層書類画像を投影用に合成する。

本稿ではこれら3種のシステムについて、そのシステム構成、熱画像処理・投影画像生成手法について説明する。そして、それぞれについて実機での実験を行いその結果を示す。最後に、考察と今後の展望を述べる。なお、本稿に關係するカラー画像は、参考文献<sup>[6]</sup>を参照されたい。

## 2. ThermoReality

赤外線カメラによって撮影された温度分布が、対象物体のどの部分と対応しているのかを、その熱画像のみから認識することは容易ではない。温度分布と対象物体との幾何学的対応を把握するには、ユーザは熱画像と対象物体との間で目視による比較を行わなければならない。多くの赤外線カメラには液晶モニタのような画像提示装置が取り付けられており、ユーザは対象物体の可視画像と熱画像とを交互に見比べることでようやくその対応を把握することが可能となっていた。

本研究では、投影型MR技術を用いて対象の温度分布をその対象上で視覚的に強調することで、このユーザインターフェース上の問題を解決する。この手法では、赤外線カメラから取得された熱画像を疑似カラーパタン(赤⇔青)に変換し、幾何学補正(位置合わせ)処理を施して投影画像を生成する。そして、これをプロジェクタから直接実世界の対象物体に投影し光学重畳することで、ユーザに対象物体の温度分布情報を提示する。これによって、「ディスプレイ空間」(熱画像を提示する空間)と「対象空間」(対象物体の存在する空間)とが3次元空間の中で一致し、実対象物体上でより直観的にその温度分布を把握することが可能となる。

### 2.1 プロジェクタ-赤外線カメラの光軸同軸設置

3次元空間中の動的な任意対象へ幾何学的に位置合わせをしつつ、熱画像から得られる温度分布情報を投影重畳する必要がある。3次元実空間を自由に動く対象に対応するために、赤外線カメラとプロジェクタの光軸が同軸となるように設置する。これにより、画角の違いと光軸周りの回転方向のずれという、2種の位置ずれが生じるが、これを補正する幾何学キャリブレーションを一度施すだけで、対象物体が動いても、正確



図3 ThermoReality システム外観

な位置に熱画像を投影できるようになる。

本研究ではこの較正処理に、赤外線カメラ-プロジェクタ座標系間のホモグラフィを利用する。赤外線カメラで、任意の平面を撮影し、その平面上の任意の4点の座標値を手動で取得する。また、手動と目視によって、その4点に投影されるプロジェクタ座標値を取得し、これら4点の対応関係からホモグラフィを算出する。これより、3次元空間中のどの点においても双方の座標値の対応関係を得ることができる。

## 2.2 温度分布強調実験

モニタを介する温度分布提示のユーザインタフェース上の問題点に対して、実対象上での温度分布強調が有効な解決策であることを示す4種の投影実験を行う。実験結果の画像は、投影結果の実写の生画像をグレイスケール化したものである。

システムの外観を図3に示す。使用する機器は、赤外線カメラ (Mitsubishi IR-SC1)、ビデオプロジェクタ (NEC MT1075J, 輝度: 4200[lm]), PC (CPU: Intel Pentium4 2.5[GHz]) である。なお、赤外線カメラとプロジェクタの光軸を同軸にするため、赤外反射・可視透過のダイクロイックハーフミラーを用いる。

### 空の絵具チューブの可視化

試料内に存在する欠陥を見つけ出す赤外線カメラを使った非破壊検査には、一旦試料を加熱し、その後の表面温度の冷却過程を観察するという手法がある<sup>[8]</sup>。このような検査での用途を考慮して、同じ形をした絵具チューブが敷き詰められている中から、絵具が入っていない空のチューブを見つける実験を行う。

図4(a)は、絵具チューブの上からヘッドドライヤを使って温風を吹きつけた後の温度分布を示している。モニタ上では、温度の低下が他よりも遅いチューブ (空のチューブ) があることは確認できるものの、それがどのチューブであるのかを特定することは困難である。これに対して提案システムの方では、対象上に直接温度分布が重畳投影されているため、一目で他と異なるチューブがどれであるのかを把握することが可能であることが確認できる。

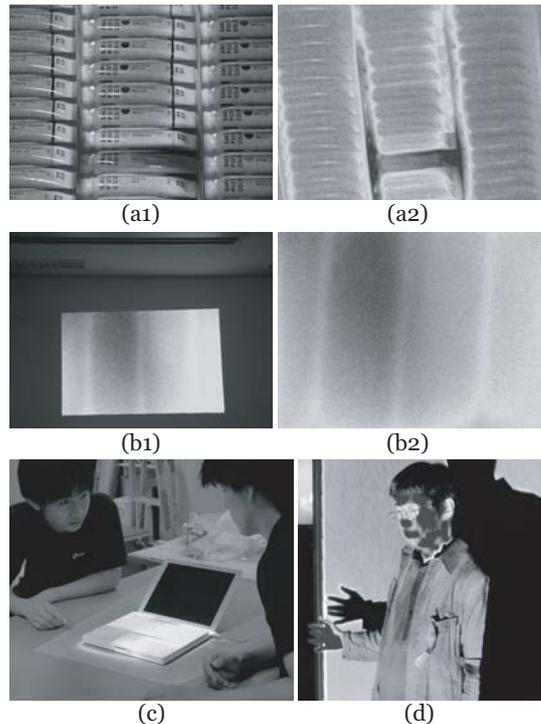


図4 (a) 絵具チューブの温度分布: (a1) 投影結果, (a2) 取得温度分布 (モニタ上での見え)  
(b) 白壁の温度分布: (b1) 投影結果, (b2) 取得温度分布 (モニタ上での見え)  
(c) 対面協調作業環境  
(d) 身体への温度分布重畳提示

### 白壁の裏側の鉄筋の可視化

建築物の外壁診断や空調診断に赤外線カメラはよく用いられる。そこで、夏場の室内において、空調装置の冷風の噴出し口に面した白壁の温度分布を観察した。鉄筋は他よりも熱伝導率が高く、外気温 (室内よりも高温) が伝わることから、壁表面のうち、鉄筋に接している部分は周りよりも温度が高くなる。

図4(b)に、モニタ上で温度変化を観察した場合と、壁に直接投影した場合の結果を示す。先ほどの実験と同様に、モニタ上で温度分布を確認しても対象との対応がとれないのに対し、提案システムでは、温度分布が対象上に浮かび上がるため、対象の温度分布を直観的に把握することができる。

### ノート型PCの熱設計を議論する対面協調作業環境

提案システムを用いた対面協調作業の一例として、ノート型PC上に投影された温度分布を確認しながら熱設計の検討を行うことのできる環境を構築し、動作確認実験を行う。モニタ上で対象の温度分布を共有すると、対話空間ではなくモニタ上のデータに注意が向けられるため、効率の良い協調作業が行われなくなる。提案システムでは、対話の手がかりとなるノンバーバル情報の豊富な、コンピュータを用いない通常の対面協調作業の作業形態を崩すことなく、対象の温度分布

情報を投影提示し協調作業を支援する。

机上にノート型 PC (Apple iBook G4) を置いて、温度分布を投影重畳した (図 4(c))。このシステムでは、机上を取り囲んだユーザが、筐体を直接指差すことができたり、向かい合って議論することができる。これによって、活発なコミュニケーションが促進され、効果的な対面協調作業を行なうことができるようになる。

### 人体の温度分布の可視化

赤外線カメラによって撮影される身体の温度分布情報は、医療現場での検診用に用いられる。提案システムを用いて、患者の体表温度が身体の上に投影されて強調表示されることで、医師が患者の温度分布を直観的に把握することができるようになる。図 4(d) に、体の温度分布を投影表示した結果を示す。

## 3. ThermoPainter

ThermoPainter は、熱画像を利用してスクリーン上の温度変化を取得することで、ユーザの手・指の接触動作や呼気の吹き付けといったボディアクションや、絵筆やエアブラシといった道具を直接用いて画像創作を行うことのできる描画作業支援システムである。本章では、ThermoPainter のセンシング原理・描画システム構成・幾何学キャリブレーション手法・実験結果について述べる。

### 3.1 センシング原理

今、計測対象である薄面をセンサ面と呼ぶ。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みなし、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。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じた画素を接触領域であると判定する (図 5)。

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 6)。これによって、赤外線カメラに絵道具や人間の手が撮られるオクルージョンの影響を受けずにすむ。

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

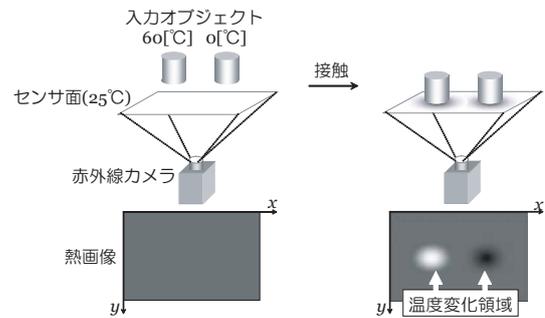


図 5 ThermoPainter センシング手法

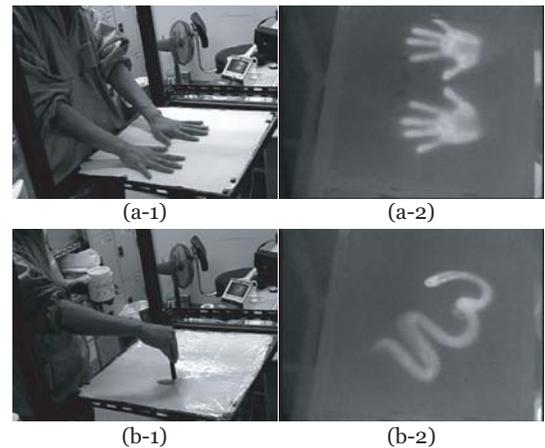


図 6 接触風景とその熱画像 (背面撮影): (a) 掌, (b) 温水につけた絵筆

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気はもとより、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、原理的にセンサ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。

### 3.2 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。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、投影光が遮蔽されることはない。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。

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、水彩画のような効果を得る。水彩画の濃淡は、染料のキャンバ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。このとき、仮想キャンバスに対する、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 (低) 変化領域において、検出できる輝度値の最大 (小) 値に対す

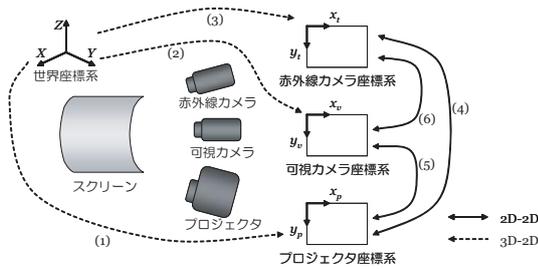


図7 曲面スクリーン用システム座標系

る検出された輝度値の割合とすることで、温度を手掛りにしたバーチャル水彩表現を実現する。

### 3.3 幾何学キャリブレーション

スクリーンが平面である場合、スクリーン上でのホモグラフィをあらかじめ求めておくことで、プロジェクタ-赤外線カメラ座標系間の位置合わせが可能である。スクリーンが曲面である場合は、以下に述べるキャリブレーション手法によって幾何学補正処理を行う。

赤外線カメラとプロジェクタの他に、可視カメラを、同様にスクリーンの背面に設置する。これらの機器は、任意の位置に設置することが可能である。図7に、可視カメラ座標系、赤外線カメラ座標系、プロジェクタ座標系、および世界座標系の関係を示す。

本システムでは、グレイコードパターン投影法<sup>[7]</sup>を用いてキャリブレーション(較正)を行う。較正用の基準物体として各面に基準点が描かれた一辺160[mm]の立方体を用いる(図8(a))。まず、グレイコードパターンをプロジェクタより投影し、その像を可視カメラで観察することで可視カメラとプロジェクタの較正を行う(図7(1), (2))。

次に、赤外線カメラの較正を、同じ較正用基準物体を用いて行う(図7(3))。このとき、赤外線カメラでは基準点を検出することができないため、基準物体の裏側に豆電球を取り付けて暖め、立方体の七隅(世界座標既知)の温度を高くする(図8(b), (c))。この熱画像より、熱によって浮かび上がってきた基準物体の稜線を手掛かりに、立方体の各頂点の座標値をそれぞれ手動で取得することで、赤外線カメラの較正を行う。次に、基準物体を計測対象に取り替え、プロジェクタより縦か横のグレイコードパターンを投影し、その像を可視カメラで得ることで対象物体の形状を計測する。最後に、対象物体の3次元形状データおよび図7(1), (2), (3)の較正結果を用いることで、可視カメラ、プロジェクタ、赤外線カメラそれぞれの間での座標値の対応が求められる(図7(4), (5), (6))。

### 3.4 描画実験

ThermoPainterを実機で構築し、描画実験を行った。平面スクリーンの場合のシステムの概観を図9に示

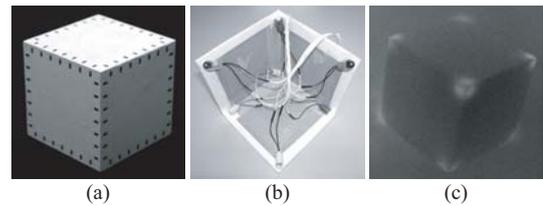


図8 較正用基準物体：(a) 外観(黒マーカが基準点)、(b) 豆電球設置風景、(c) 熱画像

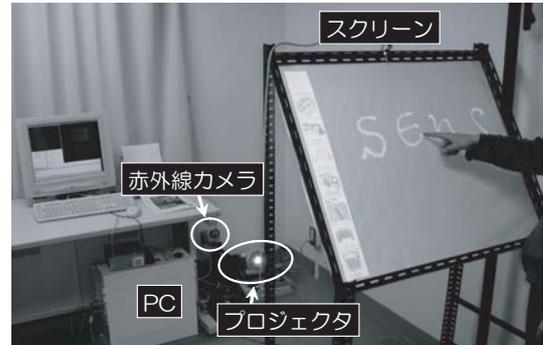


図9 ThermoPainter システム外観

す。構成要素は、赤外線カメラ(ThermoRealityと同様のもの)、プロジェクタ(EPSON ELP-7700, 輝度:3000[lm])、PC(CPU: Intel PentiumIII 2.4[GHz])である。なお、曲面スクリーンの際は、可視カメラ(Sony EVI-G20)を使用した。赤外線放射率・薄さ・手触りを考慮した結果、紙をスクリーンとして用いた。

今回は、スクリーンを高温にすることで描画を行った。室温25[°C]の室内環境で実験を行い、閾値は、画素値125(約30[°C])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。

描画実験結果を図10に示す。同図(a)より、指先で様々な太さを持った線を描くことや、手形を使った作品を制作することが可能であることが確認できる。また、同図(b)の呼気による描画では、バーチャル水彩表現によって、エアブラシで描いたような独特のタッチが再現されている。同図(c)は、書家による作品である。この結果より、筆のタッチが再現されていることが確認できる上、書き始めは筆先につけた温水の温度が高いため、表示される色は濃いですが、書いていくうちに温度が下がっていき、どんどん薄くなっていくという、墨と同様の効果が得られている。同図(d)より、ドライヤのような熱を発生する道具を用いても描画が可能であることが示されている。また、バーチャル水彩表現によって、あたかもエアブラシで描画したかのような効果が得られている。曲面スクリーンでも描画実験を行った(同図(e))。同図(e-1)は、用いた曲面スクリーン(半径150[mm]の半球面)である。同図(e-2)

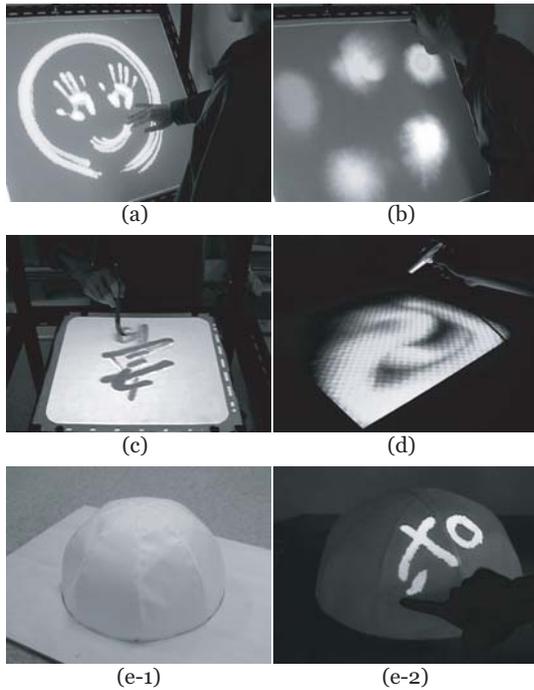


図 10 描画結果：(a) 掌, (b) 呼気, (c) 墨の代わりに温水をつけた筆, (d) ドライヤ, (e-1) 曲面スクリーン, (e-2) 曲面スクリーンでの描画結果

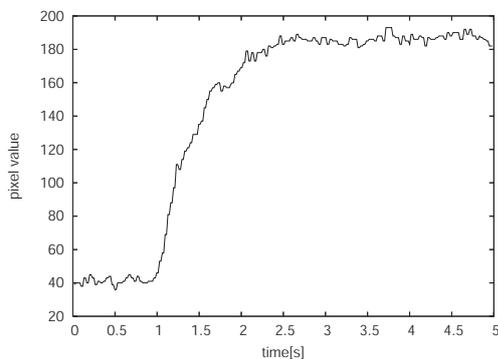


図 11 紙面上の指先接触部分の温度変化

にこのスクリーンでの描画結果を示す。これより、曲面スクリーンを用いても、描画作業が可能であることが確認できた。

システムの応答性能を調査するために、ユーザの手の熱が書類へ伝達される時間を測定した。コピー用紙に指で接触した際の、その紙の裏側の温度変化を赤外線カメラで計測した結果を図 11 に示す。ユーザの接触によりコピー用紙の温度は、定常状態（画素値 40）から 0.43[秒] で閾値（画素値 125）に達している。これより、スクリーンへの熱伝導は描画の目的には十分早く起こることが確認できた。

#### 4. Limpid Desk

筆者らは、机上の書類スタックをプロジェクタ投影により透過させて書類探索効率を向上させることを目指したシステム Limpid Desk を提案している。このシステムでは、ユーザが机上の書類に触れると、それをトリガとして透過処理が開始する。透過処理は、あらかじめ PC 内に保存されているスタックの下層書類の画像を、参考文献 [9] で提案した色補正処理を施しつつ、その上層へ投影することで実現する。これによって、探索・操作・表示空間が机上で一致するシームレスなインタラクションを実現することができる。本章では、主に熱画像と可視画像を用いた実環境への接触領域検出手法について述べ、その後 Limpid Desk で可能となる書類探索インタラクションを紹介する。

##### 4.1 接触領域検出原理

従来、投影型 MR システムにおける入力インタフェースとして、磁気トラッカ [10]、投影面に埋め込まれたセンシング機器 [11]、画像処理による指先追跡技術 [2] など、様々な手法が提案されている。しかしながら、非拘束で投影対象への接触をセンシングすることは未だ容易とはいえない問題である。

そこで筆者らは、ユーザが実物体に触れた際に、物体上の接触部位に残る熱を計測する事で、実物体への接触を検出する手法を提案する。例えば、ユーザがある物体に接触すると、その体温が物体へ伝達される。そして、ユーザが接触している手を物体から離しても、少しの間、熱が物体表面に残る。この実物体表面の蓄熱現象を計測する事でユーザの接触位置を検出することができる。

システムに組み込まれている赤外線カメラから取得される熱画像から、物体上の高温変化領域を検出し、それをユーザの接触領域とする。このとき、接触領域だけでなく、ユーザの身体（接触している手や腕）も、熱画像中に高温変化領域を引き起こすということが問題となる。そこで、カラーカメラから取得される可視画像を用いる。可視画像に対して背景差分処理を行う事で、ユーザの身体領域を侵入領域として検知する。そして、可視画像の背景とされた領域に対応する熱画像の部分領域を処理領域として、その中から高温変化領域を検出する。高温変化領域の検出には、あらかじめ取得しておいた熱画像の背景画像を利用する。高温領域ではなく、高温変化領域を検出することで、机上に置かれたコーヒーのような動かない高温物体が接触領域として検出されてしまうことを防ぐ。なお、背景差分で利用される可視・熱双方の背景画像は、10 秒程度シーンに変化がない場合に更新される。

処理の流れを、図 12 に示す。まず、可視画像で侵入

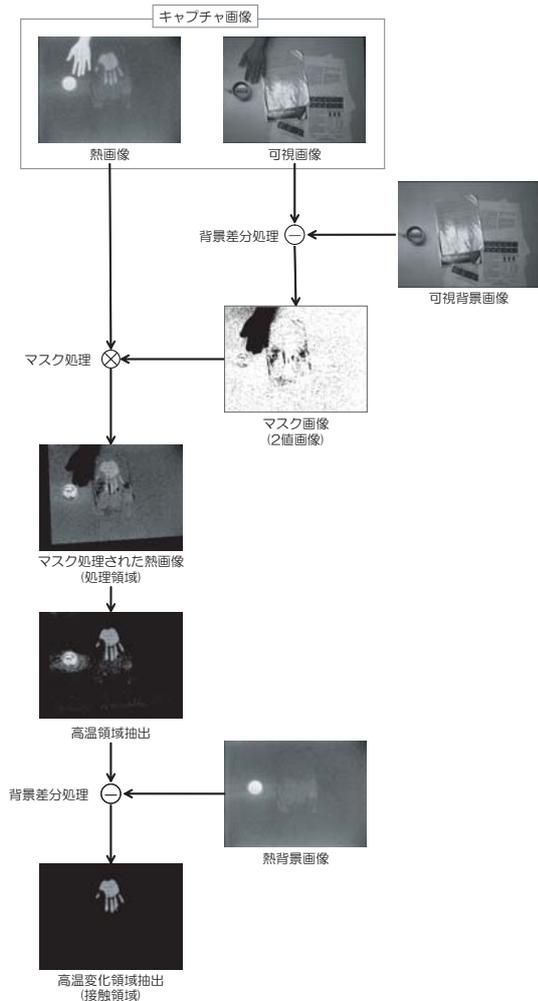


図 12 接触検出処理の流れ

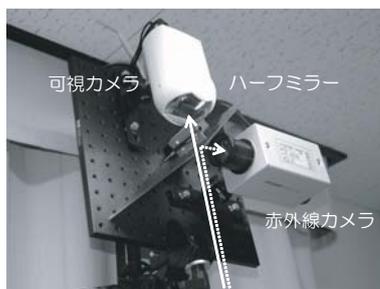


図 13 赤外線カメラとカラーカメラの光軸同軸設置

検知を行い、熱画像中よりユーザの身体領域を取り除くためのマスク画像を生成する。次に、マスク処理により、熱画像より処理領域を切り出す。最後に、この処理領域において、熱画像の背景画像との比較により高温変化領域を抽出し、ノイズ除去処理を施してユーザの接触領域を検出する。

カメラ座標系間の空間的な対応を得る事で、マスク処理における位置ずれ問題を解決する。赤外線カメラとカラーカメラを、赤外光反射・可視光透過の性質を

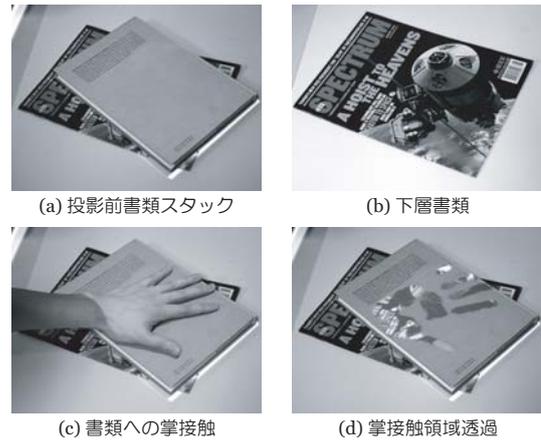


図 14 手接触領域への下層書類画像投影による上層書類の透過化

もつダイクロイックハーフミラーを用い、光軸が同軸となるように設置する (図 13)。そして、机面でのホモグラフィを求めることで、カメラの光軸方向の距離にかかわらず、双方のカメラ座標系間の位置合わせを可能とする。これによって、手が机上空間のどこにあらうとも、マスク処理によって熱画像の処理領域から除外され、また、どのような高さの書類スタックに対しても、安定に接触だけを検出する事が可能となる。

#### 4.2 接触検出実験

提案する接触検出手法の動作確認を行った。実験装置としては、赤外線カメラ (これまでの 2 システムと同様)、可視カメラ (Sony EVI-G20) を用いた。これらを制御する PC は、ThermoReality で使用したものと同様のものを用いた。重ねられた 2 冊の本の上層に接触すると、接触した領域が透過するという実験を行った (図 14)。なお、実験を行ったのは気温 25[°C] の室内で、接触検出処理での閾値は画素値 125 (約 30[°C]) 以上に設定した。

同図 (a)(b) にそれぞれ、投影前の書類スタックと、その下層書類を示す。同図 (c) に示すように、ユーザが手を書類に接触させた後、その手を離すと、同図 (d) に示すように、掌の接触領域で上層書類の透過が生じ、下層の書類が表示されていることが確認できる。この実験結果は、熱画像を利用した接触検出手法が有効であることを示している。処理のフレームレートは約 10[frame/sec] であり、提案する接触検出手法が、一般的な計算機上においてリアルタイムに動作することが確認できた。

#### 4.3 書類探索インタラクション

このセンシング機構にプロジェクタ (ThermoReality と同様のもの) を加え、書類探索を支援するシステムを構築した。図 15 に、システムの概観を示す。なお、プロジェクタの近くに設置された可視カメラは、



図 15 Limpid Desk システム外観



図 16 書類探索インタラクション

書類表面の反射特性やプロジェクタ・カメラの分光特性、環境光の影響を低減し、任意の色の見えを書類表面上で実現するための色補正処理のために用いられる。色補正処理に関しては、筆者らの先行研究<sup>[9]</sup>を参照されたい。

提案する書類探索インタラクションでは、ユーザが書類スタックの最上層書類に一度接触するだけで、そのスタック内の全書類を見ることが出来る(図 16)。ユーザが書類スタックの最上層の書類に触れると、システムがその接触を検出する(同図(a)(b))。同図(b)左上に投影表示されている丸枠はユーザがその位置に接触したことを示す。そして、スタック中の書類が上層から1層ずつ枠を残しながらフェードアウトしていく(同図(c))。最下層の書類が表示されると、透過処理は終了する(同図(d))。これによって、ユーザは書類スタック中の全ての書類をワンアクションで閲覧することが可能となる。

## 5. おわりに

本稿では、ユーザと実環境との熱情報のやり取りに着目したプロジェクタと赤外線カメラを用いた3種のインタラクティブシステム(ThermoReality・ThermoPainter・Limpid Desk)の概要とそこで用いられる画像処理技法について述べた。これらのシステムは、赤外線カメラから得られた熱画像より対象の温度分布情報を処理し、それに応じて投影画像を生成し、対象へそれを直接投影するという基本概念に基づいて設計された。本稿では実際に3種のシステムを構築してそれぞれの有用性を確認した。今後は、今回提案したような環境設置型だけでなく、ウェアラブルプロジェクタシステムへも熱画像センシングを適用し、プロジェクタ-サーマルカメラ型インタラクティブシステムを拡張していく。

## 参考文献

- [1] Burnay, S.G., Williams, T.L. and Jones, C.H.N., "Applications of Thermal Imaging", Adam Hilger, 1988.
- [2] Koike, H., Sato, Y., Kobayashi, Y., "Integrating paper and digital information on EnhancedDesk: a method for real-time finger tracking on augmented desk system," ACM TOCHI, Vol.8, No.4, pp.307-322, 2001.
- [3] 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.
- [4] 岩井大輔, 金谷一朗, 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.
- [5] 岩井大輔, 花谷佐和子, 堀井千夏, 佐藤宏介, "Limpid Desk: 投影型複合現実感による机上実物体の透過化", インタラクション2006論文集, 情報処理学会, pp.259-266, 2006.
- [6] <http://www-sens.sys.es.osaka-u.ac.jp/users/iwai/>.
- [7] 井口征士, 佐藤宏介, "三次元画像計測", 昭晃堂, 1990.
- [8] 高橋成治, "TWI パルス式サーモグラフィ非破壊検査装置 EchoTherm", 画像ラボ, 日本工業出版, Vol.16, No.8, pp.24-27, 2005.
- [9] 吉田壮伸, 堀井千夏, 佐藤宏介, "複合現実感のための反射色計測に基づくプロジェクタ投影テクスチャ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.1, pp.97-104, 2004.
- [10] Bandyopadhyay, D., Raskar, R. and Fuchs, H., "Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects", Proceedings of ISAR'01, pp.207-216, 2001.
- [11] Rekimoto, J., "SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces", Proceedings of CHI'02, pp.113-120, 2002.