原著論文

指先での押下力と温度感覚特性の関係 — 触対象物との接触面積に基づく基礎的検討 —

西村 崇宏*, 土井 幸輝**, 唐澤 洋之***, 瀬尾 明彦****

* 早稲田大学大学院, ** 国立特別支援教育総合研究所, *** 首都大学東京大学院, **** 首都大学東京

Relationship between Press Force and Sensory Characteristics of Temperature in Forefinger

— Basic Research based on Contact Area —

Takahiro NISHIMURA*, Kouki DOI**, Hiroyuki KARASAWA*** and Akihiko SEO****

* Waseda University, 2-579-15 Mikajima, Tokorozawa-shi, Saitama 359-1192, Japan

** National Institute of Special Needs Education, 5-1-1 Nobi, Yokosuka-shi, Kanagawa 239-8585, Japan

*** Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan

**** Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan

Abstract : In recent years, there has been growing research on the development of interface devices based on the tactile sense. However, although some studies have investigated the characteristics of temperature sense, there has been little research on the development of interface devices based on the temperature sense. Therefore, in this study, we focused on the temperature sense and examined the relationship between the sensory characteristics of temperature and press force in order to investigate these characteristics during active touch. Specifically, we experimented to evaluate the effect of the press force on the sensory characteristics of temperature by using pair comparison method. Additionally, we measured the contact area of forefinger for verifying its effect on sensory characteristics of temperature. The results showed that the scale value of temperature sense increases with the press force, implying that the warmer (cooler) the human perception of the temperature, the higher the press force. If the temperature of objects is similar to skin temperature, the effect of the press force on the sensory characteristics of temperature is small. Moreover, it was found that there is the possibility that contact area of forefinger affect the characteristics of temperature sense.

Keywords : *characteristic of sensory temperature, press force, human forefinger*

1. は じ め に

触覚ディスプレイ・インタフェースに関する従来研究では、視聴覚だけでは伝えられない情報である触覚の提示などを目的とした研究が盛んに行われている[1, 2]。触覚を活用することで、複数の感覚を用いた戦略的な情報提供が可能となるため、加齢によって感覚の衰えが生じる高齢者の情報格差問題の解決やコミュニケーションツールとしての活用などが期待されている。

触覚がディスプレイ・インタフェースに盛んに応用されつつあるが、そのほとんどは圧覚や力覚、振動覚を活用した研究であり、温度感覚を活用した研究はほとんどなされていない。温度感覚は、体表面上に与えられる温度刺激に対して生起される感覚であり、外界の温度変化を察知して発汗やふるえなどを誘発させる重要な感覚である。そのため、心理学的あるいは生理学的・神経学的側面から温度感覚の究明を目指した研究が従来多くなされてきている。ここで、温度感覚に関する基本的な知見を整理する。まず、皮膚上には温覚あるいは冷覚のみを引き起こす径1 mm以下の小領域（温点、冷点）が存在し、その分布密度は体部位によって異なること

が知られている[3, 4]。また、温点は顔や手掌などの限られた体部位にのみ存在すること、温点よりも冷点の分布密度のほうが高いこと、冷覚は温覚よりも感覚閾値が低いことなどが明らかにされている[5]。さらに、ヒトが知覚する温度感覚は、順応や温度変化速度、刺激面積、刺激部位、加齢効果などによって相違してくることがわかっている[6]。このように、温度感覚の基本特性が多く調べられている一方で、ディスプレイ・インタフェースへの活用を志向した従来研究はほとんど行われていない。

このような状況の中で、著者らはこれまでに、温度感覚のディスプレイ・インタフェースへの応用を目指した研究を行ってきた[7, 8]。具体的には、温度可変素子（ペルチェ素子）を格子状に配置することで、指先や手掌部に温度感覚を提示することのできるディスプレイ・インタフェースの開発を目指している。このようなディスプレイ・インタフェースが開発されれば、温度感覚を用いた相互のコミュニケーション支援や情報伝達を実現できる可能性がある[9]。しかしながら、このディスプレイ・インタフェースでさらに多様なインタラクションを実現するためには、ヒトが能動的に温度刺激に触れた際の温度感覚特性に関する知見が不足している。

ヒトが物体への接触を通して温度感覚を知覚する方法は、次の2種類に大別できる。まず1つ目は、静止しているヒトに対して触対象物が何らかの働きかけを行うことで受動的に温度感覚を知覚する場合である。もう一方は、ヒトが能動的に触対象物に触れることで温度感覚を知覚する場合である。温度感覚特性や温度受容器の解明を目指した基礎研究では、前者で示したような受動的な場면을対象とした研究が数多く報告されている[10, 11]。しかし、ディスプレイ・インタフェースの開発に寄与する知見を獲得することを目的とする場合には、受動的な温度感覚特性だけでなく、より実場面に近い能動的に触対象物に働きかけた際の温度感覚特性の知見も必要である。例えば、ヒトの皮膚は粘弾性をもつため、触対象物に指先で能動的に触れる際には発揮する力の大小によって皮膚組織自体の変形量が異なる。すると、触対象物との接触面積や皮膚組織内部に伝わる熱分布が変化し、内包される温度受容器の発火パターンなどが相違することによって温度感覚特性に影響が及ぶ可能性は考えられる。とりわけ、空間的加重によって温度感覚は増幅することから[12]、押下力による温度感覚特性の変化に対して、触対象物との接触面積が関与する可能性は高い。そのため、指先で押し込む力と温度感覚特性の関係を明らかにした上で、触対象物との接触面積に基づく検討を加えることによって、能動的に触対象物に働きかけた際に知覚する温度感覚についての基礎的な知見が得られると考えた。このような基礎的な知見の充実、ヒトとの親和性が高いディスプレイ・インタフェースの開発に向けて、より自然な温度感覚の提示方法について検討を行う際には必要不可欠である。一方で、温度感覚に関するヒトの感覚知覚特性を明らかにしていくことは、温度に対する感性の解釈にも新たな示唆を与えるものであり、当該領域においても意義のある研究だと考えられる。

そこで本研究では、温度感覚を活用した皮膚感覚ディスプレイ・インタフェースの開発に繋がる基礎的な研究の位置付けとして、ヒトが能動的に触対象物に触れて温度感覚を知覚する場面に着目し、指先での押下力と温度感覚特性の関係を明らかにすることを目的とした。また、押下力に伴い変化する触対象物との接触面積も併せて計測し、温度感覚特性との関係を調べることで、接触面積に基づく基礎的な検討を行うことにした。

2. 実験

ここでは、利き手の示指末梢部(図1参照)で単一の温度刺激に異なる押下力で触れた際の温度感覚特性を評価するための実験方法について述べる。

2.1 被験者

被験者として成人男性10名(平均年齢 23.0 ± 0.8 歳)に協力を得た。なお、温度感覚は皮膚の初期温に影響を受ける[13]。そのため、被験者の示指の皮膚温の変動が温度感覚特性に影響を及ぼす可能性が考えられたため、計測を行った。その

結果、実験前の測定では $32.6 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ 、実験中の測定では $32.8 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 、実験後の測定では $32.9 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ であり、実験を通してほぼ一定であったことを確認した。また、いずれの被験者も示指に外傷や関連既往歴はなかった。なお、本実験は、首都大学東京日野キャンパスの研究安全倫理委員会の承認を得ている。また、被験者には事前に実験の内容と実験手順について説明を行い、実験参加への同意を得た上で実験を実施した。

2.2 実験装置

2.2.1 温度感覚特性評価実験に用いた実験装置

示指での押下力が温度感覚特性に及ぼす影響を評価するため、図2に示すような実験環境を構築した。温度刺激の提示には、騒音や振動などを発生せず、直流電流の極性を制御することで容易に温度刺激を提示することができるペルチェ素子(秋月電子通商製 TES1-12705)を用いた。ペルチェ素子の大きさについては、示指で押すのに十分な縦 30 mm ×横 30 mm ×厚さ 3.1 mm とした。また、最大吸熱量($Q_{c,max}$)は 40 W 、最大温度差(ΔT_{max})は 63°C であった。ペルチェ素子には温度センサIC(Seiko Instruments社製 S-8120C)を貼り付け、サンプリング周波数 1 Hz で測定したペルチェ素子の温度をコンピュータのディスプレイに表示させることで任意の温度刺激が生成できていることを確認した。本実験装置で制御可能な温度の範囲は $-10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ である。さらに、ペルチェ素子から生じる余熱を逃がし規定の温度を提示させるために、熱伝導性シリコン接着剤でアルミ板をペルチェ素子の下に張り付け、ヒートシンクとして用いた。また、指先での押下力を計測するために、

図1 評価対象部位 (示指末梢部)

図2 温度感覚特性評価実験の実験装置の概略図

指先での押下力と温度感覚特性の関係

一軸ビーム型ロードセル（TEAC社製 TU-CR 50 N、定格容量 50 N）をヒートシンクの下に取り付けた。ロードセルからの出力は、デジタル指示計（TEAC 社製 TD-3002）及び Analog I/O Card（CONTEC 社製 ADA16-32/2(CB) F）により A/D 変換した後にコンピュータに取り込んだ。サンプリング周波数は 100 Hz である。さらに、被験者が手を置くことのできる手置台を用意した。この手置台は、ロードセルやペルチェ素子及びアルミ板と接触しないよう注意して設置した。また、手置台に手を置いた状態で利き手示指を上下した際にだけペルチェ素子と触れることができるよう高さを調節した。

2.2.2 示指の接触面積計測に用いた実験装置

図3に示す実験環境を構築し、指先での押下力を変化させた際の触対象物との接触面積を計測した。

計測には、光の全反射の性質を利用した検出法（Frustrated Total Internal Reflection）[14]を採用した。計測原理について述べる。白色LEDからアクリル板に臨界角を超えて入射した白色光は全反射し続けるが、指先が触れている領域（以下、接触領域）では屈折率が異なるため、入射する光は拡散されて接触領域の輝度が高まる。接触領域の画像は下方に45°で設置した鏡を介してデジタルカメラに入射するため、それを撮影する。撮影した静止画像に対して2値化処理を施し、接触領域とそうでない領域の輝度の差を大きくする。そこから接触領域の総画素数を取得することで指先の接触面積を計測した。なお、撮影した静止画像の解像度は300 dpi (dots per inch) である。

2.3 実験手順

実験では、被験者に利き手の示指を用いて異なる押下力でペルチェ素子を押下させ、温度感覚の差の程度を答えさせた。なお、視覚的に指先での押下力をフィードバックできるプログラムを作成し、それを被験者にリアルタイムで見せることで、規定の押下力を発揮させるようにした。実験課題の手順は以下の通りである。

- (1) 手置台に手を載せ、規定の押下力（押下力 A）で5秒間、ペルチェ素子を鉛直方向に示指で押下する。5秒の押下時間は、被験者自身が電子メトロノームの拍節に合わせて調節した。
- (2) (1)とは異なる押下力（押下力 B）でペルチェ素子を鉛直方向に押下させた。手順は(1)と同様である。

図3 示指の接触面積計測装置の概略図

上記の(1)及び(2)の手順を、(1) → (2) → (2) → (1)の順で行い、その後、被験者に温度感覚の差の程度に関する評価を口頭で答えさせ、これを1試行とした。なお、被験者が速やかに規定の力を発揮できるように、実験前に十分な練習を行った。

評価対象部位への温度提示時間（5秒間）は、火傷や凍傷の恐れが少なく、なおかつ温度感覚を十分に知覚できることを基準として決定した。具体的には、高温物体および低温物体に意図せずに触れた際の知覚反応時間がそれぞれ4秒と3秒であるという知見を参考とした[15, 16]。温度感覚の差の程度に関しては、手順(1)と手順(2)のどちらで触れたペルチェ素子の温度がより温かく（もしくは冷たく）感じたかについて、表1に示す7段階カテゴリを用いて回答させた。カテゴリで用いた副詞は、心理尺度上でほぼ等しい間隔であることが明らかにされている「やや」、「かなり」、「非常に」の3つを用いて7段階で表現することとした[17]。

2.4 実験因子

実験因子として、ペルチェ素子の温度と指先による押下力の2つを採用した。

温度については、15、25、35、45 [°C] の4条件とした。この温度条件の選定については、本研究がディスプレイ・インタフェースにおいて温度感覚による多様なインタラクションの実現を目的としているため、温覚から冷覚までを生じさせる範囲[6]で条件を設定した。さらに、下限値である15°Cと上限値である45°Cは、それぞれ凍傷と火傷の恐れがないよう倫理的配慮に基づいて決定した。

押下力については、0.5、1.0、6.0、10.0 [N] の4条件とした。この押下力条件の選定については、予備実験の結果を踏まえ、押下力を変化させることで主観的にも温度感覚が異なる値を選定した。また、下限値の0.5 Nと上限値の10 Nは、被験者が安定して発揮できる力の範囲に基づいて決定した。さらに、条件数については、被験者に過度な負担がかからないよう配慮して設定した。

以上の温度及び押下力の条件の下で各温度条件における押下力の影響を評価するため、一対比較法[18]を用いて実験を行った。一対比較法では、刺激を対にして比較させる。押下力4条件（0.5、1.0、6.0、10.0 [N]）の中から2つを選ぶ組み合わせは6通り（ ${}_4C_2$ ）である。これを4つの温度条件ごと（15、25、35、45 [°C]）に実施するため、温度と押下

表1 7段階カテゴリ及びスコア

カテゴリ	スコア
Aのほうが非常に温かい／冷たい	-3
Aのほうがかなり温かい／冷たい	-2
Aのほうがやや温かい／冷たい	-1
同程度	0
Bのほうがやや温かい／冷たい	1
Bのほうがかなり温かい／冷たい	2
Bのほうが非常に温かい／冷たい	3

力の組み合わせは24通りである。試行数について、各組合せでそれぞれ3試行ずつ行ったため、各被験者が実験全体を通して行った試行数は合計72試行であった。なお、順序効果を排除するために、押下力について被験者間でカウンターバランスをとった。実験は2日に分けて行い、実験時間は休憩も含めて各日とも2時間程度であった。また、実験室の平均の室温及び湿度はそれぞれ $24.3 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ 、 $36.8 \pm 4.5\%$ であった。

2.5 評価指標とその解析方法

表1に示したスコアより Scheffe の一対比較法の1つである中屋変法[18]を用いて、温度条件ごとに尺度値 $\hat{\alpha}$ を式(1)より求め、温度感覚特性の評価に用いた。また、統計処理として押下力を要因とする一元配置分散分析を行った。押下力による主効果が認められた場合には、温度条件ごとにスチューデント化されたヤードスティック Y 値を式(2)より算出し、押下力条件間の有意差を検定した。

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{tN}x \quad (1)$$

$$Y = q\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{tN}} \quad (2)$$

ここで、 x はスコアの合計値、 t は押下力の条件数、 N は被験者数、 $\hat{\sigma}^2$ は不偏分散の誤差、 q はスチューデント化された範囲($p=0.05, 0.01$)を表す。

3. 結果

3.1 温度感覚特性

図4に各温度条件における押下力と尺度値の関係を示す。図中の縦軸は尺度値を表しており、値が高いほど温覚ではより温かく感じ、冷覚ではより冷たく感じることを示す。なお、尺度値0は全体の平均値を意味する。

図4(a)に、温度条件 15°C での結果を示す。分散分析を実施した結果、押下力の主効果が有意であった($p<0.001$)。さらに、スチューデント化されたヤードスティック Y 値から隣り合う押下力条件間の全てにおいて有意差が認められたことより、押下力が大きくなるにつれて尺度値の値も有意に高くなることがわかった。

図4(b)に、温度条件 25°C での結果を示す。分散分析より、押下力の主効果が認められた($p<0.001$)。水準間の有意差を調べた結果、押下力 6.0 N および 10.0 N のときには押下力 1.0 N の条件に対して有意に尺度値は高くなることがわかった(それぞれ $p<0.01$, $p<0.05$)。

図4(c)に、温度条件 35°C での結果を示す。分散分析より、押下力の主効果が有意であった($p<0.001$)。さらに、押下力条件間の有意差を検定した結果、押下力 6.0 N では 1.0 N よりも有意に尺度値は高くなることがわかった($p<0.05$)。また、押下力が 10.0 N では 0.5 N よりも尺度値の値は有意に高かった($p<0.05$)。

図4(d)に、温度条件 45°C の結果を示す。統計処理として分散分析を実施した結果、押下力の主効果が認められた

図4 各温度条件における押下力と尺度値の関係

指先での押下力と温度感覚特性の関係

($p < 0.001$)。押下力条件間の有意差を調べた結果、0.5 Nと1.0 N、1.0 Nと6.0 Nの間で有意差が認められ（それぞれ $p < 0.05$, $p < 0.01$ ）、押下力の増加に伴って尺度値の値は高くなった。

以上より、温度感覚の尺度値と押下力の関係が明らかとなった。具体的には、いずれの温度条件においても、押下力の増加に伴って尺度値は増加する傾向がみられ、触対象物への接触力が大きくなるほど、より温かく、もしくは冷たく感じる事がわかった。また、25℃及び35℃の温度条件では、15℃及び45℃の温度条件と比べて、押下力の増加に伴う尺度値の変化量は全体的に小さかった。しかし、25℃では1.0 Nと6.0 N以上、35℃では0.5 Nと10.0 N、1.0 Nと6.0 Nの各押下力条件間で尺度値は有意に変化することがわかった。

3.2 示指の接触面積

図5に押下力と示指の接触面積の関係を示す。値は被験者10名の平均値であり、計測を行った押下力は0.5, 1.0, 6.0, 10.0 [N]の4条件である。エラーバーは標準偏差を表す。全体的な傾向としては、押下力の増加に伴って接触面積は大きくなることがわかった。なお、本実験で得られた結果は、指先につけた顔料インク痕をイメージスキャナで取得し、2値化した静止画像からアクリル試料片と示指の接触面積を調べた従来研究[19]での報告結果と概ね一致した。

ここで、温度感覚特性の尺度値と接触面積の関係を調べるために、温度条件ごとに両指標の相関図を図6に示す。縦軸は図4で示した温度感覚の尺度値を、横軸は図5で示した示指の接触面積を表す。結果より、いずれの温度条件において

図5 示指の接触面積と押下力の関係

も、両指標の相関係数 R は0.9を上回る高い値が得られた。このことから、温度感覚特性の尺度値と接触面積の間には高い相関関係があることを確認できた。

以上より、示指による押下力の増加に伴い、触対象物との接触面積は大きくなっていくことがわかった。さらに、接触面積と温度感覚の尺度値との相関係数は高く、両指標の間には高い相関関係が存在することも明らかとなった。

4. 考 察

図4より、押下力の増加に伴って温度感覚の尺度値は高くなり、温刺激においてはより温かく、冷刺激においてはより冷たく感じる事がわかった。また、図6より、接触面積と温度感覚の尺度値との間には高い相関関係が認められた。これらのことから、押下力と温度感覚特性の関係を明らかに

図6 各温度条件における尺度値と示指の接触面積の関係

することができた。さらに、押下力による温度感覚特性の変化には、触対象物との接触面積が関与している可能性が示唆された。このことについて、温度感覚では、初期皮膚温と刺激温度との間の熱量差が感覚の生起に重要な因子とされており、この熱量差は刺激面積や刺激温度の変化率によって変動するといわれている [13]。そのため、押下力が大きくなるにつれてペルチェ素子との接触面積が増加し、指先がペルチェ素子から受容する熱量が増えたことで、より温かく、もしくは冷たく感じた可能性が考えられる。さらに、温度刺激を提示する皮膚上の面積が大きいほど、空間的加重によって温覚・冷覚の大きさも増すという従来知見とも矛盾しない [12]。

また、25℃と35℃の温度条件では、15℃と45℃の温度条件に比べて、押下力増加に伴う尺度値の変化量が小さかった。これについては、初期皮膚温と提示温度の温度差が関与していた可能性が考えられる。先述した通り、温度感覚の生起には初期皮膚温と刺激温度との熱量差が重要な因子であると考えられている [13]。今回の被験者では、実験を通して計測した皮膚温が平均で約33℃であった。つまり、15℃と45℃の温度条件では、この平均皮膚温からの温度差がそれぞれ18℃と12℃であったのに対し、25℃と35℃の温度条件ではそれぞれ8℃と2℃の比較的小さな温度差であった。そのため、25℃と35℃の温度条件においては十分な温度感覚が生起されなかったために、押下力条件間による尺度値の値に有意な差が認められなかった可能性が考えられる。しかしながら、25℃では1.0 Nと6.0 N以上、35℃では0.5 Nと10.0 N、1.0 Nと6.0 Nの各押下力条件間で尺度値は有意に変化する結果も得られた。このことから、初期皮膚温と刺激温度の温度差が小さい場合でも、十分に押下力が異なる条件同士であれば、温度感覚は変化することが明らかとなった。

なお、指先での押下力の変化に伴って変動する他の因子としては、指先に加わる圧力や、指先の血流量、物体と指との熱伝導特性 [20] などとも考えられる。このうち、指先に加わる圧力に関して、Zimmermannら [21] は、感覚間の相互作用を明らかにすることを目的として、圧力が温度感覚特性に及ぼす影響を調べている。この研究では、一定温度（4, 12, 20, 24, 28, 36, 40, 44 [℃]）のアルミブロック（19 mm × 38 mm × 31 mm）を一定の圧力（0.62, 2.3, 7.7 [N]）で手の皮膚上にあてた時の温度感覚についてマグニチュード推定法を用いた評価を行っている。その結果、圧力は冷覚には若干の影響を及ぼすが、全体的な傾向として温度感覚特性に及ぼす影響は非常に小さいとしている。その他の因子に関しても、温度感覚特性に顕著な影響を及ぼすという報告はなされてはいないが、今後はこれらの影響についても実験的検討を重ねていき、温度感覚の知覚特性に関する総合的な評価を行っていく必要があると考えている。また、触対象物との接触面積についても、実験因子として統制した条件の下で評価を行い、温度感覚特性に及ぼす影響をより詳細に調べていく必要がある。

5. お わ り に

本研究では、温度感覚を活用した皮膚感覚ディスプレイ・インタフェースの開発に繋がる基礎的研究の位置付けとして、ヒトが能動的に触対象物に触れて温度感覚を知覚する場面に着目し、指先での押下力と温度感覚特性の関係を明らかにすることを目的として実験を行った。また、押下力に伴い変化する触対象物との接触面積も併せて計測し、温度感覚特性との関係を調べることで、接触面積に基づく基礎的な検討を行った。その結果、押下力の増加に伴って温度感覚の尺度値は増加する傾向がみられ、触対象物への接触力が大きくなるほど、より温かく、もしくは冷たく感じるようになった。また、初期皮膚温と刺激温度の温度差が小さい場合でも、十分に押下力が異なる条件同士であれば、温度感覚は有意に変化することが明らかとなった。さらに、接触面積と温度感覚の尺度値との間に高い相関関係がみられた。このことから、押下力による温度感覚特性の変化には、触対象物との接触面積が関与している可能性が示唆された。本研究で得られた知見は、ヒトの能動的な温度知覚特性に基づく親和性の高い温度感覚ディスプレイ・インタフェースを設計する際の参考データとして有用であろう。

参 考 文 献

- [1] 大岡昌博, 古賀宏嗣, 宮岡徹, 三矢保永: 高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ呈示: 第1報触覚マウスの試作と性能評価実験法の確立, 日本機械学会論文集C編, 71(711), pp.3174-3180, 2005.
- [2] Bicchi, E.: Haptic Discrimination of Softness in Teleoperation: The Role of the Contact Area Spread Rate, *IEEE Trans. Robotics & Automation*, 16, pp.496-504, 2000.
- [3] Rein, H.: Über die Topographie der Warmempfindung. Beziehungen zwischen Innervation und Receptorischen Endorganen, *Zeitschrift für Biologie*, 82, pp.513-535, 1925.
- [4] Strughold, H., Porz, R.: Die Dichte der Kaltpunkte auf der Haut des Menschlichen Körpers, *Zeitschrift für Biologie*, 91, pp.563-571, 1931.
- [5] Stevens, J.C., Choo, K.K.: Temperature sensitivity of the body surface over the life span, *Somatosensory and Motor Research*, 15, pp.153-166, 1996.
- [6] 大山正, 今井省吾, 和氣典二: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, pp.1249-1261, 1996.
- [7] 土井幸輝, 西村崇宏, 瀬尾明彦, 串山久美子, 馬場哲晃: ヒト手掌部における温度感覚特性及び識別特性の評価, 日本感性工学会論文誌, 11(3), pp.419-425, 2012.
- [8] 西村崇宏, 唐澤洋之, 瀬尾明彦, 土井幸輝: ヒト手掌部での温度感覚による仮現運動において温度刺激の提示時間とSOAが発生率に及ぼす影響の評価, 日本感性工学会論文誌, 11(3), pp.475-481, 2012.

指先での押下力と温度感覚特性の関係

- [9] 瀬尾明彦, 西川冬瑠, 土井幸輝: ヒトの手掌部の温冷感覚特性の評価とその活用法の検討, 日本感性工学会誌, 9(1), pp.111-117, 2009.
- [10] Hensel, H.: Physiologie der thermoreception, Ergebnisse der Physiologie, 47, pp.166-368, 1952.
- [11] Kenshalo, D.R.Sr.: Biophysics and Psychophysics of Feeling, Handbook of Perception, 5B, Academic Press, pp.29-103, 1978.
- [12] Stevens, J.C., Marks, L.E., Simonson, D.C.: Regional Sensitivity and Spatial Summation in the Warmth Sense, *Physiology and Behavior*, 13, pp.825-836, 1974.
- [13] Hensel, H.: Temperaturempfindung und intracutane Wärmebewegung, *Pflügers Archiv*, 252, pp.165-215, 1950.
- [14] Jefferson, H.: Low-cost Multi-touch Sensing through Frustrated Total Reflection, *Proceedings of the 18th ACM symposium on User interface software are and technology*, pp.115-118, 2005.
- [15] ISO13732-1: Ergonomics of The Thermal Environment- Methods for The Assessment of Human Responses to Contact with Surfaces (Part1: Hot Surfaces), 2006.
- [16] ISO13732-3: Ergonomics of The Thermal Environment- Methods for The Assessment of Human Responses to Contact with Surfaces (Part3: Cold Surfaces), 2005.
- [17] 織田揮準: 日本語の程度量表現用語に関する研究, 教育心理学研究, 18, pp.166-176, 1970.
- [18] 中屋澄子: Scheffeの一对比較法の一変法, 第11回官能検査大会報文集, pp.1-12, 1970.
- [19] 藤田欣也, 片桐 宏: 指先接触力検出と接触面積制御による物体柔らかさの提示, 映像情報メディア学会技術報告, 24(35), pp.1-4, 2000.
- [20] 日本機械学会: 伝熱工学資料 第4版, 日本機械学会, pp.30-31, pp.312-322, 1986.
- [21] Zimmermann, R.J., Stevens, J.C.: Temperature-touch Interactions: Is There a Reverse Weber phenomenon?, *Bulletin of the Psychonomic Society*, 19, pp.269-270, 1982.

西村 崇宏 (正会員)

2014年 早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程修了。日本学術振興会特別研究員を経て、2014年より国立特別支援教育総合研究所教育情報部研究員、現在に至る。主に、ユーザインタフェースの操作性評価に関する研究に従事。日本感性工学会、日本機械学会、日本教育工学会などの各会員。博士(人間科学)。

土井 幸輝 (正会員)

2006年 早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程修了。早稲田大学理工学術院研究助手、首都大学東京システムデザイン学部助教、国立特別支援教育総合研究所教育研修情報部研究員を経て、2013年より同研究所教育情報部主任研究員、現在に至る。主に、視覚障害者支援に関する研究、皮膚感覚知覚特性の解明に関する研究に従事。日本感性工学会、日本機械学会、日本生活支援工学会、バイオメカニズム学会などの各会員。博士(人間科学)。

唐澤 洋之 (非会員)

2013年 首都大学東京大学院システムデザイン研究科博士前期課程修了。在学中は、ヒトの温度感覚知覚特性の解明に関する研究に従事。現在、富士通株式会社に勤務。修士(工学)。

瀬尾 明彦 (非会員)

1988年 広島大学大学院医学系研究科修了。広島大学助手、福井医科大学医学部助教授、東京都立科学技術大学工学部教授を経て、2005年より首都大学東京システムデザイン学部教授、現在に至る。主に、作業による身体負担の計測とその評価法の開発に関する研究に従事。日本人間工学会、日本経営工学会、日本産業衛生学会などの各会員。医学博士。