



2 指なぞり時に指腹摩擦差がもたらす開閉錯覚

Inter-Finger Distance Illusion Induced by Friction Asymmetry in Dual-Finger Tracing

前田 太郎¹⁾²⁾, 杉原 尚理¹⁾, 原 彰良¹⁾²⁾, 古川 正紘¹⁾²⁾

Taro Maeda, Naomichi Sugihara, Akiyoshi Hara and Masahiro Furukawa

1) 大阪大学大学院情報科学研究科 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4 CiNet 3A1, *tmaeda@ist.osaka-u.ac.jp*)

2) 脳情報通信融合研究センター (同上)

概要: 先の報告では 2 指でのなぞり動作中に爪側からの振動刺激を同時に印加することで平面上に法線方向への変位錯覚 (段差形状) が生じることを発見し, そのアップダウンの極性を再現する要因として 2 指間での印加振幅の差異の効果を予測/検証した. 本報告では同様に 2 指間での振動周波数の変調が, 接線方向への変位錯覚を生じさせることを仮説・検証した. 指先に異なる摩擦係数を持つ薄膜を装着した被験者に 2 指での随従なぞりを実施させた結果, 指間での振動スペクトラム重心が遷移し, 2 指間距離が伸長/収縮する開閉錯覚が観察された.

キーワード: なぞり触覚, 2 指なぞり, 開閉錯覚, 摩擦係数

1. はじめに

指先を接触した対象に対して滑らせて行なうなぞり動作による形状知覚では, 接触部位の変形と振動を捉える皮膚触覚と指先にかかる外力を捉える力覚という複数の感覚器信号から, 単一のなぞり面形状を推定するという感覚統合を行っていることになる. この形状知覚は 1 指でも多指でも同様に知覚することが可能であるが, これを推定問題として捉えるならば, 1 指の情報で可能な形状の推定問題を多指の情報で行うことは一般には過剰決定問題となる. 多指なぞりでは, 複数の接触点が空間的に乖離しているため, 拘束条件として接触点間の距離や配置, 感覚刺激が生じる時間差などの相対関係が存在する. この相対関係もまた感覚統合に用いられているならば多指なぞりでは指間の相対関係によって生じる固有の感覚統合過程とそれに伴う錯覚現象が存在することが予測される. 実際に我々は爪上からの振動付与によってバーチャルな触覚を再現する SmartFinger[1] を用いて次のような 2 指なぞり特有の錯覚現象をこれまで報告した.

図 1 と同様の 2 指での従走なぞりにおいては, 2 指間で保たれた従走間隔距離 d を手の移動速度 v で通過する場合に, 2 指の指先から時間差 $\Delta t = d/v$ をもつ二つの皮膚触覚信号が得られる状態であれば, 二つの信号は無矛盾であり, 1 指なぞりと同様の形状を知覚すると予測され, これは実際に確認されている. これに対して SF を用いて $\Delta t \rightarrow 0$ に操作した場合, 1 指なぞりでは生じなかった形状認識の変容が生じ, 平面をなぞっているにもかかわらず, 大きな段差形状の錯覚が生じることとなった [2]. 同報告においてこれは「手の進行方向に対して 2 指の配置が段差部分で急に垂直に立ち上がったたり立ち下がったたりしたことで左右方向へ

の移動時間差 Δt が縮小した」という推定事象の統合によって導かれた錯覚であると考察している. さらにこの仮説をもとに, このような急勾配へのなぞりに際して, 先行指の接触圧の上昇/下降が Slip & Stick 振動の振幅を増加/減少させることが予測されたため, 時間差 Δt の縮小呈示に際して, 先行指と従走指への呈示振動の振幅を操作したところ, 段差の立ち上げ/立ち下げの知覚の違いを強く誘導することにも成功している [3].

このように 2 指でのなぞり知覚の形成には, 2 指の空間的配置と 2 指からの振動触覚の違いから一つのなぞり面形状を指定するという過程が働いているものと考察された [3]. 上記事例において振幅を操作した呈示振動はなぞり面への法線方向への振動成分であった. ではなぞり動作の際のせん断方向への振動振幅を操作した場合, どのような知覚が生じるであろうか. 本報告では, 図 1 に示すように 2 指なぞり動作時において, 2 指の接触面に摩擦係数の異なるテープを貼り付けることでこのせん断方向への振動成分を操作することを試みる.

2. Experimental Procedure and Findings

2.1 Methods

実験には左手の人差し指と中指の二指を用い, 左右への往復運動を行った. 実験条件は No Tape (NT), Middle Finger Taped (MT), Index Finger Taped (IT), Both Finger Taped (BT) の 4 条件であり, 図 1 の MT 条件では中指の指腹には 3M のメンディングテープ (アセテートフィルム) を貼ることによって, 示指の指腹よりも摩擦抵抗を下げてある. なお, 異なるなぞり面, なぞり速度条件下ではあるものの, 同動作中の作用力計測から, 同テープの貼られた際の指腹の動摩擦係数は $\mu_{k_Taped} : 0.040$, テープなしの動摩擦

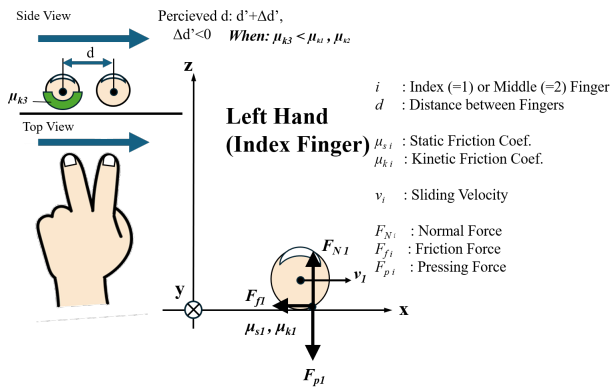


図 1: Dual-finger tracing configuration and tape conditions (MT). 図中は中指指腹をテープで被覆した MT 条件での右方向なぞり運動の状態。この運動中 2 指間が閉じ続ける錯覚を生じる。

係数は μ_{k_Bare} : 0.120 程度であることが観測されている [5]。指間距離 d は 50[mm] を保持し、465[mm] 区間の内側を 1024[ms] ごとに丁度左右端に到達するように周期的に運動を継続させた。指間距離 d の保持は被験者の姿勢保持によるものであるが、同条件下での予備実験においてセッション中の変動は最大 ± 5 [mm] 以下であることを OptyTrack およびビデオ計測によって確認済みである。追加検証として、検証に用いた 2 指の基節骨の背側を跨いだ添え木を括り付けることでこの距離を不動化した条件下においても同様に錯覚現象が生じることが確認されており、以下に報告する錯覚現象は 2 指間距離の物理的変動に依拠しないことが確認されている。

左右端到達の時間的な指標としては被験者には聞き分け可能な 2 種の beep 音 50[ms] を 1024[ms] ごとに交互に提示した。結果として継続された運動の平均速度は $v = 415[mm]/1024[ms] = 0.405[m/s]$ に相当している。

被験者は成人男性 3 名。指示に従って往復運動を継続させながら、なぞり運動とそれに伴う知覚を行う。知覚についてはなぞり状態の安定性と両指の位置関係の変化に着目してセッション終了後に回答するように指示された。被験者が運動と知覚が安定した状態になったと報告した後に右方向へのなぞり開始時に指先振動の計測を開始し、5 往復分の計測後に 1 回の計測セッションを終了した。

なぞりで生じた振動は各指の爪上に 3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサを内蔵した IMU センサを接着することによって計測した。3 軸ジャイロセンサから指先の姿勢変動を計測した結果、観測帯域内において姿勢変化の影響が観測値基準で 3% 以下であることが確認されたため、以下の本報告では指の移動方向である左右方向軸（右方向が正）の加速度センサの計測データを用いて考察を進める。

3. 実験結果

図 2 に 2 指の加速度センサデータ ([5.0, 50][Hz] 帯域でバンドパスフィルタ処理後) の自己相関関数を示す。この自

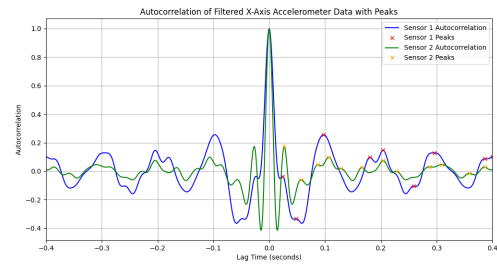


図 2: Autocorrelation of bandpass-filtered acceleration signals (5–50 Hz).

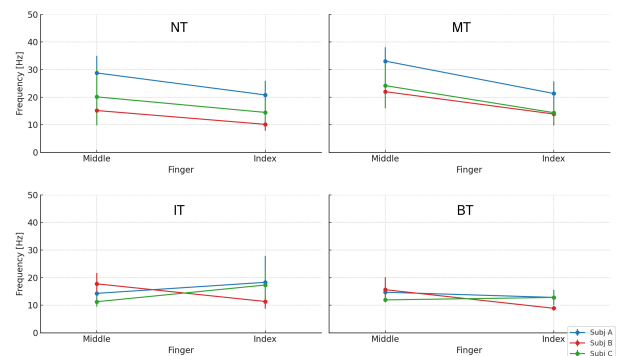


図 3: Estimated vibration frequencies of middle and index fingers under four tape conditions (NT, MT, IT, BT)

己相関のピーク群の時間間隔の平均から振動の基底周期を定め、これから基底周波数を求めた。4 つのなぞり条件下における 3 人の被験者について、同様の手順によって得られた 2 指の振動周波数の結果を図 3 に示す。

図 3 の結果からは、片方の指をテープで覆った MT, IT の各条件において、被験者 A と C においてはテープによって摩擦係数を下げた指の振動周波数が、テープの無い指の振動周波数よりも高くなっている傾向が示されている。被験者 B においては傾向が異なり常に中指が示指よりも周波数が高い傾向を維持した。これについては後ほど考察する。

また、被験者からの知覚の主観的報告はいずれも以下のようにまとめられた。

1. すべての条件下において、なぞり動作が安定した後の知覚は安定しており、なぞり面の形状は一樣で不変な平面として感じられた。両指ともに同一の水平面をなぞっている知覚が継続した。
2. 両指の距離関係が伸縮したように感じられる開閉錯覚が生じ、この錯覚の再現性も安定していた。中指にのみテープを貼った場合 (MT) では、両指間の距離について、右方向のなぞりの際にはこの距離が等速に縮み、左方向のなぞりの際にはこの距離が等速に広がる知覚が継続するという両指間距離の開閉錯覚が生じた。ちなみに実験中の物理的な両指間距離はほぼ変

化していない。

3. この傾向はテープを貼る指を交代させることで開閉錯覚の極性が反転した。なぞり方向に対する開閉錯覚の極性も同様に反転した。(MT → IT)
4. 両指の接触条件が同じ場合 (NT,BT), こうした両指間の距離変化は知覚されなかった。

このように、本報告の錯覚現象は、単純に1指の指腹に低摩擦係数のテープを貼っただけで再現可能なため、自在な知覚検証が可能である。一例として2指なぞりにおいて報告 [2] で示した並走なぞりでは、テープ貼付指の長さについて相対的な伸縮錯覚が観測され、なぞり方位に依らず、なぞり動作中のテープ貼付指の速度印象がテープ貼付無し指の速度印象を上回ることによる2指の相対位置の定位錯覚が誘導されることが観察されている。

4. 考察

表面形状知覚を行うなぞり動作では接触反力である F_N, F_f を安定化させることによってなぞり状態を維持するフィードバック制御をおこなっている。このため、 F_N, F_f のセンシングとその変動検出はなぞり触覚における表面形状知覚のメインファクターである。

しかるに計測論的な観点から見てもなぞり動作によってスリップスティック振動 $A_v \sin(\omega t)$ が生じている指腹においては、そこに作用している外力、すなわち押しつけ圧力 F_N やせん断摩擦力 F_f を、圧覚として安定的にセンシングすることには困難が伴う。静止している状態での静的な力であれば精度良く検出することが出来る感覚器 (SA1, SA2) においても、なぞり動作中で接触非接触を繰り返す振動中の指腹から安定的に力を計測・推定することは困難を極めるに違いない。その一方で、指腹における振動覚の検出器 (FA1, FA2) は同振動状態の振幅 A_v や周波数 $\omega/2\pi$ を安定的に捉えることが可能であると期待される [4]。

なぞり状態からの表面形状知覚を行うヒトの感覚統合過程にとってもこれらの事情は同様であると考えられるため、スリップスティック振動の振幅や周波数から、同振動を駆動するせん断方向摩擦力、さらにはこれに比例的な押しつけ圧力を、直接的に計測困難な圧覚情報に替えて代替的に推定する感覚統合を行っている可能性が想定される。

この結果、2指からのなぞり中の指先接触点における押しつけ圧力とせん断力の知覚を、静的な圧覚からではなく、振動覚の振幅と位相差＝周波数差から推定することによって、過去の報告 [3] ではなぞり面の上下動を、本報告では2指のせん断方向の速度差を知覚させることになり、この結果がそれぞれに UP/DOWN の極性を伴う段差形状錯覚と2指間距離の開閉錯覚をもたらしたものと考察する。

すなわち、条件 MT および IT においてはテープ被覆によって、摩擦係数の低下／向上によるせん断方向の振動振幅の減少／増大とスリップスティック振動周波数の向上／低下が、せん断摩擦力の低下／向上として推定されると共に、なぞり表面に対する指腹の相対速度の推定値を向上／低下

させることになり、この2指における推定速度の差が2指間距離の開閉錯覚を誘発したものと考えられる。実験結果である図3はこの仮説に符合する。

例外は両指テープあり条件 BT の結果であり、このデータが両指テープなし条件 NT とほぼ同等であることは、両指が同じ運動状態にあるとき、振動周波数を知覚に適した周波数に整えるように指先の押しつけ圧力 F_N, F_f をフィードバック制御する運動反射系の存在が予想される。

この予測は唯一4つの条件間で示指と中指の周波数関係が変化しなかった被験者 B のケースにも適用され得る。被験者 B はこの違いにも関わらず、錯覚の知覚応答については他の被験者と同様の回答を行っており、上記の指の知覚速度差の仮説自体は同様に満たしているものと考えられる。この場合、被験者 B において異なるのは指先の押しつけ圧力 F_N, F_f の制御戦略であり、常に各指の A_v と $\omega/2\pi$ が安定するように各指の F_N, F_f をフィードバック制御することで、各指の振動周波数 A_v と $\omega/2\pi$ からではなく F_N, F_f の分布から各指の速度差を知覚している可能性が考えられる。この検証は実際に同錯覚を生じている際の F_N, F_f を各指で独立に計測することで可能であるため、文献 [5] において構成された実験装置における計測と検証が今後の課題となる。

5. おわりに

本論では2指でのなぞり動作において指間での摩擦係数に違いを設けることによって、なぞり動作中の2指間距離に開閉印象をもたらす錯覚現象を発見した。さらにこのなぞり動作中のスリップスティック振動の周波数が摩擦係数の違いによって変化していることを指先の加速度計測によって観測した。一連の本研究 [2][3] と合わせて本論では、

1. 指先触覚は振動感覚器経由で各指のスリップスティック振動の振幅と周波数を捉えており、
2. この振動触覚間の差分が2指の指先の位置／姿勢を捉えている体性感覚との感覚統合過程に錯覚をもたらしたことで、
3. 文献 [2][3] の表面形状錯覚や本報告の2指間距離の開閉錯覚をもたらす統一的な発生機序となっている

ものと結論付けている。

この提案仮説では本研究のこれまでの報告 [2][3] において用いた爪上振動刺激からの錯覚現象として、指先の振動触覚の cutaneous な感覚パラメータを錯覚の主要因として説明したが、このスリップスティック振動を駆動する関係にある指腹での押しつけ力およびせん断摩擦力を制御する kinesthetic な感覚で捉えたことが要因であるとしても同様の説明は可能である。cutaneous と kinesthetic では感覚器が異なるため、この可能性は今後の検討課題である。

また、ここまでの研究報告によって、2指による平面上のなぞり感覚による表面形状の再現について、2指間隔と同等の距離＝数 cm オーダーの空間サイズでの高低差と指間隔の空間2自由度に関して連続的な表面形状を表現可能な制

御パラメータが得られたことになり，これは今後のバーチャルリアリティにおける多指触覚再現の新たな方法論として期待される．

参考文献

- [1] H.Ando, J.Watanabe, M.Inami, M.Sugimoto and T.Maeda. “A Study of the Nail-Mounted Tactile Display for Augmented Reality System”. The IE-ICE Transactions. Vol.J87-D-II. No.11. pp.2025-2033 (2004)
- [2] 杉原尚理, 永岡日向, 宮本拓, 渡邊理翔, 古川正紘, 原彰良, 前田太郎. “多指なぞり中の高低知覚を左右する指間の配置と運動方向の主要因の分析”. SICE SI2024 (2024)
- [3] N.Sugihara, H.Miyamoto, M.Furukawa, A.Hara and T.Maeda. “Polarity Illusion of Step Perception Induced by Amplitude Differences in Vibrotactile Stimuli –Study on Haptic Integration for Shape Perception in Dual-Finger Tracing: Part I”. World Haptics Conference 2025 Work in Progress Paper. WIP2.43 (2025)
- [4] Roudaut, Y., Lonigro, A., Coste, B., Hao, J., Delmas, P., & Crest, M. (2012). Touch sense. Channels, 6, 234 - 245. <https://doi.org/10.4161/chan.22213>.
- [5] 藤本伊吹, 杉原尚理, 原彰良, 古川正紘, 前田太郎. “摩擦差と速度差によって生じる指間開閉感覚の等価刺激量による定量的検証”. 第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 発表予定 (2025)