

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21325

研究課題名（和文）柔軟なロボット外装による接触物の温度に依らない材質検知手法の確立

研究課題名（英文）A study on temperature-independent material recognition using soft robotic cover embedded in temperature control system

研究代表者

大澤 友紀子 (Osawa, Yukiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：80909200

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、熱情報に基づく材料認識の精度向上を目的とした接触対象物の認識システムを構築した。温度調節機能を搭載した機械（ロボット）外装の開発、時系列温度データベースを用いた接触対象物の認識アルゴリズム、とハード・ソフトウェア双方の観点から、積極的に熱を取り入れた手法について検討を行った。対象物の温度に応じてロボットグリッパーの温度調節を行うことにより、従来問題であった環境の変化による認識精度の劣化を防ぐことを可能とした。また金属や木材など熱特性が大きく異なる材料に加え、触覚センサ等では分類が難しい金属同士についても、温度情報に基づく機械学習により高精度な分類を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では外装表面の温度制御により、接触物の温度に依存せず材質の特性のみを抽出した熱流の取得を可能とし、それに基づく独自の材質認知手法を構築した。このような温度調節機能が備わった柔軟なロボット外装は未だに実現されておらず、高精度の認識が必要とされる製造・医療現場など、幅広い分野での活用が見込まれる（社会的意義）。また本研究課題を遂行する中で、熱力学・制御工学のみならず情報工学・材料工学など複数の工学分野を統合した新学問領域としての基礎理論の一提案ができたと言える（学術的意義）。

研究成果の概要（英文）：In this research project, a recognition system for contact objects was developed to improve the accuracy of thermal-based material recognition. We investigated approaches that actively utilize heat from both hardware and software perspectives, including developing a temperature-controllable machine (robot) cover and recognition algorithms for contact objects using a time-series temperature database. By adjusting the temperature of the robot gripper according to the temperature of the object, it is possible to prevent deterioration in recognition accuracy due to environmental changes, which was a conventional problem. Furthermore, high-precision classification through machine learning based on temperature information has been achieved for materials with significantly different thermal properties, such as metal and wood, and metals that are difficult to classify using vision and tactile sensors.

研究分野：熱工学

キーワード：材料認識 熱計測 温度制御 ロボットスキン

1. 研究開始当初の背景

人が物に触れた際、接触物の温度や接触時の温度変化は材料への印象（材料の認識など）や感情（安心感・不快感など）に影響する。したがって熱技術は接触検知・接触材料や動作の認識・遠隔介護や触診などさまざまな場面において必要とされる。一方で機械システムにおいて熱は機械の故障など致命的な問題となり得る上に、モータによる発熱が避けられないことから、廃熱など保守的な熱設計がされることが多い。したがって熱が必要とされる一方で、積極的にシステムに取り入れた技術は未だ確立に至っていない。特に熱を用いた材料認識について、環境変動による精度劣化など多くの問題が残されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、**繊細な人間の手先動作再現を見据えた、接触物の温度に依らない材質検知を可能にする柔軟なロボット外装システムの構築**である。人間と機械が物理的に触れ合うことによる、熱技術を用いた認識・人間支援システムの確立に向けた要素技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 温度調節機能を搭載した機械（ロボット）外装の開発

まず材料認識のデータを取得することを目的とした、水流を用いた温度制御可能なロボットグリッパーの開発を行った（図1）。将来的にはロボットによる複雑な形状の物体の把持や人との接触を想定しているため、柔軟な素材に温度制御された水を流すことで柔らかい感触を残しながらグリッパーの加熱・冷却を可能とする。グリッパー表面に熱伝導率の高い素材を用いることで、水流から接触面への効率的な熱伝達が行えるように設計した。熱源としては、タンクに取り付けられた熱電変換素子（ペルチェ素子）を用いた。

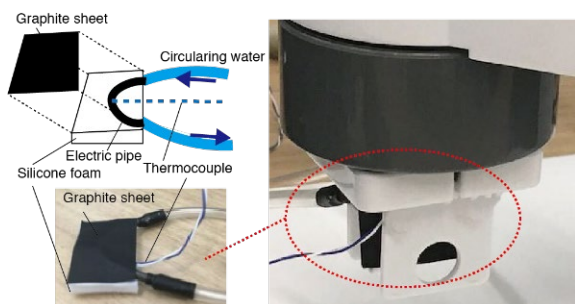


図1 ロボット外装の開発

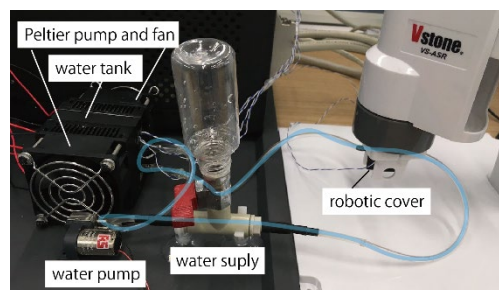


図2 基礎実験システムの構築

(2) 時系列温度データベースを用いた接触対象物の認識アルゴリズム

小型スカラロボットに温度制御システムを搭載した基礎実験システムを構築した（図2）。本システムを用い、グリッパー表面の温度を識別対象物の初期温度に応じて変化させた際の（グリッパーの温熱・冷却により接触対象物間の温度差を調整）、金属（銅／真鍮／亜鉛／鉄）と木材ブロックの時系列温度データを取得し、機械学習による分類実験を行った。

(3) 把持力・温度情報データベースの構築

ロボットの把持動作における接触対象物の認識を想定し、協働ロボット（多軸マニピュレータ）と温度制御システムを統合した実験セットアップを構築した（図3）。ロボットの手先（グリッパー）に取り付けたロボット外装に搭載された温度センサ、把持物体に付けた圧力センサから、把持動作における温度変化と把持力の情報を取得しデータベースを構築する。接触対象に軽く触れる（0.1 N）、強く握りしめる（5.88 N）など、把持力や初期温度を変化させてデータを取得し、対象物の識別実験を行った。

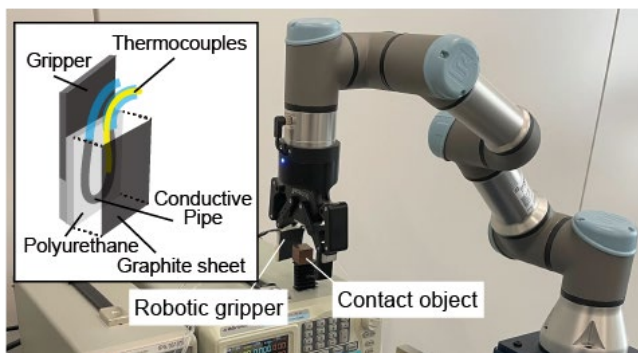


図3 多軸マニピュレータとの統合

4. 研究成果

(1) アクティブな温度制御による対象物の温度に依らない材料識別

接触対象の初期温度に応じてグリッパーの温度調節を行うことで、材料認識の精度を向上させることに成功した。特に従来手法の多くが苦手とする、グリッパーとの温度差が小さな熱された物体に対しても100%の精度で金属（銅／真鍮／亜鉛／鉄）と木材ブロックを識別することができた（図4）。このようにアクティブな温度調節によって材料識別を行う手法は今までになく、初期温度の変化にロバストに対応できる認識手法として世界で初めて成功したと言える。

得られた成果について、IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2022) における学会論文の投稿と研究発表を行った①。さらに本論文の成果が評価され、本学会主催団体の一つである計測自動制御学会 (SICE) から若手研究者に贈られる SICE International Young Authors Award (SIYA-SII2022) を受賞した。また提案コンセプトのコアの部分について、特許出願も行った②。

(2) 温度差・把持力と認識精度の関係性を明確化

複数の条件下での実験による温度センサ・圧力センサから取得されるデータ解析により、接触物体間の温度差と把持力が分類精度に与える影響を明確化することができた。グリッパーと対象物との温度差については、初期温度差が大きくなるほど（10℃～20℃）材料による温度応答の違いが顕著に現れ、逆に温度差が小さくなるほど（5℃以下）応答の差が実験ごとの応答のばらつきやノイズと区別がつかなくなり、分類精度を落とす要因となることがわかった。接触物体間に10℃以上の温度差がある場合は、触覚センサ等では分類が難しい金属同士についても、温度情報に基づく機械学習により高精度な分類を達成した。またグリッパーの把持力について、より強い把持力により接触面の接触抵抗を小さくすることができ、結果として温度応答の収束を早め（接触後0.5～3秒）、物体の熱特性がより早く明確に表れることがわかった。

(3) ロボットの発熱を活用した材料識別

さらに当初は認識に用いる熱源を熱電変換素子としていたが、ロボット内部のモータによる発熱を活用した材料識別の可能性について新たに見出した。負荷のかかったモータによるジュール熱を材料認識部に熱輸送することにより、精度の高い材料識別が可能となることを確認した。本手法は技術の発展と環境問題の解決を両立した従来の熱対策手法を革新させる基盤技術として、幅広い場面での活用が期待できる。本テーマについては、2023年～2026年度科学研究費 若手研究「人・機械協調のための自己発熱を活用した認識・制御技術（課題番：23K13303）」として引き続き検討を続ける。

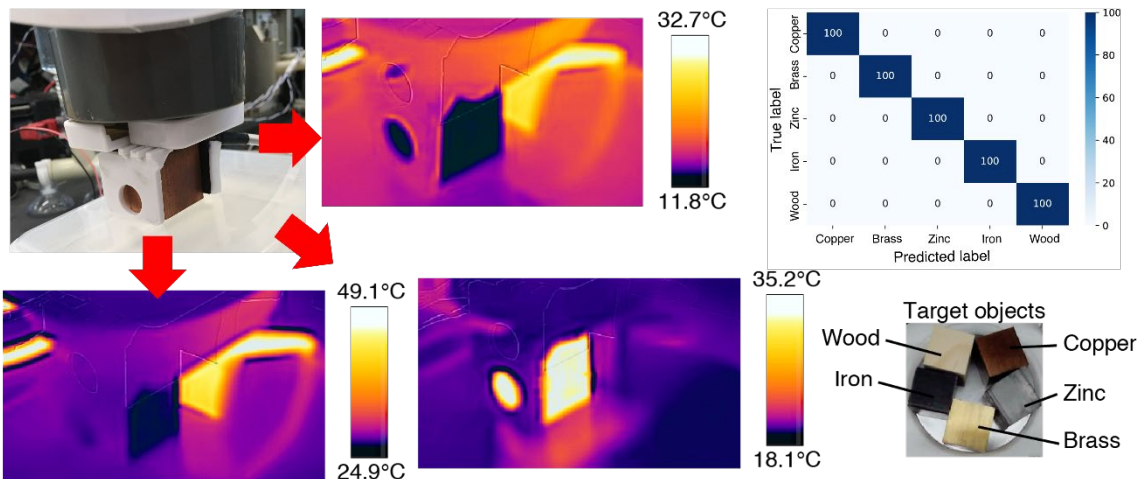


図4 アクティブ温度制御グリッパーによるロバストな材料認識手法

<引用文献>

- ① Y. Osawa, K. Kase, Y. Domae, Y. Furukawa, and A. Kheddar, “Material Classification Using Active Temperature Controllable Robotic Gripper,” *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 479-484, 2022.
- ② 特許, 特願 2022-052219, 温度制御装置及び温度制御方法, 大澤 友紀子, PCT/JP2023/005960 (WIPO), 2023/02/20.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yukiko Osawa, Kei Kase, Yukiyasu Domaе, Yoshiyuki Furukawa, and Abderrahmane Kheddar
2. 発表標題 Material classification using active temperature controllable robotic gripper
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 温度制御装置及び温度制御方法	発明者 大澤 友紀子	権利者 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-052219	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

IEEE Conference Publication IEEE Xplore https://ieeexplore.ieee.org/document/9708761 SIYA (SICE SI) https://sice-si.org/en/siya-sice-international-young-authors-award/ 個人ページ https://staff.aist.go.jp/yukiko.osawa-akiyama/publication.html

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------