

[研究助成 (A)]

人間と機械の安全な触れ合いを実現する熱変色センサの開発

2251006

研究代表者
(助成金受領者)慶應義塾大学 理工学部
物理情報工学科

専任講師

大澤 友紀子

[研究の目的]

人間と機械の調和には、触れ合い（物理的な接触）の安全性を確保すると同時に、人間にとってその接触は快適かどうかが重要となる。特に機械システム（ロボットなど）の外装（ロボットのスキン）は見た目や触感など、ロボットを印象付ける支配的な要素となる。しかしこれまで多くの研究はロボットの表面に多数のセンサを取り付けるなど、外部の認識精度の向上に焦点が当てられており、人にとって好ましいとされる外装の設計については十分に考慮されてこなかった。本研究は多数のセンサをロボット表面に取り付けるのではなく、接触対象に応じて色に変化するロボットのスキンを開発することで、ロボットの外装自体をセンサ化する。これにより表面にセンサを取り付ける必要がなくなり、人間にとって心地よい触感を残しながら、色の変化の過程から接触対象の材質・形状の認識を実現することができる。本課題の達成により人間の動作や人肌・着衣など接触部位を考慮した安全な接触が可能となり、介護をはじめとする繊細なタスクへのロボット応用が想定され、人間と機械の調和の促進が期待できる。

[研究の内容、成果]

1. 熱変色顔料を用いたセンサの開発

1.1 材料識別の原理

提案するセンサ表面には、thermochromic-

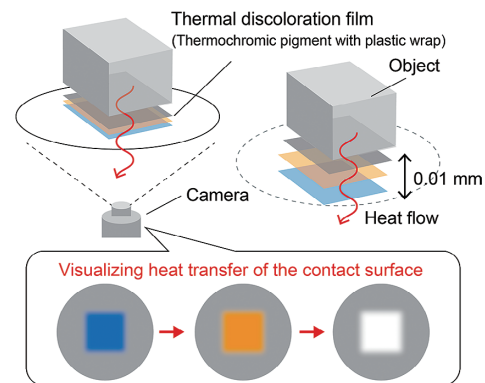


図1 熱変色センサの原理

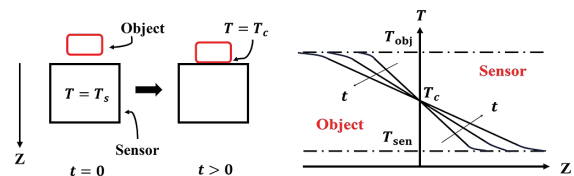


図2 センサの熱伝達モデル

pigment と呼ばれる熱変色顔料を塗布した薄膜が複数層重ねられている。本顔料はある温度閾値を超えると化学反応により無色になる特性があり、異なる色・温度閾値の顔料を組み合わせることで、温度応答と色変化に所望の相関を持たせることができる。本研究では複数の基礎実験により、色・温度閾値が異なる3層の熱変色顔料を塗布したフィルムを用いて熱の流れを可視化し、その色変化の様子をセンサ内部のカメラによって取得、HSV または LAB 色空間に変換することで色の変化を数値化する（図1）。

センサの表面温度と接触対象の初期温度に温度差がある場合、接触面に熱流が発生し、それぞれの表面温度は接触面温度に収束する（図2）。

収束する接触面温度 (T_s) は、モデルに基づき (1) 式のように表すことができる。

$$T_s = \frac{T_{obj}e_{obj} + T_{sen}e_{sen}}{e_{obj} + e_{sen}} \quad (1)$$

ここで、 T 、 e はそれぞれセンサ（下付き文字 sen）と接触物体（下付き文字 obj）の初期温度と熱浸透率を示す。したがって、接触面温度はセンサ・接触対象の初期温度と材料特性（熱浸透率）によって決まることがわかる。収束する接触面温度によって温度応答が変化するため、それぞれの初期温度が定まっている場合はその温度変化から物体の材料特性を抽出することができる。本センサはこの温度変化が色変化として現れるため、材料の空間分布が可視化される。

1.2 提案センサの構成

いくつかの試作を経て、開発したセンサの構成を図 3 に示す。センサの表層に 3 層の熱変色顔料を塗布したフィルム（厚み 0.01 mm）、センサ下層にはカメラが設置され、全体は 3D プリンタで作製した黒色（外光を遮るため）のボディで構成されている。

3 層の熱変色顔料について、本研究ではセンサの内側から青色（温度閾値：31℃）・橙色（温度閾値：43℃）・黒色（温度閾値：50℃）の組み合わせを採用した。これは、接触対象が加熱されている場合、接触後に表面温度が室温から上昇していく過程で、HSV 色空間の H 値（色相）が徐々に減少することで温度上昇との相関を実

現するためである。表層の黒色層は、初期段階で外光を遮断し、温度上昇に合わせて色相（または明度）を上げていく目的で用いられている。

基礎検証のため、センサ表面に温度制御した熱電変換素子を接触させ（図 4）、温度を室温から 50℃ へと上昇させたときの色変化を H 値に変換した。熱電変換素子の表面温度を上昇させていくと、カメラから見て熱変色部が初期状態は青色、接触面温度が 31℃ に達すると青色層が無色（このときカメラは橙色を捉える）、さらに 43℃ に達すると橙色層が無色（このとき黒色層も変色が始まっているためカメラは灰色～無色）と色が変化していき、H 値が温度との負の相関を持っていることが実験的に示された（図 5）。

色と温度の相関については、本配色以外にも作り出すことが可能である。たとえば温度差 10℃ 以下の小さな温度域での変化が検出できれば良い場合では、一層の熱変色顔料でも十分に機能することが基礎実験により確かめられている。また LAB 空間の L 値（明度）など、用いる色空間の変換パラメータによって、温度との相関が出る組み合わせはさまざまである。今回は青色から橙色にかけて値が減少する H 値を用いたため、このような配色を選択した。

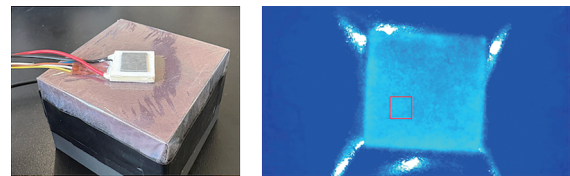


図 4 熱変色実験の様子

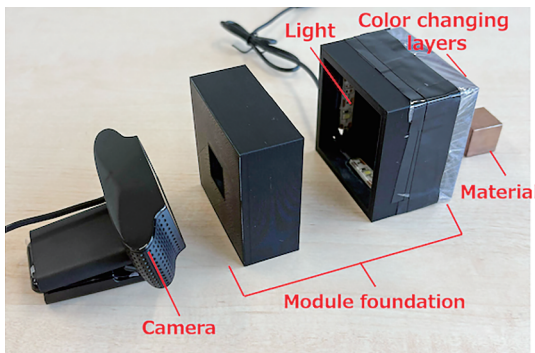


図 3 開発した熱変色センサの構成

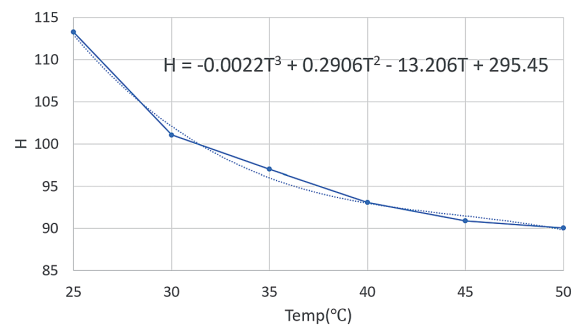


図 5 変色（H 値）と温度変化の相関

2. 提案センサの評価

2.1 材料特性の可視化

図6(a)に示す接触対象物体(20 mm × 20 mm × 20 mm)の銅・アクリル・スポンジキューブについて、材料特性の可視化における評価実験を実施した。まず1つのキューブについて図6(b)のように提案センサの表面にキューブを接触させ、各材料の特性が色変化に現れるか検証を行った。ここで、センサと接触対象は温度差が必要であるため、キューブはあらかじめ40°Cに熱した状態でセンサと接触させた。

またセンサが抽出し得る材料特性の空間分解能を検証するため、図6(c)のように異なる材料のキューブを隣り合わせにセンサと接触させる実験を行った。センサ接触時の熱応答はそれぞれ物体が持つ物理パラメータのみを抽出できるように、接触面を固定するために同じ接触面積(体積)で、熱浸透率の異なる材料を接触対象として選んだ。

それぞれの物体に接触した際のセンサの変色の様子は図7の通りである。

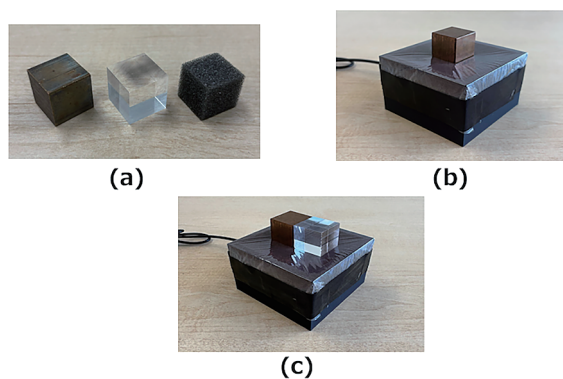


図6 材料識別の接触対象

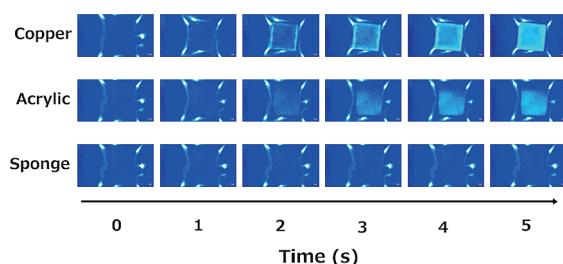


図7 銅・アクリル・スポンジに接触した際の色変化

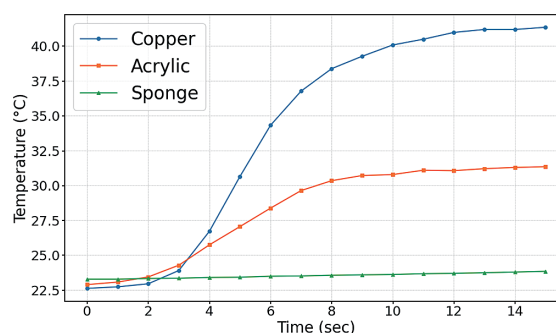


図8 色変化から変換した温度応答値

図7を見ると、銅のような熱浸透率の高い材料は熱浸透率の低いアクリルやスポンジと比較して変色が大きいたことがわかる。この色変化についてH値に変換し、図5で得られた温度との相関式を用いて温度応答値に変換すると図8のプロットが得られた。

図8より、3種類の接触対象について明確に区別ができることがわかる。本提案センサを温度センサとして用いるためには、温度と色変化の相関係数についてさらに検証が必要であるが、材料を識別するという目的においては有用であると言える。

また、図6(c)で示すように銅とアクリルキューブを隣り合わせでセンサに接触した際の変色の様子を図9に示す。これにより、銅のキューブとアクリルキューブの部分での変色の様子が異なっていることが見て取れる。また本実験結果から、接触対象の材料、形状、位置関係の情報が一度に得られていることがわかる。従来の温度・熱流束センサでは、このような温度分布の情報を得るために無数のセンサを敷き詰める必要があり、さらに形状まで把握するのは困難である。提案するセンサでは、接触時の熱の移動を可視化することで、1つのカメラのみで熱の移動とそれに伴う温度分布を取得することができる。提案センサが取得する空間分解能については、今後も検証していく。

図9より得られた色変化に基づき、それぞれの物体が位置する部分を温度応答値に変換したものを図10に示す。図10より、1つの変色動

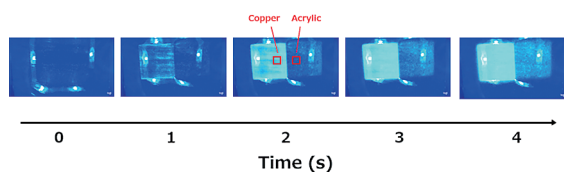


図9 銅・アクリルに同時に接触した際の色変化

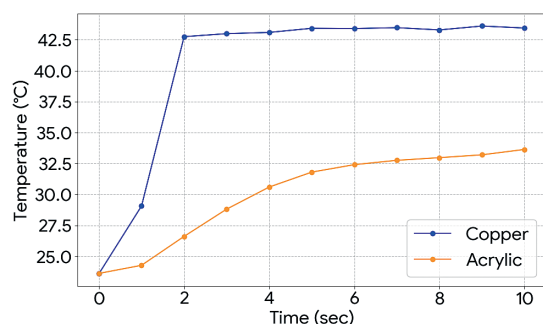


図10 銅・アクリルに同時に接触した際の色変化

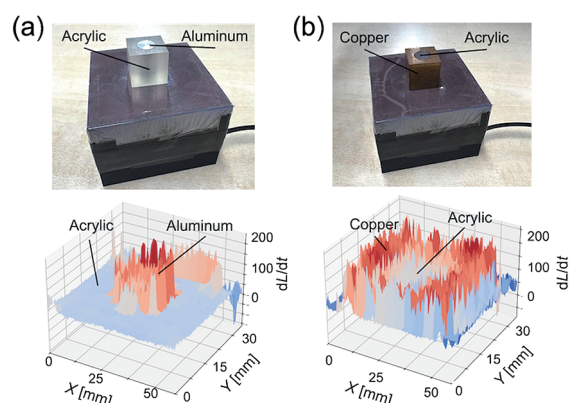


図12 材料の空間分布の可視化

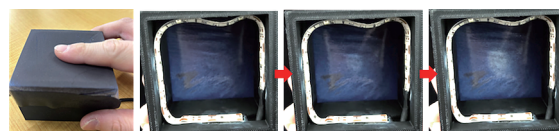


図13 指の接触に伴う熱変色センサの色変化

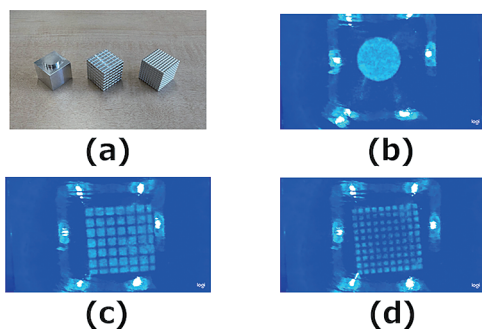


図11 表面粗さの異なる対象に接触した際の色変化

画から任意の位置での温度応答値が得られることがわかる。

2.2 表面粗さの可視化

図11 (a) に示される表面粗さの異なる接触対象（接触表面が円状・3 mm 刻みのメッシュ・1.6 mm 刻みのメッシュのアルミキューブ）についてもセンサ評価のための実験を行った。

提案する熱変色センサの色変化を図11 (b) ~ (d) に示す。これにより、それぞれの接触面の状態が色変化により識別できることがわかる。センサが表現し得る空間分解能については改めて評価が必要であるが、本実験により 1.6 mm 刻みの粗さまで可視化できることを確認した。

2.3 材料分布の可視化

次に、複数の材料が含まれている対象物について、材料分布の可視化実験を行った。図12に、熱したアクリルキューブの中央にアルミの円筒（図12 (a)）、銅キューブの中央にアクリルの円筒（図12 (b)）が入った対象物に接触した際の熱変色率（色空間 L 値の変化率）を示す。なお、キューブの一辺は 20 mm、円筒の直径は 10 mm である。

図12より、10 mm の空間分解能で材料の空間分布が可視化できることを示すことができた。

2.4 人の接触の可視化

最後に、人の接触について検証を行った。指を熱変色センサの表面に置いた際のセンサの色変化を、図13に示す。

図13より、指の接触部分が色変化していることがわかる。接触動作や接触箇所によって色の変色の過程は変化することが予想させるため、今後人の動作識別手法へも活用していく。

[課題・今後の展望]

本研究では、接触対象との熱交換を可視化する計測技術について試作、検討を行った。熱変色センサの開発とその評価実験を通し、銅・アクリル・スポンジキューブといった熱浸透率が大きく異なる材料について、熱応答の違いを熱変色顔料の色変化の違いとしてカメラで捉え、温度との相関からその材料特性を空間分布と共に抽出する方法について模索した。

本研究課題を通して得られた課題は、下記の通りである。

1. 熱の流れを可視化するために用いる熱変色顔料において、色や温度閾値の組み合わせについて引き続き検討が必要である。温度との相関についても、外光の影響で試行ごとに分散が見られるため、十分再現性のあるセンサの構成について再検討する必要がある。また熱を可視化することができる材料として、今回用いた顔料以外の候補材料についても、合わせて検討していく。
2. 提案センサが抽出し得る材料特性の空間分解能について、さらなる検証が必要である。
3. 熱を扱う以上、他センサと比較した際の応答性の悪さは避けられない。特に時間が経過するにつれて熱が拡散され、色変化がぼやけ

ていく傾向にある。接触対象の形状や表面粗さの可視化について、時間応答の観点からも検証していく必要がある。

4. 機械システムへの応用を見据え、センサの小型化、また繰り返し環境との接触を可能にする耐久性を考慮したセンサの開発が必要である。

本研究課題を通し、多くの知見を得られることができた。今後も引き続き検討を続けていきたい。

[謝辞]

本研究に助成頂いた立石財団にこの場を借りて改めて御礼申し上げます。

[成果の発表、論文など]

- [1] Hirokazu Iwane and Yukiko Osawa, "Visualizing Spatial Heat Transfer Using Thin-Thermochromic Sensor," *IEEE Sensors Journal* (Q1, IF:4.5), 2026 (Early access).
- [2] Hirokazu Iwane and Yukiko Osawa, "Thin-Film Thermal Discoloration Sensor for Distributed Material Identification," *Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 438-443, January 11-14, 2026.
- [3] Hirokazu Iwane and Yukiko Osawa, "Design of Thermal Discoloration Sensor for Shape and Material identification," *Work-in-Progress Papers (WIP) of the IEEE World Haptics Conference*, July 9, 2025.