

Fishbone Tactile Illusion を利用した触対象の凹凸知覚¹⁾

仲 谷 正 史

東京大学

The Fishbone Tactile Illusion to examine the perception of raised or indented surface geometry

Masashi NAKATANI

The University of Tokyo*

Tactile sensation usually provides reliable perception of an object's presence and its surface geometric profile. However, the human tactile perception is not necessarily faithful reproduction of the physical property of an object in real world. Such phenomenon is called as tactile illusion, and it provides a lot of insights about the characteristics of human tactile perception and its mechanisms as like as visual illusion research. Researches on tactile illusions have been reported little by little from the era of Aristotle to present in psychological field, and actively reported by engineers in recent years. It is because that the study on tactile illusions is also helpful for engineers to develop a tactile display, which is an apparatus to (re)produce tactile perception. This article mainly reviews the Fishbone Tactile Illusion as a casework of tactile illusion research in engineering field, then discusses the mechanisms of human tactile perception based on the findings of the illusion, as well as the application of those findings.

Key words: The Fishbone Tactile Illusion, tactile perception, tactile display, geometric perception

はじめに:

錯触覚を利用した触知覚研究手法

触覚は人間の五感の中でも、プリミティブな外界の情報取得に優れていると考えられる。例えば指先で触れた表面の粗さや凹凸、温度など、危険から身を守るための基本的な感覚を触覚は担っている。一方で、どのようにして日常的に体験される触知覚が生じているのかのメカニズムについて、視覚や聴覚などの他の感覚と比べて不明な点がまだ多く残っている。その理由は視覚や聴覚に比べて、触覚研究の実施はハードルが高いことに起因し

ていると考えられる。視覚・聴覚実験の実施は、CRT や液晶ディスプレイ、スピーカやヘッドフォンなど視聴覚情報を安定して提示するデバイスが確立されており、今日に至るまで多くの研究成果を生んできた。他方、触覚情報を安定して提示する触覚ディスプレイの確立はいまだ発展途上にある。それゆえ、触覚研究は工学の分野で触覚ディスプレイの研究として発展しつつある一方、触覚知覚特性に関する研究については余地を残していると考えられる。

最近では工学の発展により、触覚ディスプレイが市販されるようになり（例えば、PHANTOM[®], SensAble Technologies, Inc.）心理学の分野でも触覚研究が身近になってきている。しかし、ハードウェアの制約上あらゆる触感を提示できるわけではないことから、触覚ディスプレイがもつ限界が実験の制約となってしまうこともしばしば生じる。以上より、触覚ディスプレイは触覚知覚メカニズムを知る上でも有力なツールになりつつあるものの、幅広く触覚知覚を知るためには他の研究手法も取り

¹⁾ This research was supported by a grant from the Research Fellowship of the Japan Society for the Promotion of Science for Young Scientists (17-11884).

* Department of Information Physics and Computing, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656. Corresponding to Masashi_Nakatani@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

入れる必要がある。

近年、市販の触覚ディスプレイや複雑な機構の装置を使わなくとも人間の触知覚メカニズムを調査する手法が見直されてきている。その1つが、触覚の錯覚（以後、錯錯覚と略記する）を利用した研究手法である。触覚における錯錯現象の例は、アリストテレス以後、長い期間をかけて少しずつ報告し続けられてきており、興味を集めている。錯錯覚を題材とした研究は、次の2点において魅力的である。(1) 視覚や聴覚の錯覚と同様、人間の感覚情報処理システムの理解につながりやすい点、そして(2) 1点目で得られた知見は、触覚を伝達するシステム（触覚ディスプレイ）の開発に新たなヒントを与える点である。

本稿では、これから触知覚や触錯覚を研究される方の一助となるよう、次節にて主に工学の観点からこれまでの触覚研究の潮流を簡単に振り返る。続く後半部は筆者らが見出した新しい触錯錯覚である Fishbone Tactile Illusion についての成果レビューと、これまでに得られた触覚情報処理に関する知見について議論する。

工学における触覚研究分野と手法

工学におけるこれまでの触覚研究は1960年代後半より、視覚情報を触覚を通じて提示する福祉用途の研究から始まっている（代表的な研究例は Bliss et al., 1970, 日本では伊福部 2004 など）。その後、1990 年以降急速に成長したバーチャルリアリティ研究の一環として触覚ディスプレイの研究が進んだ（舘, 2002）。特に、遠隔地に存在する物体の触感を取得し、手元で再現する目的で触覚ディスプレイの開発が積極的に行われた（触覚ディスプレイのレビューは、例えば Hayward & MacLean, 2007）。それらの研究成果の一部はロボット手術システムの開発へとつながり、現在も臨床応用に向けて多くの研究が推進されている（Howe & Matsuoka, 1999）。1990 年代後半から 2000 年代にかけては、特に手指先の皮膚に対して提示される細かな触感の研究に注目が集まっている。（例えば最近の触覚ディスプレイでは Winfield et al. (2007) が興味深い）。加えて、2000 年代以降は触覚を再現するのみならず、普通では触れることのできない細かな表面形状を拡大して感じさせる技術も考案され（Kikuuwe et al., 2005）、ものづくり現場での応用も期待されている。

以上のように工学における触覚研究の潮流が変化してきたが、近年では工学者が錯錯覚現象に対して興味を持ち始めている。例えば、簡易な触刺激を工作し、触錯錯覚を検討した研究例が報告されている（例えば、Velvet

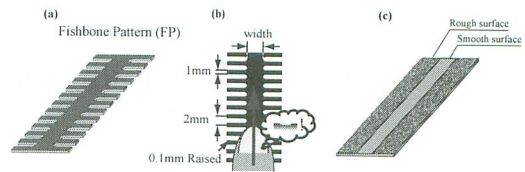


Figure 1. Schematics and variants of the surface pattern that can produce the Fishbone Tactile Illusion.

Hand Illusion (Mochiyama et al., 2005)). また錯錯覚の研究から得られた知見を利用して触覚ディスプレイを構築し（Levesque et al., 2005）、さらに新たな触知覚研究につなげた例も挙げられる（Carter et al., 2008）。ごく最近に、工学者が過去にさかのぼって現在に至るまでの触錯錯研究のレビューを発表しているので（Hayward, 2008）、ご興味のある方はご参照されたい。

工学者が錯錯覚に注目する理由として次のようなものがある。すなわち、触覚再現のために物体と人間との接触状況を完全に再現するのは既存技術だけでは困難である点、そして、人間の触知覚特性に基づいた簡易な手法で触感を再現する手法が求められている点である。筆者らも上述のような動機から、新たな錯錯錯覚である Fishbone Tactile Illusion を見だし、研究を行っている。

The Fishbone Tactile Illusion

Fishbone Tactile Illusion（以下、FTIと略記する）は、物理的に平らである面が、手の指先でなぞることで主観的にはくぼんで感じられる現象である（Nakatani et al., 2006; 仲谷ら, 2008）。FTIが生じる典型的な刺激形状の1つは、Figure 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2.0 mm/cycle程度の空間周波数を持った格子形状（gratings）が高さ差0.1 mmで形成されている。体験者が指腹部で魚の背骨にあたる部分（以後、中心線と呼ぶ）を Figure 1(b)中の矢印の方向になぞると、物理的には平らな面であるにもかかわらず「くぼみ（凹知覚）」が体験される。一方で、Figure 1(b)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てられる。ゆえに、FTIは指を動かす方向に依存する錯錯錯と考えられる（FTIの一例は参考文献（傳田, 2007）の表紙オビに印刷されて市販されている。ご興味のある方はぜひ一度書店で手に取りその場で体験していただきたい）。

その後の検討により、Fishbone Tactile Illusion は、

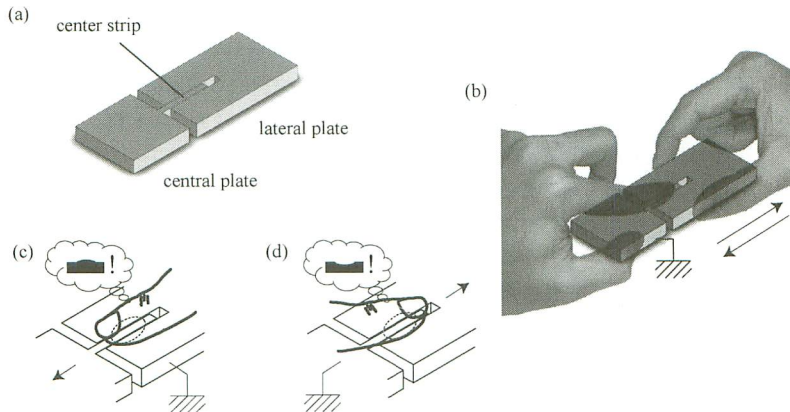


Figure 2. Other variants of the Fishbone Tactile Illusion (taken and corrected from Nakatani et al., 2008). (a) shows the perspective of the stimulus. This stimulus is composed of two pieces, and it is fabricated from the same metal. The surface of the apparatus is roughened by sand-blast processing. (b) shows how perceiver feels the illusion. (c) When the piece which has the central line moves, perceivers feel that the surface is raised, and (d) the piece which has adjacent areas, they feel the surface is indented.

魚の骨の形そのものが重要なのではなく、接触表面が有するある性質が重要であることがわかった。具体的には、指腹部が触れている面から受ける刺激の強度が一樣ではなく、強い刺激を与える領域によって弱い刺激を与える面を挟み込むことがで生じることがわかった。例えば、Figure 1(c) のように数十マイクロ程度の傷をつけ、粗さ差を作っただけのほぼ平らな表面でも、指でなぞると凹凸知覚が生じる (仲谷ら, 2007)。Figure 1(c) で示したような表面は、例えばアルミニウム合金板の一部をサンドブラストなどの方法を利用して容易に作成可能である。また、Figure 2 のようにフラットな面の一部を (準) 静的に動かすことでも生じる (Nakatani et al., 2008)。Figure 2(a) の実験片は、1 枚のアルミ合金板をはめ合いができるように切り、その上でサンドブラストによって表面を粗くしている。中心線を有する方の試料片を動かすと、表面が凸に感じられ (Figure 2(c))、逆に周辺部を有する方の試料片を動かすと表面が凹に感じられる (Figure 2(d))。さらに、Figure 1(c) のように粗さの違いで強度差を出すのではなく、数十マイクロメートル程度の垂直振動によって刺激強度分布を指先に与えることでも凹凸知覚を生じさせることが可能である (Oyarzábal et al., 2007)。

FTI で生じる凹凸知覚の深さを実験的に計測すると、0.15 mm 程度である (仲谷ら, 2007)。人間が凹凸形状に上から 1 N (約 100 g の重さ) で指腹部を押し付けたときに、凹凸を検出し、かつ正確に識別できる凹凸の高さ (深さ) が 0.2 mm 以上であることから (神明前ら,

2008)、FTI は人間が凹凸を明瞭に判別できない条件下で生じやすい錯覚であることが推察される。

以上のように FTI が生じるいくつかの事例について紹介してきたが、なぜこのような錯覚が生じるのであろうか。その理由は、触覚情報処理の観点から考えると大きく分けて 3 つ考えられる (Figure 3)。1 つ目は脳における末梢神経の解釈の結果、2 つ目は物理刺激によって生じた末梢神経の発火パターンの類似、3 つ目は指腹部の変形の類似による錯覚現象の説明である。

1 つ目の説明は、FTI を生じさせる表面に指腹部が触れた結果、引き起こされた神経信号を脳で解釈する際に生じるというものである。物理的な凹形状と、FTI が生じる形状によって引き起こされた両者の末梢神経信号は全く異なっている、それらを解釈したときに凹形状と判断されることを意味する。上でも述べたように FTI は触覚刺激が明瞭に解釈できない状況に置かれた際に生じやすいと推察されることから、人間が過去の体験に照らし合わせて接触対象の凹凸を判定している可能性が考えられる (Nakatani et al., 2006)。しかし、このような説明を想像することは簡単だが、具体的に証明することは難しい。現象が際立つよい実験パラダイムを考案し、検証することが望まれる。

2 つ目の説明は、FTI が生じる表面に指腹部が触れた結果、引き起こされる末梢神経の発火が物理的な凹形状を触れた場合と類似するという説明である。第 1 点目と異なり、末梢神経から伝達される信号を脳から見ると、実際の凹形状と FTI が生じる形状を触れた場合とでは、

脳に達する以前の段階で末梢神経からの信号が類似する。それゆえに錯覚が生じているという説明である。この際、物理的な凹形状とFTIを生じさせる表面形状によって引き起こされる指先の物理変形が互いに同じでなくても構わない。本説明の検証方法として、機械変形を伴わない電気刺激を利用した実験が考えられる。工学の分野では指腹部に対して電気刺激を利用して高解像度な触覚を提示する手法が既に提案・開発されている（梶本ら，2001）。また梶本らの手法が確かに触覚を司る末梢神経を活動させていることは、末梢から接続する正中神経活動の直接記録によって検証されている（仲谷ら，2003）。それゆえ、高空間解像度な電極を利用した電気刺激装置による実験パラダイムで本説明は検証可能と考えられる。

3つ目の説明は、FTIが生じる表面に指腹部が触れた際に得られる指腹部の機械的な変形と、物理的な凹形状

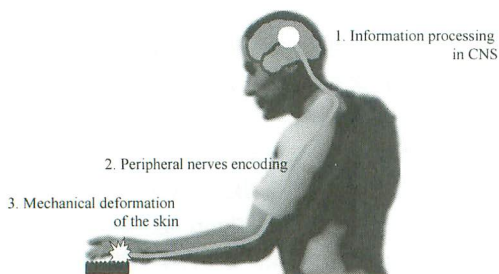


Figure 3. Three tactile information processing layers to explain why the Fishbone Tactile Illusion happens.

に触れた場合に得られる変形とが互いに類似していることによって錯覚が生じるというものである。最近になって、物理的な凹形状が生じさせる機械的な変形結果と、Figure 2のようにFTIのような凹感覚を生じさせる形状による変形の結果が、指腹部内部においては類似することが単純な弾性シミュレーションによって示されている（Nakatani et al., 2008）。その研究では、まず指腹部を構成する皮膚の硬さを計測した先行研究（前野ら，1997）に準じて、指腹部の皮膚と同程度のやわらかさをもつ3次元有限要素モデルを構築した。その上で指腹部内部に生じる主応力の大きさを計算した。結果、物理的な凹形状に触れた場合と、指の周辺部が指の長軸の方向に水平に引っ張られた場合で主応力の空間分布が類似することが明らかになった。すなわち、指の一部が垂直に力を加えられる場合と水平に引っ張られる場合で指表面の変形が異なっても、指内部の変形が類似する場合があることが示唆された。それゆえ、観察者が凹形状を体験すると推察された。シミュレーションの詳細にご興味を持たれる読者は、Nakatani et al. (2008)を参照されたい。

上述のようにFTIを通した凹凸知覚の研究を進める一方で、FTIを利用した新しい凹凸表現方法についても筆者らは研究を行っている。FTI研究の見解より、何らかの方法によって接触表面の粗さ差をつけるだけで、物理的な凹凸を作ることなく接触表面の凹凸を表現することが可能である（ケント紙など、硬めの紙にカッターなどで細かい切れ込みを入れることでFTIを生じさせる事例をNakatani et al. (2006)にて紹介している）。本性質

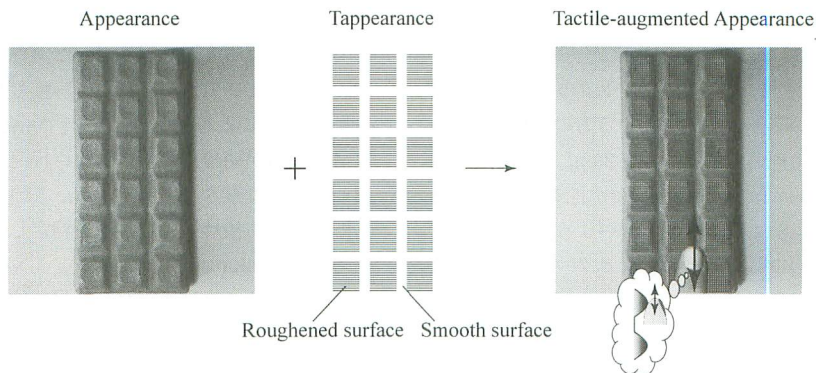


Figure 4. The concept of effective way to present both visual and tactile information. Tactile information (tactile appearance, Tappearance) is overlaid on the visual information (appearance) to augment visual information or avoid the ambiguity of visual image. The tactile information is created on a transparent sheet, and then the visual image is can be felt as bumpy as shown on the right side of the figure. This is a part of the artwork titled “Appearance Tappearance” designed by Masakatsu Ogawa and author.

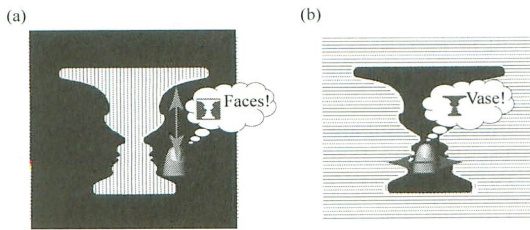


Figure 5. Application of the Fishbone Tactile Illusion on Rubin's Vase image. Two perpendicular lines are slightly cut on the surface, therefore specific visual information is selectively perceived according to the way how perceivers move their finger. For example, two faces can be seen and touched when perceiver moves their finger in the vertical direction, and a vase can be felt when perceiver moves in the horizontal direction. Tactile information functions as decreasing the ambiguity of the visual image and helping perceivers interpret presented image. This is a part of the artwork designed by Masakatsu Ogawa and author.

を利用して、視覚情報の上に触覚情報を重畳することが可能である。その1例として、非常に薄い透明シートの上に見えない線状の切れ込みを入れることで表面粗さ分布を作成し、触覚凹凸情報を視覚情報に重畳させる試みが提案されている (Figure 4) (小川ら, 2007)。

ここでは、ルビンの壺を題材にした例を示す。この有名な絵では、向かい合っている「二人の顔」もしくは「壺」の2つの見方が可能であり、視覚情報からだけで観察者は一義的な解釈を得ることができない。そこで、この視覚情報の上にFTIを利用した指の移動方向に依存する触覚的な凹凸手がかりを重畳する (Figure 5 参照)。この触覚的な凹凸手がかりは、指を垂直方向に動かすと、二人の顔の部分が盛り上がって感じられ (Figure 5(a)), 水平方向に指を動かせば壺の部分が盛り上がって感じられる (Figure 5(b))。それゆえ、指の動かす方向によって絵の解釈を一義的に特定可能となる。本例は、FTIを利用した触知覚特性の解明によって、視覚情報が有する曖昧さを触覚によって排除し、伝えたい情報を正確に伝達する手法の新しい提案と考えられる。

おわりに

本稿では工学における触覚研究の位置づけについて述べ、錯触覚研究が注目を集めている現状について論じた。その上で、筆者らが発見し研究を行った Fishbone Tactile Illusion の研究事例を述べた。加えて、研究の結

果得られた人間の凹凸知覚特性を新しい情報提示手法に応用した事例について述べた。

「心の琴線に触れる」という表現にも見られるように、触覚は身体へ直接的にかつ強力に働きかける感覚である。それだけに、普段信賴を置いている感覚の裏をかく錯触覚の発見は、人間の知覚の理解を深める強力なツールである。新規の錯触覚現象が報告されることによって、触知覚の新たな研究手法や知見、触覚提示手法への応用が生まれていくことを筆者は切に望んでいる。

謝 辞

本研究を行うにあたりまして、東京大学大学院 情報理工学系研究科 館嶂教授、川上直樹講師に多くのご助言、ご指導をいただきました。記して感謝します。

引用文献

- Bliss, J. C., Katcher, M. H., Rogers, C. H., & Shepard, R. P. (1970). Optical-to-Tactile Image Conversion for the Blind. *IEEE Trans. on Man Machine Sys.*, **11**, 58-65.
- Carter, O., Konkle, T., Wang, Q., Hayward, V., & Moore, C. (2008). Tactile Rivalry Demonstrated with an Ambiguous Apparent-motion Quartet. *Curr. Biol.*, **18**, 1050-54.
- 傳田光洋 (2007). 第三の脳, 朝日出版社.
- Hayward, V. (2008). A Brief Taxonomy of Tactile Illusions and Demonstrations That Can Be Done in a Hardware Store. *Brain Res. Bull.*, **75**, 742-752.
- Hayward, V., & MacLean, K. E. (2007). Do It Yourself Haptics, Part-I. *IEEE Rob. and Auto. Mag.*, **14**, 88-104.
- Howe, R. D., & Matsuoka, Y. (1999). Robotics for Surgery. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, **1**, 211-240.
- 伊福部達 (2004). 福祉工学の挑戦, 中公新書.
- 梶本裕之・川上直樹・前田太郎・館 嶂 (2001). 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ. 電子情報通信学会論文誌, **J84-D-II**, 120-128.
- Kikuuwe, R., Sano, A., Mochiyama, H., Takesue, N., & Fujimoto H. (2005). Enhancing Haptic Detection of Surface Undulation. *ACM Trans. on App. Percept.*, **2**, 46-67.
- Lévesque, V., Pasquero, J., Hayward, & V., Legault, M. (2005). Display of Virtual Braille Dots by Lateral Skin Deformation: Feasibility Study. *ACM Trans. on App. Percept.*, **2**, 132-149.
- 前野隆司・小林一三・山崎信寿 (1997). ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係. 日本機械学会論文集 (C 編), **63**, 881-888.
- Mochiyama, H., Sano, A., Takesue, N., Kikuuwe, R., Fujita, K., Fukuda, S., Marui, K., & Fujimoto, H. (2005). "Haptic Illusions Induced by Moving Line Stimuli." In *Proc. of First Joint Eurohaptics Conf.*

- and Symp. on Haptic Interfaces for Virt. Env. and Teleop. Sys.* (WHC '05), 645-648.
- 仲谷正史・梶本裕之・鈴木隆文・満洲邦彦・國本雅也 (2003). 経皮電気刺激提示中における感覚神経活動の解析. 第16回ニューログラム研究会要旨集, 1.
- Nakatani, M., Howe, R. D., & Tachi, S. (2006). The Fishbone Tactile Illusion. In *Proc. of EuroHaptics*, 69-73.
- 仲谷正史・Howe, R. D.・館 暲 (2008). Fishbone Tactile Illusion を利用した触対象の凹知覚の研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **13**, 97-100.
- 仲谷正史・川上直樹・館 暲 (2007). ヒト指腹部における表面粗さ分布を利用した凹凸知覚の研究. 第8回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会, 1A3-1.
- Nakatani, M., Sato, A. Tachi, S., & Hayward, V. (2008). Tactile Illusion Caused by Tangential Skin Strain and Its Analysis in Terms of Skin Mechanical Deformation. *Lec. Notes in Comp Sci.*, **5024/2008**, 229-237.
- 小川将克・仲谷正史 (2007). 見た目触り目, TECHTILE Exhibition, <http://www.techtile.org>.
- Oyazábal, M. S., Nakatani, M., & Howe, R. D. (2007). Vibration Enhances Geometry Perception with Tactile Shape Displays. In *Proc. of the Second Joint Eurohaptics Conf. and Symp. on Haptic Interfaces for Virt. Env. and Teleop. Sys.* (WHC '07), 44-49.
- 神明前正嗣・仲谷正史・川上直樹・館 暲 (2008). 指先の皮膚感覚による凹凸知覚特性の研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **13**, 101-104.
- 館 暲 (2002). バーチャルリアリティ入門 ちくま新書.
- Winfield, L. E., Glassmire, J., Colgate, J. E., & Peshkin, M. A. (2007). T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction, In *Proc. of the Second Joint Eurohaptics Conf. and Symp. on Haptic Interfaces for Virt. Env. and Teleop. Sys.* (WHC '07), 421-426.