



摩擦差と速度差によって生じる指間開閉錯覚の等価刺激量による 定量的検証

Quantitative Evaluation of Inter-Finger Distance Illusion Induced by Friction and Velocity Differences Based on Equivalent Stimulus Magnitude

藤本伊吹¹⁾, 杉原尚理¹⁾, 原彰良¹⁾²⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

Ibuki FUJIMOTO, Naomichi SUGIHARA, Akiyoshi HARA, Masahiro HURUKAWA, and Taro MAEDA

1) 大阪大学大学院情報科学研究科

2) 脳情報通信融合研究センター

概要: 2 指での平面なぞりにおいて片方の指の摩擦を低下させると、物理的な距離変化がないにもかかわらず、指間距離が開閉するような錯覚が生じる。本研究ではこの錯覚が、スティック&スリップ振動に基づく主観的相対速度差に起因すると仮定し、物理的な速度差提示を可能にする実験システムを構築した。調整法による主観的零位再現によって同錯覚の効果量を物理速度差の等価刺激量として定量化することに成功した。

キーワード: 触覚, 感覚・知覚, 心理, 計測・認識

1. はじめに

2 指による平面なぞり動作において、両指間に摩擦係数の差がある場合、実際には指間距離に変化がないにもかかわらず、指が開閉するような知覚が生じる現象が報告されており [1], 本報告ではこの現象をテープ錯覚と呼称する。このテープ錯覚現象は両指に生じるスティック&スリップ振動の主成分の周波数ピークの差によって、一方の指が他方よりも速く動いているように感じられることで、指間が物理的に開閉したかのような錯覚が生じるものと考えられる。ただし同現象は能動運動中での錯覚現象であるため、現象の観測再現性は高い一方でその効果量を定量的に同定する手段を欠いていた。

そこで本研究では、2 指間に物理的に異なる速度刺激を提示可能な実験システムを構築することによって、同テープ錯覚の効果量を物理的速度差と対応づけることで定量化する。これにより、触運動における主観的速度知覚と錯覚発生との関係性を明らかにし、触覚提示設計への応用可能性を探る。

2. 実験装置の構成と目的

本報告における 2 指なぞりによるテープ錯覚現象の Configuration を図 1 に示す。従来、能動運動を伴うなぞり動作の研究においては、なぞり現象を力学的に記述するための指腹接触部における v : なぞり速度, F_N : Normal Force, F_f : Tangential Force の 3 パラメータを運動中に常時計測することは困難であった。そこで能動運動を伴わない前腕静止状態において、2 指の指腹部へのなぞり速度 v を独立に制御しつつ、それぞれの F_N , F_f を計測することが可能

な実験システムを構築した。

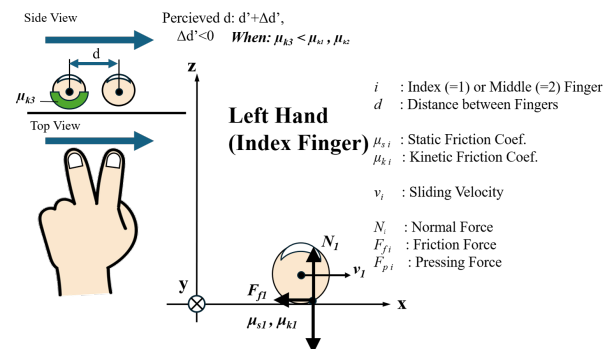


図 1: Dual-finger tracing configuration and tape conditions (MT). 図中では中指指腹をテープで被覆した MT 条件での右方向なぞり運動の状態。この運動中 2 指間が開閉続ける錯覚を生じる。

2.1 実験装置

被験者の示指および中指に個別のなぞり刺激を提示するため、図 2 に示すような 2 つの回転ローラーで構成される装置を使用した。各ローラーは DC モーターによって駆動され、回転速度は速度フィードバック制御によって $-120+120\text{rpm}$ の範囲で自由に制御可能である (符号は回転方向に対応)。ローラーの内径は約 40mm であるため、提示する摩擦速度刺激は $-0.2512\text{m/s}+0.2512\text{m/s}$ の範囲で自由に制御可能である (符号はなぞり方向に対応)。さらに各モーターの基台をそれぞれの 6 軸力センサ (PFS055YA501U6) 上に配置したことによって各ローラーへの接触力を独立に $500[\text{sample/s}]$

で計測することが可能である。

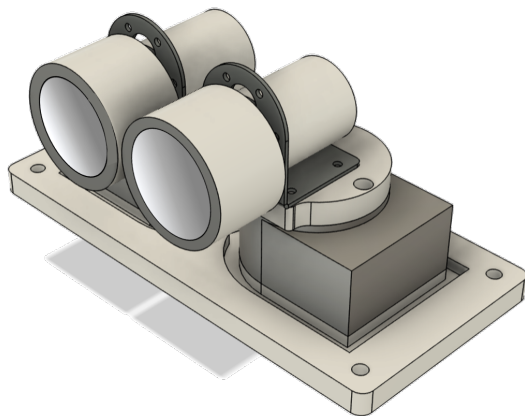


図 2: 個別のなぞり刺激提示装置

ローラー表面は紙やすり (400 番) で均一に仕上げられており、適度な摩擦を保持しながら安定したせん断刺激を実現している。両ローラーは左右対称に配置され、同一素材で統一されているため、摩擦係数の差異が生じないように配慮されている。

被験者は各指を対応するローラーの内周面の下部に軽く接触させ、ローラーの回転によって生じる相対運動が、なぞり刺激として指腹に提示される。被験者の指の位置は、実験中に指間距離の変化が生じないように、背側からの補助具によって固定した (図 3)。なお、この固定を継続した状態においても通常の平面上での 2 指なぞり動作と知覚状態には変化は生じず、開閉錯覚現象も同様に観測されることが確認されている。

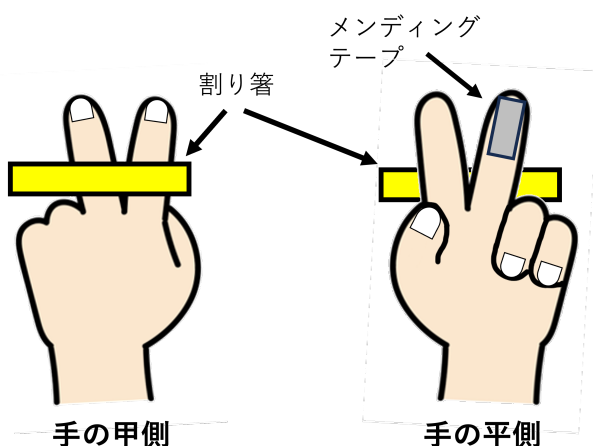


図 3: 実験中における被験者の手の状態

3. 実験 1: 受動運動時におけるテープ錯覚現象の再現性の検証, および同再現性におけるなぞり速度の上現/下限の同定

3.1 実験 1 の目的

図 1 の実験装置を用いることで、能動運動を伴わない前腕静止状態において、2 指の指腹部への摩擦速度刺激によって能動運動時と同様にテープ錯覚としての開閉印象が再現するか否かを検証し、同現象の再現が可能となる速度域を予備的に同定する。

3.2 実験手順

本実験は以下の 2 段階で構成される

1. 基準速度の設定

まず、両指に同一速度のなぞり刺激を提示したときにテープ錯覚が安定して生起する速度範囲を被験者ごとに調査した。その上限と下限の中央値を基準速度とし、この値を速度差提示の中心とした。

2. 速度差弁別閾の測定 (調整法)

次に、基準速度で両ローラーを同方向・同側に回転させた状態から、被験者自身により片方のローラーの速度を調整できるつまみを操作し、速度差を徐々に導入していく方法を採用した。

被験者には、示指と中指の間に「指が開く/閉じるような感覚が生じたと感じた時点」で操作を停止し、そのときの両ローラー間の速度差を記録した。

3.3 結果

本実験より、被験者が両指間のなぞり速度差を知覚可能となる弁別閾は、平均で約 0.0419m/s であることが示された (図 4)。これは、テープ錯覚が知覚される物理的速度差との比較において、相対速度情報の感度を示す基礎的指標となる。

また、実験 1 において力覚センサで測定された接触力データを基に、各指の接触面における摩擦係数を計算した。具体的には、接触時のせん断力 (F_f) と法線力 (F_N) の比から動摩擦係数を算出し、試行全体の平均を求めた。その結果、テープを貼付した指の摩擦係数は約 0.1837、貼付していない指では約 0.3016 となり、明らかな摩擦特性の差が確認された。一方で、両条件において測定されたせん断力の大きさに顕著な差は見られず、代わりに法線力が逆相で変化していた。すなわち、摩擦係数が低下した指では、それを補う形で法線方向の押しつけ力が高まり、必要な摩擦力を維持しようとする補償的な力制御が行われていた可能性がある (図 5)。

4. 実験 2: テープ錯覚の定量化

4.1 実験目的

本実験では、2 指間に摩擦係数の差を導入した際に生起するテープ錯覚の錯覚量を、物理的な速度差と等価な知覚刺激量として定量化することを目的とする。具体的には、極限法による二件法を用いて、2 指間の速度差を刺激量とし、

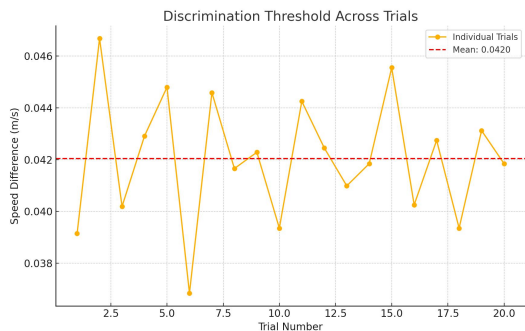


図 4: 速度差分別閾値測定時における各試行における実際の 2 指間速度差の推移

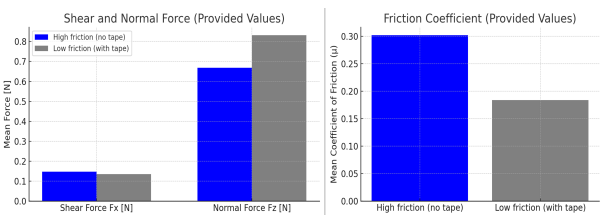


図 5: 摩擦非対称条件下における摩擦係数および接触力の比較

被験者に対して「開く感覚」あるいは「閉じる感覚」のいずれかを選択させる手法を採用した。これにより、提示された速度差に対する主観的知覚の変化を定量的に評価し、錯覚が生起している条件下における錯覚の効果量を明らかにする。

4.2 実験装置

装置構成は実験 1 と同様である。ただし本実験では、意図的に片方の指腹に摩擦係数を低減するテープ 3M 社製のメンディングテープを貼付し、物理的な速度差は与えずにテープ錯覚を誘発する条件を作成した。

4.3 実験手順

1. 錯覚誘発条件の設定

両ローラーの回転速度を基準速度に設定し、両指に同一のなぞり刺激を提示した状態から、片側の指腹に摩擦係数を低減する素材（3M 社製のメンディングテープ）を貼付した。この条件により、両指間に物理的な速度差が存在しないにもかかわらず、テープ錯覚が安定して知覚される状態を作り出した。ここでテープ錯覚が安定して生じない被験者は除外した。

2. 錯覚量の定量化

錯覚が知覚されていることを確認できた状態から、摩擦係数の低い側のローラーの回転速度をソフトウェア制御により段階的に下降／上昇させた。被験者には、速度が変化する各段階において「指が開いた／閉じたような感覚」を判断させた。

3. 試行回数とデータ取得

この手順を 1 被験者あたり各条件 5 回ずつ計 35 回繰

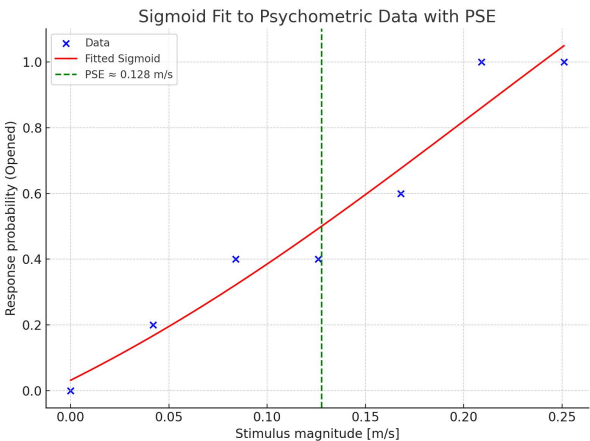


図 6: 物理的速度差に対する「開感覚」の報告割合 (Logistic 関数によるフィッティングと PSE の抽出)

り返し、各試行における錯覚方向を開／閉の 2 件法で回答させた。

4.4 結果

被験者の回答に基づいて、各速度差における「開感覚」と「閉感覚」の報告割合を算出し、刺激量（速度差）を横軸、閉感覚の報告を縦軸とした心理物理関数を作成した（図 6）。

後続する中指の摩擦係数が低いとき速度差が大きくマイナスな条件では、被験者は「開感覚」と回答した。一方、速度差が小さくなるにつれて「開感覚」の割合は徐々に減少し、速度差が 0 の時には全く報告されなかった。この結果から、物理的な速度差が被験者の主観的な開閉感覚に大きく影響を及ぼしていることがわかる。また、錯覚が誘発されていた条件では、速度差がゼロであっても開感覚がある程度残っていたことから、摩擦などの非対称性が知覚にバイアスを与えている可能性が示唆される。

さらに、得られた心理物理関数からシグモイド曲線の 50 % 点を求めたところ、錯覚が等価と感じられる錯覚等価速度は約 0.1277m/s であった。これは、摩擦差による錯覚が、物理的に 0.1277m/s の速度差提示と等価な開感覚を誘発することを意味しており、錯覚の定量化に成功したことを示している。

5. 考察

指先の接触面の摩擦係数が低下すると、その指における主観的な押し付け感覚が減少するという傾向が確認された。実際には、力覚センサで計測された垂直方向の押しつけ力は十分に存在していたにもかかわらず、摩擦係数が低い指では「押し付けていない」と感じていた。これは、2 指間でせん断方向の摩擦力に差が生じた際、摩擦係数の低い指の摩擦力を補うために、無意識的に垂直方向の力を強めていた結果と解釈できる。

このとき身体は、接触中の物体が回転せずに並行移動するという条件、すなわち 2 点間でせん断方向の力が均等であることを満たすために、必要な摩擦力を確保しようと無

意識に力の配分を調整していたと考えられる。この力の自動調整が結果的に、摩擦係数の低い指における「押し付けていない」という主観的な感覚変化として現れた可能性がある。

本実験の準備段階において、受動運動条件下でテープ錯覚が生じにくい場面が観察され、その際には被験者の運動方向に対する認識の曖昧さが共通して見られた。このことから、受動運動における錯覚の生起には、被験者の運動意図や触覚環境の変化が影響を与えている可能性があると考えられた。すなわち、能動運動時における運動方向の記憶や認識が明確であるほど、錯覚の強度が大きく変化する傾向がある。被験者が事前に体験した能動運動の方向を正確に保持できていた場合、その感覚記憶が受動運動中の触覚入力と統合され、予期された運動とのズレが錯覚として増幅される可能性がある。

この仮説に基づき、本実験では、受動運動中にも能動運動時のような運動意識を保持させるため、被験者に対して「現在のなぞり運動方向」を口頭で説明したうえで、テープ錯覚の評価を行った。

以上の結果は、テープ錯覚の生起が単なる物理的入力だけでなく、力の調整や運動意図の記憶に関わる身体内在的な制御プロセスとも密接に関係していることを示唆している。

6. おわりに

本研究では、2 指間における摩擦係数の非対称性が、スティック&スリップ振動を通じて主観的な相対速度の非対称性を生じさせ、それが開閉錯覚を引き起こすという仮説を検証した。摩擦差条件において錯覚が安定的に誘発されること、およびその錯覚が物理的な速度差を設けることで知覚されなくなることを確認した。これにより、主観的等価点としての速度差を錯覚量として定量化することが可能であることが示された。

参考文献

- [1] 前田太郎, 杉原尚理, 原彰良, 古川正紘. “2 指なぞり時に指腹摩擦差がもたらす開閉錯覚”. 第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 発表予定 (2025)