Vol.2023-HCI-202 No.49
2023/3/15

複数の質感を複合的に提示可能な触覚提示デバイス

田中　瑠彗[1,a)]　松下 光範[1,b)]

概要：本研究の目的は視覚障碍者に対して触覚を用い，様々な感情の表情を提示することである．視覚障碍者の多くは表情などの非言語情報を取得することが困難であるため，コミュニケーションに苦労する．このような問題に対して非言語情報である表情を触覚情報に変換し，代替的に提示することで問題の解決を目指す．本稿ではその端緒として，温冷感，硬軟感，粗滑感，平凸感をパラメータとし，それらを複合的に提示できる触覚提示デバイスを実装した．また，デバイスが意図した触覚刺激を適切に提示可能であるかを検証するため実験を行った．その結果，温冷感，硬軟感，粗滑感，平凸感，全てのパラメータにおいて高い精度で提示可能であることを示した．

1. はじめに

人間が外界から得る情報のうち，約 83%は視覚に依存している [14]．そのため，視覚機能に何らかの問題を抱える視覚障碍者は日常生活において多くの不便と不利益を被っている．このようなユーザに対する情報提示として，歩行移動を支援するための音声案内や視覚障碍者誘導用ブロック，文字情報提示のための点字やディジタルデバイスに備わっている音声読み上げ機能のように，視覚情報を触覚情報や聴覚情報に変換し代替的に提示する方法が広く利用されている．これらの取り組みは視覚障碍者の日常生活行動を支援する上で一定の役割を果たしてはいるものの，他者とのコミュニケーションに付随する非言語情報（e.g., 表情やアイコンタクト，頷く動作）の提示はまだ途上にある．これらの非言語情報は人の感情の把握や状況の予測などコミュニケーション時に重要な役割を果たす情報であり，晴眼者がコミュニケーションで得る情報の 65%以上を占めると言われている [3]．現状では，視覚障碍者がこのような非言語情報を認識することは困難であり，コミュニケーションの障碍になることが指摘されている [7]．

こうした問題に対して，樋口ら [16][17] は非言語情報である表情を触感を用いて代替的に提示することを目指した分析を行っている．この研究では，共感覚的な表現を用いて，怒り，嫌悪，恐怖，喜び，悲しみ，驚きの 6 種の表情と触感の対応について調査し，喜びの表情とやわらかさ，怒りの表情とかたさ，怒りおよび嫌悪の表情と凸の対応を明らかにしている．この研究では表情と触感の対応づけを試みているが，その知見を活用したコミュニケーション手段を実現するには，硬さや柔らかさ，凸などの質感を有する触覚刺激を複合的に提示可能な機構が必要である．

そこで，本研究では視覚障碍者に対し，様々な感情の表情を触覚情報を用いて提示することを目指し，複数の質感を複合的に提示することで異なる触覚刺激を提示できるデバイス（以下，触覚提示デバイスと記す）の実現を図る．

2. 関連研究

本章では，視覚以外の感覚器官を用いて表情や感情を伝達することを目的とした研究を概観し，各々の利点と問題点について整理する．

Krishna らは手袋型の振動覚デバイスを実装することで，振動パターンと喜び，悲しみ，驚き，無表情，怒り，恐怖，嫌悪の 7 つの表情を対応づけた [4]．手袋には各指に振動モータが 14 個（人差し指 3 個，中指 3 個，薬指 3 個，小指 3 個，親指 2 個）組み込まれている．ユーザは手袋がどのようなパターンで振動したかを認識することで，表情の種類を識別することが可能である．

Yoo らは振動刺激で人が想起可能な感情の範囲を明らかにするため，実験を行った [12]．この実験では 24 名の実験参加者に振幅，周波数，時間，包絡線をパラメータとした様々な振動刺激を提示し，その感情価 (valence) と覚醒度 (arousal) を回答してもらい，ラッセルの感情円環モデル [8] にマッピングした．実験の結果，振動刺激で想起できる感情は，感情価と覚醒度が共に高い感情（e.g., 興奮，元気），および感情価が低く覚醒度が高い感情（e.g., 心配，怒り）に限定されるものであった．

1 関西大学
Kansai University, 2-1-1 Ryozenji, Takatsuki, Osaka 569–1095, Japan
a) k801283@kansai-u.ac.jp
b) m_mat@kansai-u.ac.jp

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

Wilson らはユーザの熱刺激に対する主観評価をラッセルの感情円環モデル [8] とベクトルモデル [1] の各々にマッピングし，熱フィードバックと感情を対応づけた [10]．その結果，温度刺激で想起できる感情は，感情価が高く覚醒度が低い感情（e.g., 満足，リラックス）や，感情価が低く覚醒度が高い感情（e.g., 心配，神経質）に限定されるものであった．

Krishna ら [4] のように振動パターンと表情を対応づけて伝達する方法は表情の識別をする上では有用であるものの，振動パターンと表情との対応をユーザ自身が思考して対応づける必要があるため，直感的でない．また，ユーザはシステム使用前に対応関係を記憶する必要があり，学習時間を有する．さらに，表現する表情の種類を増やしたい場合，振動モータを増設する必要があるため，対応関係の把握がより一層，困難になることが懸念される．Yoo ら [12] や Wilson ら [10] のように，温度や振動といった触覚刺激と感情を対応づけて伝達する方法はユーザの感情を引き起こす手法であるため直感的であるものの，基本的な感情全てを想起できないことが指摘されている．さらに，「泣きながら笑う表情」や「怒りながら泣く表情」などの複雑な表情の表現はこれらの手法では難しい．

視覚障碍者に対しての表情情報提示は，(1) 直感的な手法が好ましい，(2) 視覚障碍者が視覚障碍者でないものと同一内容の情報を取得できることが好ましい[*1] とされている．本節で示した温度刺激や振動刺激と感情を対応づける手法は表現可能な触覚刺激が限定されるため，それぞれ単体では特定の表情しか表現できない．

しかし，質感[*2]であるマクロな粗さ（凹凸/平たい），ミクロな粗さ（粗い/滑らか），温冷感，硬軟感，摩擦感（乾湿・粘り/滑り）[13] をパラメータとし，それらを複合的に提示することで様々な触覚刺激が提示でき，幅広い表情を表現できると考えられる．また，複数の質感を含んだ触感は (1) 人が物体に触れた際，即座に認識可能である，(2) 硬さや冷たさなどの複数の質感を人は同時に感じ取ることができる，という特徴から，様々な表情を直感的に伝達可能であることが指摘されている [17]．

以上のことから，本研究では視覚障碍者に対して，複数の質感を複合的に提示することにより，様々な表情を直感的に伝達することを目指す．その端緒として本稿では触覚提示デバイスを実装し，複数の質感の複合的な提示を試みる．

3. 触覚提示デバイスの設計

質感は平凸感，粗滑感，温冷感，硬軟感，摩擦感の 5 種類存在する [13]．このうち，粗滑感と摩擦感は凹凸面のかみ合いの効果により，独立した質感として提示することは困難であることが示されている [9]．そのため，本デバイスでは質感として温冷感，硬軟感，粗滑感，平凸感の質感をパラメータとし，それらの複合的な提示を試みる．

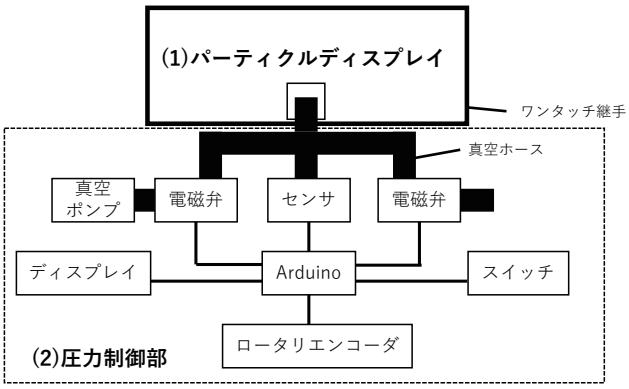


図 1 硬軟感提示機構の構成

提案する触覚提示デバイスは硬軟感提示機構，温冷感提示機構，粗滑感・平凸感提示機構の 3 つの機構を積層・並置している．本章では各機構の実現方法，他の機構と組合わせる際の留意点・工夫点について説明し，各々の機構を組み合わせたデバイスの構成について述べる．

3.1 硬軟感提示機構

Matoba ら [5] は，表面の硬さを動的に変化可能なディスプレイ「ClaytricSurface」を実装した．このディスプレイは発泡ポリエチレンビーズを充填した木箱の上部を柔軟性・気密性の高い素材で密閉している．通常，ディスプレイ上部は柔らかい状態を保っているが，ディスプレイ内を減圧することで発泡ポリエチレンビーズが圧縮され，ディスプレイ上部が硬くなる．この性質を活かすことで，ディスプレイ内の気圧を制御し，ディスプレイ上部の硬さを調整することを可能にした．

本研究では硬軟感提示機構にこの手法を採用した．この機構は (1) パーティクルディスプレイ（以下，ディスプレイと記す）と (2) 圧力制御部から構成されている（図 1 参照）．

(1) のディスプレイは木の角材 7 本とステンレスフィルタを内部に設置した 115mm × 115mm × 75mm の木箱（図 2 参照）の中を直径 1mm の発泡ポリエチレンビーズで充填させ，柔軟性・気密性の高い，厚さ 0.5mm のシリコンゴムで密閉している（図 3 参照）．また，ディスプレイ内の気密性を高めるため，ディスプレイ側面には合成ゴムが貼付されている．さらに，ディスプレイには圧力制御部に接続するためのワンタッチ継手が埋め込まれている．このワンタッチ継手は減圧用，加圧用，センサ接続用の 3 つのポートに分かれており，減圧用ポートは電磁弁を通し真空ポンプに，加圧用ポートは電磁弁を通し外気に接続されている．

*1 障害者による情報の取得及び利用並びに意思疎通に係る施策の推進に関する法律: https://www8.cao.go.jp/shougai/suishin/jouhousyutoku/pdf/jouhou_honbun.pdf（2023/1/28 確認）
*2 先行研究 [13] では材質感次元と呼んでいる．

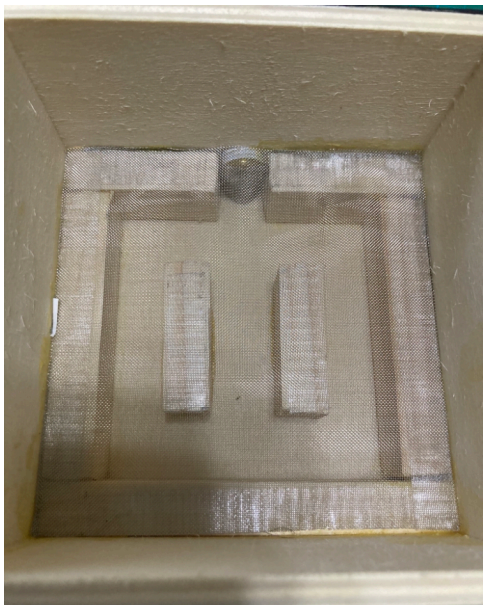
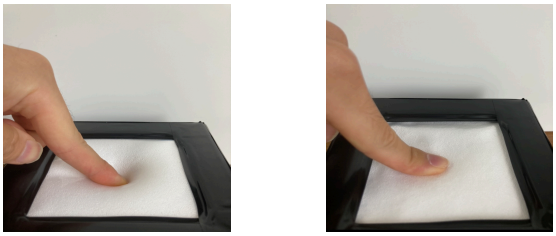


図 2　木のフレーム構造



(a) 最も柔らかい状態　(b) 最も硬い状態

図 3　硬軟感提示機構の外観

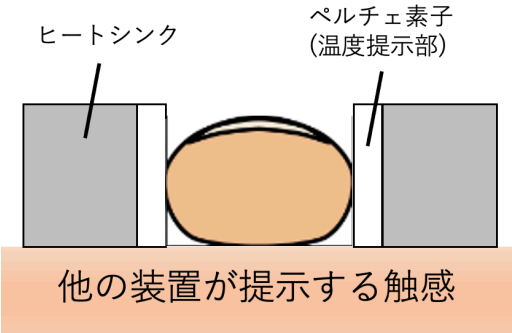


図 4　温冷感提示機構

次に (2) の圧力制御部（図 1-(2)）はディスプレイを減圧するための真空ポンプ，上述した減圧・加圧用の 2 個の電磁弁，ディスプレイ内の圧力を一定に保つための空気圧センサ，設定空気圧をシステムに入力するためのつまみ付きロータリーエンコーダ，空気圧をリセットするためのスイッチ，設定空気圧とディスプレイ内の圧力を表示する液晶ディスプレイ，さらにそれら全てを制御するマイクロコントローラから構成されている．真空ポンプは実行排気速度 14L/min，最大真空到達度は大気圧を 0 として約-77.5kPa である．また，空気圧センサは 0kPa から-101kPa までの範囲において圧力を測定可能である．

硬軟感提示機構はロータリエンコーダを回すことで設定圧力が入力でき，その値と空気圧センサで取得したディスプレイ内の圧力を比較することで，硬さの制御を行う．設定圧力がディスプレイ内の圧力より低い場合，真空ポンプに通じる電磁弁の開放による減圧を行う．設定圧力がディスプレイ内の圧力より高い場合，外気に通じる電磁弁の開放による加圧を行う．ディスプレイ内の気圧が設定圧力に達した場合，二つの電磁弁を閉じることで圧力を維持する．この際，ディスプレイに埋め込まれたワンタッチ継手の隙間から少量の空気漏れが生じる．そのため，空気圧センサでディスプレイ内の空気圧を常に監視し，空気圧と設定圧力の差が 10hPa を超えたとき，再び真空ポンプに通じる電磁弁の開放による減圧を行う．またスイッチを押すことで設定圧力が 1013hPa になり，システムの硬さは初期状態に戻る．このように硬軟感提示機構は設定する空気圧を調節することで硬さを動的に制御できる．システムの応答性については，最も柔らかい状態（図 3-(a)）から即座に最も硬い状態（図 3-(b)) にすることが可能である．

硬軟感提示機構は厚みがあるため，他の機構の上に積層した場合その機構が提示する質感を妨げることが懸念される．したがって，硬軟感提示機構は最下部に配置し，他の機構はディスプレイ上に積層する．この際，上に積層する機構の触覚提示部は，硬軟感に影響を与えないよう，可能な限り薄く，柔軟性の高いものにする必要がある．

3.2　温冷感提示機構

3.2.1　実装

本研究において，温度提示を行う機構は温度を自在に制御でき，温感・冷感ともに扱えるものが望ましい．そのため，半導体熱伝導素子の一つであり，軽量かつ温感・冷感を共に提示可能であるペルチェ素子を採用した．

この機構は設定温度を入力するつまみ付きロータリエンコーダ，設定温度を表示する液晶ディスプレイ，温度提示を行う 2 個のペルチェ素子，それらを制御するマイクロコントローラ，ペルチェ素子の冷却性能を維持するための 2 個のアルミニウム製ヒートシンクから構成されている．これらのうち，2 個のペルチェ素子は温度刺激によるエネルギーを均一化させるため，直列に繋いでいる．ペルチェ素子はある方向に直流電流を流すと，素子の上面が冷却，下面が発熱し，電極を変えることで冷却面と発熱面が入れ替わる．また，流す電圧によって，温感あるいは冷感の度合いの調整が可能である．これらの性質を考慮し，温冷感提示機構には電圧・電流を制御することで，温冷感の度合いの調節を可能としている．実装したデバイスでは，ロータリエンコーダを回すことにより温かさ 100 段階（最大 40°C 程度），冷たさ 150 段階（最小 10°C 程度）で温度を設定できる．

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

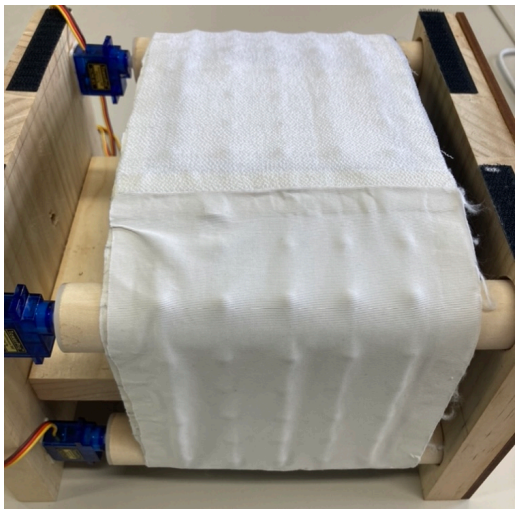


図 5　粗滑感・平凸感提示機構の外観

3.2.2　サーマルリファレル現象

従来，温冷感を提示する機構の大半はペルチェ素子を用いて皮膚の温度を直接変化させ，提示する手法を採用している．しかし，複数の機構を積層・並置する場合にこの手法を用いると，システム構成が複雑になり温冷感を提示する機構が他の機構の質感提示を妨げることが懸念される．本研究はこの問題を解決するために，サーマルリファレル現象に着目した．サーマルリファレル現象とは温度刺激と触刺激を隣接した部位に提示した場合，触刺激部位にも温度刺激が知覚されるという現象である [15].

これを参考に，本デバイスでは指先側部に温度刺激を行うことで，指腹部に温冷感を提示する手法を採用した（図 4 参照）．これにより，他の機構が提示する質感に影響を与えることなく，温冷感を提示することが可能である．

3.3　粗滑感・平凸感提示機構

実装した粗滑感・平凸感提示機構の外観を図 5 に示す．この機構は円柱状の木材がついた 4 台のマイクロサーボモータ，サーボモータを制御するマイクロコントローラ，サーボモータを取り付けている木の枠組み，円柱木材を渡るように巻きつけた布，タクトスイッチから構成されている．布は滑らかで平らなもの，滑らかで凹凸があるもの，粗くて平らなもの，粗くて凹凸があるもの，計 4 種類の布をつなぎ合わせた布を用いた．この 4 種類の布は可能な限り柔軟性が高く薄いものを選定した．また，凹凸がある 2 種類の布については，1cm の丸型ウレタンの突起を布の内部に複数入れ，凹凸感を表現している．

粗滑感・平凸感は布を切り替えることで提示する．繋ぎ合わせた布は図 5 のようにサーボモータに付随する円柱の木材にロール状に巻き付けている．タクトスイッチを押すことで，円柱状の木材がついた 4 台のマイクロサーボモータが同時に回転し，布を切り替える．この時，静止する布の種類によって粗滑感と平凸感が提示できる．

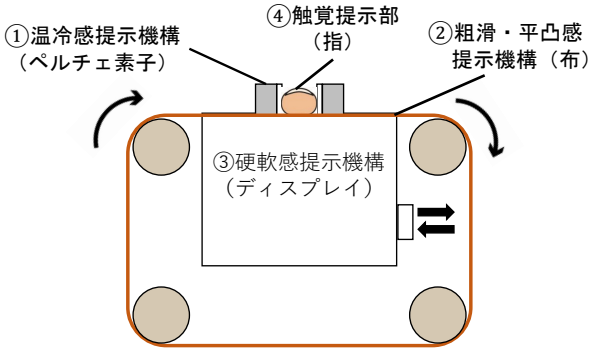


図 6　デバイスの構成

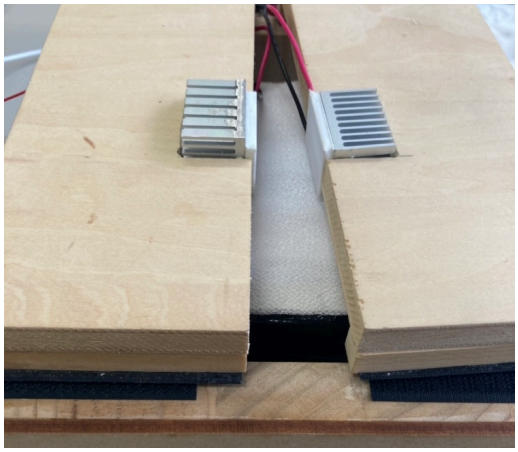


図 7　実装した触覚提示デバイスの外観

なお，粗滑感・平凸感提示機構の上に他の質感を提示する機構を積層した場合，粗滑感・平凸感をユーザに提示できないことが懸念されるため，粗滑感・平凸感提示機構はユーザが直接触れることのできる場所に配置する．

3.4　デバイスの構成

本デバイスは図 6 のように① 硬軟感提示機構，② 粗滑・平凸感提示機構，③ 温冷感提示機構から構成されており，ユーザは ④ 触覚提示部を指で触れることで触覚刺激を知覚できる．

次に各々の質感の提示手法について説明する．

- 硬軟感提示機構の空気圧を制御することで硬軟感を提示する．
- 粗滑感・平凸感提示機構の布を巻き取ることで粗滑感・平凸感を提示する．
- 温冷感提示機構のペルチェ素子に流す電流・電圧を制御することで温冷感を提示する．

このように本デバイスは平凸感，粗滑感，温冷感，硬軟感をパラメータとし，それらを複合的に提示できる．

4.　実験

触覚提示デバイスが温冷感，硬軟感，粗滑感，平凸感を適切に提示可能であるかを検証するため，大学生 20 名を

表 1　質感ごとの評価平均値と評価一致率

	温	冷	軟	硬	粗	滑	平	凸
評価平均値	1.4	4.2	1.9	4.1	1.8	4.1	1.7	4.7
評価一致率 (%)	99.3	80.6	82.5	85.0	91.3	88.8	89.4	96.9

表 2　触覚刺激の提示パターン

	温冷	硬軟	粗滑	平凸
(1)	温	軟	粗	平
(2)	温	軟	粗	凸
(3)	温	軟	滑	平
(4)	温	軟	滑	凸
(5)	温	硬	粗	平
(6)	温	硬	粗	凸
(7)	温	硬	滑	平
(8)	温	硬	滑	凸
(9)	冷	軟	粗	平
(10)	冷	軟	粗	凸
(11)	冷	軟	滑	平
(12)	冷	軟	滑	凸
(13)	冷	硬	粗	平
(14)	冷	硬	粗	凸
(15)	冷	硬	滑	平
(16)	冷	硬	滑	凸

対象に実験を行った．実験では参加者に 16 種類（表 2 参照）の触覚刺激を組み合わせて提示し，ぞれぞれの評価を求めた．

4.1　実験方法

評価基準統一のため，評価開始前に参加者に対して 16 種類の触覚刺激をランダムに知覚させた．この際，デバイスを直接見ることを禁じ，利き手の指で提示部に 10 秒間触れるよう参加者に指示した．また，16 種類の触覚刺激を提示する際，硬さは硬軟感提示機構の最も硬い状態，柔らかさは硬軟感提示機構の最も柔らかい状態，温かさは約 40°C，冷たさは約 10°C となるよう設定した．その後，参加者に対してランダムな順序で 16 種類の触覚刺激の提示を行い，その評価を収集した．参加者が触覚刺激を知覚する際，時間制限は設けなかった．また，実験参加者が触覚刺激を知覚し終わってから次の触覚刺激を知覚するまでの間は，直前に提示した触覚刺激の影響を受けないように，利き手で紙を 3 度なぞり，30 秒間その上に手を置くよう指示した．実験中は実験参加者のデバイスへの触れ方を観察するためビデオカメラを用いて動画撮影を行った．評価項目は「1: あたたかい–5: つめたい」，「1: やわらかい–5: かたい」，「1: あらい–5: なめらか」，「1: 平らである–5: 凹凸がある」，「1: 乾いている–5: 湿っている」の 5 項目を 5 段階で取得した．評価アンケートの最後には記述欄を設け，デバイスの改善点，気づいたことについて回答を求めた．

表 3　提示順序ごとの冷たさの評価平均値と評価一致率

	連続した提示	その他
評価平均値	4.0	4.5
評価一致率 (%)	61	96.7

4.2　結果

デバイスが提示した温かい触覚刺激に対し，評価アンケートで「かなりあたたかい」，「ややあたたかい」と回答したものをデバイスが提示する触覚刺激と一致するものとし，評価一致率を算出した．他の項目についても同様の処理を行った．表 1 に各々の質感のパラメータに対する評価の平均値（以下，評価平均値と記す）と評価一致率を示す．デバイスが提示を行っていない乾湿の評価平均値は 2.4 であった．また，実験参加者がデバイスに触れる様子を観察した結果，提示部を押す，擦る，叩く，軽く触れる，押しあてるなどの動作が確認された．

5.　考察

本章では実験結果からデバイスが提示した各々の質感に見られた傾向と，異なる評価が行われた原因について考察する．

5.1　温冷提示

実験結果から温冷感に見られた傾向として，実験参加者に対してランダムに提示した順序のうち連続して冷たさを提示する部分がある場合，その部分の冷たさの評価平均値と評価一致率がともに悪くなる傾向が見られた（表 3 参照）．この原因として，温冷感提示機構のヒートシンクの放熱性能が不足していることが考えられる．冷たさ提示の際，ペルチェ素子の触覚提示部の裏面は発熱しており，この熱をヒートシンクで放熱する必要がある．ヒートシンクの放熱性能が不足している場合，ヒートシンクに熱が徐々に溜まり，放熱の精度が落ちる．そのため，ランダムに提示した順序のうち連続して冷たさを提示した部分は十分な冷たさを提示することができなかったと考えられる．また，冷たさを連続して提示していない際に想定する温冷感と一致しなかった場合においても同様，ヒートシンクに熱が溜まっており，十分な冷たさが提示できなかったことが原因であると推察できる．

5.2　硬軟提示

デバイスが提示する硬軟感に対して異なる評価が行われた原因について考察する．一部の実験参加者から「凸提示した時の突起が，硬軟感を知覚することを困難にしている」

表 4　前半と後半の硬軟感の評価平均値と評価一致率

	前半（柔らかさ）	後半（柔らかさ）	前半（硬さ）	後半（硬さ）
評価平均値	1.7	2.0	4.4	3.9
評価一致率 (%)	87.5	77.5	91.2	78.8

表 5　滑らか・凸提示した時の粗滑感の評価一致率

	滑らか・凸提示	その他
評価一致率 (%)	78.0	94.2

表 6　硬さ・平提示した時の粗滑感の評価一致率

	硬さ・平提示	その他
評価一致率 (%)	82.5	96.7

という意見が得られた．これは実験参加者が硬軟感提示機構が提示する硬軟感と，その上に積層した布に入っている突起の硬軟感を複合的に知覚したからだと考えられる．このことから，凸提示した時の突起が硬軟感の知覚を妨げている一因として考えられる．

次に実験結果から硬軟感に見られた傾向について説明する．実験参加者 20 名のうち，実験を受けた順に 1 番目から 10 番目までの参加者を前半参加者，11 番目から 20 番目までの参加者を後半参加者とした場合，硬さと柔らかさに対する評価平均値と評価一致率は，前半参加者よりも後半参加者の方が悪い傾向が見られた（表 4 参照)．また，硬軟感提示機構の発泡ポリエチレンビーズが実験の回数を重ねるごとに，真空ポンプで圧縮され，元の大きさに戻らず小さくなる現象が見られた．これらのことから，実験回数を重ねるごとにディスプレイ内が十分な量の発泡ポリエチレンビーズで満たされなくなったことが硬軟感の知覚を妨げた一因だと考えられる．

5.3　粗滑・平凸提示

次にデバイスが提示する粗滑感に対して異なる評価が行われた原因について考察する．一部の実験参加者から「手が乾燥し，荒れているため粗滑感を感じることが困難である」という意見が得られた．このことから，粗滑感の知覚にはユーザの身体的特性が影響しており，粗滑感は手指の状態で知覚の仕方が大きく異なることが推察できる．また，一部の実験参加者から「粗さと凹凸の基準が曖昧であり，それらの回答に迷った」という意見が得られた．表 5 に示すようにデバイスが凸と滑らかを同時提示した際の粗滑感の評価一致率はそれ以外の触覚刺激パターンを提示した際の粗滑感の評価一致率より低いことがわかる．これらのことから実験参加者において，粗さと凸を識別可能な人とそうでない人が存在していたと考えられる．

デバイスが提示する平凸感に対して異なる評価が行われた原因として，布の下に配置された硬軟感提示機構による影響が考えられる．表 6 に示すようにデバイスが硬さと平らを同時提示した時，平凸感の評価一致率はそれ以外の触覚刺激パターンを提示した際の平凸感の評価一致率より，低いことがわかる．これは硬軟感提示機構が硬化した際に，その触覚提示部に多少の凹凸が生じる場合があり，それがユーザが平凸感を知覚することを妨げた一因であると考えられる．

5.4　乾湿感

粗さ提示の際，乾湿の評価平均値は 1.8 で，滑らか提示の際，乾湿の評価平均値は 3.0 であった．また，粗さを提示した際に「乾いている」と回答した参加者は 81.3%であったのに対し，滑らかさを提示した際に「乾いている」と回答した参加者は 32.5%であった．これらの結果から粗さの提示が参加者の乾湿感の知覚に影響を及ぼす可能性が示唆された．

5.5　触れ方

Nagano ら [6] は各々の質感を知覚するための適切な触れ方としてマクロな粗さは押す，ミクロな粗さは擦る，柔らかさは押す，硬さは叩く，摩擦は擦る，温冷は押すと軽く触れるであると述べた．また，人はこれらの適切な触察動作を無意識に取ることが明らかとなっている [2][11]．

本アンケートは各々の質感を問う形式であったため，実験の際に押す，擦る，叩く，軽く触れるなどの触察動作を観測可能であると推測できる．検証した結果，実験時にデバイスの提示部を押す，擦る，叩く，軽く触れる，押しあてるなどの動作が見受けられた．これは先行研究の知見に基づく，各々の質感に対する適切な触れ方とほとんど一致し，実験の観察結果から人は適切な触察動作を無意識にとることが確認された．

6.　触覚提示デバイスの課題

5.1 節で，温冷感提示機構の問題点としてヒートシンクの放熱性能が不足していることを挙げた．この問題を解決するためには，放熱性能の高いヒートシンクに取り替えるもしくは，ヒートシンクにファンを増設し，放熱性能を高める必要があると考えられる．

5.2 節で，硬軟感提示機構の問題点として，使用時間が増加するにつれ，ディスプレイ内の発泡ポリエチレンビーズが圧縮され，硬軟感の知覚に影響を及ぼすことを挙げた．この問題を解決する方法として，ディスプレイ内に発泡ポリエチレンビーズを加える機能をディスプレイに増設することが挙げられる．これにより，ディスプレイ内が十分な

発泡ポリエチレンビーズで満たされていない場合にユーザが随時，発泡ポリエチレンビーズを加えることができる．また，ディスプレイを密閉する素材をさらに柔軟性が高く，薄い素材にすることで硬軟感提示機構が提示する柔らかさの精度を上げることが期待できる．

5.2 節で，粗滑感・平凸感提示機構の問題点として，布に入っている突起が硬軟感に影響を及ぼすことを挙げた．この問題を解決するためには，布に入れる突起を硬軟感に影響を及ぼしにくいものを選定し，改良する必要がある．また，粗滑感・平凸感提示機構は温冷感提示機構や硬軟感提示機構とは違い，度合いの調節ができない．度合いの調整を可能とすると，デバイスで表現可能な触覚刺激の種類が増え，より多くの表情を表現できると考える．そのため，他の機構と組み合わすことができ，粗滑感・平凸感の度合いの調節が可能な機構を実現すべきである．

実験結果として得られたデバイスの改善点についての自由記述欄に，「触覚刺激を知覚する際，指を前後だけでなく左右にも動かしたい」というユーザビリティに関する意見があった．この問題を解決するためには，温冷感提示機構の配置を再検討する必要がある．さらに，「触覚刺激を知覚する際，指の側面部で硬いペルチェ素子が擦れるため，気になった」という意見が得られた．これはペルチェ素子に熱伝導率の高いクッション性の素材をつけることで解決できるが，温冷感の応答率が悪化することが懸念される．

7. おわりに

本研究は視覚障碍者に対して非言語情報である表情情報を触覚情報に変換し，代替的に提示することを目指す．本稿ではその端緒として，温冷感，硬軟感，粗滑感，平凸感をパラメータとし，それらを複合的に提示できる触覚提示デバイスを実装し，評価を行った．評価実験の結果から温冷感，硬軟感，粗滑感，平凸感，全てのパラメータにおいて高い精度で提示可能であることを示した．

今後は各々の機構で明らかとなった課題について，改良を行う．さらに，粗滑感・平凸感の度合いが調節でき，柔軟性が高い機構を実現することを目指す．

参考文献

[1] Bradley, M. M., Greenwald, M. K., Petry, M. C. and Lang, P. J.: Remembering pictures: pleasure and arousal in memory, *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, Vol. 18, No. 2, p. 379 (1992).

[2] Cavdan, M., Doerschner, K. and Drewing, K.: The many dimensions underlying perceived softness: How exploratory procedures are influenced by material and the perceptual task, *2019 IEEE World Haptics Conference*, pp. 437–442 (2019).

[3] Knapp, M. L., Hall, J. A. and Horgan, T. G.: *Nonverbal communication in human interaction*, Cengage Learning (2013).

[4] Krishna, S., Bala, S. and Mcdaniel, T.: VibroGlove: An Assistive Technology Aid for Conveying Facial Expressions, *Proceedings of the 28th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 10–15 (2010).

[5] Matoba, Y., Sato, T., Takahashi, N. and Koike, H.: ClaytricSurface: An Interactive Surface With Dynamic Softness Control Capability, *ACM SIGGRAPH Emerging Technologies* (2012).

[6] Nagano, H., Okamoto, S. and Yamada, Y.: Haptic invitation of textures: Perceptually prominent properties of materials determine human touch motions, *IEEE transactions on haptics*, Vol. 7, No. 3, pp. 345–355 (2014).

[7] Qiu, S., Hu, J. and Rauterberg, M.: Nonverbal Signals for Face-to-Face Communication between the Blind and the Sighted, *In Proceedings of International Conference on Enabling Access for Persons with Visual Impairment* (2015).

[8] Russell, J. A.: A circumplex model of affect, *Journal of personality and social psychology*, Vol. 39, No. 6, p. 1161 (1980).

[9] Smith, A. M. and Basile, G.: Roughness of simulated surfaces examined with a haptic tool: Effects of spatial period, friction, and resistance amplitude, *Experimental Brain Research*, Vol. 202, No. 1, pp. 33–43 (2010).

[10] Wilson, G., Dobrev, D. and A.Brewster, S.: Hot Under the Collar: Mapping Thermal Feedback to Dimensional Models of Emotion, *CHI '16: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4838–4849 (2016).

[11] Yokosaka, T., Kuroki, S., Watanabe, J. and Nishida, S.: Linkage between free exploratory movements and subjective tactile ratings, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10, No. 2, pp. 217–225 (2016).

[12] Yoo, Y., Yoo, T., Kong, J. and Choi, S.: Emotional responses of tactile icons: Effects of amplitude, frequency, duration, and envelope, *2015 IEEE World Haptics Conference*, pp. 235–240 (2015).

[13] 岡本正吾，　永野光，山田陽滋：触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向，日本バーチャル リアリティ学会大会論文集，Vol. 16, No. 3, pp. 343–353 (2011).

[14] 吉成麻人，黒沼邦彦，　鈴木聡：産業教育機器システム便覧，日科技連出版社 (1972).

[15] 佐藤克成：指側部の温度刺激による指腹部への温度感覚提示，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 22, No. 3, pp. 315–323 (2017).

[16] 樋口友梨穂，松下光範：共感覚的比喩を用いた触感と表情の対応性に関する一検討，電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 121, No. 143, pp. 7–12 (2021).

[17] 樋口友梨穂，松下光範：共感覚的表現を用いた触感と基本 6 感情の対応づけに関する一検討，情報処理学会研究報告，Vol. 2022-HCI-196, No. 18, pp. 1–7 (2022).

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan