



指先への斜め線刺激の方位判断課題における 周辺刺激パターンの影響

小嶋麻由佳¹⁾, 黒木忍¹⁾

1) NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所

(〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1, mayuka.kojima@ntt.com)

概要: 触覚を介して指先に方位情報を提示することは、情報提示において有効な手段の一つである。一方、複数の刺激が同時に提示された場合、たとえ標的刺激と妨害刺激が明示されていても、両者が統合されて知覚される現象が広く知られている。本研究では、標的刺激として斜め方向の振動刺激を提示し、妨害刺激として周囲に 1 本または 2 本の振動刺激を付加することにより、妨害刺激が指先における方位判断課題に与える影響を検討した。

キーワード: 心理物理、皮膚感覚、方位判断

1. 緒言

触覚を介した物体認識や操作では、対象物と皮膚との相対位置を把握することが不可欠であり、その基本要素が方位である。ヒトの指腹部における方位弁別能を解明するため、これまで多くの研究が実施されてきた [1-6]。電気生理学的研究により、皮膚が変形した際に活動する求心性神経のうち SA-1 と FA-1 では、触刺激の傾きを 5 度変更しただけでも神経活動パターンが変化することが示されている [1]。知覚心理学的な研究においては、単一の線分の傾きを比較する場合、傾きが 20 度以上異なれば区別できることが知られている [2]。また、静的な線分だけでなく、振動刺激で線分を提示した場合にも、方位弁別は可能なことが知られている [3]。こうした知見は、指腹部が高精度な方位弁別能力を持つことを示唆している。

一方、現実の状況では、触覚刺激が一つだけ提示されるとは限らず、複数の刺激が同時に与えられる場合がある。複数の触覚刺激が提示される場合、標的刺激と妨害刺激が明示されていても、ヒトは両者を統合して知覚することが知られている [7-10]。Craig [7] は標的刺激を文字とし、標的刺激提示の前後に妨害刺激を提示する課題において、妨害刺激を全体に均等に提示するよりも、標的刺激に似せて提示の方が大きく認知判断能力が下がることを示した（時間マスキング）。しかしながら、方位判断課題において、一つの提示部位に同時に提示された妨害刺激の形状や配置が標的刺激の方位知覚にどのような影響を与えるか（空間マスキング）については、あまり明らかにされていない。

本稿では、指先での方位判断課題において同時に提示される妨害刺激の影響を調べることを目的とする。標的刺激は 45 度あるいは 135 度の斜め線分とし、その周辺に 1 本あるいは 2 本の妨害刺激を加えた刺激系列を作成する（図 1 参照）。妨害刺激の本数・方位・空間的配置を操作しながら、標的刺激の方位判断精度を調べることで、妨害刺激の支配的な要素を検討する。このような方位判断における標

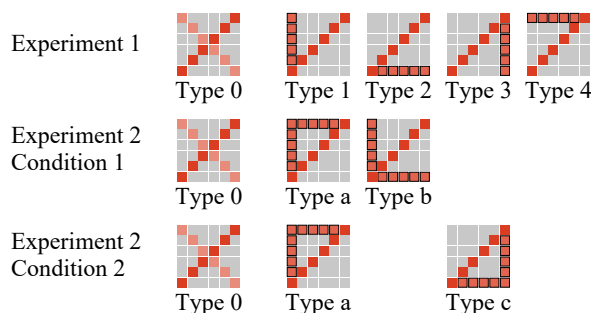


図 1: 実験 1・実験 2 における刺激の種類。「Type 0」の濃い赤色は 45 度の標的刺激、薄い赤色は 135 度の標的刺激を示す。「Type 1」から「Type 4」と「Type a」から「Type c」の黒い枠線は妨害刺激を示す。「Type 0」以外の図では、見やすさのため 135 度の標的刺激を省略した。

的刺激と妨害刺激の関係を明らかにすることは、触覚提示デバイスを設計する際にも重要である。

2. 指先における方位判断実験

本実験では、指先に提示された刺激の方位を判断する課題により、ヒトの方位判断精度を測定する。刺激は線分状の振動刺激であり標的刺激と妨害刺激が同時に提示される。標的刺激である判断する方位は、45 度と 135 度の二肢強制選択 (2-AFC) である。本稿において、図 1 の「Type 0」に濃い赤色で記す左下と右上を結ぶ線分状の刺激を 45 度、薄い赤色で記す右下と左上を結ぶ線分状の刺激を 135 度と定義する。

妨害刺激は図 1 の「Type 1」から「Type 4」と「Type a」から「Type c」に黒い枠線で示すように、実験 1 と実験 2 とで異なる。実験 1 では標的刺激の上下左右に一本の線分状刺激が提示され、実験 2 では隣り合った二本の線分状刺激が提示される。本実験により、方位判断課題における妨害刺激の影響を検討する。なお、本稿における実験はヘル

シンキ宣言（2008 年）に由来する倫理基準に従って行われ、NTT コミュニケーション科学基礎研究所研究倫理委員会の承認を得た（承認番号：R06-001）。

2.1 セットアップ

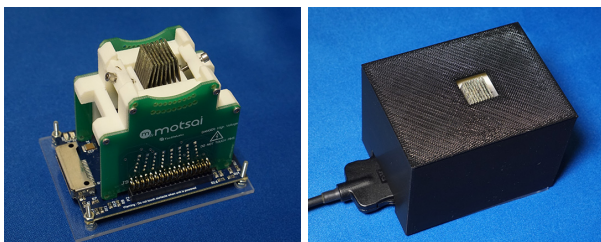
本実験において、刺激は「Latero」（Tactile Lab, Montreal, Canada）[11] から提示される（図 2(a) 参照）。「Latero」はピンアレイ状の刺激装置であり、上側中央部の各ピンが独立して皮膚との接触面を横方向に移動させることができる。ピン構成は 8 行 8 列の 64 ピンであり、刺激領域の縦横は約 13 mm と 10 mm である。ピン間隔の縦横は 1.6 mm と 1.2 mm である。刺激装置のリフレッシュレートは 1100 Hz であり、カットオフ周波数は 100 Hz である。実際に使用する際には、刺激提示部のみを指腹で触りやすくするため、3D プリンタで作成したカバーを上から被せる（図 2(b) 参照）。

実験 1・実験 2 ともに、実験参加者は図 3 のように、左示指の指腹を刺激提示部に置く。このとき、視覚座標と皮膚座標が大きく変わらないように、実験参加者は「Latero」を体の正面やや左側に設置する。また、左手の下にはクッションを置き、座位で楽な姿勢を取るよう指示する。さらに、右手でキーボードを操作することにより、刺激の方位を回答する。キーボードにはわかりやすいように、回答すべき方位を示すシールが貼られている。

2.2 実験手順

実験 1 では、図 1 上段のような 5 タイプ 10 種類の刺激が、実験 2 では、図 1 の中段や下段のような 4 タイプ 8 種類の刺激が提示される。「Type 0」は 2 種類の標的刺激のみの刺激であり、「Type 1」から「Type 4」は標的刺激に加えて上下左右に一本の線分状妨害刺激が同時に提示される刺激である。「Type a」から「Type c」は標的刺激に加えて隣り合った上下左右に 2 本の線分状妨害刺激が同時に提示される刺激である。

刺激は 6 行 6 列ピンのアレイ範囲の一部を駆動して提示した。刺激位置は「Latero」で制御できる 8 行 8 列のピン領域の中から、試行ごとにランダムに選択した。各試行で刺激される皮膚部位をわずかに変化させることで、皮膚変形の絶対位置情報だけでは課題を解きにくくなるように設計した。



(a) Latero.

(b) With a cover.

図 2: 実験で使用する「Latero」。(a) 刺激提示部は上側中央部であり、8 行 8 列のピンアレイ形状である。(a) 実験中は提示部に指を置きやすいように、3D プリンタで作成したカバーを上から被せる。



図 3: 実験セットアップ。実験参加者は左示指の指腹を刺激提示部に置き、右手でキーボードを操作して回答する。

刺激提示時間は 200 ms であり、振動刺激は周波数が 40 Hz の正弦波である。先行研究 [4] において、ヒトが十分に方位判断可能と報告された刺激を参考に設計した。振幅強度は十分に知覚できるが、長時間の実験で疲労しない程度の強さに調整した。

実験参加者は、各ブロックにおいて以下の試行を繰り返す。まず、左示指の指腹にランダムな順序で刺激が提示される。実験参加者はキーボードを押し、標的刺激の方位を 45 度か 135 度かで回答する。指を置き直して次の試行を開始する。このとき、回答のタイミングに制限は設けない。

実験 1 では、各ブロックにおいて 10 種類の刺激が 2 回ずつランダムな順序で提示され、これを 10 ブロック繰り返す。すなわち、全ブロックでは 10 種類の刺激を 20 回ずつ、200 試行提示する。実験 2 では、各ブロックにおいて、条件 1 では「Type 0」・「Type a」・「Type b」の 6 種類の刺激、条件 2 では「Type 0」・「Type a」・「Type c」の 6 種類の刺激が 5 回ずつランダムな順序で提示される。この 2 条件をランダムな順序で 4 ブロックずつ繰り返す。すなわち、各条件において 6 種類の刺激を 20 回ずつ、120 試行提示され、2 条件合計で 240 試行提示される。各ブロックは 5 分以内であり、複数ブロックを連続で実施することを許可する。連続したブロックは 20 分を超えないようにし、超える場合には中断して 5 分以上の休憩をとるように指示する。

実験 1 には、自己申告に基づく触覚感度が正常な 6 名（女性 3 名、24～49 歳、平均年齢 33 ± 8.93 歳、全員が右利き）が参加した。実験参加者は NTT コミュニケーション科学基礎研究所内で募集し、著者も参加した。実験 2 には、自己申告に基づく触覚感度が正常な 12 名（女性 5 名、20～39 歳、平均年齢 24.2 ± 4.9 歳、全員が右利き）が参加した。参加者の人数は、同様の刺激で指先を刺激して触覚知覚をテストした先行研究 [4, 5, 12] と同程度になるよう、あらかじめ定めた。参加者は全員、書面によるインフォームド・コンセントを得た。

2.3 結果

判断した方位の正答率を、妨害刺激の「Type」や方位ごとに図 4 へ記した。実験 1 の結果が図 4(a) と図 4(b) であ

り、実験 2 の結果が図 4(c) と図 4(d) である。図 4(a) と図 4(c) の横軸は妨害刺激の有無と判断する方位、縦軸は方位判断正答率を示す。図 4(b) と図 4(d) の横軸は妨害刺激の「Type」、縦軸は方位判断正答率を示す。図中のエラーバーは 95%信頼区間 (CI) を示し、点線はチャンスレベルを示す。二肢強制選択法を用いているため、チャンスレベルは 0.5 である。実験 2 では、「Type 0」と「Type a」の結果に関して他の「Type」とサンプル数を揃えるため、実験参加者と提示方位ごとに条件 1 と条件 2 からランダムに一つ取り出して解析した。

実験の結果、95%信頼区間はどの条件においてもチャンスレベルを超えていた。すなわち、図 1 のような標的刺激と妨害刺激の場合、ヒトは妨害刺激の有無や「Type」に関わらず、方位を判断できることが明らかになった。

実験 1・実験 2 の両方において、妨害刺激の有無が方位判断課題の正答率に与える影響を評価した。正規性 (Shapiro-Wilk test, $p > 0.05$) が棄却されなかったため、対応のある t 検定 (Paired t test, $p < 0.05$) を実施した。 t 検定の結果、妨害刺激がある場合に有意に方位判断正答率が小さいことが明らかになった。実験 1 において、 $t(5) = 2.66$, $p < 0.05$, Cohen's $d = 1.09$ であり、実験 2 において、 $t(11) = 12.75$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 3.68$ であった。

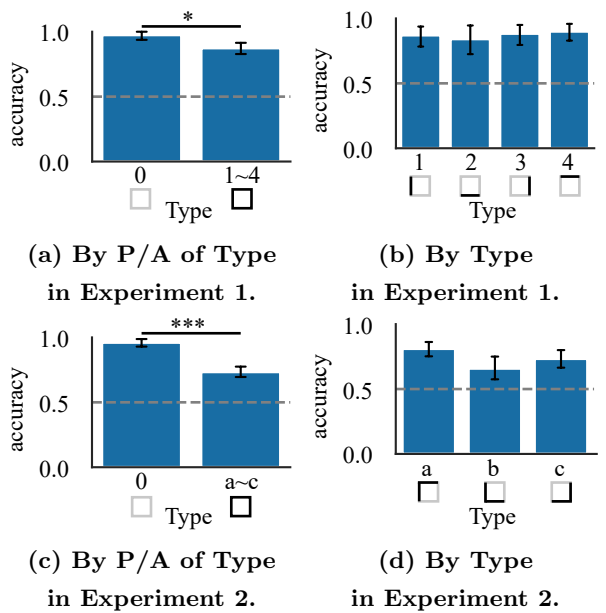


図 4: 実験 1 と実験 2 の結果。横軸は妨害刺激条件、縦軸は方位判断正答率を示す。エラーバーは 95%信頼区間を示し、点線はチャンスレベルを示す。図中の*は $p < .05$ を、***は $p < .001$ を示す。実験 2 において、「Type 0」と「Type a」に関して「Type b」や「Type c」とサンプル数をそろえるため、条件ごとにランダムに半分を抽出した。(a) 実験 1 における妨害刺激の有無と判断する方位ごとの方位判断正答率。(b) 実験 1 における妨害刺激の「Type」ごとの方位判断正答率。(c) 実験 2 における妨害刺激の有無と判断する方位ごとの方位判断正答率。(d) 実験 2 における妨害刺激の「Type」ごとの方位判断正答率。

また、実験 1・実験 2 の両方において、妨害刺激の「Type」に関して評価した。正規性 (Shapiro-Wilk test, $p > 0.05$) が棄却されたため、フリードマン検定 (Friedman test, $p < 0.05$) を実施した。フリードマン検定の結果、実験 1 では妨害刺激の「Type」について有意差がなく、実験 2 では有意差がみられた。実験 1 において、 $\chi^2(3) = 0.74$, $p = 0.87$ であり、実験 2 において、 $\chi^2(2) = 8.67$, $p < 0.05$ であった。

実験 2 に関して、妨害刺激の「Type」ごとの多重比較として、ホルムの方法 (Holm-Bonferroni method) で補正したペアワイズ Wilcoxon 符号順位検定 (Wilcoxon Signed-Ranks Test for Matched Pairs) を実施した。結果をまとめた表が表 1 であり、どの 2 つの「Type」の組合せにおいても効果量は中程度見られたが、有意差は見られなかった。

判断する方位が 45 度か 135 度かに関しては差は見られなかった。妨害刺激の「Type」に関して、実験 1 では「Type 2」の正答率が低い傾向、実験 2 では「Type b」が低い傾向が見られた。なお、実験参加者ごとに結果を確認すると、妨害刺激がない「Type 0」の場合を除き、チャンスレベル以下の正答率の者もいた。

2.4 考察

妨害刺激によって標的刺激の課題正答率が下がる結果は、先行研究 [7–10] においても報告されている。一方で、先行研究において標的刺激に似た妨害刺激のほうがランダムな妨害刺激よりも課題判断能力が下がることが報告されている [7]。そのため、本実験で提示したような標的刺激に似ている線分状の妨害刺激ではなく、あまり似ていない点状の妨害刺激を提示した場合には、方位判断能力があまり下がる可能性が考えられる。

また、本実験では実験 1 と実験 2 とで条件が異なり、直接比較しなかったが、妨害刺激 2 本の「Type a」から「Type c」のほうが妨害刺激 1 本の「Type 1」から「Type 4」よりも正答率が低い傾向が見られた。このように妨害刺激が隣接する縦横線の 2 本になった場合に、正答率が特に下がる要因としては、以下の 2 つが考えられる。一つ目は、妨害刺激のエネルギー量が増えたために、標的刺激よりも妨害刺激の方が大きくなり難しくなった可能性である。二つ目は、縦横斜めと方位が増えたことにより判断が難しくなった可能性である。後者の可能性に関しては、妨害刺激の方位を

表 1: 実験 2 に関して、妨害刺激の「Type」ごとの多重比較として、ホルムの方法で補正したペアワイズ Wilcoxon 符号順位検定を実施した結果。どの組合せにおいても効果量は中程度見られたが、有意差は見られなかった。

比較 Type	統計量 $W(24)$	補正後 p	Cohen's r
a & b	217	0.05	0.48
a & c	162.5	0.21	0.34
b & c	88.5	0.21	0.31

揃えた N 字あるいは Z 字のような形状の刺激を用いて課題成績を調べることで、検証することができる。

さらに、実験 2 の結果より、妨害刺激を加える皮膚部位によって、標的刺激の方位判断性能が変化する可能性が示唆された。このような妨害刺激の部位ごとに正答率が変わる要因として、次の 3 つが考えられる。一つ目は、部位による受容器密度の違いであり、先行研究においてもヒトの指の方位識別感度は指腹中央部の方が側面よりも高いことが報告されている [6]。二つ目は、指の形状によるデバイスとの接触条件の違いである。指腹の中央部はデバイスと適切に接触しているが、側面部や先端部はデバイスとの間に隙間が発生している可能性がある。また、指腹中央部は肉が柔らかく、先端部よりも同じせん断力を加えたときの皮膚変形量が大きいと考えられる。三つ目は、ヒトが注意を向けやすい皮膚部位に一定の傾向がある可能性である。ヒトの触知覚能力は注意を向けることによって向上することが知られている [13]。

なお、実験 1 では妨害刺激を加える皮膚部位ごとの有意差は確認されなかった。しかし、実験 1 では全体的に正答率が高く、天井効果が生じたために差が見えなかった可能性もある。この点については、刺激強度を下げて課題の曖昧性を高めることで、再検討できる。

3. 結言

本研究では、標的刺激と妨害刺激を同時に提示する標的刺激の方位判断課題において、妨害刺激の形状や空間的配置が方位判断課題の正答率に与える影響を検討した。心理物理実験を実施することにより、妨害刺激を提示することによって標的刺激の方位判断正答率が下がることが明らかになった。また、妨害刺激の形状を変えることにより、標的刺激の方位判断正答率が変化する傾向がみられた。今後の展望としては、妨害刺激が 1 本の実験 1 と妨害刺激が 2 本の実験 2 とで実験参加者や刺激条件をそろえることにより、本実験での結果の妥当性を検討する。また、本稿の実験では検討できていない「Type a」から「Type c」以外で妨害刺激が 2 本の実験や点状の妨害刺激での実験も実施し、妨害刺激の空間的配置の影響を検討する。さらに、「Latero」のピンゴとの振動特性が影響している可能性があるため、デバイスの影響を受けない点字での実験も実施する。このような実験をすることにより、方位判断課題における妨害刺激の影響を解明し、触覚を通じて方位提示を行う際の信号設計に寄与すると期待される。

参考文献

- [1] Sukumar, V., Johansson, R. S., and Pruszynski, J. A.: Precise and stable edge orientation signaling by human first-order tactile neurons, *eLife*, Vol. 11, No. e81476, pp. 1–18, 2022.
- [2] Bensmaia, S. J., Hsiao, S. S., Denchev, P. V., Killebrew, J. H., and Craig, J. C.: The tactile perception of stimulus orientation, *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 49–59, 2008.
- [3] Schneider, S. L., Hughes, B., Epstein, W., and Bachy-Rita, P.: The detection of length and orientation changes in dynamic vibrotactile patterns, *Perception & Psychophysics*, Vol. 40, No. 5, pp. 290–300, 1986.
- [4] Kuroki, S. and Nishida, S.: Touch cannot attentionally select signals based on feature binding, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 17, No. 4, pp. 604–613, 2024.
- [5] Kaneko, S., Kajimoto, H., and Hayward, V.: A case of perceptual completion in spatio-temporal tactile space. In *Proceedings of Haptics: Science, Technology, and Applications*, pp. 49–57, 2018.
- [6] Sobue, M., Kato, S., Mizoguchi, I., and Kajimoto, H.: Measuring the distribution of tactile acuity at the fingertips, In *Proceedings of International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications (EuroHaptics 2024)*, Vol. 14769, pp. 15–24, 2025.
- [7] Craig, J. C.: Vibrotactile masking: a comparison of energy and pattern maskers, *Perception & Psychophysics*, Vol. 31, No. 6, pp. 523–529, 1982.
- [8] Kusnir, F., Pesin, S., and Landau, A. N.: Hello from the other side: Robust contralateral interference in tactile detection, *Attention, Perception & Psychophysics*, Vol. 86, No. 1, pp. 295–311, 2024.
- [9] Overvliet, K. E. and Sayim, B.: Perceptual grouping determines haptic contextual modulation. *Vision Research*, Vol. 126, pp. 52–58, 2016.
- [10] Sherrick, C. E., Jr.: Effects of double simultaneous stimulation of the skin, *The American Journal of Psychology*, Vol. 77, No. 1, pp. 42–53, 1964.
- [11] Qi, W. and Hayward, V.: Biomechanically Optimized Distributed Tactile Transducer Based on Lateral Skin Deformation, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 323–335, 2009.
- [12] Kuroki, S., Hamazaki, T., Kajimoto, H., and Nishida, S.: Passive human touch cannot recognize the shape of a pattern imprinted on the fingertip, *iScience*, Vol. 28, No. 5, pp. 112331, 2025.
- [13] Kennett, S., Taylor-Clarke, M., and Haggard, P.: Noninformative vision improves the spatial resolution of touch in humans, *Current Biology*, Vol. 11, No. 15, pp. 1188–1191, 2001.