

基礎論文

光学式皮膚感覚センサのための 示温塗料とカメラを用いた温度計測

佐藤 克成^{*1*2} 篠田 裕之^{*1} 舘 暲^{*3}

Thermal Measurement using Thermo Sensitive Ink and Camera for Vision-based Cutaneous Sensor

Katsunari Sato^{*1*2}, Hiroyuki Shinoda^{*1}, and Susumu Tachi^{*3}

Abstract — We propose a thermal measurement method using thermo sensitive ink and a CCD camera to realize the vision-based cutaneous sensor that can measure both tactile and thermal information. The thermo sensitive ink is employed to measure temperatures of the sensor surface on the basis of its color, which changes according to its temperature. The proposed method can be implemented in a simple structure so that we can integrate it with the finger-shaped GelForce technology that measures tactile information in terms of surface traction field. We implemented prototype sensors and confirmed that the proposed method can measure difference in temperature or material of objects based on the time response of measured temperature.

Keywords: vision-based sensor, temperature, surface traction field

1 はじめに

力触覚 (haptic sense) 情報の伝達は、バーチャルリアリティやテレプレゼンテーション[1]における現実感やインタラクティブ性を向上させるために、重要な技術である。ヒトは力触覚を知覚する際に、力覚 (kinesthetic sense) と皮膚感覚 (cutaneous sense) を統合的に解釈していることが知られている。そのため力触覚情報の伝達には、力覚と皮膚感覚をそれぞれ記録し再生する、センサとディスプレイが必要となる。これまでの研究の成果から、力覚に関しては、ヒトに対して提示するのに十分な情報の記録と再生が実現しつつある。その一方で皮膚感覚に関しては、十分な情報を扱うセンサやディスプレイの実現には至っていない。

我々は力触覚情報伝達の実現に向け、特に知覚感度が高い指先に着目し、指型の皮膚感覚センサを構築する。ヒトの皮膚感覚は、その情報を取得する受容器から、皮膚変形を知覚する触覚 (tactile sense) と、温度変化を知覚する温度覚 (thermal sense) に分けられる。そのため皮膚感覚のセンサとしては、触覚と温度覚を同時に計測することが求められる。

従来の皮膚感覚センサは、電子式と光学式とに分類できる。電子式のセンサ[2] [3] [4] [5] では、歪みゲージなどの感圧素子と共に、熱電対やサーミスタなどの温度計測素子を弾性体に埋め込むことで、触覚と温度覚情報の同時計測を実現している。これらの計測手法では、空間分解能の向上が問題となる。触覚情報の計測では、必要とされる空間分解能が 2 mm 以下[6] と高いため、複数の計測素子を弾性体内部に高密度に配置し配線するという、実装上の困難性が伴う。これに対し光学式のセンサ[7] [8] [9] は、カメラ以外の電子的な計測機器を必要としないため、コンパクトで高空間分解能のセンサが容易に実現できる。しかし、現状の光学式センサは触覚情報のみを計測するものであり、温度覚情報との同時計測は実現されていない。

本論文では、示温塗料とカメラを用いた光学式の温度計測手法を提案し、その有効性を示す。そして、触覚と温度覚情報の同時計測が可能な光学式の皮膚感覚センサを実現する。

2 温度計測手法の設計

2.1 温度覚の知覚特性

本論文で構築する皮膚感覚センサは、計測された情報をヒトに対して提示することを前提としている。そのため、温度計測手法はヒトの温度知覚特性を基に設計すべきである。

ヒトの皮膚内部には、温度上昇と低下それぞれに応答する 2 種類の受容器が存在し、ヒトは各受容器の応答頻度から温度を知覚する。ヒトの皮膚表面温度の知

*1 東京大学大学院情報理工学系研究科

*2 現在、日本学術振興会/慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

*3 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

*1 Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo.

*2 Currently, Japan Society for the Promotion of Science/Graduate School of System Design Management, Keio University

*3 Graduate School of Media Design, Keio University.

覚範囲は $15^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 程度であり, この範囲を外れた温度刺激は温度覚ではなく痛覚として知覚される[10]. 温度の知覚感度は, 皮膚表面の温度変化速度が速いほど良くなる傾向がある. また温刺激よりも冷刺激に対する知覚感度のほうが高く, 指先の場合, $1.9^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の冷刺激に対しては約 0.3°C の差を弁別可能であるが, 温刺激に対する弁別閾は $2.1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ で約 0.5°C である[11]. 無毛部における温度受容器は, 100 mm^2 あたり $50\sim 70$ ユニット存在する[12]. しかし, 温度覚の空間分解能は低く, 温度知覚精度が優れている掌においても, 温度刺激の位置定位は平均で 19 mm 程度ずれる[13].

ヒトは皮膚の温度変化速度の差を知覚することで, モノの素材の差を判別できる. Lederman ら[14] は, 表面形状の等しい金属と木材に触れた場合, 指の温度変化のみから 900 ms 以内にそれらを判別できることを示している. Ino ら[15] は, 接触後の温度変化からアルミニウムや木材を判別できること, またガラス材やゴム, ポリアクリルの判別は困難であることを示している.

2.2 温度計測の要件

前節で述べた温度覚の知覚特性から, 構築する皮膚感覚センサに要求される温度計測の精度をまとめる.

温度計測範囲としては, ヒトが温度覚を感じられる $15^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ が目標となる. ただし, ヒトは指先温度の変化からモノの温度や素材を判別できることが知られている. そのため, センサがヒトの体温と同程度の温度を有していれば, 体温付近の狭い範囲における温度変化を測定できれば十分と考える. 温度計測の分解能としては, 約 $2.0^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の温度刺激に対しては 0.3°C 程度の精度が求められる. また, 少なくとも金属と木材など伝熱特性の大きくことなる素材の差を, 温度変化として判別できることが必要となる. 空間分解能の指標としては, 第一にヒトの温度知覚の空間分解能が挙げられる. しかし, 温度計測位置が粗な場合, 物体の接触位置が計測位置と離れるほど温度計測の時間応答が低下してしまう. そこで本研究では, ヒトの温度受容器神経密度を参考に, 約 1 mm を温度計測間隔の目標値とする.

さらに温度変化を計測する場合は, 皮膚感覚センサの物理パラメータが重要となる. まず, 皮膚感覚センサの形状や柔軟性がヒトの指と同等であることが望ましい. センサがモノに触れたときに, ヒトの指と同様に変形することで, センサと物体との接触面積がヒトの指が触れた場合と同等になる. 接触面積は温度変化の度合いに影響するため, これを再現することで, ヒトの指に対して提示するための温度情報をより忠実に計測できる. また, 温度や伝熱特性もヒトの指と同様であることが望まれる. 例えば, ヒトが 25°C 程度の金属に触れた場合, 最初は冷たさを感じ, 徐々に金属が温まる様子を感じられる. そして, 指を離れた後にも触れた部分は温かい状態が

続き, 再度同じ場所に触れた際には, 接触直後から温かみを感じられる. センサがヒトの温度や伝熱特性を模擬することで, このような接触対象の温度変化を再現してのより忠実な温度計測が可能になる. 以上のようにセンサがヒトの指を模擬することは, 聴覚情報の記録におけるダミーヘッドに相当する考えであり, 温度覚だけでなく触覚情報の計測においても重要となる.

3 光学式の温度計測手法を用いた皮膚感覚センサ

前章で述べた設計に基づき, 示温塗料を用いた光学式の温度計測手法, およびこれを用いた皮膚感覚センサを提案する.

3.1 光学式皮膚感覚センサの構成

光学式皮膚感覚センサは, 主に指型に成形した弾性体と CCD カメラ, LED から構成される(図 1). 弾性体は表面が黒色弾性体層, 内部が透明弾性体層と層状になっている. 黒色弾性体層により外光を遮断し, 画像処理の安定性を高める. 2 種類の弾性体層の境界部分には, 温度計測に用いる示温塗料を配置する. また, 触覚と温度覚情報の同時計測を実現するために, 光学式の触覚センサの技術を統合する. 本研究では, センサ内部のマーカ移動量からセンサ表面に加わるカベクトル分布を計測する, GelForce 技術[9] を採用する. そのため, 透明弾性体層の弾性体表面付近には, 深さの異なるマーカ群を配置する. LED はカメラ用の照明の役割を果たすだけでなく熱源としても作用し, 弾性体内部の温度は LED 照明に近い部分ほど高くなる. この LED の発熱により, センサ表面の温度は, 均一とはならないがヒトの指表面と同等の温度に設定できる.

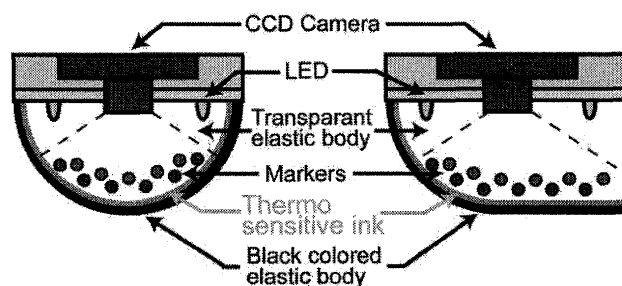


図1 光学式皮膚感覚センサの構成.

Fig.1 Configuration of vision-based cutaneous sensor.

3.2 光学式の温度計測手法

提案する温度計測手法では, カメラが撮影する示温塗料の色相情報から, センサ表面の温度変化を推定する. 示温塗料とは, 温度に伴い変色反応を示す物質(感温染料や感温液晶)である. 温度分布の可視化が可能であり, 従来は流体の温度場と速度場の同時計測手法[16]などに用いられている.

ここで、センサの表面に物体が接触したときの温度変化を、ヒトの指の温度変化をモデル化した従来研究[10]を参考に、2つの半無限体の接触を仮定して考える。この場合、センサと物体の接触面の温度は、瞬間的に T_s に変化する。

$$T_s = \frac{T_{\text{object},i} (k\rho c)_{\text{object},i}^{1/2} + T_{\text{sensor},i} (k\rho c)_{\text{sensor},i}^{1/2}}{(k\rho c)_{\text{object},i}^{1/2} + (k\rho c)_{\text{sensor},i}^{1/2}} \quad (1)$$

T_i は初期温度、 k は熱伝導率、 ρ は密度、 c は熱容量を表し、*object* と *sensor* はそれぞれ物体とセンサの物性であることを示す。また、 $(k\rho c)^{1/2}$ は温度接触係数と定義され[17]、物体の温度変化特性を決定する重要な指標である。さらに、接触から t 秒後におけるセンサ表面から深さ x の地点の温度 $T(x,t)$ は、以下の式で表せる。

$$T(x,t) = T_s + (T_{\text{sensor},i} - T_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2(\alpha_{\text{skin}} t)^{1/2}} \right) \quad (2)$$

α は $(k\rho c)_{\text{skin}}$ と定義され、熱拡散率と呼ばれる。また、深さ x_i に配置した示温塗料の温度 $T(x=x_i)$ は、カメラによって検出される示温塗料の色相 h_i と以下の式で対応付けられる。

$$T(x=x_i) = g(h_i) \quad (3)$$

$g(\cdot)$ は色相から温度への変換式であり、予めセンサ内部における示温塗料の温度と色相との関係を調べることで作成する。色相を用いることで、弾性体の変形により示温塗料の明度が増減した場合にも、明るさの影響を受けずに安定した温度算出が行える。以上の関係により、提案する温度計測手法では、センサ表面付近に配置した示温塗料の温度変化を算出することで、センサが物体と接触した際の表面の温度変化を測定できる。

光学式の温度計測手法は、弾性体の素材や LED の発熱量を適切に設定することで、センサのヤング率や温度接触係数、温度をヒトの指に近づけることが可能である。また示温塗料は、電子式の温度計測素子に比べ弾性体の柔軟性への影響が小さいため、示温塗料が存在する弾性体表面からの深さを小さくし、時間応答性の高い温度計測が実現できる。そして、カメラによって撮影できる示温塗料の存在範囲すべてが計測面となるため、高い空間分解能を実現できる。さらに、構成が非常にシンプルのため、光学式の触覚計測手法を統合した皮膚感覚センサとしての実装も容易に実現できる。

3.3 触覚情報との同時計測

温度覚に加え触覚情報を計測するために、本研究では光学式のカベクトル分布センサ GelForce の技術を統合する。弾性体表面に外力が加えられた場合、弾性体内部のマーカは力の向きや大きさ・分布に応じた移動を示す。GelForce 技術では、このカベクトル分布とマーカ移動量の関係式を予め導き、その逆問題を解くことで、カメラが検出するマーカ移動量 \mathbf{u} から弾性体表面に加わるカベクトル分布 \mathbf{f} を算出する。

$$\mathbf{f} = \mathbf{H}\mathbf{u} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{H} はカベクトル分布からマーカ移動への変換行列であり、実測に基づき作成される[9]。

なお、従来の GelForce 技術では色付きマーカを使用しているが、この場合、示温塗料がマーカによって遮蔽され、空間分解能が低下してしまう。これを回避するためには、マーカを透明な赤外遮断フィルムで作成し、力分布の計測には赤外光領域を利用する、などの工夫が必要と考える。

4 光学式温度計測手法の評価

光学式の温度計測手法の有効性を確認するために、色相と温度の対応関係と、異なる温度の金属に触れた場合の時間応答を計測した。

4.1 実装

提案する温度計測手法の有効性を検討するために、光学式温度センサ(図 2a)を実装した。

透明弾性体には、ヒト肌と同等のヤング率 (5.0×10^4 Pa) を有するウレタンゲル(透明ヒト肌ゲル, 株式会社エクスールコーポレーション)を用いた。半球と円柱を組み合わせた形状とし、大きさは $18 \times 9 \times 19 \text{ mm}^3$ とした。黒色弾性体層は、ウレタンゲルに粉末状の黒鉛を混ぜることで作成し、厚さは 1 mm とした。一般的なウレタンゲルの伝熱特性は、熱伝導率が $0.12 \sim 0.18 \text{ W/mK}$ 、密度が $1.05 \sim 1.31 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、熱容量が 1900 W/kgK 程度である。

黒色弾性体層と透明弾性体層の間には示温塗料を配置した。示温塗料としては、粉末タイプと液体タイプ、そして液晶を紙に塗布したシートタイプがある。弾性体内部に埋め込む場合は、弾性体の柔軟性を妨げない粉末タイプが適しているが、本研究においては入手の容易さからシートタイプ(クロマティック液晶シート, 株式会社日本カプセルプロダクツ)を用いた。この液晶シートの色は、温度低下に伴い青緑、緑、紫と連続的に変化する(色変化が生じる温度はカタログ値として約 $32^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$ であるが、使用環境によって変化するため、構築したセンサ毎にキャリブレーションが必要となる)。液

晶シートが弾性体の柔軟性を損なうことを避けるため、シートを1辺5mmの正方形に切り分け、3×3の計9枚を並べた(図2b)。

CCDカメラとしては640×480ピクセル(VGA)のフルカラー画像(8bit, RGB形式)を15fpsで取得可能なUSBカメラ(株式会社ビュープラス)を採用した。このカメラでは、単焦点(1.14mm)で広視野角(V101°×H123°×φ140°)の小型レンズを使用している。この時、カメラ画像の10ピクセルが弾性体内部の感温液晶シートの0.5~1.0mmに相当する。

照明には、白色のチップLED(AQ-KS1609WC, audio-Q Inc.)を使用し、レンズを囲むように8個のLEDを並べ直列に接続した。LEDに流れる電流量、すなわち光量は、可変抵抗により調整可能とした。またLEDの発熱により、センサ表面先端部分(画像の中心位置付近)の温度は室温26°Cの環境において約35°Cと、ヒトの指の体温の平均値と同程度となるように調整した。

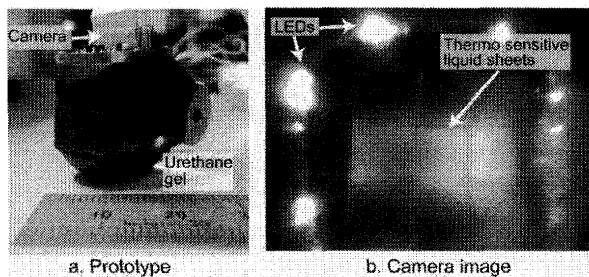


図2 (a)温度センサと(b)カメラ画像。

Fig.2 (a) Prototype of thermal sensor and (b) its camera image.

4.2 温度と色相の関係

実装した温度センサにおける、感温液晶シートの色相と、センサ表面温度の対応関係を調べた。計測環境を図3a, bに示す。温度センサを上下方向に移動するスライダに固定し、弾性体表面の先端部分をクーラプレート(NCP-2215, 日新理化株式会社)の表面に50gF程度のもので押し当てた。クーラプレートの温度を31°Cから36°Cまで0.5°C刻みで変化させ、それぞれの温度における感温液晶シートの色相をカメラで計測した。

クーラプレートと液晶シートの間には弾性体の層が存在するため、液晶シートの温度、すなわち色相が十分に变化するためにはある程度の時間が必要となる。そこで、クーラプレートの温度が目標温度に到達後、31°Cの場合は5分程度、それ以降は2分程度放置した後カメラ画像を取得した。この場合、センサ表面の温度と示温塗料の温度差は、(2)式より0.1°C未満になる。カメラ画像は、各目標温度に対し5回ずつ取得した。

カメラ画像から色相情報を抽出する際には、まず、カメラ画像中の液晶シートの中心位置を目視により設定し、その位置から10ピクセル四方の範囲を切り出した。10

ピクセル四方のブロック毎に温度計測を行うことで、目標とする計測間隔1.0mmを実現できる。次に、OpenCV(Willow Garage)の関数を用いて、カメラの取得するRGB画像をHSV画像へと変換した。最後に、ブロック内のH値の平均値を算出し、温度計測に用いる色相情報とした。

計測結果を図4に示す。各プロットは5つの画像から得られた液晶シートの色相の平均値である。31.5°C以上の範囲において、色相と温度は1対1の対応関係を示している。得られた温度と色相の関係を基に、(3)式における変換式 $g(\cdot)$ を導出した。本論文では、温度計測範囲を0.5°Cずつの区間に分割し、各区間において線形近似式として変換式を求めた。以下の温度計測では、ここで求めた変換式を用いて温度計測を行った。また、構築した温度センサにおける分解能を、導出した線形変換式の傾きと計測された色相の分散値の積と定義し、各計測温度において算出した。算出した分解能値を図4中にエラーバーとして示す。35°C以上の範囲では温度変化に伴う色相の変化量が少なく、色相の分散が大きいため、分解能は約0.3°Cとなった。一方で、31.5°C~35°Cの範囲では分解能は0.1°C未満となった。

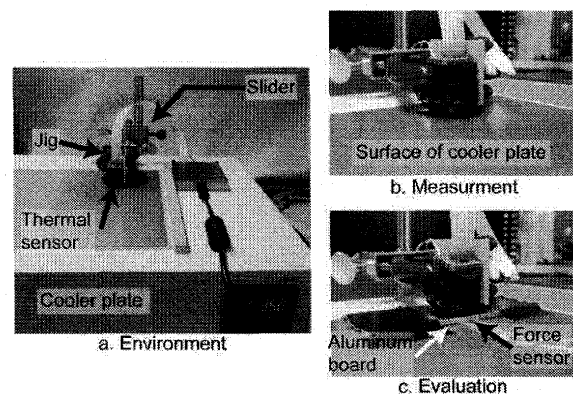


図3 (a, b)色相の計測環境と(c)時間応答の評価環境。

Fig.3 Environment for (a, b) measurement of hue and (c) evaluation of time response.

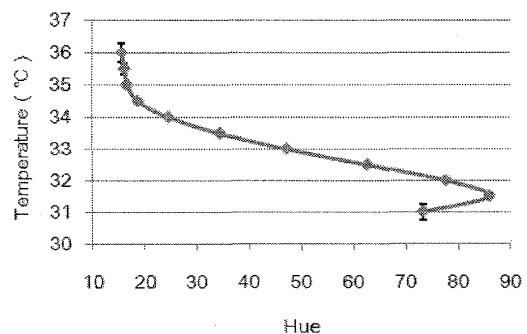


図4 対象物の温度と液晶シートの色相との関係。

Fig.4 Relationship between temperature of object and hue of thermo sensitive sheet.

4.3 温度計測の時間応答

提案手法における温度計測の時間応答を調べた。クーラプレートの上に厚さ 2 mm のアルミ板を置き、クーラプレートとの間にフィルム状のカセンサ (FlexiForce, ニッタ株式会社) を挟んだ (図 3c)。カセンサの出力は 200 Hz で計測し、温度センサとアルミ板との接触検出に用いた。表面の温度は、接触が検出された瞬間から 15 Hz 程度で計測した。ここでは、カメラ画像中の液晶シートの中心位置を目視により設定し、そこから示温塗料の領域を 10 ピクセル四方のブロックに分割し、ブロック毎に温度を算出した。

まず、アルミ板の温度を 32°C に保ち、弾性体表面の中心位置をアルミニウムに接触させ、温度変化を観察した。計測された温度分布を CG で可視化した結果を図 5 に示す。計測された温度の高さを、CG 中の面の高さとして色に対応付けた。時間経過に伴い、センサ表面の温度が接触面を中心に徐々に低下していく様子が見られる。画像中の手前と奥の部分は、LED 照明との距離が近いことにより温度が高くなっている。また、各液晶シートの間には不連続点が見られるが、これは液晶シートのつなぎ目の感温液晶シートが存在しない部分の影響によるものである。

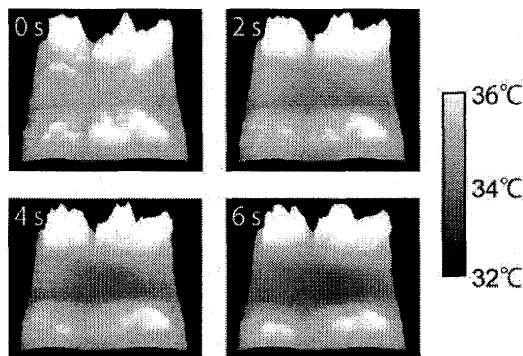


図5 計測された温度分布の時間変化。

Fig.5 Time variation of the measured temperature distribution.

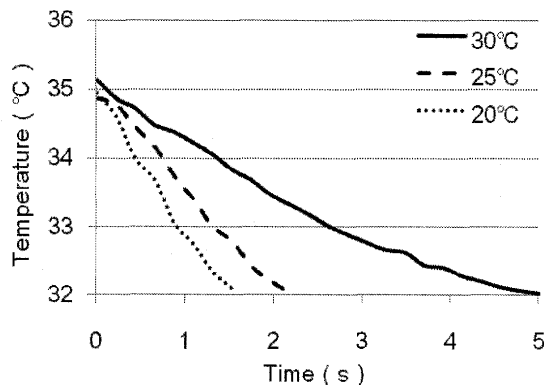


図6 温度計測の時間応答。

Fig.6 Rate of thermal change.

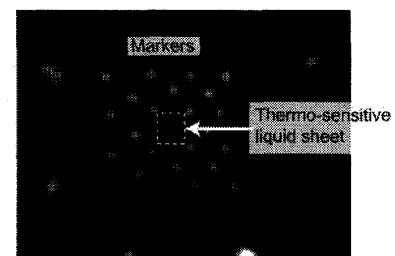
次に、アルミ板の温度を 30°C、25°C、20°C とし、温度センサ接触後の時間応答を観察した。感温液晶シートの中心部における温度変化の様子を図 6 に示す。アルミ板の温度が低いほどセンサが計測する温度の変化速度が速くなり、20°C のときで 2°C/s 程度である。

5 温度とカベクトル分布の同時計測

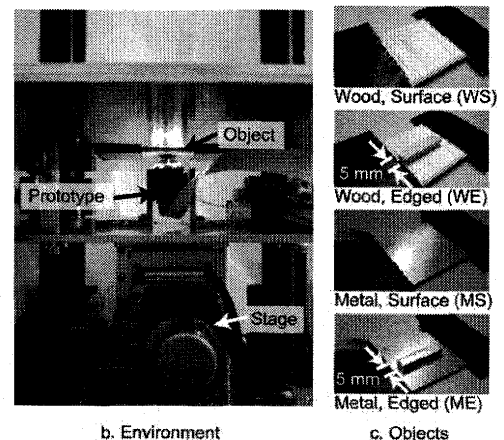
光学式皮膚感覚センサのプロトタイプを構築し、温度とカベクトル分布の同時計測実験を行った。

5.1 光学式皮膚感覚センサのプロトタイプ

センサを構成する弾性体や CCD カメラ、LED、示温塗料には、4 章で構築した温度センサと同様のものを用いた。構築したプロトタイプセンサでは、センサ中央部分のみを温度計測面と設定し、2.5 mm 四方のブロック状とした感温液晶シートを、弾性体表面内側の中央に配置した (図 7a)。また、カベクトル分布を計測するために、弾性体表面の内側に、16 個の赤色蛍光マーカーと 8 個の緑色蛍光マーカーを配置した。赤色マーカーは黒色弾性体層と透明弾性体層の境界に、緑色マーカーは透明弾性体層の内部で境界からの深さが 1 mm の位置に、それぞれ 3mm 間隔で 2 次元正方格子状に配置した。マーカーはすべて直径 1 mm の円形とした。また、マーカーにより液晶シートが遮蔽されるのを避け、中心付近の赤色マーカー 4 つは液晶シートの 4 隅付近に配置した。



a. Camera Image



b. Environment

c. Objects

図7 (a) 皮膚感覚センサのカメラ画像。(b) カベクトル分布と温度の計測環境。(c) 試料片

Fig.7 (a) Camera image. (b) Measurement environment of surface traction field and temperature. (c) Objects.

温度とカベクトル分布の計測には、液晶シートとマーカ位置を認識する必要がある。マーカ位置の認識には、CCDカメラが取得するRGB画像のR値とG値を用いた。蛍光マーカを用いているため、適切な閾値を設定することで、液晶シートの変色によるノイズを除去できる。また、液晶シートの4隅に存在する4つの赤色マーカの位置の平均値を、液晶シートの中心位置とした。液晶シートの中心位置を検出した後は、4.3節の実験と同様に中心位置を基準として10ピクセル四方の範囲を切り出し、色相を算出した。

マーカ移動からカベクトル分布を算出するために、(4)式の変換行列 \mathbf{H} を導出した。導出は論文[9]中に示される手法に基づいて行った。まず、センサ表面において2.5mm間隔の3×5点をカベクトルの計測点と設定し、それぞれの計測点に対し3軸方向の既知の力を加え、マーカ移動量をカメラで取得した。加えた力と計測されたマーカ移動の結果を基に、15の計測点に対する変換行列 \mathbf{H} を導出した。

5.2 計測環境

構築したプロトタイプセンサを用いて、形状と素材の異なる試料片と接した際の温度とカベクトル分布を計測した。試料片はアルミニウム板に張り付け、室温26°Cに1分以上放置し、温度を室温と同程度にした。センサをステージ(VSQ-601XYV, 中央精機株式会社)に固定し、それぞれの試料片を弾性体表面の中央部分に押し当て、計測されたカベクトル分布と温度を記録した(図7b)。試料片はセンサ表面に対して1s間かけて2mmだけ押し当て、その後4s間放置した。試料片の形状は平面と凸面(幅5mm)、素材は木(合成木材)と金属(アルミニウム)とし、それらの組み合わせから4種類の試料片(図7c)を用意した。

5.3 計測結果

計測結果を図8から図10に示す。図8は、押し当て開始から2秒後の計測結果を可視化したものである。矢印の長さや向きは計測されたカベクトルの大きさや向きを示し、矢印と指型形状を表すワイヤフレームの色は温度を示す。また図9と図10は、それぞれ計測されたカベクトルの大きさの和と温度の時間変化を示す。結果から、試料片の形状に応じたカベクトル分布が計測されていることがわかる。さらに、試料片の素材が金属の場合にのみ温度が低下し、平面は凸面の場合よりその低下量が大きい。

6 考察

4章と5章では、提案した温度計測手法を用いたセンサを実装し、センサ自身の温度よりも冷たいモノに触れた場合の温度変化を計測した。

4.3節では、異なる温度のアルミニウムと接した際に、

アルミニウムの温度に対応した温度変化を計測できた。5.3節では、室温中に放置した金属と木材と接した場合、素材の差を温度変化として計測できた。同じ温度の金属と接した場合には、接触面の広さが広いほど温度変化の度合いが大きくなった。さらに、試料片の形状に応じたカベクトル分布を温度と独立に計測できた。以上より、示温塗料を用いた温度計測手法を用いることで、物体の温度の差や伝熱特性の差といった温度情報を計測できることを確認した。また、触覚と温度覚情報の同時計測が可能な皮膚感覚センサを実現できることを確認した。

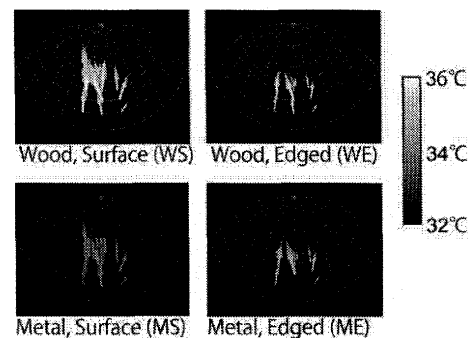


図8 計測されたカベクトル分布と温度。

Fig.8 Measured forces and temperature.

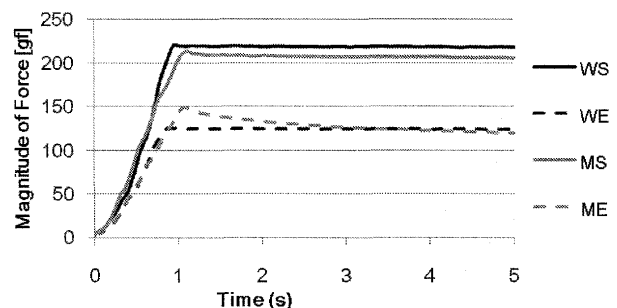


図9 計測された力の大きさの時間変化。

Fig.9 Time response of measured force magnitude.

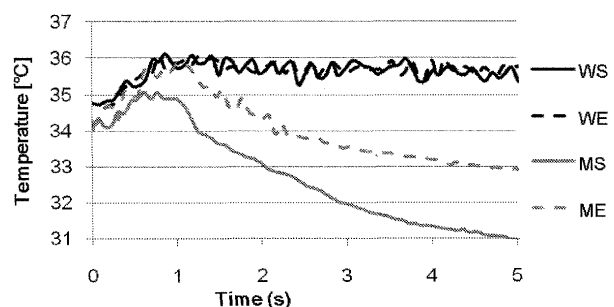


図10 計測された温度の時間変化。

Fig.10 Time response of measured temperature.

提案する光学式皮膚感覚センサは、計測した情報をヒトの指に対して提示することを目的としている。そこで以下では、ヒトに提示するのにより適した温度計測を行うための改善手法を検討する。

まず、計測範囲に関しては、示温塗料の色が変化する温度範囲の大きさに依存し、一般的な示温塗料ではその大きさは $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 程度である。本論文で提案する温度センサは、絶対的な温度ではなく体温と同程度の温度からの変化を計測するものであるため、温度計測範囲として十分と考える。一方で、示温塗料の特性は、温度計測の分解能にも影響する。本論文で用いた感温液晶シートでは、4.2 節の計測結果から、 35°C より低い範囲では 0.1°C 未満であるが 35°C 以上では 0.3°C 程度と、温度範囲によって異なっている。そのため図 10 のグラフにおいては 35°C 以上の計測結果において振動が見られる。温度計測範囲において分解能の変動を抑えるためには、温度変化に対する色相変化特性が可能な限り線形かつ安定した示温塗料を選択することが望ましい。

温度計測の時間応答に関しては、今回の計測では最大で $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 程度であった。これに対し、過去の知見 [10] に基づけば、ヒトの指が $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 程度のアルミニウムに接した場合、 $6^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上の温度変化速度を示すことが予想される。温度変化速度が小さい理由として、熱接触係数の影響が考えられる。構築した皮膚感覚センサにおいて使用したウレタンゲルは、熱接触係数がヒトの指の $1/2\sim 1/4$ 程度である。この場合、熱伝導の速度はヒトの指の場合に比べて低下する。そのため、弾性体をヤング率だけでなく熱接触係数も考慮して選定することで、時間応答の改善が期待できる。

本論文では、主に弾性体先端 1 地点での温度計測による評価を行っており、分布計測に関しては図 5 を示すに留まっている。しかし実用上は、温度変化を分布として評価し、より厳密な接触面の温度変化計測を行うべきと考える。この場合、カメラ画像の周辺部において、透明弾性体の曲率やレンズの色収差など光学系による計測誤差の影響が懸念される。そのため温度分布計測を行う場合は、より厳密なキャリブレーションと評価が必要と考える。また、センサの温度をヒトの指と同等にするために、本研究では LED による発熱を利用した。しかしこの場合、図 5 のように弾性体内部での場所による温度の差が 2°C 以上と大きくなる。ヒトの指のように表面の温度を均一化するためには、弾性体内部における熱の供給方法や配置を検討する必要がある。

7 おわりに

本論文では、示温塗料を用いた光学式の温度計測手法を提案し、触覚と温度覚の同時計測が可能な光学

式の皮膚感覚センサを実現した。光学式皮膚感覚センサを用いることで、接触したモノの形状(凸面と平面)に加え、物体の温度や素材(金属と木材)の差を判別可能であることを示した。また、計測された情報をヒトに対して提示する、という応用に向けた改善点を検討した。

今後は、構築した皮膚感覚センサが計測した情報を再生可能な皮膚感覚ディスプレイを開発し、さらに力覚のセンサやディスプレイと組み合わせることで、力触覚情報の伝達を実現していく。

謝辞

本研究の一部は、特別研究員奨励費および戦略的創造研究推進事業(JST-CREST)「さわれる情報環境」プロジェクトの助成を受けたものである。

参考文献

- [1] S. Tachi and K. Yasuda: Evaluation Experiments of a Telexistence Manipulation System; Presence, Vol.3, No.1, pp.35-44 (1994)
- [2] D. Siegel, I. Garabieta, and J. M.Hollerbach: An integrated tactile and thermal sensor; Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp. 1286-1291 (1986)
- [3] G.J. Monkman and P.M. Taylor: Thermal Tactile Sensing; IEEE Trans. on Robotics and Automation; Vol. 9, No. 3, pp. 313-318 (1993)
- [4] D. Taddeucciand, C. Laschi, R. Magni, P. Dario, and A. Starita: An approach to integrate tactile perception; Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp. 3215-3221 (1996).
- [5] 岩瀬智紀, 高椋慎也, 細田耕: 触覚と温度感覚を持つ人間型柔軟指による材質識別; ロボティクス・メカトロニクス講演会講演集 (2008)
- [6] F. Bega-Bermudez and K.O. Johnson: Differences in spatial acuity between digits; Neurology, Vol. 56, pp. 1389-1391 (2001)
- [7] N.J. Ferrier and R.W. Brockett: Reconstructing the Shape of a Deformable Membrane from ImageData; Int'l Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 9, pp. 795-816 (2000)
- [8] M.K. Johnson and E.H. Adelson: Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape; Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1070-1077 (2009)
- [9] K. Sato, K. Kamiyama, N. Kawakami, and S. Tachi: Finger-Shaped GelForce: Sensor for Measuring Surface Traction Fields for Robotic Hand; IEEE Trans. on Haptics, vol. 3, no. 1, pp. 37-47 (2010)
- [10] L.A. Jones and H.N. Ho: Warm or Cool, Large or Small? The Challenge of Thermal Displays; IEEE Trans. on Haptics, Vol. 1, No. 1, pp. 53-70 (2008)
- [11] J.C. Stevens and K.C. Choo: Temperature Sensitivity of the Body Surface over the Life Span; Somatosensory and Motor Research, vol. 15, pp. 13-28 (1998)
- [12] I. Darian-Smith: Thermal Sensibility; Handbook of Physiology: The Nervous System, I. Darian-Smith, ed., Am. Physiological Soc., pp. 879-913 (1984)

- [13] P.W. Nathan and R.C. Rice: The Localization of Warm Stimuli; *Neurology*, vol. 16, pp. 533-540 (1966)
- [14] S.J. Lederman and R.L. Klatzky: Relative Availability of Surface and Object Properties during Early Haptic Processing; *J. Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 23, pp. 1680-1707 (1997)
- [15] S. Ino, S. Shimizu, T. Odagawa, M. Sato, M. Takahashi, T. Izumi, and T. Ifukube: A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface; *Proc. of the 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 220-224 (1993)
- [16] M. Ozawa, U. Miller, L. Kimura, and T. Takamori: Flow and Temperature Measurement of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-Sensitive Liquid Crystal; *Experiments in Fluids*, Vol. 12, pp. 213-222 (1992)
- [17] J.A. Businger and K.J.K. Buettner: Thermal Contact Coefficient (A Term Proposed for Use in Heat Transfer); *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 18, No. 3, pp.422-422 (1961)

(2011年3月7日)

[著者紹介]

佐藤 克成 (学生会員)



2006年東北大・工学部・情報学科卒業。同年より東大大学院・情報理工学系研究科・システム情報学科所属。2008年より学振特別研究員(DC1)。2011年より慶應大学大学院・メディアデザイン研究科リサーチャー。2011年博士(情報理工学)。同年より学振特別研究員(PD)として慶應大学大学院・システムデザイン・マネジメント研究科所属。トレイグジスタンスにおける力触覚情報の計測と提示に関する研究に従事。情報理工学系研究科研究科長賞, 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。

篠田 裕之 (正会員)



1988年東大・工学部・物理工学科卒業。1990年同大・計数工学科修了, 同年より同大学助手, 1995年博士(工学)。同年東京農工大講師, 1997年同大助教授, 1999年UC Berkeley 客員研究員を経て, 2001年東大大学院・情報理工学系研究科・助教授, 2007年同大准教授。触覚のセンサとディスプレイ, 二次元通信, ヒューマンインタフェース, 電磁波・音響・生体計測などの教育と研究に従事。計測自動制御学会などの会員。

舘 暲 (正会員)



1968年東大・工学部・計数工学科卒。1973年同大大学院博士課程修了。工学博士。東大工学部助手, 通産省機械技研・主任研究官・バイオロボティクス課長, MIT客員研究員, 東大・先端研・教授などを経て, 1994年同大・工学部・計数工学科教授, 2001年同大大学院・情報理工学系研究科教授, 2009年慶應大学大学院・メディアデザイン研究科教授。東京大学名誉教授。トレイグジスタンス, 人工現実感などの研究を行う。IEEE/EMBS論文賞, 通産大臣表彰, 国際計測連合(IMEKO)特別勲功賞, IEEE-VR Career Award, 文部科学大臣賞など受賞。IMEKOロボティクス会議議長, 計測自動制御学会第46期会長, 日本バーチャルリアリティ学会初代会長。