



鼻尖に対する擦過刺激の速度が方向知覚に与える影響

The Effect of the Friction Stimulation Velocity at the Nasal Apex
on Direction Perception

宮崎滉己¹⁾, 萩森大貴¹⁾, 磯山直也¹⁾, Perusquía-Hernández Monica¹⁾, 内山英昭¹⁾, 清川清¹⁾

Koki MIYAZAKI, Daiki HAGIMORI, Naoya ISOYAMA, Monica Perusquía-Hernández,

Hideaki UCHIYAMA and Kiyoshi KIYOKAWA

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

(〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5,

{miyazaki.koki.mj8, hagimori.daiki.gu6, isoyama, m.perusquia, hideaki.uchiyama, kiyo}@is.naist.jp)

概要: 人間は掌などの皮膚の様々な部位に受けた擦過刺激の方向を知覚できるが、鼻尖における擦過刺激の方向の知覚特性は明らかにされていない。本稿では、鼻尖への上下及び左右方向の擦過刺激の速度が擦過方向の知覚に与える影響を明らかにする。回転体を用いて鼻尖へ回転による擦過刺激を提示した結果、上下方向では 57 mm/s 以上、左右方向では 67 mm/s 以上の場合に知覚した回転方向の正答率は 100 % となった。この知見を踏まえ、鼻尖への擦過刺激は視覚に依らない方向提示手法への寄与が期待される。

キーワード: 触覚, 擦過刺激, 皮膚感覚, 方向知覚

1. はじめに

人間の皮膚には、振動や圧力といった機械的刺激を知覚するために、機械受容器が備わっている [1]。機械受容器は応答性と受容野面積によってより細かく分類される [2]。一方で、機械受容器の分布は手掌や足底のように体毛の無い部位 (無毛部) [3] とその他の毛根が存在する部位 (有毛部) [4, 5, 6] で異なることが知られている。そこで、無毛部及び有毛部に対する機械的刺激における知覚特性を明らかにする研究は幅広く行われている。

Weinstein [7] は 20 に及ぶ身体部位と機械的刺激の関係性の詳細な調査を行っている。特に、有毛部である鼻の先端部 (鼻尖) は特徴的な特性を示している。鼻尖の圧力感度は無毛部である指先と比べて高く、点定位は指先に相当する感度を示す。二点識別は一部の指先と同等の感度である。したがって、鼻尖は指先同等に機械的刺激の感度が高い。加えて、鼻尖は有毛部である前額部と比較すると圧力感度、点定位、二点識別の全ての感度が高いことが示されている。

機械的刺激に対する感度に関連して、皮膚上の連続的な刺激の移動方向を識別する方向知覚特性を明らかにする研究が行われている。清水ら [8] は有毛部である前額部において刺激を連続的に移動させた時の方向の変化を知覚可能な絶対閾に関して調査を行っている。結論として、刺激を提示する距離 0.6–4.2 mm に対して、速度が 12–30 mm/s の時に方向が知覚しやすく、水平・垂直方向と比べて斜め方向は知覚しづらいことを報告している。Dreyer ら [9] は、ブラシが移動することで生じる刺激を口腔周囲の有毛部が受容

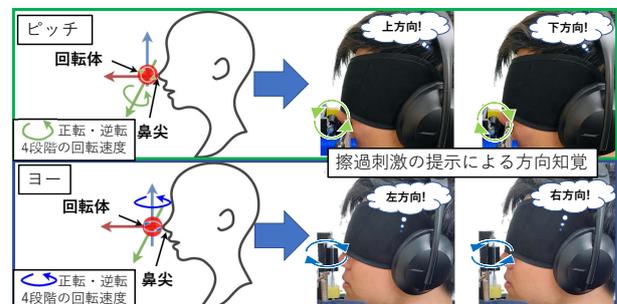


図 1: 鼻尖における方向知覚特性の調査

した際の方向知覚において、刺激速度と移動距離の影響を調べている。結論として刺激を提示した距離 5–40 mm に対して、方向を知覚しやすい刺激の移動速度は 30–250 mm/s であったと報告している。Essick ら [10] は、無毛部の掌や上肢の有毛部などを対象として刺激提示速度や位置、方向などが方向知覚感度に及ぼす影響を移動刺激を用いて調査している。結論として、方向を知覚しやすい速度は 50–300 mm/s であると報告している。

これら先行研究 [8, 9, 10] では、皮膚に物体を擦り当てる際に生じる刺激 (擦過刺激) [11] を検査棒やブラシの一定距離の移動によって提示している。しかし、移動を伴う擦過刺激の提示では、刺激の提示位置と速度が同時に変化してしまうため、それぞれの条件と方向知覚の特性を独立して明らかにすることができない。さらに、多くが有毛部の上肢や前額部、口腔周囲を対象とした方向知覚特性の解明で

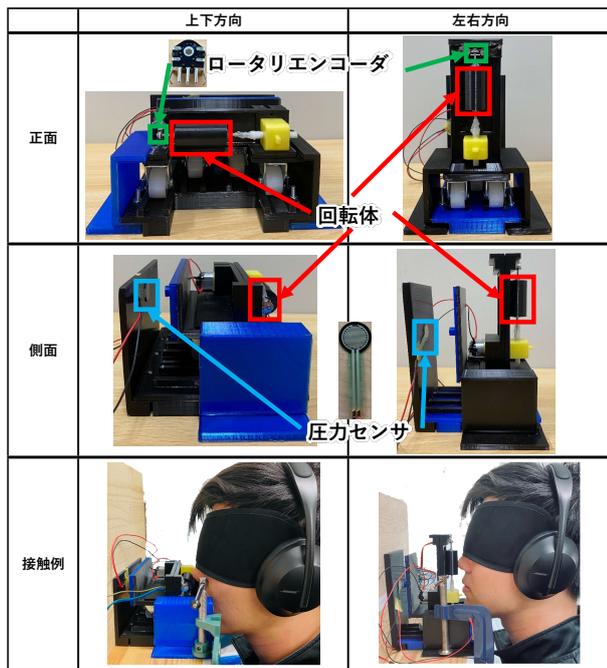


図 2: 擦過刺激提示デバイス (左) 上下方向の場合 (右) 左右方向の場合

あるが、有毛部である鼻尖は未だ解明されていない。

そこで本研究では、移動を伴わない擦過刺激として、回転体を用いた手法を提案し、感度の高い有毛部である鼻尖における刺激速度と方向知覚の関係を明らかにすることを目的とする(図 1)。本研究の貢献は、鼻尖への擦過刺激による方向知覚の生起を示すことである。さらに、鼻尖は顔面中央に位置し大きく隆起していることから、鼻尖への擦過刺激を方向提示に利用することで、頭部運動の教示を行うといったユーザインタフェースへの応用が期待できる。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本実験では、擦過刺激提示デバイス(図 2)を用いた刺激の移動を伴わない擦過刺激提示手法として、図 1 のように上下または左右方向へと回転させた回転体を鼻尖に接触させることで擦過刺激を提示する。擦過刺激提示デバイスに取り付けられた回転体の回転速度はピッチまたはヨーの 2 方向に対してそれぞれ 4 段階設けた。被験者にはアイマスクとヘッドセットを装着した状態で回転体に鼻尖を接触させ、知覚することができた場合は回転の向き(上下方向であれば上か下か、左右方向であれば左か右か)を回答し、知覚することができなかった場合は「わからない」と回答させた。鼻尖に対して上下及び左右方向の擦過刺激を提示した際に、被験者が各回転速度において回転方向を正しく知覚できるか、擦過速度は方向知覚に対して影響を与えるか調査する。

2.2 実験装置

上下方向(図 2 (左))及び左右方向(図 2 (右))に独立した擦過刺激を提示するデバイスを開発した。擦過刺激提示デバイスは、直径 2 mm のシャフトに取り付けられた回転

体を鼻尖に擦り当てることで擦過刺激を提示する。この回転体の素材は動摩擦係数 5-6、静摩擦係数 10-15 と十分な摩擦が生じる TPU [12] から構成されている。回転体の成形には 3D プリンタを利用しており、回転に適した形状かつ鼻との接触面において変化の少ない円柱(直径 20 mm、高さ 40 mm)を採用した。また、擦過刺激提示デバイスは、デバイス下部に車輪を取り付けているため前後方向に対して移動可能であり、刺激提示位置がずれないように上下及び左右方向の移動は制限している。

回転体を駆動させるアクチュエータには減速比 1:48 のギアドモータ(TGP01D-A130-10300-288)を利用しており、モータ制御にはモータドライバ(VNH2SP30)を利用している。モータへの制御命令は PC からモータ制御用マイコン(ESP-WROOM-32)への無線通信を介して、UART 通信によって制御信号伝達用マイコン(Arduino UNO)へとデータ通信を行うことでドライバへ伝達している。モータの回転速度制御には PWM (pulse width modulation) 制御を用いた。

2.3 計測情報

本実験では、回転体の回転速度や回転方向、鼻尖が擦過刺激提示デバイスを圧する際の圧力値を計測する。回転体の回転速度や回転方向は、ロータリエンコーダ(EC10E1260502)をシャフトの末端に取り付け、キャリブレーションを行った後に 1 s に回転する回数やクリック方向を計測している。クリック回数のカウントは 1 ms の割り込みで処理している。

また、鼻尖が擦過刺激提示デバイスを圧する際の圧力値は、デバイス後方に成形した突起によって圧力センサ(FSR402)を圧迫することで計測している。圧力値は事前に計測した抵抗値を変数とした最小二乗法による線形近似によって算出されており、計測間隔は 4 ms としている。

2.4 実験条件

本実験では、回転体の回転速度によって擦過刺激の速さを決定している。この擦過刺激の速さと方向知覚は何かの関係性が生じると考えた。そこで、段階的に擦過刺激の大きさを提示するために回転体の回転速度を上下及び左右方向で 4 段階に設定した。

上下及び左右方向に提示する擦過速度は式(1)の等比数列によって決定した。回転体の回転速度は、ロータリエンコーダで実測した 1 秒間に回転する回数を基に算出している。表 1 に示す通り、初項は上下方向では 10.85 mm/s、左右方向では 9.15 mm/s と今回用いたギアドモータの PWM 制御で実現可能な最低回転速度としている。また、公比は上下及び左右方向共に 2.5 とした。

$$a_{n+1} = a_n r^{n-1} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

本実験において擦過刺激提示デバイスは台座に固定した状態であり、被験者は自ら回転体に対して鼻尖を接触させることで擦過刺激を受容することが可能となる。そこで、鼻尖で擦過刺激提示デバイスを押し付ける際の圧力値の基準として、皮膚が擦れる程度の圧力指標を 100-300 gf とした。こ

表 1: 上下方向及び左右方向の擦過速度

Step	上下方向 [mm/s]	左右方向 [mm/s]
1	9.15	10.86
2	22.87	27.15
3	57.18	67.87
4	142.94	169.68

の値は回転を妨げずかつ安全な値として経験的に設定した。

2.5 実験手順

実験では、それぞれの被験者に対して表 1 に示す擦過速度をそれぞれ 8 試行行った。上下方向と左右方向の試行はそれぞれ連続して行い、上下方向の回転を 32 試行と左右方向の回転を 32 試行、全 64 試行行った。

実験開始前に、実験者は被験者に対して鼻尖に回転体が接触する座高になるように椅子の高さを調整するよう指示した。次に、圧力指標の教示を行い擦過刺激提示デバイスに 100–300 gf を維持する圧力をかけるように指示を行い、リアルタイムに計測された出力を確認させることで訓練を行った。その後、実験者は被験者に対してホワイトノイズが出力されているヘッドセットを装着するよう指示し、モータの駆動音が聞こえなくなるよう音量の調節を行った。最後に、実験中は視覚と聴覚がアイマスクとヘッドセットによって制限されるため、実験者は被験者に対して鼻尖接触合図や実験終了合図は被験者の左肩を叩いて合図を送ることを伝えた。なお、実験前の訓練では回転体は実際には回転していない。また、ヘッドセットの音量は回転体に鼻尖が接触していない状態で調整した。

実験中、被験者はアイマスクとヘッドセットを付けた状態で、鼻尖接触合図後に自ら鼻尖に回転体を押し当て回転方向を回答した。回答方式は三択であり、被験者は知覚することのできた「上・下」方向若しくは「左・右」方向を回答した。知覚することができなかった場合は「わからない」と回答させ不正解とした。なお、被験者には、回転体による擦過刺激を確実に知覚させるために鼻尖を回転体に接触する時間の制限は設けていない。回答後は鼻尖を離し、次の鼻尖接触合図を待つという手順で 32 試行繰り返した。

2.6 被験者とその構成

被験者は、心身ともに健康な成人の 8 人 (男 6 人, 女 2 人; 年齢 23–36) であった。

3. 実験結果

上下方向及び左右方向における各擦過速度ごとの正答率を図 3, 4 に示す。上下及び左右方向において上位二つの擦過速度では 100% の正答率が得られた。また、上位三つの擦過速度をみると 95% 以上の正答率が得られていることも確認できる。一方で、最も低い擦過速度は上下方向共に正答率が最も低く、上下方向は顕著に低い結果となった。

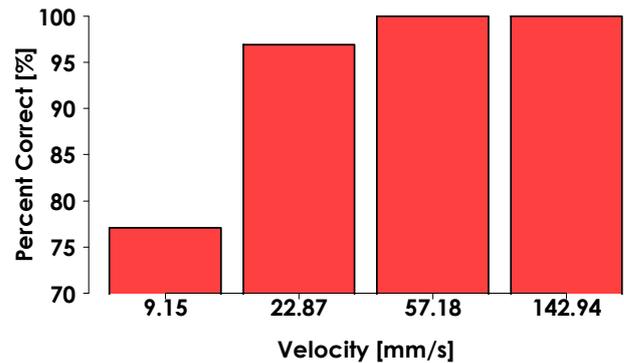


図 3: 上下方向の方向正答率

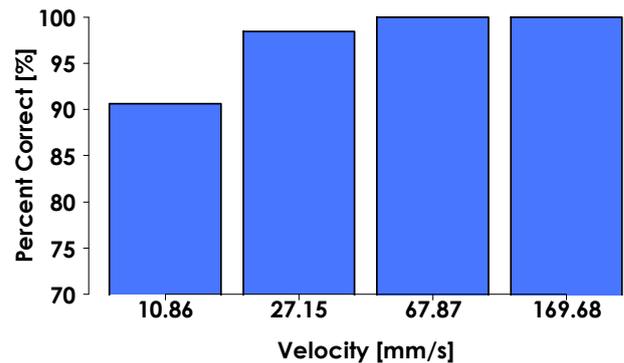


図 4: 左右方向の方向正答率

4. 考察

実験結果は上下方向では 57.18 mm/s 以上、左右方向では 67.87 mm/s 以上の擦過速度の際に正答率が 100% であった。従って、上下及び左右方向共に擦過速度が速くなるにつれて方向知覚が正確に行われていることが示唆された。この結果は、刺激提示距離を長く設けた実験設定で行った Dreyer ら [9] や Essick ら [10] に近い結果であると言える。

先行研究 [10] において得られている知見は、皮膚長が長くなるにつれて刺激の移動距離が増加することで方向知覚特性における適切な速度が増加し、適切な速度以上あるいは適切な速度以下の場合には方向知覚が低下することであった。刺激の移動距離は鼻尖と回転体が接触した時間と回転体の回転速度によって求められると仮定すると、瞬間的な接触時間の場合には低い回転速度が適しており、一定時間接触する場合は高い回転速度が適していることが考えられる。

本実験において、鼻尖と回転体の接触時間に制限は設けていないため、被験者は接触開始から回答までの間回転体と鼻尖の接触を維持している。そのため、被験者が方向を知覚して認識するまでの間、接触時間は延び続けていることになる。鼻尖の接触時間を主とした計測を行っていないため正確な数値は得られなかったが、実験を通して被験者の多くは接触から回答までに最低 1 s 以上の時間を要していた。このことから、一定時間接触が生じたことにより、先行研究 [9, 10] における刺激の移動距離が増加した条件に類似したことが考えられる。これにより、高い回転速度における最適な速度に該当する時間が長いことにより正答率が高まっ

たとえられる。一方で、低い回転速度は接触し始めた最適な速度に該当する時間が短いことで判断が鈍り正答率が下がったことが考えられる。これより、回転体を用いた擦過刺激による方向知覚特性においては、移動距離ではなく回転速度と接触時間によって適切な速度が求められる可能性があり、今後のさらなる調査が必要である。

その他、実験中は被験者が擦過刺激提示デバイスに圧力を掛けすぎているかを確認するため圧力値の計測を行った。内訳は上下及び左右方向の全 512 試行の内、圧力を計測することができたのは 271 試行であり、計測することができなかったのは 241 試行であった。圧力値が計測された試行に対して、各試行において鼻尖を回転体に接触している間に計測された圧力の平均値を用いて解析を行ったところ、上下及び左右方向の各擦過速度において圧力値が 100–250 gf 付近に密集しており、全体的に低い圧力値に集中していた。このことから、擦過刺激である性質上圧力が多少は必要であるものの、刺激を感じるには微小な圧力で十分であったことにより、計測されなかった試行が発生したと考えられる。また、擦過速度の増加に伴って方向知覚が正確に行われているため、方向知覚特性において圧力は擦過速度よりも依存度が小さいと考えられる。

5. まとめ

本研究は、鼻尖の皮膚に対して回転体を上下及び左右方向に回転させることで生じる擦過刺激を受容した際の方向知覚特性を調べた。本実験において、回転体をピッチ軸、ヨー軸に回転させることで鼻尖に対して擦過刺激を提示した際に上下及び左右方向を正しく知覚可能か、回転速度によって方向知覚に変化が発生するかを調査した。結果として、擦過速度が上下方向では 57 mm/s 以上、左右方向では 67 mm/s 以上の場合に擦過刺激によって提示した方向と知覚した方向が完全に一致した。なお、上下方向では 142.94 mm/s、左右方向では 169.68 mm/s を上限の擦過速度としている。

本研究で得られた知見は、頭部を任意の方向に誘導するための方向提示手法や視覚に依らない方向提示手法に応用可能性がある。今後は、回転速度と頭部運動の方向の関係や回転体との接触時間が方向知覚に与える影響を明らかにしていく。

参考文献

- [1] 清水豊. 機械的刺激による触覚の心理物理特性. 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 445–450, 1984.
- [2] 仲谷正史. 皮膚を支配する機械受容器と指腹部の構造的な機能. システム/制御/情報, Vol. 64, No. 4, pp. 126–130, 2020.
- [3] 岩村吉晃. ヒト触覚受容器の構造と特性. 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 438–444, 1984.
- [4] 古川正紘, 永谷直久, 橋本悠希, 常盤拓司, 杉本麻樹, 梶本裕之, 稲見昌彦. 皮膚有毛部の体毛を介した振動感受特性. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 511–520, 2009.
- [5] A.B. Vallbo, H. Olausson, J. Wessberg, and N. Kakuda. Receptive Field Characteristics of Tactile Units with Myelinated Afferents in Hairy Skin of Human Subjects. *The Journal of Physiology*, Vol. 483, No. 3, pp. 783–795, 1995.
- [6] B. Scharf, J. Hyvärinen, A. Poranen, and M.M. Merzenich. Electrical Stimulation of Human Hair Follicles via Microelectrodes. *Perception & Psychophysics*, Vol. 14, No. 2, pp. 273–276, 1973.
- [7] S. Weinstein. Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality. *The skin senses*, 1968.
- [8] Y. Shimizu and T. Wake. Tactile Sensitivity to Two Types of Stimulation: Continuous and Discrete Shifting of a Point Stimulus. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 54, No. 3-suppl, pp. 1111–1118, 1982.
- [9] D.A. Dreyer, G.H. Duncan, C.L. Wong, and B.L. Whitsel. Factors Influencing Capacity to Judge Direction of Tactile Stimulus Movement on the Face. *Journal of Dental Research*, Vol. 58, No. 11, pp. 2052–2057, 1979.
- [10] G.K. Essick and B.L. Whitsel. Factors Influencing Cutaneous Directional Sensitivity: A Correlative Psychophysical and Neurophysiological Investigation. *Brain Research Reviews*, Vol. 10, No. 3, pp. 213–230, 1985.
- [11] 村田耕一, 松下明, 五月女康作, 河本浩明, 山海嘉之. ピン刺激と擦過刺激が可能な MRI 対応感覚刺激装置の開発. 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 810, pp. DR0028–DR0028, 2014.
- [12] 伊藤七之助. ポリウレタン系熱可塑性エラストマー. 日本ゴム協会誌, Vol. 57, No. 11, pp. 704–716, 1984.