

# サーマルエネルギー変換による熱感覚伝送技術の開発 (112103003)

## Development of Thermal Communication Techniques by Thermal Energy Conversion

### 研究代表者

桂 誠一郎 慶應義塾大学

Seiichiro Katsura Keio University

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

### 概要

本研究では、次世代の超臨場感コミュニケーションを実現することを目的とし、「温もり」のような熱感覚情報を遠隔地に伝えるための新しいサーマルエネルギー変換技術の開発を目的とする。具体的には、温度と熱流からなる熱感覚を効率良く電気信号に変換する熱感覚センシング技術、抽出した熱感覚を双方向に伝送してペルチェデバイスを用いて再現するバイラテラル熱制御技術、さらにネットワークを介した熱感覚通信とフレキシブルデバイスによる大面積化した要素技術を開発し、各要素技術を統合した熱感覚伝送技術として確立する。

### 1. まえがき

現在、人間の感覚情報のうち、聴覚・視覚情報の保存・再生は携帯電話・テレビ・CDやDVDなどの通信・放送機器などによって広く実用化されている。触覚情報は第3のメディア情報としての実現が期待されており、実用化へ向けた研究が多くなされているものの、研究の多くが力覚呈示にとどまっているのが現状である。人間は接触を通じた物体認識において「硬さ、柔らかさ」に相当する力覚のみならず、「温もり」といった温熱感覚も駆使しているため、温熱感覚を含むコミュニケーション技術の確立が強く望まれる。

温熱感覚情報を精度良く呈示するには、温熱感覚情報のセンシングやバイラテラル制御理論、また実際のネットワークを用いた通信といった様々な分野を包括的に取り扱う必要がある。本研究では、感覚情報通信における臨場感の向上を目的として、温熱感覚情報を遠隔地に通信・放送するためのサーマルエネルギー変換技術の開発を行った。具体的には、熱システムをマスタ・スレーブシステムとして使用し、物体との接触における熱エネルギーの授受を効率良く遠隔地間において再現する熱バイラテラル制御システムの開発に成功した。また、フレキシブル熱デバイスの創製や力覚情報との同期性向上のための一般化パワー制御といった温熱感覚呈示に係る基盤形成に成功した。

### 2. 研究開発内容及び成果

#### 2.1 温熱感覚の高速・高精度センシングおよび制御に関する研究

温熱感覚の高精度な呈示を実現するには、環境物体に接触した際に発生する温熱感覚情報を効率良く電気信号に変換し、また電気信号として与えられた指令を忠実に温熱感覚に変換するサーマルエネルギー変換技術の確立が必要である。温熱感覚呈示に関する従来研究では、ペルチェ素子を熱流発生源として用いて温度制御などを行っているが、温熱呈示においては通常温熱制御に比べて極めて速い時定数のセンシングおよび制御を実現する必要がある。本研究では、ペルチェ素子を熱システムとし、高速かつ高精度に温熱感覚情報の取得および制御を行う手法の構築に成功した。具体的には、ロバストに温熱制御を行うための熱外乱オブザーバを構築し、ペルチェ素子の温度状態のフィードバックを付加することで、素子の温度制御において数百 ms レベルでの過渡応答の設計可能性を確保することに成功した。さらに、熱システムに対して流入する熱量をセンサレスで推定する流入熱量オブザーバを

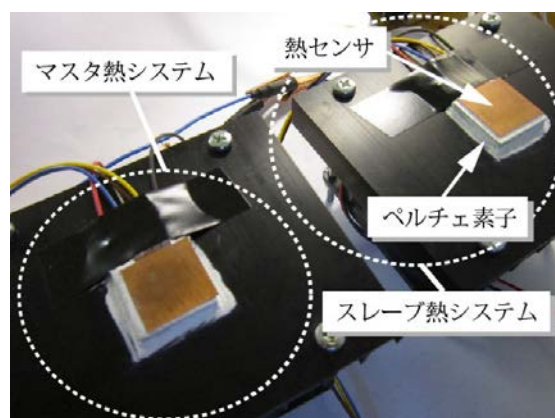


図1 開発した温熱感覚通信システム

構築し、その情報取得帯域の温熱感覚呈示制御に対する影響等を明らかにした。

#### 2.2 温熱感覚情報の遠隔地間通信に関する研究

温熱感覚は人間と環境物体間における熱エネルギーの移動によって励起されるものであり、この時人間側において流入・流出した熱エネルギーは物体側において流出・流入することになる。この熱エネルギーの授受における双方向性を遠隔地間においてリアルタイムで工学的に再現するためには、操作側・遠隔地側の熱デバイスを双方向に同期制御させる必要がある。さらに、物理現象としては温度差に従って熱流が流れ、その熱流に従って温度が変化することになるため、温熱感覚呈示においては温度および熱流を同時に制御する必要がある。従来研究のほぼ全てが遠隔地側の温度を指令値として単方向的に制御するものであり、また熱デバイスの双方向制御に関する研究も一部存在しているものの、温度および熱流を高精度に同時制御する技術は未だ確立されていない。

そこで本研究では、操作側および遠隔地側の熱システム間において温度・熱流を高精度かつ双方向に同期させ、物体との接触における熱エネルギーの移動を遠隔地間において再現するシステムの開発に成功した。図1に開発した温熱感覚通信システムを示す。本システムでは前節にて述べた熱外乱オブザーバや流入熱量オブザーバを各熱システムに対して適用しており、かつ温度・熱流の同時制御アルゴリズムを実装している。これにより、遠隔物体の持つ温もりをあたかも目の前で触れているかのように感じさせる世界初の技術の開発に成功した。

### 2. 3 触覚情報の通信方式に関する研究

温熱感覚や力覚情報のバイラテラル・マルチラテラル制御技術を広く普及させるにあたっては、インターネットに代表されるネットワーク網を用いた通信制御が欠かせない。しかしながら通信に情報伝達遅れが生じ、触覚伝送制御系の性能が悪化することが知られている。さらに無線通信を行った場合にはパケットロスが発生し、感覚再現の精度を大きく劣化させてしまう。本研究では、通信状態が不安定である場合の性能劣化を防止するため、触覚通信に特化したネットワークの結合制御や通信方式の構築に関する研究を行った。具体的には、グラフ理論における隣接行列を基にマルチラテラル制御系の各拠点が全体システムに与える影響の定量化や、触覚データ送信の経路分散に基づく性能劣化防止といった手法の構築に成功した。

### 2. 4 フレキシブル電熱変換デバイスの開発

将来の温熱感覚呈示インタフェースを考えると、人間の身体曲面に対して形状的に適合することが重要であり、本研究では温熱感覚呈示のためのフレキシブル性を有する電熱変換デバイスについて開発検討を行った。一般的なペルチェ素子に用いられるビスマス・テル化合物をカプトンフィルム上に蒸着加工し、成膜を形成することでデバイス厚みを減少させ、電熱変換デバイスをフレキシブル化することに成功した。起電力の観点からは更なる改善を必要とするものの、身体装着用のフレキシブル熱デバイスの開発可能性を示唆する知見を得るに至った。

### 2. 5 複合感覚情報の同時呈示に関する研究

これまで触覚呈示研究においては、温熱感覚や力覚が独立に研究されているが、これらを効率的に統合することで感覚呈示の臨場感が飛躍的に向上することが期待される。そこで本研究では、力覚および温熱感覚の統合に関して研究を行い、特に両感覚の時定数の違いに着目した呈示手法の検討を行った。まず、電気モータおよびペルチェ素子から構成される力覚・温熱感覚同時呈示システムに対して、一般化パワーに基づくバイラテラル制御系を構成することで力覚・温熱感覚を高精度に双方向通信させることに成功した。次に、双方向制御における応答値をデータベースとして保存し、時間を越えて感覚情報を物理的に再現するシステムを開発した。そして電気モータによる力覚呈示およびペルチェ素子による温熱感覚呈示における時定数の差異に着目し、信号処理に基づく感覚情報の加工を行うことで再現における力覚・温熱感覚の同期性向上を達成した。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

人・モノの温もりを伝える本研究の内容は、従来では映像や音声にのみとどまっていたマルチモーダル通信分野におけるイノベーションが期待され、また医療分野では発熱している患部を遠隔触診によって検出するといった利用が考えられる。温熱感覚は人間が触れた物体が何かを把握する上で根源的な情報の一つであるため、その通信呈示技術の確立は情報通信の形態を変え、社会の様々な分野において展開されると考えられる。

また得られた研究成果に関して、2013年10月に幕張メッセで開催された CEATEC JAPAN 2013 にて成果公表を行い、最終的に CEATEC AWARD 2013 審査員特別賞を受賞するに至った(図2)。来客者からは遠隔物体の感触を手で感じると好評を博した。今後、本研究による開発成果が社会に波及することが期待される。



図2 CEATEC JAPAN 2013 における公開展示  
(審査員特別賞を受賞)

### 4. むすび

本研究では、人間の持つ温熱感覚情報呈示に関するサーマルエネルギー変換技術を開発し、温熱感覚情報を通信・放送するための技術基盤の開発に成功した。研究内容はデバイス開発から制御系の構築、通信方式の検討といった様々な項目をカバーしており、次世代のコミュニケーションシステムを構築する上で重要な基盤となると考えられる。

#### 【誌上发表リスト】

- [1] Hidetaka Morimitsu, Seiichiro Katsura: "Thermal Bilateral Control for Reproduction of Thermal Contact between Remote Places," IEEE Haptics Symposium 2012, pp. 65-70, March, 2012.
- [2] 鈴木希、桂誠一郎: "バイラテラル制御に基づく触覚伝送におけるパケットロスの評価", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J96-B, No. 8, pp. 842-849, August, 2013.
- [3] Satoshi Nishimura, Seiichiro Katsura: "An Evaluation of Connectivity and a Control in a Multilateral Communication System," IEEE Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 2, pp. 164-173, March, 2014.

#### 【申請特許リスト】

- [1] 桂誠一郎、森光英貴、熱感覚伝送システム、日本、2012年6月15日、特願2012-136336

#### 【受賞リスト】

- [1] 桂 誠一郎、安藤博記念学術奨励賞、「「超身体」実現のための身体性の時空間拡張に関する研究」、2013年6月29日
- [2] 桂研究室、CEATEC AWARD 2013 審査員特別賞、「温熱覚通信システム」、2013年10月3日
- [3] 森光英貴、電気学会優秀論文発表賞、「クオオリー行列に基づく熱マルチラテラル制御系の構築」、2014年3月19日

#### 【報道掲載リスト】

- [1] "温熱感覚 遠隔地間で共有 慶大 TV電話の臨場感拡張も"、日刊工業新聞、2013年10月1日
- [2] "慶大、温熱感覚を遠隔地間で共有 - TV電話の臨場感拡張も"、朝日新聞デジタル、2013年10月1日
- [3] "温熱感覚も双方向通信 慶大が新技術 ペルチェ素子利用"、化学工業日報、2013年10月7日

#### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.katsura.sd.keio.ac.jp/>