

認知神経科学研究のための温感ディスプレイと 身体錯覚を利用した実験システムの開発

○水垂宏介(埼玉大), 原正之(埼玉大), 金山範明(広島大), 山口大介(埼玉大),
石野裕二(埼玉大), 高崎正也(埼玉大), 水野毅(埼玉大)

Design of a Novel Experimental System Using Thermal Displays and Bodily Illusion for Cognitive Neuroscience Study

○Kosuke MIZUTARU, Masayuki HARA, Noriaki KANAYAMA (Hiroshima Univ.),
Daisuke YAMAGUCHI, Yuji ISHINO, Masaya TAKASAKI, and Takeshi MIZUNO (Saitama Univ.)

Abstract: The objective of this study is to reveal whether the sense of body temperature (which may be unconsciously perceived in our daily life) is necessary for human body perception or recognition in self touch. To enable the examination, the control of skin temperature at the touching or touched body part is required when an experimental participant touches their own body, but the skin temperature at the body part cannot be directly manipulated. In this study, we propose and design an experimental system using active self-touch, thermal displays, and bodily illusion paradigm in order to realize the unique situation. This paper, in particular, focuses on the design of a robotic master-slave system and thermal displays for revealing the relationship between the sense of body temperature and body recognition.

1. 緒言

ヒトは脳内に自身の身体に関する情報を持っており、この身体情報を基に身体を動かすあるいは知覚しているものと考えられている。ヒトの自己感・身体認知については、ラバーハンド錯覚 (Rubber Hand Illusion: RHI) [1] といった身体錯覚 (Bodily Illusion) などを用いた研究が行われているが、まだその主要因および基本メカニズムについては未知の部分が多い。身体認知の主要因およびメカニズムは、産業、医療・福祉、娯楽といった様々な分野での応用が期待されるが、その実現ためにはより多くの身体認知に関する知見を集める必要があるものと考えられる。

そこで、ヒトが身体を認知するための最も一般的な方法の 1 つであるセルフタッチについて着目する。身体とのインタラクションによって接触する身体部位間でやり取りされる情報をロボティクス・ハプティクス技術により操作し、日常生活においてヒトが無意識に知覚しているものと考えられる身体情報と“ずれ”を与えることで、ヒトの身体認知にどのような影響を及ぼすかを検証する。本研究では、操作する身体情報として体温感覚に着目し、体温感覚がヒトの身体認知に必要不可欠であるかどうかを明らかにすることを目指す。本稿では、この検証を行うために必要な実験システムの設計方法および開発について述べる。

2. 実験設計と仮説

本研究では、右手人差し指で左手の甲をセルフタッチする状況を考える。この状況で各身体部位がもう一

方の身体部位に与える温度を様々に操作し、ヒトの身体認知において体温感覚が重要であるかどうかを検証する。このような実験を実現するためには、セルフタッチ時に右手人差し指と左手の甲の皮膚温度をそれぞれの部位に影響を与えずに操作する必要があるが、そのような操作を身体上で直接行うことは不可能である。そこで、温感ディスプレイとアクティブセルフタッチ (マスタスレーブシステム) [2][3]、さらには身体錯覚の 1 つである体性感覚における RHI (Somatic Rubber Hand Illusion: SRHI) [4] を利用することを考える。

Fig.1 に示すよう、研究参加者はマスタデバイスを装着した右手人差し指でフェイクハンドにタッチし、同時にスレーブデバイスが左手の甲に接触するよう制御する。これにより、フェイクハンド上で錯覚的なセルフタッチの感覚、すなわち SRHI を生じさせ、自分の身体にあたかも触れているような感覚を作り出す。この時、フェイクハンドとスレーブデバイスに温感ディスプレ

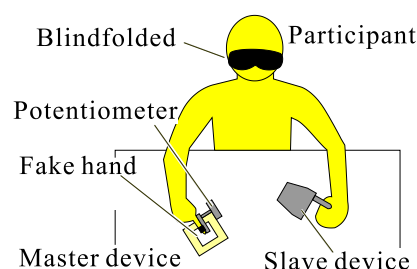


Fig.1 Experimental schema for manipulating sense of human body temperature

イを組み込むことでセルフタッチ時の温度フィードバ

クを様々に操作する．仮説として，ヒトの身体認知に体温感覚の情報が重要であるならば，この 2 つの温感ディスプレイが提示する温度が実際の体温に近い時に SRHI が強く生じ，どちらか一方でも体温から逸脱した温度を提示するときには SRHI は生じないものと考えられる．

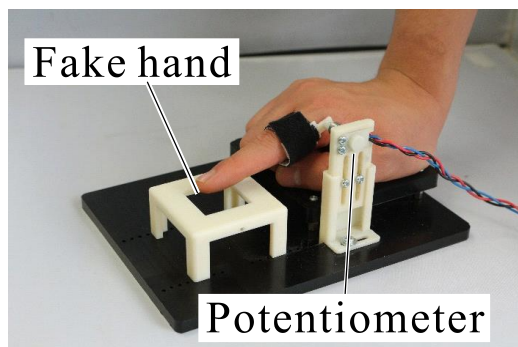
3. 実験システムの試作

3.1 マスタデバイス

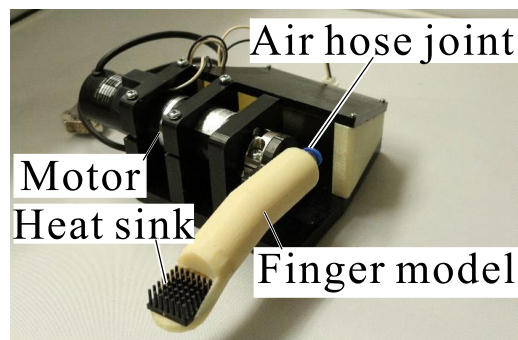
本研究で設計・開発したマスタデバイスを Fig.2 (a) に示す．Fig.2 (a) に示すように，研究参加者の右手人差し指の基節をマジックテープでマスタデバイスに固定し，スレーブデバイスの操作は第 3 関節の上下運動のみで行うようにする．指の回転運動（角度）はポテンシオメータ（RDC502010A, ALPS）により取得できるようになっており，回転中心（回転軸）の位置は研究参加者の手のサイズに合わせて位置と高さを微調整できるようにになっている．また，マスタデバイスの前方にはペルチェ素子（ET-127-10-13, Adaptive），すなわち温感ディスプレイを配置しており，実験時に研究参加者はこの温感ディスプレイをフェイクハンドの甲として指腹部でソフトタッピングを行う．

3.2 スレーブデバイス

Fig.2 (b) に，スレーブデバイスの外観を示す．スレーブデバイスは，主として右手人差し指を模した模型（長



(a) Master device



(b) Slave device

Fig.2 Master-slave system for inducing the sense of illusory self-touch

さ 100mm, 直径 28mm) とモータ (RH-8D-6006-E100AL, ハーモニックドライブシステムズ) から成る．指模型の先端には，小型のペルチェ素子 (ET-031-10-20, Adaptive) が取り付けられており，温度提示部が左手の甲と接触するように配置している．また，指模型の内部は管状になっており，指模型の根元からエアコンプレッサの空気を流入して温感ディスプレイの冷却を行う．本研究では，1Hz 程度でのセルフタッピング実験を想定しており，タッピングの際に 60deg の範囲（上端から下端まで）で右手人差し指を上下させることを考える．温感ディスプレイと指模型の総質量は約 0.2kg であるので，1 秒で上端から下端までスレーブデバイスを往復動作させるのに必要なトルクと回転速度はそれぞれ 0.05Nm と 25rpm と試算できるので，この要件を満たすモータを選定した．スレーブデバイスは，マスタデバイスで検出された角度とモータに搭載されているエンコーダで検出される角度を基に，指模型の位置（角度）制御を行う．

3.3 温感ディスプレイ

温感ディスプレイの概略図を Fig.3 に示す．本研究で作製する温感ディスプレイは，サーマルシリコンシート，銅板，ペルチェ素子，K 型熱電対，ヒートシンクで構成される．温度提示部は，銅板を用いてマスタ側では手の甲のように平らに，スレーブ側では指の腹のように円錐形にする．ヒトは 15℃以下 43℃以上で痛みを感じることから 4)，提示する温度は痛みを感じさせない範囲（20℃～40℃）で，熱電対で取得した温度をフィードバックして制御する．

ペルチェ素子はヒートシンクや冷却ファンなどによって排熱処理をしなければ，任意の温度へ制御することができない．そこで Fig.4 のような熱伝導モデルでペルチェ素子の排熱の計算を行い，必要な熱抵抗を持つヒートシンクおよび流量を選定する．各パラメータを Table 1 に示すように定義すると，熱抵抗 R は以下の式で求められる．

$$R = \frac{T_2 - T_4}{Q} - \frac{d}{\lambda A} \quad (1)$$

熱伝導接着剤としてワイドワークス社の J-Thermo14C

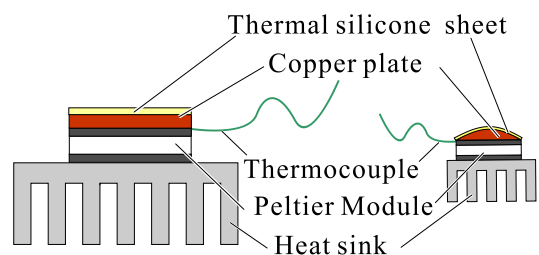


Fig.3 Structures of thermal displays for master and slave devices

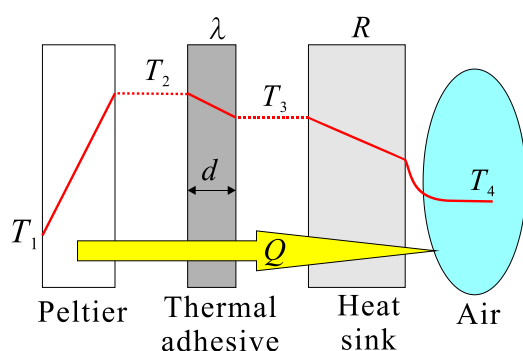


Fig.4 Heat conductive model and heat conductive property in the designed thermal displays

Table 1 Parameters for heat conductive calculation

Temperature of the Peltier's cold side [K]	T_1
Temperature between the Peltier's hot side and thermal adhesive [K]	T_2
Temperature between heatsink and thermal adhesive [K]	T_3
Room temperature [K]	T_4
Waste heat from the Peltier element [W]	Q
Thickness of adhesive [m]	d
Thermal conductivity of thermal adhesive [W/mK]	λ
Thermal resistance of heatsink [K/W]	R
Surface of the Peltier element	A

を使用する場合、 $\lambda=14\text{W/mK}$ 、 $d=0.1\text{mm}$ となる。ペルチェ素子を駆動するための電流アンプ (LA220, サーボテクノ) の最大出力電流は 4A であるが、安全性を考え 2A で駆動することとする。また、温度提示部の冷却時に多くの排熱が必要となるため、冷却時にペルチェの高温面の温度を $T_2=323\text{K}$ (50degC), 室温を $T_4=300\text{K}$ (27degC) とし、そのときの最大の排熱量から伝熱計算を行う。マスタデバイスで用いるペルチェ素子の最大排熱量は約 $Q=45\text{W}$ であり、また熱伝導接着剤と接着面の面積は $A=30\text{mm} \times 30\text{mm}$ であるので、式 (1) より熱抵抗は $R=0.5\text{K/W}$ と求まる。同様にスレーブ側のペルチェ素子の最大排熱量は $Q=6\text{W}$ であり、面積は $A=15\text{mm} \times 15\text{mm}$ であるので必要なヒートシンクの熱抵抗は $R=3.8\text{K/W}$ と求まる。したがって、目標の温度提示を行うためには、試算した値以下の熱抵抗を持つヒートシンクを選定する必要がある。しかしながら、これらの条件を満たすためには非常に大きなヒートシンクを用いる必要があるため、本研究では空冷を併用することによって目標の熱抵抗を実現することを試みる。

マスタデバイスには、熱抵抗 2.4K/W のヒートシンク (ICK S 50x50x25, Fischer Elektronik) を用いることを

考える。熱抵抗の風速による変化は類似品のデータシート 6) より、 4m/s 以上の流量で約 0.53K/W 以下となることから、DC ファン (109P0412H702, 三洋電機) を用いることとする。スレーブデバイスに関しては、指模型に組み込むことを考えて小型のヒートシンク (ASK21-10, あすか電子) を用いる。同様に類似品のデータシート 6) を参照すると、 4m/s 以上の流量で約 3.0K/W 以下となる。また、スレーブデバイスの指模型に DC ファンを組み込むことは難しいので、エアコンプレッサ (TKF002, Tools Island) により強制空冷することを考える。エアコンプレッサの流量を計測すると 14l/min であったので、指模型の空気吐出口の面積をおよそ 0.05m^2 にすることで要件を満たす。

4. 結言

本稿では、ヒトが無意識に持つ体温感覚が身体認知に及ぼす影響を検証するための実験システムの設計方法および開発について述べた。今後の研究では、実際に試作機を用いてヒトを対象とした実験を行い、実験システムの有効性を確認するとともに、体温感覚と身体認知の関係について明らかにすることを目指す。

5. 謝辞

本研究は、平成 29 年度独立行政法人日本学術振興会科学研究費若手研究 (A) (26700027) の援助を受けて行われたものである。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) M. Botvinick and J. Cohen : "Rubber hands 'feel' touch that eyes see", *Nature*, vol. 391, pp. 756 (1998).
- 2) M. Hara et al. : "A Novel Rubber Hand Illusion Paradigm Allowing Active Self-Touch with Variable Force Feedback Controlled by a Haptic Device," *IEEE Transaction on Human Machine Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 78-87 (2015).
- 3) M. Hara et al. : "Voluntary self-touch increases body ownership," *Frontiers in Psychology*, vol. 6, article 1509, pp. 1-12 (2015).
- 4) H. H. Ehrsson et al. : "Touching a Rubber Hand: Feeling of Body Ownership Is Associated with Activity in Multisensory Brain Areas", *The Journal of Neuroscience*, vol. 12, pp. 10564-10573 (2005).
- 5) 富永真琴 : "温度感受性 TRP チャネル", *Science of Kampo Medicine*, vol. 37, no. 3, pp. 164-175 (2013).
- 6) 丸三電気 : "小型ヒートシンク", <http://www.lex.co.jp/product/catalog/heat-sinks4/small.html> (参照日 2017 年 9 月 25 日)