

温・冷刺激の空間分割による高応答性温度提示ユニット

佐藤 克成^{† ‡} 前野 隆司[‡]

装着型の VR インタフェースや携帯端末など、使用時に皮膚と接触状態にあるデバイスにおいて温度感覚の提示する場合、時間応答性が問題となる。本稿では、ヒトの温度知覚特性の中で、閾値が順応温度に依存する、空間分解能が低い、という 2 点に着目し、高い応答性を実現する温度提示ユニットを提案する。温刺激と冷刺激を空間的に分割し、順応温度を調整することで、従来の温度提示手法より温度知覚時間が短縮することを、実験により確認した。

High-Response Thermal Display Unit using Spatially Distributed Warm and Cold Stimuli

KATSUNARI SATO^{† ‡} TAKASHI MAENO[‡]

Time response of thermal display is important problem especially for a device which maintains contacts with human skin, such as a glove-type VR interface and a portable terminal. In this paper, we focus on two characteristics of human thermal perception, one is that the threshold changes depending on adapting temperature and another is that the spatial resolution is low, and propose a high-response thermal display unit based on these characteristics. We confirmed that the proposed method that controls adapting temperature and uses spatially distributed warm and cold stimuli could improve time response of thermal display.

1. はじめに

ヒトの触感における温度感覚は、接触対象の状態や材質の認識を可能にする。山本ら[1]は、対象と接触後の指先の温度変化を再現することで、金属や木材などの材質感を再現している。さらに、温度感覚はヒトの情動にも影響することが指摘されており、Williamsら[2]は、身体的な温度が心理的な温かさに関連することを示唆している。

近年、VR インタフェースや携帯端末をはじめとして、触感を再現するインタフェースが数多く開発されている。これらは、主に力覚や圧覚・振動覚の提示により、触感の再現を試みている。さらに温度感覚を提示することで、インタフェースが再現する触感の種類が増え、ユーザーに提供する体験の幅が拡張されると期待できる。佐藤ら[3]は、空間的に分布する圧覚と温度感覚を同時に提示することで、遠隔地のモノの形状や材質の再現を試みている。串山ら[4]は、映像と同期した温度感覚を提示することで、蔓や氷の結晶に触れその温もりや冷たさを感じられるインタラクティブシステムを構築している。さらに将来的には、携帯電話などにも温度感覚の提示機構が搭載されると期

待できる。この場合、家族や恋人などと通話する時にお互いの温もりを伝え合い、相手の存在をより身近に感じられるようになることを考える。

温度感覚の提示においては、その時間応答性が問題となる。ヒトがモノに接した場合、皮膚表面における伝熱の対象が空気からモノへと切り替わり、瞬間的に急激な温度変化が生じる。温度感覚の提示機構としては、この温度変化を再現できる、高い応答性が求められる。特に、装着型の VR インタフェースや携帯端末のように、使用中にデバイスと皮膚とが接触した状態を保つ場合は、この応答性が大きな問題となる。これらのインタフェースでは、温度感覚の提示機構が常に皮膚と接触状態にあり、瞬間的な伝熱状態の変化を再現することが困難である。高い応答性を実現するためには高いエネルギーが必要となり、また冷刺激を提示するためには、吸熱したエネルギーを放熱する機構が必要となり、デバイスが大型化する。

我々は、ヒトの温度感覚の知覚特性を利用し、高速な温度感覚提示を実現する手法に着目する。秋山ら[5]は、皮膚の順応温度を調整することで、温・冷両刺激に対して温度提示を高速化できることを示している。本稿ではこの結果に基づき、温刺激と冷刺激をマトリクス状に配置した温度提示ユニットを提案し、その有効性を検証する。

† 日本学術振興会

Japan Society for the Promotion of Science

‡ 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科

System Design and Management, Keio University

2. 提案手法

本章では、提案手法の基礎となるヒトの温度知覚に関する従来知見を概説し、その上で温度提示ユニットを紹介する。

2.1 温度感覚の知覚特性

ヒトの温度変化に対する感度は、皮膚の温度変化速度、皮膚の順応温度、そして温度刺激の面積に依存することが知られている。温度変化速度に関しては、変化が急激な程、温・冷刺激共に閾値が減少する傾向にある [6]。ただし、 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ より急激な温度刺激に対しては閾値が同程度となる。閾値は温度変化が生じる前の皮膚の温度（順応温度）によって変化する [7]。順応温度が高いほど温刺激の閾値が減少し、冷刺激に対する閾値が上昇する。一方で、順応温度が低いほど冷刺激に対して敏感になり、温刺激に対して鈍感になる。温度閾値は刺激面積が広いほど小さくなる傾向にあり [8]、温刺激に対しては面積が2倍になると閾値は半分程度になる [9]。同様に、冷刺激に対しては面積が4倍になると閾値は半分程度になる。

温度感覚は、圧覚や振動覚など他の触覚に比べ空間分解能が低い。2点弁別閾の実験 [10] では、前腕における弁別閾が150mmと報告されている。また、温刺激の位置定位実験 [11] では、位置知覚精度は手の背面において19mm程度であると報告されている。

2.2 温刺激と冷刺激の空間分割

秋山ら [5] の研究では、ヒトの温度閾値が皮膚の順応温度に依存することに着目し、順応温度をユーザに知覚されない範囲で予め調整することによって、温度変化提示の応答性を高める手法を提案している。実験では、15mm四方のペルチェ素子を上下に2つ並べており、それぞれを温刺激と冷刺激を割り当てている。結果として、温刺激と冷刺激の両方に対し、順応温度を調整することで応答性が15%程度向上することを確認している。ただし、ペルチェ素子を並べた幅が、温度刺激の位置定位精度19mmよりも大きい場合、被験者は温刺激と冷刺激の位置を認識可能である。

本稿では、この順応温度を調整する手法を採用した温度提示ユニットを提案する。提案する温度提示ユニットの構成を図1aに示す。1辺が10mm未満のペルチェ素子4つを2×2のマトリクス状に配置する。ペルチェ素子の内、温刺激と冷刺激が交差するように、2つは温刺激、もう2つは冷刺激用に割り当てる。ペルチェ素子は、背面部の放熱が不十分である場合、温度刺激提示面における温度変化の効率が低下する。そこで、ペルチェ素子の背面は、アルミ板などの熱伝導

率の高い物質に接着する。ペルチェ素子の大きさを温度刺激の位置定位精度の半分未満にすることで、使用者は局所的な温度刺激の位置を正確に把握できず、面全体からの刺激として知覚すると考えられる。

提案する温度提示ユニットを用いた温度変化提示手法の例を図1bに示す。まず、温刺激用のペルチェ素子では、ユーザに知覚されない範囲で、皮膚の温度が初期温度よりも高い順応温度になるように調整する。同様に、冷刺激用のペルチェ素子は、皮膚の温度が初期温度よりも低い順応温度になるように調整する。そして温刺激を提示する場合は、温刺激の強度に応じて温刺激用のペルチェ素子を駆動し、冷刺激用のペルチェ素子は皮膚温度を順応温度に維持する。この場合、ユーザは温刺激のみを提示面全体から知覚する。冷刺激を提示する場合は、冷刺激の強度に応じて冷刺激用のペルチェ素子を駆動し、温刺激用のペルチェ素子は順応温度を維持する。この場合は、ユーザは提示面全体からの冷刺激を知覚する。このように温刺激と冷刺激を空間的に分割し、順応温度を調整することで、温・冷両方の刺激に対して応答性を高められると考える。また提案手法では、温刺激と冷刺激が急に切り替わる場合において、1つのペルチェ素子に要求される表面温度変化が、全てのペルチェ素子を一様に温度変化させる場合よりも小さくなり、より急速な温度変化を再現できると考える。

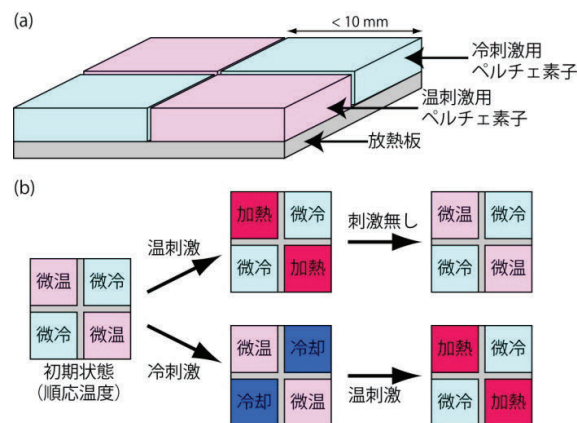


図1 a. 温度提示ユニットの構成 b. 温度変化提示の例

3. 実験

提案する温度提示ユニットは、主に以下の3つを仮定している。

1. 使用者は局所的な温度刺激を全体的な刺激として知覚する。
2. 温刺激と冷刺激を分割することで温度変化を高速に提示できる。

3. 提案するペルチェ素子の大きさと配置においても順応温度の調整手法 [5] が有効である。

本章の実験では、これら3つの仮定を検証した。

3.1 実験環境

実験装置を図2に示す。2×2の4つのペルチェ素子を配置した。ペルチェ素子としては、日本テクモ社製のペルチェ素子 (TEFC1-03112, 8.3mm×8.3mm×2.4mm) を用いた。被験者は、ペルチェ素子の上に人差し指の指先を置いて実験を行った。実験中の室温は24~25℃、湿度は38~41%程度であった。

温度ディスプレイとしての実装を考えた場合、放熱板は小型なほうが望ましい。しかし実験においては、各ペルチェ素子の性能を最大限に引き出すために、アルミニウム製のヒートシンク (30mm×30mm×20mm) を用いた。ペルチェ素子とヒートシンクは熱伝導両面テープで接着し、さらにヒートシンクにはファンを取り付けた。

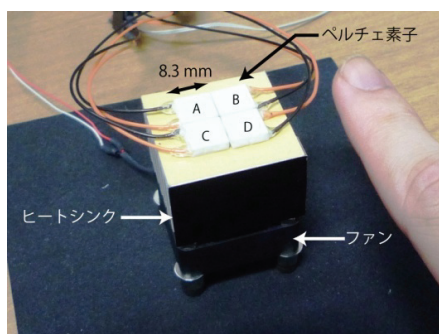


図2 実験装置

ペルチェ素子の駆動には TOSHIBA 社製のモータドライバ TA7291PA を使用し、モータドライバの制御信号は Arduino 社製の Arduino UNO の PWM ピンから出力した。Arduino UNO はシリアル通信でラップトップ PC と接続し、PWM ピンの出力値はラップトップ PC 上で管理した。ペルチェ素子を駆動する電圧の更新周波数は 200Hz とした。

1つのペルチェ素子を駆動した時の、モータドライバの出力電圧とペルチェ素子表面の温度変化速度を図3に示す。計測は、ペルチェ素子の表面に石塚電子社製のサーミスタ 103JT-025 を貼り付け、ペルチェ素子に3秒間電圧を加えることで行った。以下の実験では、得られた温度特性を基に刺激強度を設定した。また、空気中におけるペルチェ素子の表面温度が、ヒトの指の平均的な皮膚温度 (32℃) と同等になる、0.35V の電圧を加えた状態を標準とした。

なお、モータドライバ回路によって PWM の Duty 比とモータドライバの出力電圧に差があったため、各

モータドライバの出力電圧が同等となるように、予め Duty 比の調整を行った。

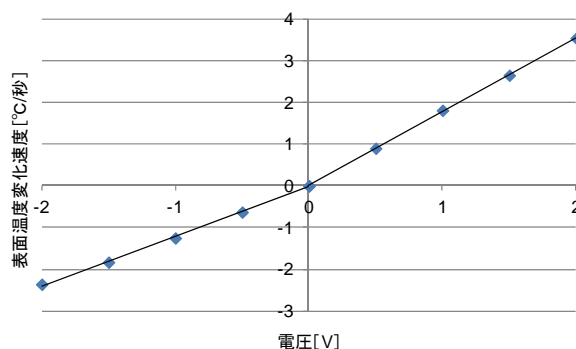


図3 ペルチェ素子の電圧-温度変化速度特性

3.2 温度刺激の位置知覚実験

まず、使用者が局所的な温度刺激を全体的な刺激と知覚するか否かを、刺激位置の知覚実験により検証した。ペルチェ素子のうち2面もしくは4面から刺激を提示した場合に、知覚される刺激位置と知覚時間を評価した。

被験者はボランティアで、20代男性2人 (K.S.とS.A., K.S.は著者) と30代女性1人 (E.S.) とした。それぞれ右利きで、指先の体温は32~33℃程度であった。指幅は15mm以上であり、指先を実験装置に載せた際、4つのペルチェ素子全てに指先が接触した。各被験者には、実験前に実験手順の説明を行った。

実験手順は以下の通りである。まず被験者は、右手の人差し指を実験装置の上に置いた状態で、左手でキー操作を行い、実験を開始する。キー操作の後、ランダムで決定される0.5~1.5秒のインターバルの後に、温刺激もしくは冷刺激が開始される。刺激の提示時間は最長で5秒間である。刺激は、実験装置の4つのペルチェ素子のうち、2つもしくは4つ (図4) からランダムに与えられる。被験者は、温刺激もしくは冷刺激を感じた時点で左手のキー操作により刺激を止め、右手を実験装置から離す。このとき、刺激が開始されてから刺激が止まるまでの時間が計測される。そして被験者は、感じた刺激が温刺激か冷刺激か、および刺激を感じたペルチェ素子の位置を自由に回答する。その後、皮膚とペルチェ素子の表面温度が初期温度に戻るように、20秒間休憩する。以上の手順を繰り返した。

被験者に提示した刺激の種類は、温・冷刺激の2通りと、図4に示す刺激位置のパターン7通りで、合計2×7の14通りとした。各刺激は5回ずつ提示した。刺激強度としては、刺激面積の影響を無くするため、[8]

[9] の知見を参考に、2 面刺激の場合は温刺激 1.75V に冷刺激 -1.6V, 4 面刺激の場合は温刺激 1.0V に冷刺激 -0.95V とした。

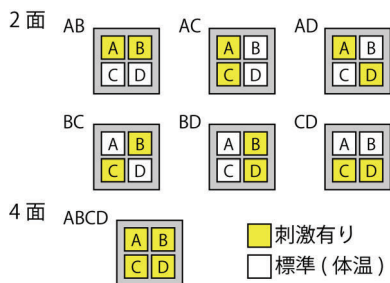


図4 位置知覚の実験において提示した刺激面のパターン

3.3 温度刺激の知覚速度

次に、温刺激と冷刺激を分割提示することの有効性、および順応温度調整手法の有効性を検証した。実験は温・冷刺激を切り替える場合を想定し、温刺激の後に冷刺激、冷刺激の後に温刺激を行った際の、切り替え後の温度刺激の知覚時間を評価した。比較のために、a. 全面提示、b. 分割提示（順応温度調整無し）、c. 分割提示（順応温度調整の有り）の3条件（図5）を用意した。

被験者はボランティアで、20 代男性 3 人 (K.S., S.A., Y.W., K.S.は著者) と 20 代女性 1 人 (A.N.) とした。体温や指の大きさは前節の実験と同様であった。各被験者には、実験前に実験手順の説明を行った。

実験手順は以下の通りである。まず被験者は、右手の人差し指を実験装置の上に置いた状態で、左手でキー操作を行い、実験を開始する。キー操作の後、0.5～1.5 秒の後に、5 秒間の事前刺激が開始される。事前温度刺激は、ランダムで決定される図5中の各条件に基づき与えられる。事前刺激の後に、5 秒間の本刺激が提示される。被験者は、温刺激もしくは冷刺激を感じた時点で左手のキー操作により刺激を止める。このとき、刺激が開始されてから刺激が止まるまでの時間が計測される。その後、皮膚とペルチェ素子の表面温度が初期温度に戻るように、20 秒間休憩する。以上の手順を繰り返した。

被験者に提示した刺激の種類は、温・冷刺激の2通りに、提示条件3通りで、合計2×3の6通りとした。各刺激は5回ずつ提示した。刺激強度は前実験と同様に、分割提示の場合は温刺激 1.75V に冷刺激 -1.6V, 全面提示の場合は温刺激 1.0V に冷刺激 -0.95V とした。事前刺激の開始後4秒間においては、皮膚の温度が全面刺激の場合は 1℃, 分割刺激の場合は 2℃変化するように、刺激を与える時間を調整した。また、順応温

度調整のための刺激は、被験者に知覚されずに5秒間で皮膚温度を 1℃程度変化させる強度として、予備実験から求めた温刺激 0.65V に冷刺激 0.05V とした。

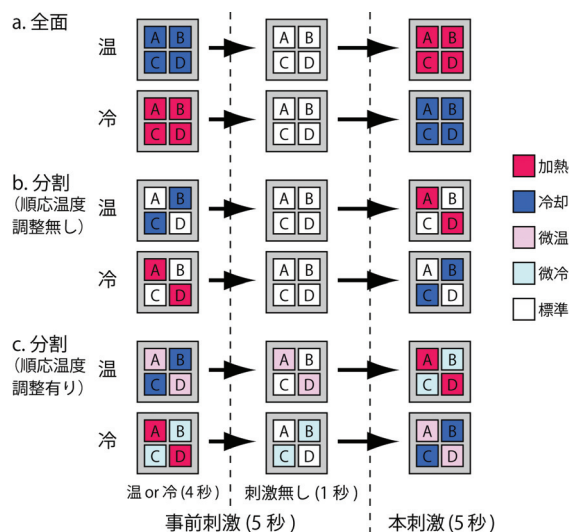


図5 知覚速度の実験において提示した刺激パターン

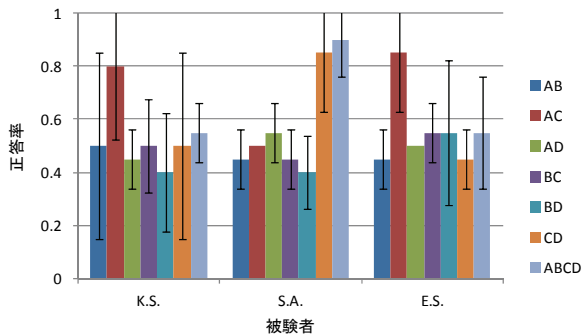
3.4 結果

位置知覚実験の正答率と知覚時間を図6と図7に示す。それぞれ上のグラフが温刺激の、下のグラフが冷刺激の結果である。図6において、横軸は被験者を、縦軸は正答率を表す。ここで正答率とは、(刺激の有る箇所を「刺激有り」と回答した回数+刺激の無い箇所を「刺激無し」と回答した回数)÷4、として定義する。例えば「AB」と提示した際に、「AC」を刺激有りと回答した場合は正答率 0.5, 「A」のみを刺激有りと回答した場合は正答率 0.75 となる。図7の横軸は被験者を、縦軸は知覚時間を表す。図6と図7共に、グラフのバーは被験者の各刺激位置パターンにおける平均値、エラーバーは標準偏差を表す。なお、温刺激と冷刺激の判別結果は、どの被験者も正答率 10 割であった。

被験者や温・冷刺激の違いによって、正答率が8割を超える刺激位置のパターンと、4～6割程度となるパターンが異なっている。「被験者」、「刺激位置パターン」、「温冷」の3要因による分散分析を行った結果、「刺激位置パターン」、および「被験者」と「刺激位置パターン」の交互作用にそれぞれ有意差 ($p < 0.01$) が見られた。

一方で知覚時間においても、正答率と同様に「被験者」や「刺激位置パターン」、「温冷」の各要因によって異なっている。分散分析の結果、「被験者」と「温冷」の交互作用を除く、全ての要因と交互作用について有意差 ($p < 0.01$) が見られた。

○温刺激



○冷刺激

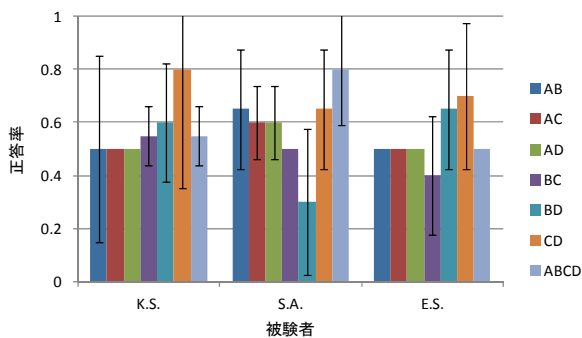
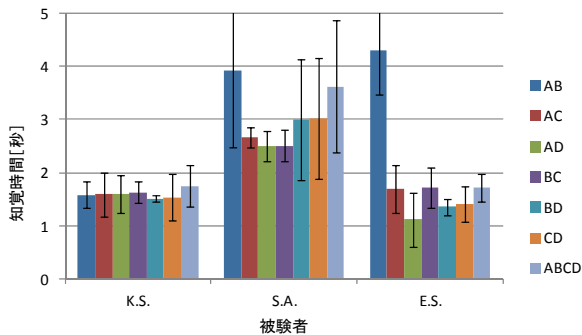


図6 位置知覚実験の正答率. 上: 温刺激. 下: 冷刺激

○温刺激



○冷刺激

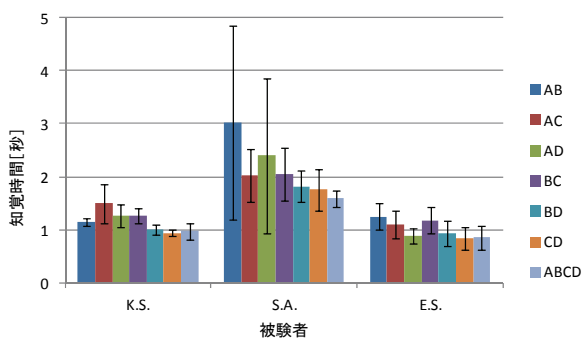
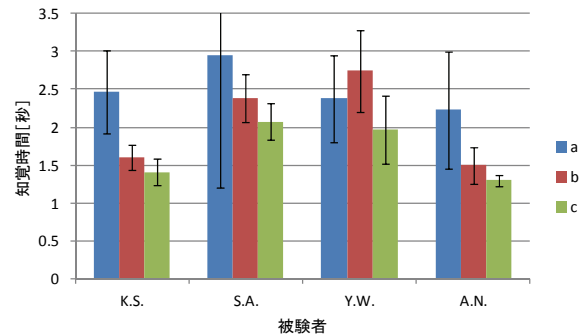


図7 位置知覚実験の知覚時間. 上: 温刺激. 下: 冷刺激

知覚速度実験の知覚時間を図8に示す. 上のグラフが温刺激の, 下のグラフが冷刺激の結果である. 横軸は被験者, 縦軸は知覚時間, グラフのバーは被験者の各条件における平均値, エラーバーは標準偏差を表す.

各提示条件における平均知覚時間は, a の場合に2.3秒, b の場合に2.0秒, c の場合に1.7秒と, 提案手法の場合に最も短くなった. 「被験者」, 「提示条件」, 「温冷」の3要因分散分析の結果, 「被験者」と「提示条件」, および「被験者」と「温冷」の交互作用に有意差 ($p < .01$) が見られた. 「提示条件」における多重比較を行ったところ, 条件aと条件b, 条件bと条件c間にそれぞれ $p < .01$ で有意差が, また条件aと条件b間には $p < .05$ で有意差が見られた.

○温刺激



○冷刺激

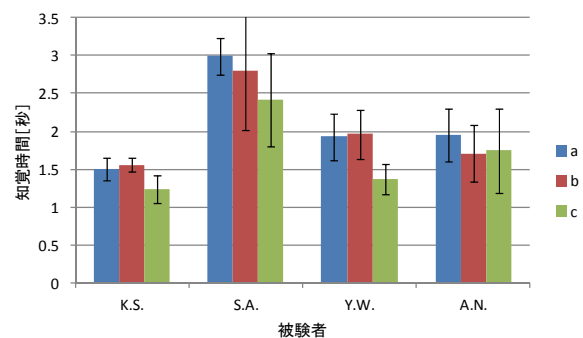


図8 知覚速度実験の知覚時間. 上: 温刺激. 下: 冷刺激

4. 考察

位置知覚精度の実験結果から, 温・冷両刺激に対し, 2面刺激の場合も4面刺激の場合も正確に刺激位置を判断することは困難であることがわかる. そのため, 温刺激と冷刺激を分割して提示した場合は, 提示面全体からの刺激として知覚されると考える. ただし, 被験者によって正確に位置を知覚できる部位があったことから, 指の部位によって温度感が異なると考えら

れる。そのためディスプレイとして使用する際には、ペルチェ素子毎に知覚強度が同一となるようにキャリブレーションを行うことが望ましい。

知覚速度の実験結果では、知覚時間の平均は条件 c の場合に最短となり、条件 a の場合に最長となった。位置知覚精度の実験において、2 面の場合と 4 面の場合の知覚速度がほぼ同一であったことから、刺激面積の影響はないと考えられる。また、条件 a に対する条件 c の知覚時間短縮率は 26% であり、条件 b に対する短縮率は 15% と、秋山ら [5] の研究と同程度となった。以上のことから、今回の実験条件においては、提案する温刺激と冷刺激の空間分割提示、および順応温度の調整手法それぞれが有効であったと考える。ただし 2.1 節でまとめたように、ヒトの温度知覚には様々な要因が影響する。そのため、実際に温度感覚ディスプレイとして応用するためには、ペルチェ素子の大きさや配置する際の間隔、刺激強度や刺激時間などを変化させ、提案手法のロバスト性を評価する必要がある。

5. おわりに

本稿では、皮膚との接触状態を保つインタフェースにおいて高速な温度感覚提示を実現するために、温刺激と冷刺激を空間的に分割して行う温度提示ユニットを提案した。8mm 四方のペルチェ素子を用いた装置を実装し、位置知覚精度と知覚時間の実験を行った。その結果、本稿における実験状況において以下の 3 点を確認できた。

1. 提案する温度分割刺激のパターンを特定することは困難である。
2. 温刺激と冷刺激の分割提示により、温度提示の温・冷を切り替えた際の応答性が高まる。
3. 提案する分割提示においても、予備温度調整により応答性が高まる。

今後はペルチェ素子の大きさや配置間隔、刺激強度などを変化させ、提案手法の適用範囲を検証していく。

また、提案した温度提示ユニットをインタフェースへ実装するために、デバイスの小型化が求められる。一般に、ペルチェ素子を用いた温度ディスプレイでは放熱が問題となり、デバイスの小型化が困難である。しかし、提案手法はこの放熱問題が緩和され、小型なデバイスが実現できると期待する。提案手法では、温刺激用と冷刺激用のペルチェ素子を交互に配置している。この時、温刺激部の背面における吸熱と、冷刺激部の背面における発熱とで、相互に作用させられる可

能性がある。今後は、この背面における伝熱作用も考慮に入れた刺激手法を検討していく。

謝辞 本研究は特別研究員奨励費の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) A. Yamamoto, B. Cros, H. Hasegimoto, and T. Higuchi: Control of Thermal Tactile Display Based on Prediction of Contact Temperature, Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation (ICRA '04), pp. 1536-1541 (2004).
- 2) L.E. Williams and J.A. Bargh: Experiencing Physical Warmth Promotes Interpersonal Warmth, SCIENCE, Vol. 32, pp. 606-607 (2008).
- 3) 佐藤克成, 篠田裕之, 館すすむ: 遠隔物体の形状と温度の知覚が可能な力触覚情報伝達システム, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec2011), 2P1-O03 (2011).
- 4) K. Kushiyama, S. SASADA: Thermoesthesia, ACM SIGGRAPH 2006 Art Gallery (2006).
- 5) 秋山史門, 佐藤克成, 牧野泰才, 前野隆司: ヒトの温度知覚特性を利用した温度呈示手法の検討, 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会 (2011).
- 6) D.R. Kenshalo, C.E. Homes, and P.B. Wood: Warm and Cool Thresholds as a Function of Rate of Stimulus Temperature Change, Perception & Psychophysics, Vol. 3, pp. 81-84 (1968).
- 7) D.R. Kenshalo: Correlations of Temperature Sensitivity in Man and Monkey, A First Approximation, Sensory Functions of the Skin with Special Reference to Man, Y. Zotterman, ed, pp. 305-330, Pergamon Press (1976).
- 8) D.R. Kenshalo, T. Decker, and A. Hamilton: Comparisons of Spatial Summation on the Forehead, Forearm, and Back Produced by Radiant and Conducted Heat, J. Comparative and Physiological Psychology, Vol. 63, p. 510-515 (1967).
- 9) S.L. Berg: Magnitude Estimates of Spatial Summation for Conducted Cool Stimuli along with Thermal Fractionation and a Case of Secondary Hyperalgesia, PhD dissertation, Florida State Univ. (1978).
- 10) A.J.H. Vendrik and E.G. Eijkman: Psychophysical Properties Determined with Internal Noise, The Skin Senses, D.R. Kenshalo, ed., pp. 178-193, Charles Thomas (1968).
- 11) P.W. Nathan and R.C. Rice, The Localization of Warm Stimuli, Neurology, vol. 16, pp. 533-540 (1966).