



鼻背側面への皮膚剪断変形刺激を用いた方向提示デバイスの提案

西本和貴¹⁾, 仲村友杜¹⁾, 暦本純一^{1,2)}, 鳴海拓志¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {nishimoto, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp, yuto-nakamura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

2) ソニーコンピュータサイエンス研究所 (〒 600-8086 京都市下京区松原通東洞院東入本燈籠町 13-1, rekimoto@acm.org)

概要:

装着時の負担が少ない方向提示インタフェースとして、眼鏡の鼻パッドからの刺激提示を利用した手法が提案されている。既存手法は刺激として振動を提示しているが、振動提示は連続使用によって感覚順応や不快感が生じるという課題がある。そこで、鼻パッドに搭載した回転モータで皮膚に剪断変形を引き起こす方向提示手法を提案する。本稿ではプロトタイプを製作し、8 種類の刺激を識別する課題を実施し、全体正答率 72.8%、方向性認識正答率 96.9%となることを確認した。

キーワード： 触覚インタフェース, 皮膚剪断変形, 鼻部刺激, HCI

1. はじめに

現在ナビゲーションで多用されている視覚・聴覚提示は移動中のユーザの注意を阻害するために安全上の課題が指摘されており、第 3 のモダリティとして触覚の活用が期待されている。特に、振動モータを利用して振動パターンで方向や距離を伝えるナビゲーション手法が数多く提案されてきた。しかし、このような触覚提示を用いたナビゲーション手法の多くは手首や腰などにナビゲーションに特化されたデバイスを装着する必要がある、着脱の煩わしさが課題となっている。この課題に対し、眼鏡のような日常的に使用されるデバイスにナビゲーション手法を組み込むことで解決を図る提案が登場してきている。例えば Nakamura ら [1] は、眼鏡の鼻パッドを利用して鼻背の左右に振動刺激を与えることでナビゲーションを行う手法を提案している。しかし、この研究では、長時間の振動刺激の提示で鼻に痒みが生じ、ユーザが負担を感じたことが報告されている。また、鼻のような狭い領域に振動が提示されると、振動の伝播によって、刺激方向の識別が難しくなる可能性がある。

他方、触覚提示研究では、振動パターンの提示を超えてより豊かな触覚情報を提示する手法として、皮膚に剪断力を加えて変形させることで方向性のある力を提示する手法が提案されている。例えば、顔の皮膚を伸縮させて方向を提示する手法 [2] や、鼻尖への擦過刺激により方向知覚を生起させる手法 [3] 等が研究されている。この皮膚剪断変形刺激を鼻パッドを利用した触覚提示によるナビゲーション手法に応用すれば、振動刺激よりも明確な方向性を提示でき、振動伝播による識別性能の低下や長時間使用時の不快感の発生といった問題を回避できる可能性がある。そこで本研究では、左右の鼻パッドに組み込んだ回転モータにより、鼻背側面の皮膚剪断変形を引き起こすことで方向を提示する手法を提案し、刺激の識別可能性を調査する。

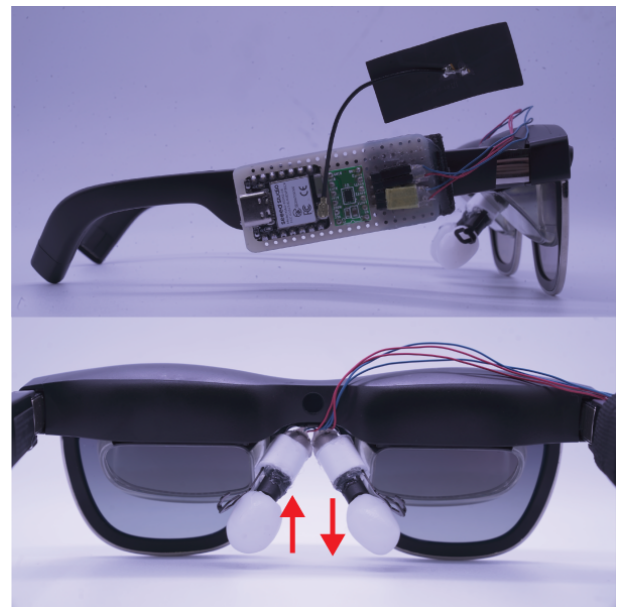


図 1: 実装した 2 つの回転子を持つデバイス
モータが回転し矢印のように左 (右) の鼻側面の皮膚を上 (下) 方向に剪断変形させる刺激を提示する

2. 提案手法

2.1 実装

作成したデバイス (図 1) は回転子を持つ鼻パッド部分と電子回路部分に分けられる。鼻パッド部分には直径約 10mm のプラスチック粘土製の回転子を取り付けられたギアモータ (Pololu item:2359、減速比 700:1、定格 6V、90rpm) が 2 つ付いている。電子回路部分は PC との通信およびモータの回転制御を行うためのマイクロコンピュータ (XIAO ESP32C6) およびモータドライバ (DRV8835) から構成されている。今回の実験ではマイクロコンピュータがアクセスポイントとなり、PC から Wi-Fi 経由で UDP 通信によ

り信号を送り、左右のモータの回転を制御することで刺激を提示した。

2.2 実験刺激について

鼻における感圧刺激に対する圧感受性は 1.8mm 程度である [4]。そこで後述する実験では皮膚を約 2mm 変形させる刺激を採用した。また、刺激の提示時間は 50msec とした。この時モータの回転速度は約 4cm/sec であった。実際のモータ制御においては、左右のモータの個体差を考慮して異なる PWM Duty 比を設定した。

刺激は、50msec で特定の方向に 2mm 回転させ、1000msec 停止し、その後 50msec で元の位置に戻るという動作を基本とした。この刺激の回転方向の組み合わせを変えることで 8 種類の刺激を構成した。1 つのモータで表現が可能な刺激の状態は「1. 鼻の皮膚を上方向に変形させ、その後元に戻る」「2. 鼻の皮膚を下方向に変形させ、その後元に戻る」「3. 回転しない」の 3 通りである。これに左右どちらの回転子を回転させるのかという組み合わせを考えると、図 2 のような 8 種類の条件と両方回転させない条件の合計 9 種類の状態を表すことができる。

具体的な 8 種類の刺激パターンは以下の通りである：

1. UN: 左上方向のみ（左正転→逆転、右停止）
2. DN: 左下方向のみ（左逆転→正転、右停止）
3. NU: 右上方向のみ（左停止、右逆転→正転）
4. ND: 右下方向のみ（左停止、右正転→逆転）
5. UU: 両方上方向（左正転→逆転、右逆転→正転）
6. UD: 左上右下方向（左正転→逆転、右正転→逆転）
7. DU: 左下右上方向（左逆転→正転、右逆転→正転）
8. DD: 両方下方向（左逆転→正転、右正転→逆転）

今回の実験では両方回転させない条件を除いた合計 8 種類の刺激を弁別することができるのか、実験を通じて検証を行った。

3. 実験

実験の目的は、本提案手法で提示可能な刺激のうち、特に回転方向の組み合わせを識別可能であるか検証を行うことである。

図 2 に実験の様子を示す。実験参加者には事前アンケートに回答後、デバイスを装着した状態で椅子に座ってもらった。実験では左右の回転子の動きが異なる 8 種類の刺激をランダムに提示し、参加者にはテンキーを用いてどの刺激が提示されたかを回答してもらった。回答は 8 種類のパターンを各キーに割り当て、参加者は提示された刺激のうち最初に動いた方向を判断して対応するキーを押下した。回答後 1 秒で次の刺激が提示されるようになっており、8 種類の刺激をそれぞれ 5 回、合計 40 回の刺激提示を 1 セッションとした。練習として 1 セッション、本番として 2 セッションの計 3 セッションを実施し、解析では本番の 2 セッションのデータを使用した。



図 2: 実験で表示された回答画面

それぞれの矢印が方向の組み合わせが異なる 8 種類の刺激を表しており、対応するテンキーで回答を行う

実験システムは刺激に対する回答、正解判定、反応時間等を自動的に記録した。実験終了後、NASA-TLX による作業負荷の評価、System Usability Scale(SUS) によるユーザビリティ評価、および 7 段階のリッカート尺度を使った独自のアンケートにより、提示した刺激が適切であったかを評価した。独自のアンケートは装着性に関して「デバイスを装着したままでも視界が妨げられなかった」「デバイスの装着は安定していた」、刺激の快適性・明確性に関して「刺激の強度は適切だった」「鼻への刺激は不快だった」「デバイスによる音は気にならなかった」「振動が他の部位（眼鏡フレーム等）に伝わって分かりにくかった」「映像や音声なしでも、このデバイスで目標を探すのは有効だと感じた」「歩行中や作業中でも安全に使用できると思う」「左・右・前の 3 方向を明確に区別できた」の 8 つの質問と自由記述のアンケートで構成した。

4. 実験結果

前述の実験を 6 名の実験参加者（21-28 歳の男性）に対して行った。その後、6 名の参加者による実験データ（総試行数 720 回、練習セッション除外後 480 回）を解析した。またデータ前処理において、反応時間外れ値（0.2 秒未満または 10.0 秒以上）を 2 回（0.42%）除外し、最終的に 478 回の試行を分析対象とした。加えて複数のアンケートの結果をもとに今回の提案手法の評価を行った。

4.1 正答率の解析

8 パターン別の正答率を図 3 に示す。全体の正答率は 72.8% (SD = 27.4%) であった。また、統計的検定として二項検定を実施した結果、8 パターン識別の正答率（72.8%）は 8 択のチャンスレベル（12.5%）と比較して統計的に極め

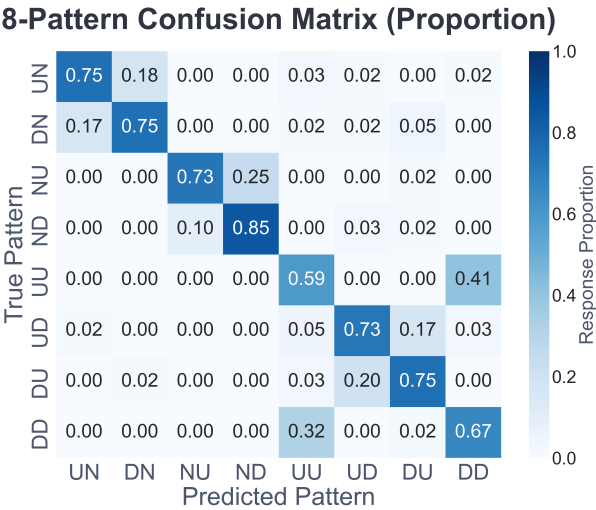


図 3: 8 種類の刺激別の回答割合

て有意に高い結果を示した ($p < 0.000001$)。最も高い正答率を示したのは ND (右下方向) パターンの 85.0%であり、最も低かったのは UU (両上方向) パターンの 59.3%であった。さらに個別に回答を分析すると、同じ方向性を持つパターン間での混同 (例: UU と DD の間違いは回答全体の約 5%あった) があり、異なる方向性 (左・右・両方) 間での混同は極めて少ないことが分かった。

4.2 方向別にみる正解率

8 種類の刺激を正確に識別する場合は全体の正答率 72.8%であったが、3 種類の方向 (左・右・両方) のどれが動いているかを識別することに対しては極めて高い正答率を示した。この 3 種類の方向を認識しているというのは、左のみが動いている条件 (UN、DN) に対して左系回答 (UN、DN のいずれか片方) を回答していることを指す (例えば UN の提示に対して DN と回答したことも正解とする)。同様に右系 (NU、ND)、両方系 (UU、UD、DU、DD) についても同様の回答をしている場合は正解として捉えることをここでは方向別に刺激を認識できていると定義する。

図 4 はこの方向別に刺激を認識できているかをもとにした方向別の正答率を示している。全体の方向性認識正答率は 96.9%に達し、3 択のチャンスレベル (33.3%) と比較して統計的に極めて有意に高い結果を示した ($p < 0.000001$)。

4.3 反応時間

表 1 に刺激の種類別および方向別の反応時間を示す。

3 種類の方向別の場合は以下の結果を得た：

- 左方向グループ：平均 2473ms (SD = 447ms)
- 右方向グループ：平均 2492ms (SD = 598ms)
- 両方向グループ：平均 2785ms (SD = 917ms)

統計的検定 (t 検定) の結果：

- 左 vs 右：有意差なし ($p = 0.883$)
- 左 vs 両方：有意差あり ($p = 0.006$)
- 右 vs 両方：有意差あり ($p = 0.032$)

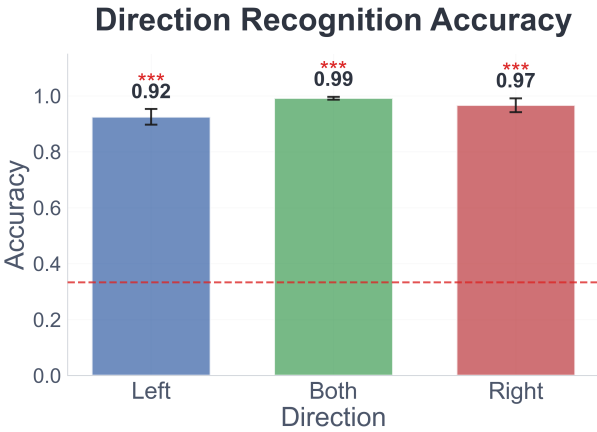


図 4: 3 種類の方向別の正答率・チャンスレベル (赤破線) との 2 項検定結果

(* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.005$)

表 1: 8 種類の刺激別の反応時間

刺激の種類	平均反応時間 (ms)	標準偏差 (ms)
UN (左上)	2566	536
DN (左下)	2313	578
NU (右上)	2603	521
ND (右下)	2406	843
UU (両上)	2619	609
UD (左上右下)	3059	854
DU (左下右上)	3065	1035
DD (両下)	2618	1221

これらの結果から、両方向の刺激は単一方向の刺激と比較して有意に長い処理時間を要することが明らかになった。これは、両方向刺激がより複雑な認知処理を要求するためと考えられる。

4.4 アンケート結果

4.4.1 作業負荷評価 (NASA-TLX)

NASA Task Load Index (NASA-TLX) を用いて、8 種類の刺激判別を行う課題における主観的作業負荷を 6 つのサブスケールで評価した。各サブスケールは 0-100 の範囲で評価され、高い値ほど負荷が高いことを示す (作業成績は逆転項目)。

6 名の参加者による NASA-TLX 評価の結果を表 2 に示す。

最も高い負荷を示したのは知的・知覚的要求 (68.0) であり、8 種類の触覚パターンの識別が認知的に困難な課題であることが確認された。次に努力 (46.0) が高く、課題達成に相当な集中力が必要であることが示された。一方で、身体的要求 (23.0) は最も低く、鼻部への軽微な接触刺激による身体的負担は軽微であることが確認された。また、タイムプレッシャー (29.0) も比較的低く、参加者は自分のペース

表 2: NASA-TLX 作業負荷評価結果

サブスケール	平均値	標準偏差
知的・知覚的要求	68.0	17.2
努力	46.0	29.7
作業成績	38.0	22.5
フラストレーション	31.0	24.8
タイムプレッシャー	29.0	14.7
身体的要求	23.0	11.5

で課題に取り組むことができた」と評価している。作業成績の自己評価 (38.0) は中程度の値を示し、参加者は自分の識別性能を適切に認識していることが示唆された。

4.4.2 ユーザビリティ評価 (SUS)

System Usability Scale (SUS) による客観的なユーザビリティ評価を実施した。SUS は 0-100 の範囲で評価され、一般的に 68 以上が「良好」とされる基準である。6 名の参加者による SUS 評価の結果を表 3 に示す。

表 3: SUS (System Usability Scale) 評価結果

評価項目	結果
平均 SUS スコア	59.17
標準偏差	11.80
最高スコア	75.0
最低スコア	42.5

本研究で得られた平均 SUS スコア (59.17) は、一般的に「良好」とされる基準値 (68) を 8.83 ポイント下回る結果となった。これは、プロトタイプ段階のデバイスとしては妥当な水準であるものの、実用化に向けてはユーザビリティの改善が必要であることを示している。また、標準偏差 (11.80) から、参加者間でユーザビリティの感じ方に一定の個人差があることが確認された。このばらつきは、装着感や操作性に対する個人の感受性の違いに起因すると考えられる。

4.4.3 装着性・刺激の快適性・明瞭性の評価 (独自アンケート)

独自のアンケート項目では主に装着性と提示した刺激の快適さ・明確性に関する 8 つの質問と自由記述のアンケートを行った。装着性に関しては人によって意見が割れていた。自由記述のアンケートでは「上方向へ回転する際にメガネがずり落ちる感覚がしたため、頻繁にメガネの位置を調節した」という回答が複数得られており、剪断変形量が大きいためにメガネがずれて装着性が低下していたと考えられる。この装着性は快適さにも大きな悪影響を与えていると考えられるため今回の刺激の課題である。

一方で刺激の快適さ・明確性に関しては自由記述のアンケートで「意外と慣れるとパッと分かるようになった、鼻の刺激もそんなにきつくないので不快感がない」といった回答が複数得られ、わかりやすい刺激であったと考えられる。

5. 考察

今回の 8 種類の皮膚剪断変形は識別することが可能であり、特にどの回転子が動いているのか判別するだけであれば非常に高い割合で識別が可能であることが分かった。しかし、両方の回転子が複雑に動く場合は認知負荷が特に高く、集中力が求められることや、デバイスが刺激を提示する際に眼鏡が動くことに対して不快感や安全性への言及があったことから、快適な方向提示を行うためには刺激の大きさや刺激の提示方法について検討を重ねる必要があることが分かった。例えば、刺激を小さくすることでより快適になる可能性が考えられるが、正答率が低下することが想定される。これに対して、皮膚の剪断変形による方向知覚には変形速度が影響を与えるということが知られている [3]。これを考慮して、高い正答率を保ったまま快適な刺激を行うために、最適な刺激の大きさと回転速度を同定する実験の実施を検討したい。

本研究では鼻部における皮膚剪断刺激に対する高い識別性を明らかにした。今後は刺激パラメータの最適化やアプリケーションにおける評価を行うことが求められる。

謝辞本研究は JST ムーンショット型研究開発事業 (JP-MJMS2012)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JP-MJMS2013)、科研費基盤研究 (B)(25K03162)、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2108) の支援を受けた。

参考文献

[1] Yuto Nakamura, Kazuki Nishimoto, Akira Yui, Takuji Narumi, and Jun Rekimoto. Noseknowsnorth: Directional cueing using nose vibration stimulation for smart glasses. In *2025 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 772–776, 2025.

[2] Chi Wang, Da-Yuan Huang, Shuo-wen Hsu, Chu-En Hou, Yeu-Luen Chiu, Ruei-Che Chang, Jo-Yu Lo, and Bing-Yu Chen. Masque: Exploring lateral skin stretch feedback on the face with head-mounted displays. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19*, p. 439 – 451, 2019.

[3] 宮崎滉己, 萩森大貴, 磯山直也, Perusquía-Hernández, Monica, 内山英昭, 清川清. 鼻尖に対する擦過刺激の速度が方向知覚に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM), Vol. 27, 1E1-3, 2022.

[4] Sidney Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. *The skin senses*, pp. 223–261, 1968.