

## 海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 31 年度(令和元年)

受付番号 201960463

氏名 大澤(秋山)友紀子

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。  
なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

### 記

1. 用務地(派遣先国名) 用務地: フランス国立科学研究センター(CNRS) (フランス)
2. 研究課題名(和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。  
人間とロボットのインタラクション創出のための空間温熱知覚を考慮した人工皮膚の開発
3. 派遣期間: 平成 31 年 4 月 1 日 ~ 令和 3 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名  
受入機関名: フランス国立科学研究センター(CNRS)  
部局名: LIRMM(Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier), IDH(Interactive Digital Humans)チーム
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4判相当3ページ以上、英語で記入も可)**  
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)  
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

別紙参照

# 海外特別研究員最終報告書

採用年度 平成 31 年度(令和元年)

受付番号 201960463

氏名 大澤 友紀子 (Yukiko Osawa)

## 研究・調査実施状況 (Progress of the research)

### 1. 三井化学株式会社との共同研究体制の構築

本研究課題を遂行するにあたり、柔らかい感触と高い熱伝導性を同時に達成させるための新しいデザインを有したロボット外装の開発が必要であった。受け入れ研究者である A. Kheddar 教授の紹介で、三井化学株式会社の協力を得られることになり、以降、所望する機能を達成するためのプロトタイプ実現に向け、連携して研究開発を行うことになった(三井化学株式会社・MITSUI CHEMICALS EUROPE)。三井化学の方々に 2 度 CNRS LIRMM へご訪問頂き、また web ミーティング等により議論を重ねた。

#### 1. Collaborative work with Mitsui Chemicals

A robotic cover with a novel design to achieve both softness and high-heat conductivity was needed to proceed with this research project. My host researcher Prof. Kheddar introduced MITSUI CHEMICALS, INC. to me, and we started collaborative work to develop a prototype. Our colleagues in Mitsui Chemicals visited us two times to have meetings at LIRMM in France.

### 2. プロトタイプによる温度制御と熱流を用いた接触検知

まず柔軟材料の内部に独立したパイプを埋め込んだ小型のプロトタイプを作成し、ロボットハンドに取り付け検証を行った (Fig. 1)。温度制御による水流の温熱・冷却に加え、熱流センシングを用いた接触検知手法について検討した。推定された熱流は接触物の素材や温度によって異なることから、本手法を基礎とした接触対象物の検出手法への応用が期待できる。

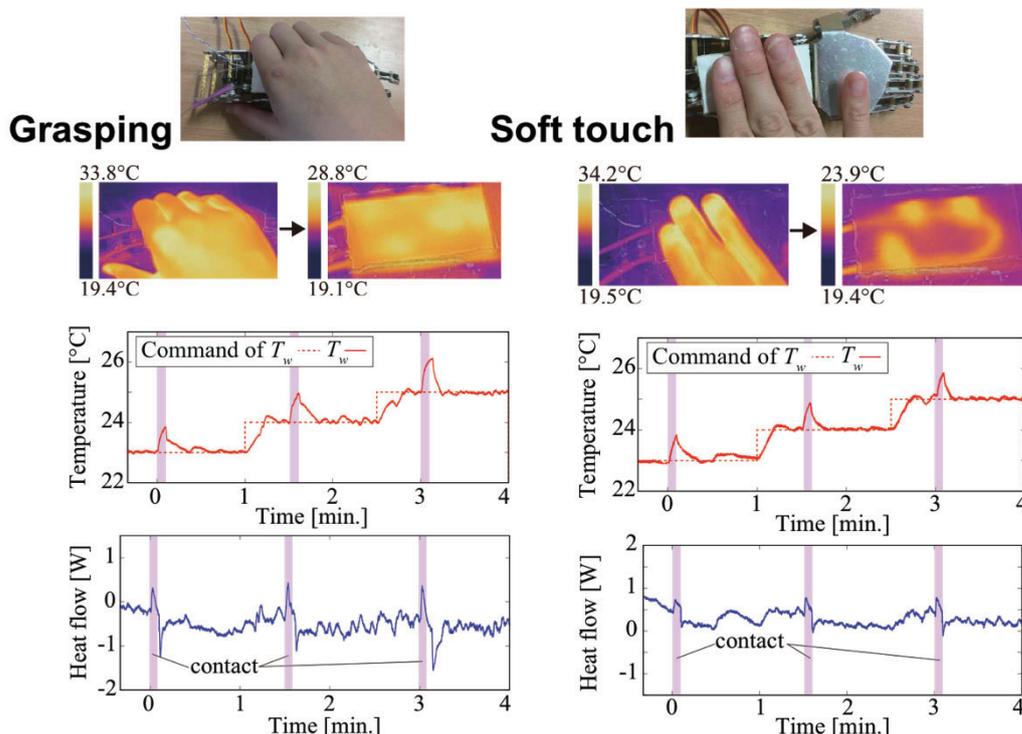


Fig. 1. Prototype of the robotic cover.

## 2. Thermal contact detection using a small prototype of the robotic cover

We developed a prototype built-in pipe for a small robot arm (Fig. 1). The cover temperature can be controlled by a circulating water system, including the tank attached to the Peltier pumps. By applying a thermal exchange observer to the control system, heat flow entering from a contact object can be estimated while controlling the surface temperature. The obtained heat flow changes depending on the material, temperature, contact area, etc., and the value is expected to be used for material recognition of a contact object in future work.

## 3. ヒューマノイドロボット上腕部の外装の構築

プロトタイプによる基礎実験で得られた知見に基づき、ヒューマノイドロボットの上腕部の外装を開発した (Fig. 2)。外装の表面温度を内蔵された閉回路の水循環システムに基づいて調節することにより、触った際の好みの温度パターンを実現することができる。さらに柔らかさと熱伝導性という相反する特性を同時に実現している。本外装は以下に述べる 2 層構造により広い面積をカバーする際に重量を減らす工夫をしている。(i) 水を循環させるための水路を内蔵した内層部は柔らかく、外装とロボット構造の間の熱絶縁層として機能し、(ii) 任意の質感や色でパターン化できる外層部は、内層部の循環水から表面への熱伝達を可能にする。本ロボット外装は任意の厚さ、固さ、粗さ、および色に変更することができるため、提案するデザインはユーザーまたはアプリケーションに合わせてカスタマイズすることができる。

## 3. Development of a soft robotic shell with active thermal display

Finally, we successfully developed a robotic shell for upper arm of the humanoid robot (Fig. 2) based on findings from the previous prototype. The displayed cover temperature is regulated based on a closed-circuit water-circulation system that is built into the cover. Subsequently, such a shell can be used as a robot body cover that can be set to realize a desired temperature pattern or behavior subsequent to touch. Our proposed shell enables the simultaneous realization of conflicting softness and heat conductivity properties. This shell is fabricated with low mass density materials to reduce the weight required for large surface coverage. The presented soft-shell robotic cover is composed of a linked two-layer structure: (i) the inner layer, with built-in pipes for water circulation, is soft and acts as a thermal-isolation layer between the cover and the robot structure, whereas (ii) the outer layer, which can be patterned with a given desired texture and color, allows heat transfer from the circulating water of the inner part to the surface. A novel water-circulation system is also developed, through which both heating and cooling of the cover are achieved within short response times. This fabrication technique enables robotic cover possibilities, including tunable color, surface texture, and size, that are likely to have applications in a variety of robotic systems.

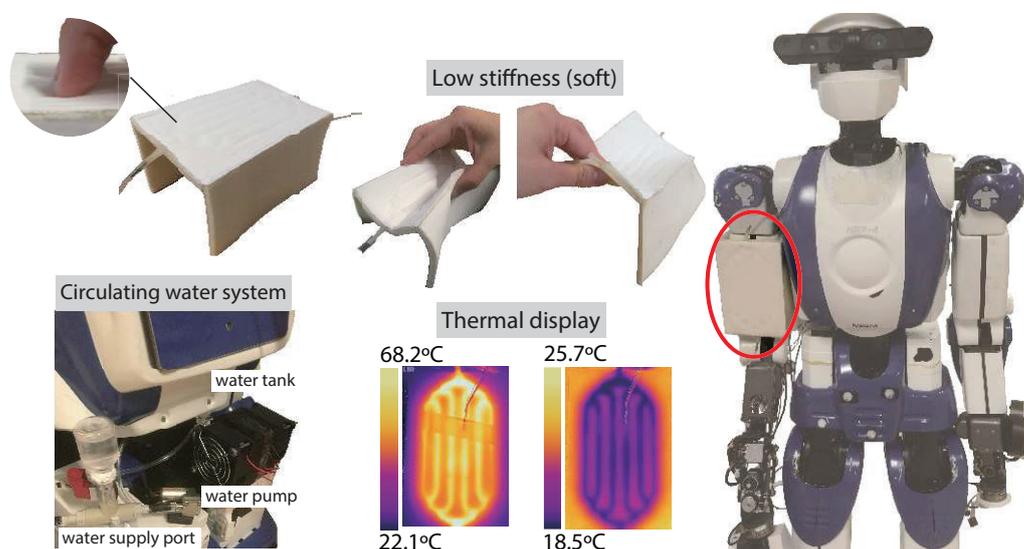


Fig. 2. Developed robotic cover for upper arm of humanoid robot HRP-4.

## 成果の発表状況 (Publications)

### 1. 学会論文の執筆

プロトタイプによる熱流を用いた検知手法について、International Symposium on Experimental Robotics (ISER2020)に採択された [2]。本論文は Springer Proceedings in Advanced Robotics に掲載されている。なお研究発表はパンデミックの影響により延期され、2021年の夏頃に開催される予定である。

#### 1. Conference paper

The conference paper about the soft robotic cover with dual thermal display and sensing capabilities was accepted (ISER2020) [2]. Because of the Covid-19 pandemic, the physical conference was postponed to the end of the summer this year.

### 2. 特許の申請

新しい素材・デザインによるロボット外装の開発に成功し、フランス国立科学研究センター (CNRS) と三井化学と共同で特許を申請した (「ロボット温度制御装置」・出願番号 : FR2103637・出願日 : 2021/4/9) [3]。

#### 2. Submitting patent with Mitsui Chemicals and CNRS

We successfully developed the soft robotic cover that can achieve both softness and high thermal conductivity. We have filed patent applications about the material and novel structure (Filing No.: FR2103637, Filing Date: 09/04/2021, Applicant: MISUI CHEMICALS, INC., CNRS) [3].

### 3. ジャーナル論文の執筆 (Science Robotics)

博士課程での研究が IEEJ Journal of Industry Applications に掲載された [1]。また近日、本研究課題についてジャーナル論文の投稿を行う予定である [4]。

#### 3. Journal paper (Science Robotics)

The paper I submitted during my Ph.D. was published in IEEJ Journal of Industry Applications [1]. We plan to submit a journal paper of which has high impact factor within a few weeks [4].

- [1] **Yukiko Osawa**, Seiichiro Katsura: “Thermal Rendering Based on Thermal Diffusion Equation,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 8, No. 6, pp. 957-964, November 2019.
- [2] **Yukiko Osawa**, Abderrahmane Kheddar: “A Soft Robotic Cover with Dual Thermal Display and Sensing Capabilities,” *Proc. International Symposium on Experimental Robotics (ISER2020)*, Springer Proceedings in Advanced Robotics, Vol 19, March 2020.
- [3] Patent, MISUI CHEMICALS, INC., CNRS, Filing No. FR2103637, Filing Date: 09/04/2021.
- [4] **Yukiko Osawa**, Yuho Kinbara, Masakazu Kageoka, Kenji Iida, and Abderrahmane Kheddar: “Soft robotic shell with active thermal display enabled by a water-circulation system,” 2021 (will be submitted soon).

## 謝辞 (Acknowledgments)

フランスでの2年間の経験は、自身の研究基盤を作ることだけでなく、一日本人研究者として国際色豊かな研究者とのコミュニティを築けた点で本当に素晴らしいものであった。このような機会を与えてくださった日本学術振興会海外特別研究員制度と関係者の皆様に、心から感謝している。また共同研究によりロボット外装の開発をご協力頂いた三井化学株式会社・Mitsui Chemicals Europe に感謝御礼申し上げます。

The authors would like to thank JSPS overseas fellowship for giving such a wonderful opportunity to research in France, and all colleagues in CNRS-Mitsui Chemicals collaborative work for realizing the robotic cover. The authors also thank all team members in LIRMM IDH team for involving me the lovely community.