

Fishbone Tactile Illusion を利用した 触対象の凹知覚の研究

仲谷 正史^{*1} Robert D. Howe^{*2} 舘 暲^{*1}

Tactile depth perception examined by the Fishbone Tactile Illusion

Masashi Nakatani^{*1}, Robert D. Howe^{*2} and Susumu Tachi^{*1}

Abstract – Tactile sensation usually provides reliable perception of an object’s presence and its surface geometric profile. We can easily conduct a part of daily behaviors without looking at. However, the human tactile sensation is not necessarily faithful reproduction of the physical property of an object in real world. Here we report a novel tactile illusion named as “Fishbone Tactile illusion”: in which depth perception of the contact surface occurs through stroking by a fingertip even though the surface profile is physically flat. We investigated the effects of the touching modes (static and active) and that of the surface profile of stimuli (presence/non presence and width of smooth-flat contact surface) on the illusionary perception of stimulus geometry. The results from the two experiments suggest that this illusion is induced when the stimulus satisfies following at least two conditions: 1. a central smooth region is surrounded by rough adjacent regions; 2. a central smooth strip is required when the width of its region is below 1.5 mm. This phenomenon may reveal the basic of human tactile system to process the perception of depth in finger tip because of its robustness and simplicity.

Keywords : tactile illusion, geometric perception, depth perception

1 はじめに

触覚は人間の五感の中でプリミティブな外界の情報取得に優れている。それゆえ、視覚で情報を取得できない闇の中でも人は触覚だけを信頼して危険を回避しながら行動することができる [1]。しかしながら、視覚や聴覚と同様に、人間の主観的な触体験は必ずしも物理世界を忠実に再現しているわけではない。その証拠に、触覚における錯覚現象（物理的には異なるが、実質的に別の物理現象と等価と感ずること）の存在が長い期間をかけて少しずつ報告し続けられている。中でも我々は Fishbone Tactile Illusion（以下、FTI と略記する）という、視覚の影響を受けないロバストな皮膚感覚における触錯覚現象を発見した [2]。この錯覚の詳細は後述するが、端的に言えば物理的に平らな面が主観的にはくぼんで感じられる現象である。

一般に、錯覚現象を利用して人間の知覚メカニズムを解明する手法は視覚の分野では数多く採用されている。特に新しい錯覚現象の発見は視覚システムの理解を促進している。同様のロジックにより、発見した錯覚現象を利用して生じる触知覚を研究することは、旧来行われてきた心理学・感性工学（例えば点字の設計方法など [3]）や神経生理学 [4] とは異なるアプローチ

で触知覚システムの理解に貢献できると考えられる。加えて、得られる知識は、VR 空間において人間に正しい形状情報を提示する触覚ディスプレイの設計に利用可能である。事実、触錯覚を利用した凹凸感提示の研究がごく最近に行われ、触覚ディスプレイの刺激レンダリング手法として応用されている [5]。

以上の動機より、筆者らは Fishbone Tactile Illusion を通した人間の触対象の凹知覚（もしくは奥行き知覚）について検討した。特に本稿では、現象が生じる物理刺激の条件を検討し、触知覚メカニズム究明に有用な知見を得ることを目的とする。

2 報告する触錯覚現象の詳細

Fishbone Tactile Illusion が生じる典型的な刺激形状の 1 つは、図 1(a) に示す「魚の骨」のような形状である。平らな中心部（以下、中心線と略記する）に対して周辺部には一周期 2.0 mm の空間周波数を持った格子形状 (gratings) が彫られている。体験者が指腹部で中心線を長軸方向になぞると、物理的には平らな面であるにもかかわらず「くぼみ」を感じられる。一方で、図 1(c) において矢印で示した方向と直交した方向に指を動かすと、中心線は盛り上がり感じられる。ゆえに、FTI は指を動かす方向に依存する錯覚である。さらに、FTI は視覚など他のモダリティーの影響を受けにくく、体験者が指先で接触表面に触れる前に視覚や触覚で形状を確認させた後でも凹知覚は生じる。

^{*1}東京大学大学院 情報理工学系研究科

^{*2}Harvard School of Engineering and Applied Sciences

^{*1}Graduate School of Information Physics and Computing, The University of Tokyo

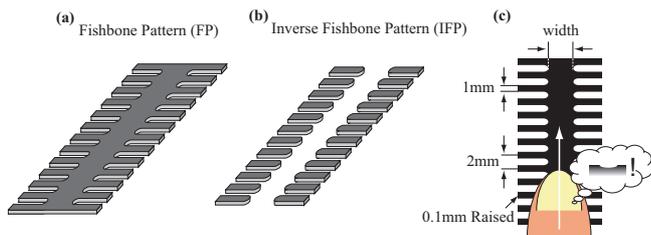


図1 実験で用いた物理刺激。(a)Fishbone Pattern 形状は平らな面を有する中心線と、その面から深さ 0.1 mm だけ一部を削って格子形状が加工された周辺部の 2 つから構成される。(b)Fishbone Pattern の高さを反転させたパターン。(c) Fishbone Pattern 形状の詳細。矢印の方向に指を動かすことで凹知覚が生じる。

Fig. 1 The surface geometry pattern used in the experiments: Fishbone Pattern (a) and Inverse Fishbone Pattern (b). Detailed surface profile is shown in (c).

同様な現象は平面の粗さ・質感が異なる材料のペア（たとえば、アクリル板と木材）を隣り合わせて接着し、端面をフライス盤等で平らな面に加工した物理刺激でも生じる [2]。また、ピンマトリクス型触覚ディスプレイにおいて、指腹の中心部は刺激せず周辺部のみを刺激しても同様の現象が再現可能である [6]。逆に、一様に滑らかな平面の一部に粗い部分が存在することによって、凸知覚が生じる。しかし予備実験から、粗い表面で滑らかな表面を挟んだ条件の方が再現性高く凹知覚が生じることを確認している。

次節では、FTI において凹知覚が生じる物理条件を調べた二つの実験結果を示す。

3 実験

3.1 実験 1 Fishbone Pattern による主観的な凹知覚

実験 1 の目的は、次の二つである。一つ目は、Fishbone Tactile Illusion の発現が中心線の幅によって影響されうるかを調べることである。二つ目は、物理的な凹形状に対して確かに凹知覚が生じているかを調べることである。その目的のために、Fishbone Pattern(以下、FP と略記する) 形状と、FP 形状の凸部と凹部を反転させた形状 (Inverse Fishbone Pattern, 以下 IFP と略記する。図 1(b) 参照) を、中心線幅 (図 1(c) 中の width) を変えながら作成した。

3.1.1 実験参加者

右利きの 10 名の大学生・院生 (男性 5 名, 女性 5 名, 年齢 21-28, 平均年齢 24.2 歳) が実験に参加した。被験者は実験に先立ってインフォームドコンセントを与えられたが、実験の内容に関しては知らされなかった。

3.1.2 実験器具

3 次元フライス (TMC 1000, Light Machine Corporation 製) に 0.793 mm (1/32 インチ) のエンドミルを装着して、厚さ 6.25 mm (0.25 インチ) のアルミニウム板上に同じ中心線幅の FP 形状と IFP 形状を作成した。中心線幅は全部で 7 種類 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 8.0 mm) 用意した。中心線外側には幅 1.0 mm で、高さ差 0.1 mm の隆起と溝を波長 2.0 mm で規則的に形成した (以下、周辺部と略記する)。FP 形状において、周辺部の隆起の高さと中心線の高さは同じとした。加えて、中心線のない格子形状のみの刺激片も用意し、FP, IFP 形状と合わせて計 15 種類の触覚刺激片を作成した。

3.1.3 実験手順

実験者は、実験に先立って刺激片をエタノールで洗浄し乾かした。また、実験の前にウェットティッシュを用いて被験者の人差し指の指腹部を拭き、付着した汚れを除去した。その後、実験者は目隠しをした被験者の右手人差し指を、用意した刺激片の中心線上に置いた。被験者は試行によって、指を動かさない条件 (static touch) と自分で指を動かす条件 (active touch) の 2 条件で刺激片に触れた¹。指を動かす条件において被験者は一度だけ、自身の体の手前から奥の方向に人差し指を動かすよう指示された。被験者は、触れている接触表面の中央部が「平ら」であるか「くぼみ」かの二件法で答えた²。FP 形状と IFP 形状および gratings の全 15 種類の刺激片を各 10 回ずつ、static/active touch 条件のそれぞれにおいて計 150 回ずつ触れさせた。試行数が多いため、static/active touch 条件をそれぞれ 75 試行の計 150 試行を 1 日分とし、全試行を 2 日間に分けた。また、試行は 30 回ごとに 3 分程度の休憩をとった。休憩時には実験片をエタノールによって洗浄し、被験者の指腹部をウェットティッシュによって再び洗浄した。練習試行を含めて 1 日分の試行を終えるのに約 1 時間 10 分の時間を要した。

3.1.4 実験 1 結果

結果を図 2 に示す。縦軸に「くぼみ」と回答した率を示す。FP 形状に対して、static touch 条件でくぼんでいと回答する率は低く、中心線を物理形状と一致して「平ら」と知覚している傾向が見られた。しかし active touch 条件で中心線幅が 1.0 - 5.0 mm の間で奥行きを「くぼみ」と誤回答をする傾向が見られた。上述の範囲が FTI が生じる中心線幅であり、特に 1.5 -

¹指が止まっていて刺激片が動く条件 (passive touch) においても凹知覚が生じることを予備実験で確かめたが、active touch 条件との有意差が見られなかったため、本実験では試行数を減らして被験者の負担を軽減するために passive touch 条件を行わなかった。

²予備実験において、中央部が盛り上がっていると答えた被験者が稀 (30 人に 1 人程度) であったため、今回は「平ら」・「くぼみ」の二肢から選択させた。

3.0 mm の範囲では 75 % 以上の確率で錯覚が生じた。

IFP 形状に対して, static touch 条件で中心線幅が 0.5 - 5.0 mm までの間では, 回答率 50 % を超えて中心線を物理形状と一致して「くぼみ」と被験者は回答した. 特に中心線幅 1.5 - 3.0 mm の間では 75% を超えて正答した. 一方, active touch 条件で中心線幅が 2.0 mm 以上では, 物理形状と一致して「くぼみ」と回答する傾向が見られた. 上述の範囲よりも小さい 1.5 mm 幅以下の場合には, 接触表面を「平ら」と答える頻度が高かった.

3.1.5 実験 1 考察

実験 1 の結果から, Fishbone Tactile Illusion は中心線の幅によって錯覚する確率が変化することがわかった. 加えて, FP 形状と IFP 形状に対する凹知覚は異なる傾向を示すことが示唆された. 特に active touch 条件で FTI 形状に触れる時, 狭い中心線幅に対しても (1.0 mm 前後) 凹知覚が生じていることがわかった.

なぜ, 凹知覚が FP 形状と IFP 形状で異なる傾向を示すのかを考察する. FP/IFP 形状において, 周辺部の gratings 刺激は同じである. ゆえに, 唯一の物理的な違いは中心線の高さである. 今回は高さ差 0.1 mm であるが, 指腹部に対する中心線が固着する領域の大きさは FP 形状に比べて IFP 形状では小さくになると考えられる. さらに, IFP 形状に対して, 指の機械的な変形の限界から中心線幅の減少につれて中心部の底面に指が到達できなくなると考えられる. ゆえに, 凹知覚が生じるメカニズムについての詳細なる検討を要するが, 上述の固着領域の有無も凹知覚の原因になると考えられる.

3.2 実験 2 Fishbone Pattern と Inverse Fishbone Pattern における凹知覚の強度比較

実験 1 の結果から, FTI が生じる物理条件は中心部と周辺部の粗さ差に加えて, 中心部が指腹部に固着する面の有無も関係すると仮説立てられた. 実験 2 では, 実験 1 の結果の理解を深めるために, 同じ中心線幅を持つ FP 形状と IFP 形状によって生じる凹知覚の強度を直接比較する.

実験 1 の結果から予測すると, 中心線幅が 0.5 - 1.5 mm の間では FP 形状の方が IFP 形状よりもくぼんで感じるだろうと予想される. 一方, 2.0 - 5.0 mm の間では IFP 形状の方がくぼんで感じると予想される. 想定される結果を検証するために, 以下の方法で実験を行った.

3.2.1 実験参加者

実験 1 と同じ, 10 名の被験者が実験 2 に参加した. 実験は実験 1 とは別日程で行われた.

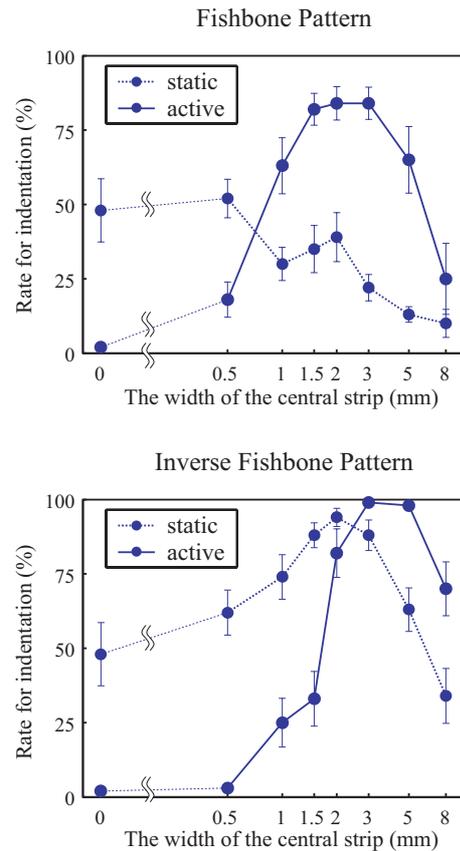


図 2 Fishbone Pattern/Inverse Fishbone Pattern 形状をそれぞれ 1 回ずつ, static touch と active touch で触れた際に得られる凹知覚 (N=10). エラーバーは標準誤差を表す.

Fig. 2 Subjective perceived geometry in both static and active touch condition. N=10, and error bars indicate the standard error of the mean.

3.2.2 実験器具

刺激片は, 実験 1 で利用した中心線幅が 0 mm の gratings 刺激以外の 14 種類を使用し, 同じ中心線幅の FP 形状と IFP 形状をペアとして 7 組の刺激片を使用した.

3.2.3 実験手順

実験 1 と同様, 実験に先立って実験者は被験者の指の汚れを除去した. 実験者は目隠しをした被験者の右手の人差し指を用意した刺激片の中心線上に置いた. 被験者は中心線幅の同じ FP 形状と IFP 形状をそれぞれ 1 回ずつなぞり, 先もしくは後の刺激片のどちらが中心線にくぼみを感じたかを二件法で答えた. どちらもくぼみを感じた場合には, より深くくぼみを与えた刺激片を選択させた. 実験 2 では FP 形状において錯覚が生じる active touch 条件でのみ実験を行った. 刺激片の中心線の幅や FP/IFP 形状のどちらが先に提示されるかはランダムであった. 練習試行を含めて 70 試行を終えるのに約 40 分の時間を要した.

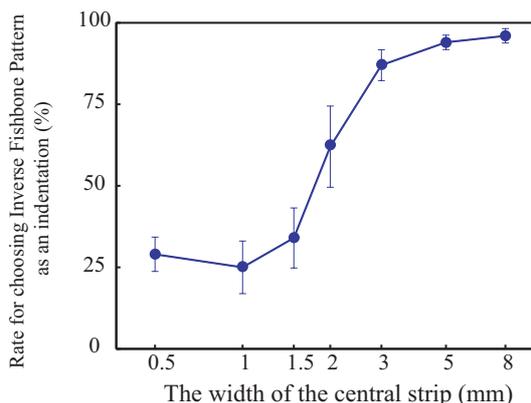


図3 同じ中心線幅を持つ Fishbone Pattern 形状と Inverse Fishbone Pattern 形状の組を触り比べたときに、Inverse Fishbone Pattern をよりくぼんでいると答えた率 (N=10)。エラーバーは標準誤差を表す。

Fig. 3 The result of subjective evaluation that which is indented when stroking over Fishbone Pattern and Inverse Fishbone Pattern (physically indented geometry). Averages of the result for ten subjects are shown, and error bars indicate the standard error of the mean.

3.2.4 実験2 結果

図3に実験2の結果を示す。縦軸に IFP 形状をよりくぼんでいると回答した率を示す。ゆえに、縦軸の値が大きいほど物理的な形状と一致して凹知覚が生じたことを意味する。結果より、1.5 - 2.0 mm の間を境に、中心線幅が大きくなるにつれて IFP 形状をよりくぼんでいると選択した。一方、中心線幅が 1.5 - 2.0 mm よりも小さくなると FP 形状をよりくぼんでいると回答する傾向が観測された。その際、IFP 形状を選ぶ率の平均は 30 %程度であった。

3.2.5 実験2 考察

実験2の結果は、中心線幅が 3.0 mm 以上であれば FP 形状と IFP 形状が互いに 75%以上の確率で区別されることを示唆していた。一方で、1.5 mm 以下の中心線幅では、中心線に面が存在する FP 形状をより奥行き方向にくぼんでいると回答する傾向が示唆された。以上の結果は、3.2節の予想と合致していた。ゆえに、実験2の結果は実験1の考察における仮説を支持するものであった。

4 今後の展望

本稿は Fishbone Tactile Illusion によって凹知覚が生じる物理刺激について検討した。結果、凹知覚が生じる刺激片の物理条件として 1. 中心部に比べて周辺部が粗いことに加えて、2. 指腹部中心に固着する面の有無の2つが示唆された。上述の物理条件がなぜ凹知覚を与えるのかについては、指の機械変形が類似する

[7], 神経発火パターンが類似する [4] などの説明が考えられるが、想像の域を超えていない。今後は、物理刺激によって生じる機械変形による説明を中心に吟味し、本現象の究明を図ってゆきたい。また、刺激の強度差を利用した最適な触覚刺激生成方法についても検討してゆきたい。

参考文献

- [1] R. Blake and R. Sekuler: *Perception*, McGraw-Hill, 2006.
- [2] M. Nakatani, R. D. Howe, S. Tachi: The Fishbone Tactile Illusion, in Proc. of EuroHaptics, pp. 69-73, 2006.
- [3] J. M. Loomis, S. J. Lederman: Handbook of Perception and Human Performance, Tactual Perception, K. R. Boff, L. Kaufman, and J. P. Thomas, Eds. A Wiley-Interscience Publication, 1986, vol. 2, chapter 31.
- [4] K. O. Johnson, S. S. Hsiao: Neural mechanisms of tactual form and texture perception, Annual Review of Neuroscience, vol. 15, pp. 227-50, 1992.
- [5] J. V. Levesque, J. Pasquero, V. Hayward, M. Legault: Display of Virtual Braille Dots by Lateral Skin Deformation: Feasibility Study, ACM Trans. App. Percept., Vol. 2, No. 2, pp. 132-149, 2005.
- [6] M. Oyarzábal, M. Nakatani, R. D. Howe: Vibration enhances geometry perception with tactile shape displays, In proc. of World Haptics, pp. 44-49, 2007.
- [7] 牧野, 篠田: 吸引圧刺激による触覚生成法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 11, no. 1, pp. 123-32, 2006.

(2007年10月22日受付)

[著者紹介]

仲谷 正史 (学生会員)



2005年東大大学院・情報理工学・修士課程修了。同年より同大学院博士課程に在籍。日本学術振興会特別研究員 (DC1)。触覚メカニズム・触覚ディスプレイの研究に従事。

Robert D. Howe



Robert D. Howe received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Stanford University in 1990. Currently, he is the Gordon McKay Professor of Engineering in the Harvard School of Engineering and Applied Sciences. His research interests focus on robot and human manipulation and development of new techniques for image-guided surgery.

舘 暲 (正会員)



1973年東大大学院博士課程了。工学博士。1994年より東大・工・計数工教授, 2001年, 同大学大学院・情報理工教授。パイスペクトル, 盲導犬ロボット, テレインジスタンスなどの研究に従事。