

Fishbone Tactile Illusion を通した 凹凸知覚の研究

Convex and Concave Perception Induced by a Fishbone Tactile Illusion

仲谷正史¹⁾, 梶本裕之¹⁾, 川上直樹¹⁾, 舘璋¹⁾

Masashi NAKATANI, Hiroyuki KAJIMOTO, Naoki KAWAKAMI and Susumu TACHI

1) 東京大学 情報理工学系研究科

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {nakatani, kaji, kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: We found a novel tactile Illusion that makes us misunderstood a convex shape as a concave shape. We found that touching a texture engraved with fishbone like shape induces this illusion, and also we found that more than two different friction areas are necessary for this illusion in our further analysis. We investigated the relationship between (1) the width of the centerline of the shape and (2) spatial frequency of the edge. Our result showed that the broader the centerline of the shape became, the more difficult to feel the concave shape. Also the smaller the edge interval became, the easier the subjects felt a concave shape.

Key Words: Fishbone Tactile Illusion, Tactile Sensation, Friction Perception, Tactile Augmentation

1. はじめに

触覚による物体表面の凹凸知覚を再現する新手法の提案, およびその応用方法を示すことが本稿の目的である.

これまでの凹凸知覚の研究の成果として, 運動方向に対してそれと逆向きの力によって凹凸の知覚が変化させられるという知見が示されている[1]. この先行研究では PenCAT/PRO という, PHANTOM のようなデバイスを用いて, 体性感覚としては凸状の物体をなぞっているにもかかわらず, そのなぞっている最中に凸形状の中心に向かう力をバーチャルに呈示することで, 凹形状を知覚させることが可能なことを示した. 我々はこの知見に関連して, Fishbone Tactile Illusion (以下, FTI と呼ぶ) を通して皮膚感覚における凹凸知覚の検討を行う. この錯触覚の詳細は次節で述べるが, 端的に言えば凸形状にもかかわらず体験者はバーチャルに凹形状を感じてしまう現象であり, 素手で体験することが可能である. 本稿ではこの FTI が生じうる条件について検討し, そこから導かれる触覚情報処理に関する知見について論じる.

2. Fishbone Tactile Illusion

Fishbone Tactile Illusion は最初図 1 に示すような形状の中心を横方向になぞった際に生じたことからその名を付けた. これは, 円形状のうち周辺部の一部が「くし型」状に削られており, テクスチャである. この形状と凹凸を反転させた形状を作成したとき, その 2 つの区別が難しいほど類似していることが明らかとなった. 適切な刺激であ

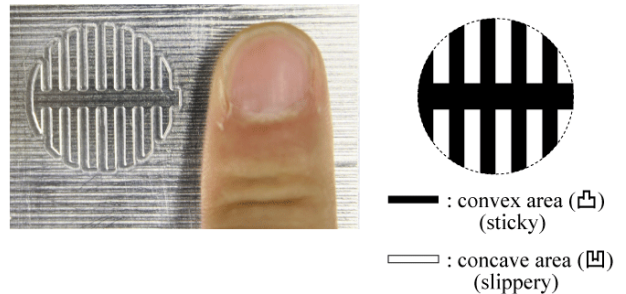


図 1 Fishbone Tactile Illusion が生じるテクスチャの一例. 左が錯触覚を最初に見出したときの金属プレート, 右がその形状の説明.

ればほとんどの体験者が凸形状と凹形状を見分けることが困難となってしまふ. 以上のように物理的な特徴と知覚する形状との整合がとれていないことから, 本現象は錯触覚の 1 つであると考えられた.

この形状を詳しく分析すると, 指との摩擦がほとんど生じず, 滑りやすい中心部 (Slippery area) と, 凹凸の存在により摩擦が生じやすい周辺部 (sticky area) から構成される. このことから, この現象の本質は指接触部分に 2 つ以上の摩擦の異なる部位が存在することでないかと考えられる.

これらのことを検証するために, 図 1 の形状を非常に簡略化し, 図 2 のような形状を考案した. これは, sticky

area にある四角形の輪郭状の切れ込みをケント紙に入れることで、摩擦差のあるテクスチャを作成したものである。紙に切れ込みを入れただけでも、10名以上の被験者において slippery area に凹み知覚が生じると回答した。さらには、運動方向に対して垂直な線と平行な線でどちらが FTI に対する寄与があるかについて調べた(図 2)。結果、5名の被験者はすべて図 2(b)のほうがより FTI が生じやすいと答えた。以上のことから、指の運動方向に対して逆向き方向の力を与えるエッジの存在が FTI の生成に大きく関わっていることがわかった。

問題は、指が何種類以上の摩擦知覚ができるかを調べることである。すなわち、中心部の間隔を広げるもしくは狭くすることによって、凹み知覚が生じたら、指の下にある摩擦知覚を完全に分解できていないこととなる。このことについて、次節では心理物理実験を通じた検討を行う。

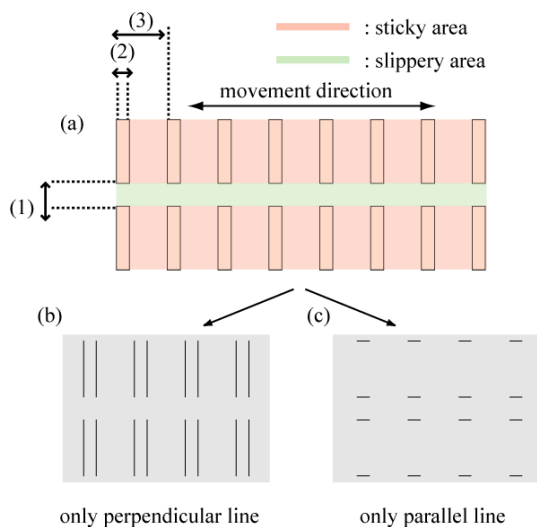


図 2 Fishbone Tactile Illusion が生じるテクスチャのプロファイル。(a) 赤色の部分は摩擦が大きく、緑色の部分は摩擦が小さい部分として機能する。(b) (c) (a)の形状から運動方向に対して垂直な線と平行な線を抽出した図。(この図を利用して FTI を体験できます。付録をご参照ください)

3. 心理物理実験

3.1 実験 1 slippery area の幅と凹み知覚の関係

FTI によって生じる感覚と、図 2 (a) 部の幅との関係を調べるために、図 3 のような金属プレート (アルミ製) を作成した。(図で説明) 本実験では、金属プレートを作成して実験を行った。金属プレートは 3D プロッタ (Roland 社製 Modela MDX-20) により製作した。製作した形状の概観を図 3 に示す。中心領域の幅 (図中の (1) にあたる) が 1.3, 2.0, 3.0, 5.0, 8.0, 10.0mm の 6 種類の形状を (a)、(b) 2 つの形状が彫った金属プレートを用意した。凸部の高さはベースの高さよりも 0.1mm だけ高くなっている。この 6 種類のプレートを用いて 2 つの質問を行った。1 つ目は、「右手と左手の親指で同時に形状 (a) と (b) をなぞり、どちらが凹んでいるか」と尋ね、(a) である、(b) である、どちらともいえないの 3 種類の方法で回答させた。この実

験を幅が 6 種類のプレートで行った後、「人差し指で形状 (a) をなぞり、中央部はどれくらい凹んでいるか」という質問をし、別途作成した標準刺激金属プレート (アルミ製、作成した機器はテスト刺激を製作したものと同じ) (図 4) と比較し、15 個の標準刺激のうちどれと同じ深さであるかを回答させた。この場合、もし凹んでいないと知覚した場合にはそのように答えるようにさせた。被験者は 7 名 (男性 5 名、女性 2 名、20 歳～30 歳代) であった。結果を図 5 に示す。slippery area の幅が狭いほど、凹んでいると感じやすく、また、その凹む量が大きくなる傾向が見られた。

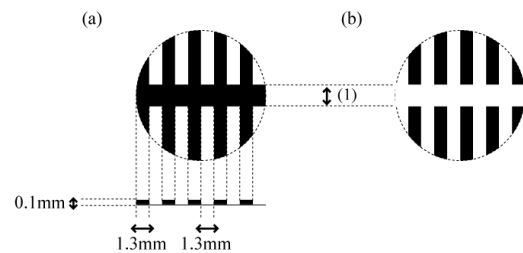


図 3 実験に用いた金属プレートに彫った形状。(a) Fishbone tactile illusion が生じるプレート。(b) (a)の凸部が反転した形状。中心部が凹んでいる。黒い部分と白い部分の高低差は約 0.1mm である。

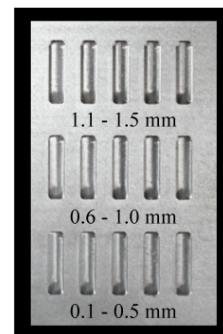


図 4 実験 1 で使った標準刺激金属プレート。深さが 0.1mm 刻みで 0.1 ~ 1.5mm、幅が 5mm の溝を作成している。実験では、この標準刺激片とテスト刺激片(図 3)を比較し、どれと同じ深さに感じるかを回答させた。

3.2 実験 2 溝の空間周波数と知覚の関係

FTI によって生じる凹み感と、図 2 の摩擦の大きさとの関係を調べるために、ケント紙に図 6 の黒線で表す部分に切れ込みを入れることで実験を行った。切れ込みはカッティングマシン (Roland 社製 DESIGN CUTTER STIKA SX-12) を用いて作成した。実験に用いたテスト用のテクスチャは被験者ごとに作り直し、複数回の使用による変化の影響を排除した。図 6 中の sticky area に作ったエッジの間隔は 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10mm の 7 種類とした。知覚された深さを回答するために、実験 1 のために作成した標準刺激が形作られた金属プレート図 4 を用いて、15 個の標準刺激のうちどれと同じ深さであるかを回答させた。被験者が触覚取得時の指を動かす速度を規定するために、実験ではメトロノームの速さ (tempo:90) に合わせて 40mm の距離をなぞら

せた。被験者は5名（男性3名，女性2名，20歳～30歳代）であった。

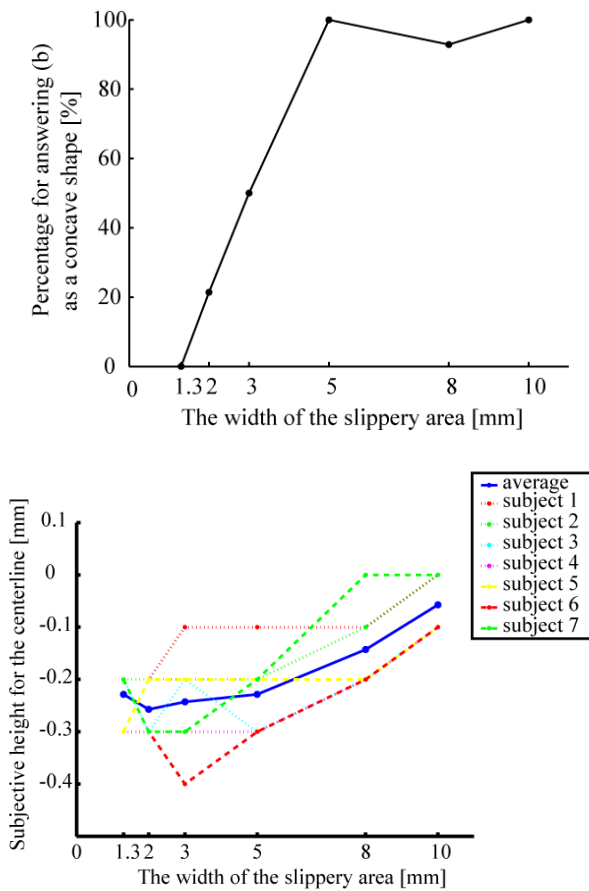


図5 実験1の結果。(上)中央が凹んでいる形状として、正しく形状(b)を選択した率。(下)形状(a)をなぞらせた際に中心部がどれだけくぼんでいるかの被験者の主観的評価。

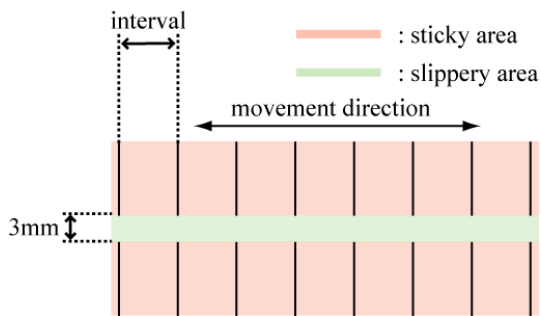


図6 実験2において使用した刺激パターン。黒い部分に切れ込みを入れることで、摩擦差の異なる2つの領域を作成した。

実験結果を図7に示す。エッジの間隔が4mm以下であると、slippery areaが凹んでいる知覚が得やすい傾向が見られた。また

3.3 その他の予備実験

3.3.1 2つの摩擦差のある物体によるFTI

凹凸による摩擦の差ではなく、材質の違いによってもFTIが生じるのか検討するために、図8に示すようなブロック形状を作成した。これは、摩擦係数の小さい材料として

幅3mmの亚克力板をさまざまな材料で挟んで接着し、フライス盤によって表面を平らに加工したものである。(a)は主成分をポリウレタン樹脂としたケミカルウッド、(b)は発泡アルミ、(c)は木製の合板である。(a)はフライス加工をすると表面が非常に滑らかとなり、亚克力板とほとんど摩擦が変化しなかった。そのため、中心がへこんでいると確信を持って答えた被験者はいなかった。一方で、(b)、(c)において、被験者は容易に凹みを感じた。さらには、(c)の(1)部と(2)部では摩擦差があり、より摩擦の強い(2)部のほうがより凹んで感じると自由回答の際に答える被験者が複数名いた。

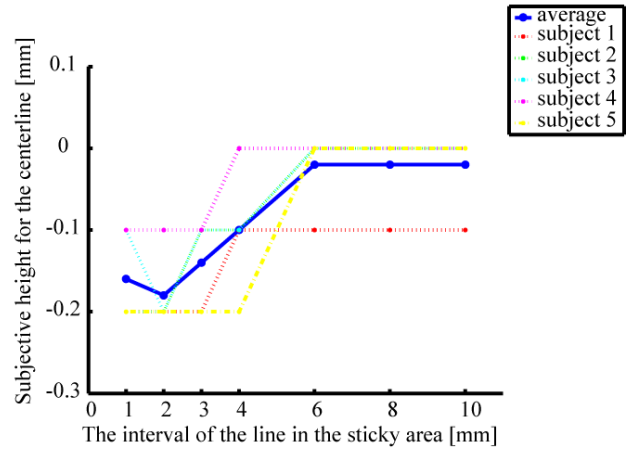


図7 実験2の結果。摩擦係数の大きい領域にある切れ込み線の間隔が狭いほど、凹んでいる高さが高い傾向が見られた。

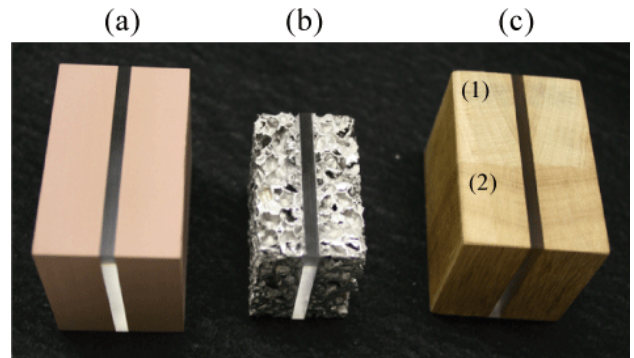


図8 摩擦差による凹み知覚実験のために製作したブロック形状。中心に幅3mmの亚克力板を(a)ケミカルウッド(b)発泡アルミ(c)木の合板のそれぞれで挟んで接着し、フライス盤を使用して指との接触面を平面とした。

3.3.2 高密度ピンマトリクス使用時のFTI

筆者らはこれまでに高密度ピンマトリクス(Pin Matrix, PM)を用いた触覚呈示の手法について提案している[3]。これは、径が0.5～0.8mmのステンレス製ピンを1.0mm～2.0mm間隔で多数並べたもので構成されており、テクスチャの高さ情報を特定の空間周波数でサンプリングする一種のアナログ演算器である。PMによってFTIが生じるテクスチャをなぞったときにやはり同様の効果が生じるのか実験を行った。結果、被験者5名全員が、FTIが生じる

と報告した。しかしながら、素手で触れる場合と比較して形状の凹みの深さは浅いという感想を多く得た。

4. 考察

4.1 Fishbone Tactile Illusionが生じるメカニズム

FTI の説明として2つの方法が考えられる。1つは実際に凹んでいる形状に触れている際に生じる歪み分布と、FTI を生じさせるテクスチャに触れている際に生じる歪み分布が非常によく似ているために、凹んでいると解釈するのだという説明である。これは、吸引によっても凸形状を表現できるという牧野らの先行研究[2]とも類似しており、同様な説明で理解できる可能性がある。

もう1つの説明は、指先の摩擦知覚に対する分解能が低いために、触れている部分の一部だけ摩擦が少ない場合には形状の解釈において誤った判断がされるのではないかとするものである。すなわち、「対応する部分から受ける摩擦が小さい」と解釈するよりも「対応する部分が凹んでいる」と解釈するほうが自然であるために、このような現象が生じるという説明である。確かに、これまでの摩擦に関する先行研究では指1本に対して2つ以上の摩擦の異なる領域に関する考慮は十分にされていない。この理由として、人間が1つの指からは複数種類の摩擦知覚を得る場面が稀であるために、「テクスチャの一部から受ける摩擦力が小さい」と解釈するよりも「テクスチャの一部が凹んでいる」と解釈してしまいやすい傾向がある可能性がある。ゆえに、皮膚表面2箇所以上に摩擦差のある領域が触れた際に、摩擦差のある領域がいくつまで識別ができるのかは非常に興味深い。我々は簡単な予備実験として、図9のように摩擦の少ない部分(slippery area)を2箇所含むようなテクスチャを実験2と同様にケント紙に切れ込みを入れて作成し、2つのslippery areaをカバーするように指を動かした。結果、摩擦係数の小さい領域2つともが凹んでいると答える被験者が多く、また得られる摩擦知覚はsticky areaのそれと似ていると回答した。指先の接触領域に摩擦係数の異なる領域が多数含まれる場合、人がどのように知覚するのか詳細な検討が今後望まれる。その手段として、摩擦係数が既知である標準刺激との比較によって摩擦係数を求める手法が有効だと考えている。以上のように、今回見出した錯触覚の原因として歪み分布/摩擦知覚の2つの観点から説明できると考えられるが、今後はどちらの寄与率が高いのかを検討してゆく考えである。

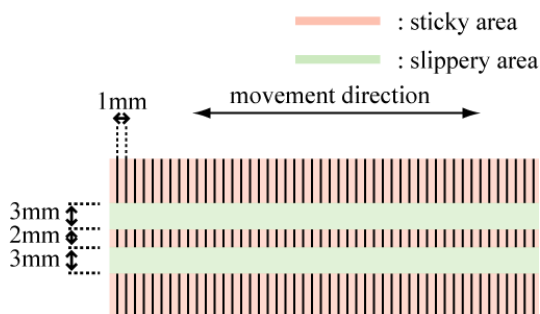


図9 二つ以上の摩擦の少ない領域を有するテクスチャ。

4.2 Tactile Augmentation

今回見出した錯触覚は、物理的に凹凸形状を作るのではなく、摩擦差を利用してバーチャルに凹凸知覚を生じさせる。この現象を利用すれば、容器や取っ手などの物品をより安定して把持できるような触覚情報の付加手法が考えられるだろう。特に子供や高齢者に対して、明示しなくとも凹んでいると感じる部分を自然と持たせることで安定した把持部位を教えることができる。このことは、触覚を利用した強化(Tactile Augmentation)効果として位置づけることができるだろう。この概念は、触れないほど小さな凹凸に触れるようにした触覚コンタクトレンズのTactile Enhancement 効果[4]と通ずるところがあるが、(錯)触覚現象を身の回りの物品に適用することで人にとって使用しやすい/落下事故などが起こりにくい製品デザインに関して新たな視点を提供できる概念となると考えられる。

5. おわりに

本稿では錯触覚の1つとして、我々が見出したFishbone Tactile Illusionについて紹介し、その現象の分析を行った。この現象は摩擦係数の大きい部分と小さい部分を同時に指先で触った時に生じ、後者の部分が凹んでいると感じる現象である。現象が生じる条件として、摩擦係数の小さい領域の幅が1.3-3mm程度でかつ摩擦差が大きいと容易に生じることを心理物理実験を通して確認した。本稿で紹介した現象はTactile Augmentation 効果として、例えば把持しやすい形状を作る際に応用できるだろう。これは、相互作用を起こす物体に、使用者にとって有用な情報を付加する1つの手法になり得ると考えている。

付録 本稿をA4の紙に印刷して、図2、図6、図9のsticky areaにある黒い線の部分をそれぞれ1本ずつカッターで切れ込みを入れ、図中矢印の方向に指を動かしてなぞってみてください。このような簡易的な方法でも、本稿で述べた錯触覚が体験できます。これらの図における幅は、本稿で述べた実験結果に準じてA4の紙に印刷したときに中心部幅が約3mmとなるように最適化されています。

参考文献

- [1] Gabriel Robles-De-La-Torre and Vincent Hayward: Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch, *Nature*, vol. 414, pp. 445-448, 2001.
- [2] 牧野泰才, 浅村直也, 篠田裕之: 吸引圧を用いるマルチプリミティブ触覚ディスプレイ, *日本バーチャルリアリティ学会大会論文誌*, Vol. 7, pp. 243-246, 2003.
- [3] 仲谷正史, 梶本裕之, 川上直樹, 館暉: 高密度ピンマトリクスによる触覚呈示の可能性, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05*, 1P1-N-103, 2005.
- [4] Ryo Kikuuwe, Akihito Sano, Hiromi Mochiyama, Naoyuki Takesue, and Hideo Fujimoto: Enhancing Haptic Detection of Surface Undulation, *ACM Transactions on Applied Perception*, Vol.2, No. 1, pp. 46-67, 2005.