

指腹へのせん断変形呈示はなぞり運動に介入するか？

松井 健哉^{*1}, 岡本 正吾^{*1}, 山田 陽滋^{*1}

Does Presentation of Shear Deformation to Finger Pad Intervene in Tracing Movements?

Kenya MATSUI^{*1}, Shogo OKAMOTO^{*1} and Yoji YAMADA^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Science and Engineering, the Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

Human sensory inputs and motor outputs mutually affect each other. This study focuses on the shear deformation of a finger pad during tracing movements. A tactile interface influences the sensory-motor relationships during the tracing movements by manipulating the deformation of the finger pad. We conducted a preliminary experiment involving five participants and confirmed that the moving distances of the finger increased when the finger pad deformations were amplified by the tactile device. We conclude that the intervention in the finger pad's deformation affects tracing movements.

Key Words : Friction sensation, Skin stretch

1. 序 論

人の感覚入力と運動生成は、密接に結びついている⁽¹⁾。本研究は、この結びつきに触覚インタフェースが介入することで、人の運動生成に影響を与えることができるのではとの着想に基づく。このような触覚インタフェースの例として、Nakamotoらは、指腹での滑り知覚と把持力調整反射の関係⁽²⁾を利用した、把持反射を誘発する触覚ディスプレイ⁽³⁾を開発した。Watanabeらは足に振動刺激を呈示することで、歩行周期の誘導を行う手法の研究を行った⁽⁵⁾。足裏皮膚への刺激呈示が、直立している人の身体の姿勢とその知覚に影響することはよく知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。例えば、人の足裏の前方や後方へ刺激を呈示することで、人の姿勢が足裏に呈示した刺激と反対の方向に傾くことが知られている⁽⁶⁾。また、人の足裏に刺激を与えることで、高齢者の姿勢を安定させることができることが知られている⁽⁷⁾。以上の研究は、触覚インタフェースによって適切な刺激を人間に与えることが、その人間の運動にほとんど無意識的に影響を与えることを示す。上記の研究と同様に、われわれは誘導が無意識的であるかどうかよりもむしろ、どのような刺激がどのよう

に運動を誘導するかを調査する。触覚インタフェース以外では、人の視野に映るボールの大きさを変化させることにより、捕球動作を誘導できることなどが知られている⁽⁹⁾。

感覚入力と運動生成に結びつきがある運動として、なぞり運動を取り上げる。なぞり運動とは、人が紙面上の文字や図形などを指腹でなぞることである。なぞり運動は指腹のせん断変形を引き起こし、この様子の観察が報告されている⁽¹⁰⁾。本研究の目的は、指腹のせん断変形となぞり運動の関係に触覚インタフェースを用いて介入し、その介入がなぞり運動にどのように影響を与えるかを調査することである。もし、指腹にせん断変形を呈示することで、なぞり運動に影響を与えることが出来れば、適切な変形を指腹に呈示することで、タッチパネル型インタフェースなどにおいてなぞり動作を誘導するアプリケーションなどを構築し得る。どのような触覚刺激がどのように人の運動を誘発するかを明らかにすることが、今後のヒューマンインタフェースのデザインに影響を与える。

われわれは前報⁽¹¹⁾にて、なぞり運動中の指腹に触覚インタフェースを用いてせん断変形を加えることによって、せん断変形と同じ軸方向の運動成分に影響が生じることを確認した。本論文では、この実験の内容を4章で紹介する。さらに、5章では、触覚インタフェースが加えたせん断変形と直交するなぞり運動の成分に影響が生じるかどうかを実験的に検証した。

^{*1} 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町) {matsui.kenya@a.mbox, okamoto-shogo@mech, yamada-yoji@mech}.nagoya-u.ac.jp
This work was in part supported by MEXT KAKENHI 22800030 and 23135514, and Kayamori Foundation of Information Science Advancement.
本研究に関して、議論に参加頂いた名古屋大学 原 進氏に感謝する。

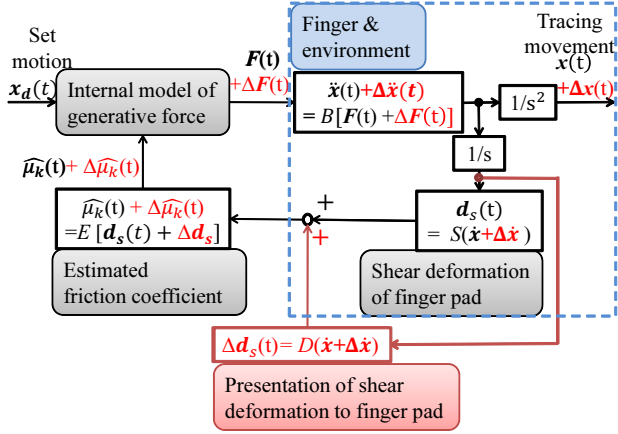


Fig. 1 Relationships between shear deformation of finger pad and tracing-movement. Black: closed loop without presentation of shear deformation. Red: closed loop with presentation of additional shear deformation ($\Delta d_s(t)$) by tactile interface.

2. 本実験における感覚と運動の関係性

2.1 なぞり運動における感覚と運動の関係の基本モデル Fig. 1 は、われわれが考える、なぞり運動と指腹のせん断変形の、運動-感覚ループである。人は、目標とするなぞり運動 $x_d(t)$ を自身が有する指への発生力の内部モデルに入力し、接触面方向への指の発生力 $F(t)$ を決定する。この指の発生力 $F(t)$ が自身の身体と環境に作用することで、実際のなぞり運動 $x(t)$ が決定される。この作用を、 $x(t) = B[F(t)]$ と記述する。Fig. 2(i) に示すように、このなぞり運動 $x(t)$ から、指腹に加わるせん断力 $f_s(t)$ 、さらに指腹のせん断変形 $d_s(t)$ が決まる。指腹に加わるせん断力は、アモン・クーロンの法則より、

$$f_s(t) = -\text{sign}[\dot{x}(t)]\mu_k F_n \quad (1)$$

となる。ここで、指先と床の動摩擦係数を μ_k 、指腹の床面に対する垂直抗力を F_n とする。 F_n は、指腹にせん断変形を呈示する前後で変化しないと仮定する。指腹のせん断変形は、人の指腹の剛性を K_f とすると、

$$d_s(t) = S[\dot{x}(t)] = \frac{f_s(t)}{K_f} = -\frac{\text{sign}[\dot{x}(t)]\mu_k F_n}{K_f} \quad (2)$$

となる。人はこの指腹のせん断変形 $d_s(t)$ から接触面の摩擦係数を推定することができる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。われわれはこの推定プロセスを

$$\hat{\mu}_k(t) = E[d_s(t)] \quad (3)$$

と表現する。 $\hat{\mu}_k(t)$ は推定された指先と床の動摩擦係数である。人はこの推定された摩擦係数を自身の指の

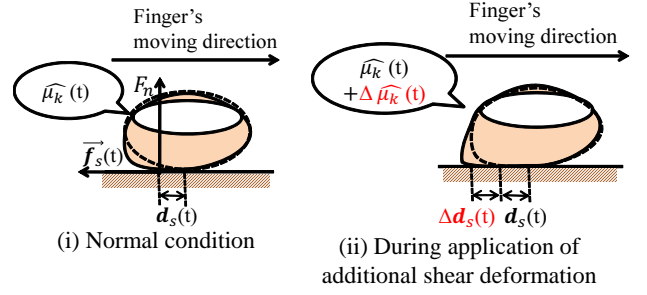


Fig. 2 Shear deformation to finger pad by tactile interface and perceived friction coefficient

発生力の内部モデルにフィードバックする。そして、人は目標のなぞり運動軌跡を実現させるために指の発生力 $F(t)$ を逐次決定するとわれわれは考える。

2.2 指腹へのせん断変形呈示によるなぞり運動への影響 本研究では、Fig. 1 に示すように、後述のデバイスを用いて指腹にせん断変形 $\Delta d_s(t) = D[\dot{x}(t)]$ を呈示する。このデバイスを用いることで、指腹のせん断変形は Fig. 2(ii) に示すように、 $d_s(t) + \Delta d_s(t)$ と増加する。物体把持や静止物体において、指腹のせん断変形の増加は、接触面の静摩擦の増加を知覚させる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。なぞり運動についても、せん断変形の増加が、床面の動摩擦知覚に影響することが予想される。この場合、人が推定する床面の摩擦係数も

$$\hat{\mu}_k(t) + \Delta\hat{\mu}_k(t) = E[d_s(t) + \Delta d_s(t)] \quad (4)$$

と増加すると考えられる。人はこの増加した摩擦係数 $\hat{\mu}_k(t) + \Delta\hat{\mu}_k(t)$ を自身の指の発生力の内部モデルにフィードバックする。指腹へのせん断変形増加の前後で指腹の床面に対する垂直抗力 F_n が変化しないとすれば、なぞり運動速度を維持するために、指の発生力 $F(t)$ が、 $F(t) + \Delta F(t)$ と大きくなる。このように、指腹のせん断変形の増加により、人は摩擦係数の増加を知覚(錯覚)し、指の発生力を増加させる。このような機序により、われわれはなぞり運動が触覚インタフェースにより影響を受けると考える。しかしながら、本研究の主題は、このような機序の特定よりも、むしろ指腹へのせん断変形呈示がなぞり運動に影響を与えることを実験的に検証することである。

3. 実験装置

Figs. 3 と 4 に、作成したせん断変形呈示デバイス(以下、呈示デバイス)を示す。呈示デバイスは、糸を巻きつけた1組のDCモータを回転させ、指腹に配置されたアクリル製プレートを駆動し、指腹にX方向のせん断変形を呈示した。モータ(RE-140, マブチモータ)

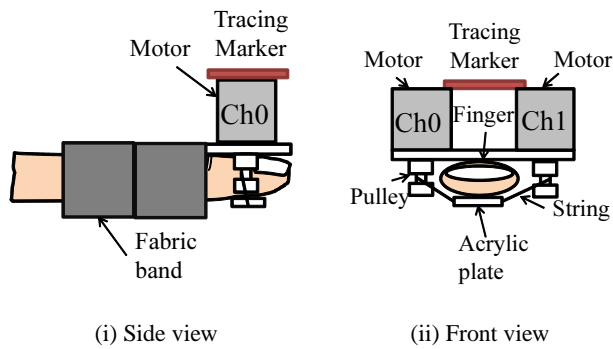


Fig. 3 Device to present shear deformation to finger pad

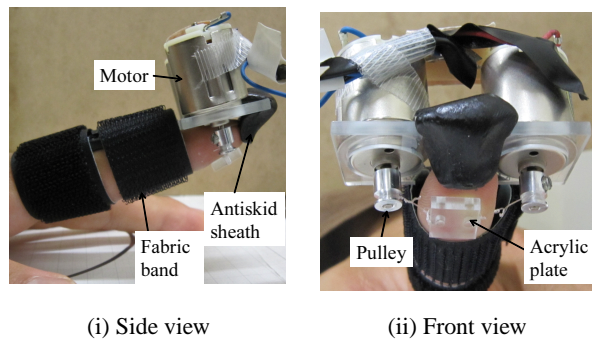


Fig. 4 Photograph of device to present shear deformation to finger pad

ター)は、3.0 V 印加時で、最大トルク 7.31 mN·m を出力する。デバイスによって指に呈示される内力の和はゼロであるので、呈示デバイスの駆動によって指の位置が移動することはほとんどない。デバイスを装着した状態で、指を後述の実験でも用いる紙面に置き、デバイスを最大トルク出力で駆動させたところ、指の位置は高々 0.3 mm しか移動しなかった。4.2 節に示すように指腹へのせん断変形呈示がなぞり運動の移動距離へ与える影響は 6 mm 程度であり、デバイスの動作による指の移動はこの値と比較して無視できる程小さい。

指の軌跡を計測するため、カメラ (320 × 240 pix, 30 fps, Playstation eye, Sony Computer Entertainment Inc.) を用いて、呈示デバイスに張り付けられたマーカの位置座標を計測した (分解能 実験 1: 0.85 mm, 実験 2: 1.05 mm)。次数 5 の Savitzky-Golay フィルタ⁽¹⁴⁾を用いて、なぞり運動の速度を算出した。この平滑化された速度が呈示デバイスを制御するコンピュータに転送され、このコンピュータは、4.1.3 と 5.1.3 節で述べた式に基づき、制御周期 0.2 ms で呈示デバイスのモータの出力を制御した。

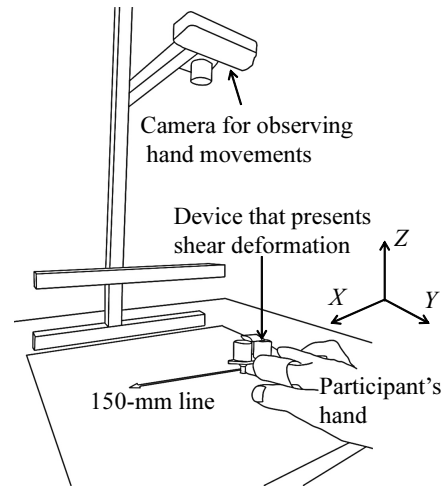


Fig. 5 Experimental scene

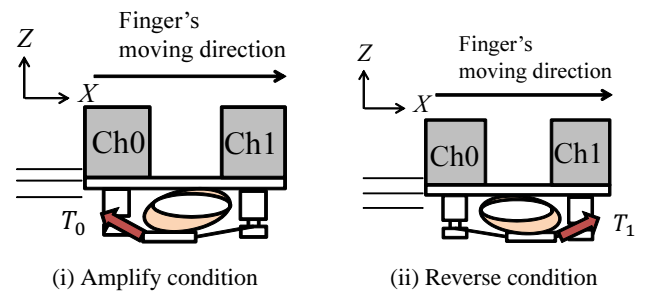


Fig. 6 Shear deformation to finger pad during linear tracing-task

4. 実験 1: 直線的ななぞり運動

人が紙面に描かれた 150 mm の線分上で、直線的ななぞり運動を行っているときに、指腹にせん断変形を呈示することがなぞり運動に与える影響を調査した。

4.1 方法

4.1.1 参加者 参加者は、著者らを除く、著者らの研究室のボランティア、5 名 (P1-P5: 右利き) であった。従って、本実験は予備的な位置づけである。参加者は、閉眼により視覚を遮断した。また、ヘッドフォンを通して、ピンクノイズを聞くことにより聴覚を遮断した。

4.1.2 タスク 参加者は呈示デバイスを利き手の示指に装着した状態で、なぞり運動の計測装置の前に座り、Fig. 5 に示すように示指を用いて線をなぞった。0.75 Hz のメトロノームの一回の音で半周期、2 回の音で 1 往復するなぞり運動を、1 試行で 3 回行った。実験前にメトロノームに従ってなぞる練習を数分間行った。参加者は可能な限り、精確に 150 mm をなぞるように指示された。試行の間、参加者は示指が Y 軸に沿うように、手の姿勢を維持するよう努めた。それぞれの試行の開始時に紙面上の線の位置を視覚的に

確認し、自ら線分の右端(初期位置として指定)に指を置いた。

4.1.3 刺激 なぞり運動中の参加者の指腹に3種の条件のせん断変形をランダムに呈示した。参加者には、これらの条件の情報は伝えなかった。それぞれの条件で10試行ずつが行われた。3種の条件のせん断変形はそれぞれ、

- Amplify 条件: 指腹のせん断変形を X 軸に沿って増幅させる (Fig. 6 (i)) および
- Reverse 条件: 指腹のせん断変形を X 軸に沿って反転させる (Fig. 6 (ii)) ,
- Normal 条件: 呈示デバイスからせん断変形を呈示しないとした。

われわれの本来の関心は、2.2 節で述べた機序で説明される Amplify 条件と Normal 条件との比較であるが、せん断変形呈示の方向に関係なく、なぞり運動に影響が生じる可能性を確認するために Reverse 条件を用意した。

Amplify 条件 人が紙面に描かれた線をなぞる際に、通常、指腹は指の速度の逆方向にせん断変形する。Amplify 条件では、モータのトルクは指腹のせん断変形を増幅するように決定された。基本的にモータの駆動によりプレートの糸にかかる張力は T_{max} か T_{min} としたが、指の運動の速度が比較的小さいときに限って、トルクの変化をスムーズにするためにモータのトルクを直線的に変化させた。今、Fig. 6 のように、指が X 軸の正の方向に移動しているとする。なぞり運動の速度を v_x として、プレートの糸にかかる張力は、

$$T_0 = \begin{cases} T_{min} & \text{if } 0 \leq v_x < 10 \\ \alpha(|v_x| - 10) + T_{min} & \text{if } 10 \leq v_x < 150 \\ T_{max} & \text{if } 150 \leq v_x \end{cases} \quad (5)$$

$$T_1 = T_{min} \quad \text{if } 0 \leq v_x \quad (6)$$

とした。ここで、 α および T_{max} , T_{min} はそれぞれ、 $5.75 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ および 1.07 N , 0.31 N とした。 α および T_{max} は、指腹の変形が不自然にならない程度に設定した。 T_{min} は糸の緊張を保つために設けた。 $v_x = 150 \text{ mm/s}$ のときに T_0 が T_{max} に達する。なぞり運動の速度が0の近傍にあるときに、プレートに掛かる力の方向が頻繁に切り替わり、振動的な振る舞いをするのを防ぐために 10 mm/s の不感帯を設けた。指が X 軸の負の方向に移動しているとき、張力は、

$$T_0 = T_{min} \quad \text{if } v_x < 0 \quad (7)$$

$$T_1 = \begin{cases} T_{min} & \text{if } -10 \leq v_x < 0 \\ \alpha(|v_x| - 10) + T_{min} & \text{if } -150 < v_x \leq -10 \\ T_{max} & \text{if } v_x \leq -150 \end{cases} \quad (8)$$

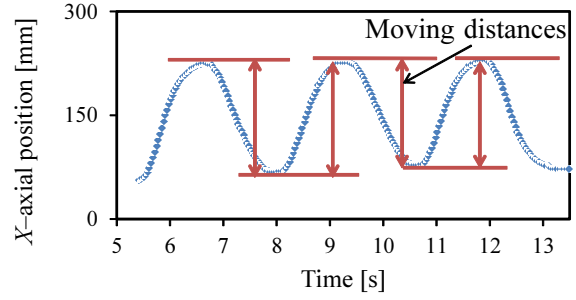


Fig. 7 Example of finger's moving distances

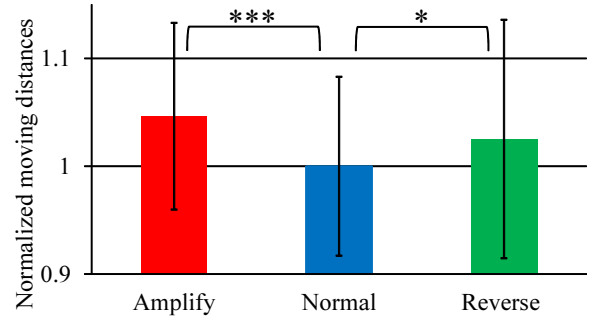


Fig. 8 Average and standard deviation of finger's moving distances under amplify, reverse and normal conditions in Exp. 1. *: significance level of 5%. ***: significance level of 0.1%.

とした。

Reverse 条件 この条件は、Amplify 条件での T_0 と T_1 を入れ替えた制御であり、指腹のせん断変形を反転させた。

Normal 条件 この条件では、呈示デバイスは、せん断変形を呈示しない。この条件と Amplify 条件, Reverse 条件における結果を比較する。ただし、指の Z 方向に掛かる力が、Amplify 条件および Reverse 条件と等しくなるように、モータの張力を制御した。張力は、

$$T_{0,1} = \begin{cases} T_{min} & \text{if } |v_x| < 10 \\ \frac{1}{2}((\alpha(|v_x| - 10) + 2T_{min})) & \text{if } 10 \leq |v_x| \\ T_{max} & \text{if } 150 \leq |v_x| \end{cases} \quad (9)$$

とした。

4.2 結果 X 方向のなぞり運動の移動距離 (Fig. 7) を特徴量として抽出した。1 試行の間に 6 ストロークが観察されるが、初めと最後を除いた 4 ストロークを統計処理に用いた。特徴量の個人差の影響を排するために、参加者 p ごとに、特徴量を Normal 条件での特徴量の平均 \bar{X}_{Np} で除して正規化した。正規化された特徴量の平均と標準偏差を Fig. 8 に示す。計算に用いた

サンプル数は、Amplify および Reverse 条件では 200(5 名 × 10 試行 × 4 ストローク/試行)であった。カメラの計測失敗により Normal 条件におけるサンプル数は 196 であった。正規化された特徴量の平均と分散を用いて t 検定を行った。Amplify 条件では、Normal 条件と比べて、指の移動距離 ($t_0(394) = 5.44, p = 9.39 \times 10^{-8}$, two-tailed) が大きかった。移動距離では、Amplify 条件の方が Normal 条件より平均 7.1 mm 大きかった。さらに、5 人の参加者すべてにおいても、この傾向が認められた。Reverse 条件においても、Normal 条件と比べて、指の移動距離 ($t_0(394) = 2.56, p = 0.0109$, two-tailed) が大きかった。移動距離では、Reverse 条件の方が Normal 条件より平均 3.9 mm 大きかった。しかしながら、この増加は参加者に依存し、統一的な傾向がなかった(増加: P1, P3, P5 減少: P2, P4)。

4.3 まとめ Amplify 条件でのなぞり運動の移動距離は、Normal 条件と比べて大きかった。われわれは、この現象を 2.2 節で述べた、指腹へのせん断変形呈示がなぞり運動へ影響を与える機序を用いて説明する。Amplify 条件において、呈示デバイスが指腹にせん断変形 $\Delta d_s(t)$ を呈示すると、人が知覚する摩擦係数は (4) のように増加した。この増加した摩擦係数 $\hat{\mu}_k(t) + \Delta \hat{\mu}_k(t)$ が、自身の指の発生力の内部モデルにフィードバックされ、指の軌跡を維持するために、指が発生する力 $F(t)$ は増加し、その結果、なぞり運動の移動距離が増加したと考えられる。Reverse 条件においても、なぞり運動の移動距離は、Normal 条件と比べて大きかったが、この増加は参加者に依存し、減少した参加者もいた。

5. 実験 2: 円のなぞり運動

実験 1 では、なぞり運動中の指腹にせん断変形を呈示した際に、呈示したせん断変形と同じ軸方向の運動成分に影響が生じることを確認した。実験 2 では、円状の軌跡を描くなぞり運動を題材とし、呈示されるせん断変形に直交する運動成分への影響を検証する。

5.1 方法

5.1.1 参加者 参加者は、先の実験同様に、著者らを除く、著者らが所属する研究室内のボランティア 5 名 (P1, P2, P4, P7: 右利き P6: 左利き) であった。

5.1.2 タスク 参加者は、0.50 Hz のメトロノームの音に合わせて、2 s で一周の周期となるように、直径 150 mm の円をなぞった。一回の試行で 3 周のなぞり運動を行った。各試行の開始時に、参加者は紙面上の円の位置を視覚的に確認し、自ら円の下端(初期位置として指定)に指先を置いた。

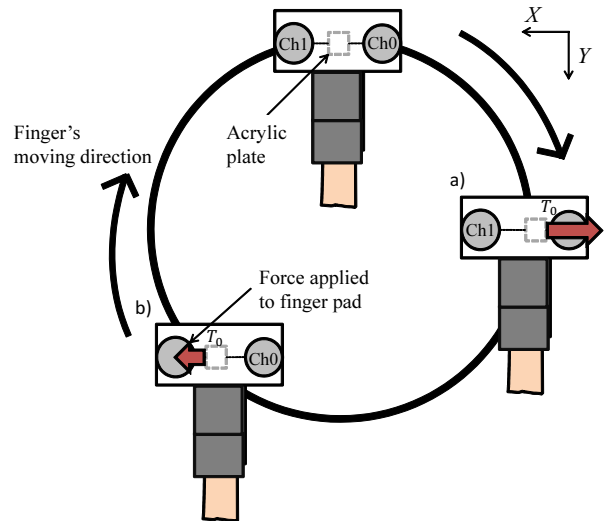


Fig. 9 Shear deformations to finger pad in circular tracing-task: outer condition

5.1.3 刺激 なぞり運動中の参加者の指腹に 5 種の条件のせん断変形をランダムに呈示した。1 条件につき、試行回数は 5 回とした。実験 1 の 3 種の条件に新たに 2 種の条件を加えた。新たな 2 種の条件は、Y 方向の指の速度に反応して指腹に X 方向のせん断変形を呈示した。5 種の条件は、

- Amplify 条件: 指先の速度の X 成分に応じて、指腹のせん断変形を X 方向に増幅させる条件 (Fig. 6 (i)) および
- Reverse 条件: 指先の速度の X 成分に応じて、指腹のせん断変形を X 方向に反転させる条件 (Fig. 6 (ii))、
- Normal 条件: せん断変形を呈示しない条件、
- Outer 条件: 指先の速度の Y 成分に応じて指腹へ円の外側向きにせん断変形を呈示する条件 (Fig. 9)、
- Inner 条件: 指先の速度の Y 成分に応じて指腹へ円の内側向きにせん断変形を呈示する条件とした。

実験 1 と同様に、われわれの関心事は、Amplify 条件と Normal 条件の比較であったが、せん断変形呈示の方向に関係なく、なぞり運動に影響が生じるかどうかを確認するために Reverse 条件、Outer 条件、Inner 条件を用意した。

Outer 条件 モータのトルクを Y 方向の指の速度に応じて制御した。その結果、デバイスは円の外向きに変形を呈示した。例えば、Fig. 9 a) のように、指先が Y 軸の正の方向に移動しているとき、2 台のモータがプ

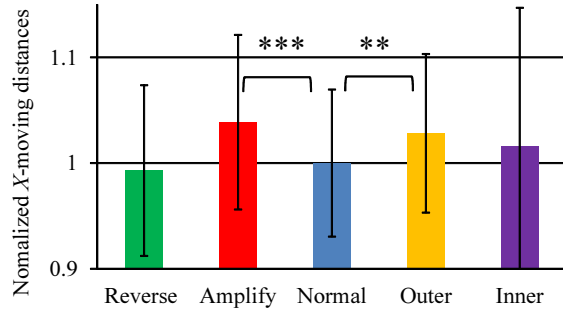


Fig. 10 Average and standard deviation of finger's X-axial moving distances. **: significance level of 1%.

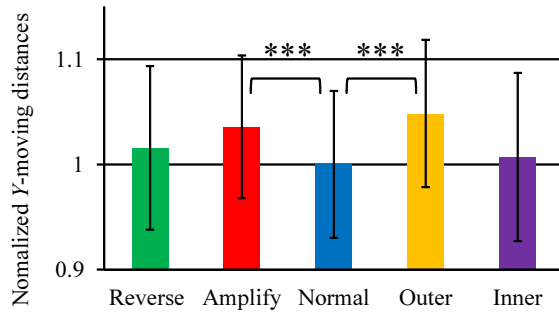


Fig. 11 Average and standard deviation of finger's Y-axial moving distances

レートに係に加える張力は,

$$T_0 = \begin{cases} T_{\min} & \text{if } 0 \leq v_y < 10 \\ \alpha(|v_y| - 10) + T_{\min} & \text{if } 10 \leq v_y < 150 \\ T_{\max} & \text{if } 150 \leq v_y \end{cases} \quad (10)$$

$$T_1 = T_{\min} \quad \text{if } 0 \leq v_y \quad (11)$$

とした. ここで, α および T_{\max} , T_{\min} はそれぞれ, 実験 1 と同じ 5.75×10^{-3} N·s/mm, 1.07 N, 0.31 N とした. (10) は, (5) の v_x を v_y と入れ替えた制御である. また, Fig. 9 b) のように, 指先が Y 軸の負の方向に移動しているとき, 張力は,

$$T_0 = T_{\min} \quad \text{if } v_y < 0 \quad (12)$$

$$T_1 = \begin{cases} T_{\min} & \text{if } -10 \leq v_y < 0 \\ \alpha(|v_y| - 10) + T_{\min} & \text{if } -150 < v_y \leq -10 \\ T_{\max} & \text{if } v_y \leq -150 \end{cases} \quad (13)$$

とした. (13) は (8) の v_x を v_y と入れ替えた制御である. **Inner 条件** この条件は, Outer 条件での T_0 と T_1 を入れ替えた制御であり, なぞる円の内向きにせん断変形を呈示した.

5.2 結果 X および Y 方向のなぞり運動の移動距離を, 特徴量として抽出した. 特徴量の個人差の影響を排するために, 参加者 p ごとに, 特徴量を Normal 条件での特徴量の平均 \bar{X}_{Np} , \bar{Y}_{Np} でそれぞれ除して正規化した. 正規化された特徴量の平均と標準偏差を Figs. 10 と 11 に示す. 計算に用いたサンプル数は, Amplify 条件, Reverse 条件, Outer 条件および Inner 条件では, 100 (5 名 \times 5 試行 \times 4 ストローク/試行) であった. カメラの計測失敗により Normal 条件におけるサンプル数は 96 であった. 正規化された特徴量の平均と分散を用いて t 検定を行った. Amplify 条件では, Normal 条件に比べて, X 方向 ($t_0(194) = 3.54, p = 4.98 \times 10^{-4}$, two-tailed) および Y 方向 ($t_0(194) = 3.62, p = 3.75 \times 10^{-4}$, two-tailed) の指の移動距離がそれぞれ大きかった. 移動距離では, Amplify 条件の方が Normal 条件より, X 方向で平均 5.8 mm, Y 方向で 5.7 mm 大きかった. 参加者ごとでは, 参加者 P4 の Y 方向以外で指の移動距離が Normal 条件と比べて大きい傾向があった. Outer 条件についても, Normal 条件と比べて X 方向 ($t_0(194) = 2.72, p = 7.16 \times 10^{-3}$, two-tailed) および Y 方向 ($t_0(194) = 4.85, p = 2.55 \times 10^{-6}$, two-tailed) の指の移動距離がそれぞれ大きかった. 移動距離では, Outer 条件の方が Normal 条件より, X 方向で平均 4.7 mm, Y 方向で 7.7 mm 大きかった. 参加者ごとでは, 参加者 P2, P4 の X 方向以外で, 指の移動距離が, Normal 条件と比べて大きい傾向があった. Reverse 条件では, Normal 条件と比べて X 方向 ($t_0(194) = 0.65, p = 0.511$, two-tailed) および Y 方向 ($t_0(194) = 1.48, p = 0.140$, two-tailed) それぞれの指の移動距離に違いが見受けられなかった. Inner 条件についても, Normal 条件と比べて X 方向 ($t_0(194) = 1.08, p = 0.281$, two-tailed) および Y 方向 ($t_0(194) = 0.65, p = 0.515$, two-tailed) それぞれの指の移動距離に違いが見受けられなかった. Reverse 条件および Inner 条件では, 移動距離の増減も参加者に依存し, 統一的な傾向がなかった.

5.3 まとめ 円のなぞり運動においても, 直線的ななぞり運動のときと同様に, Normal 条件と比べて Amplify 条件にて X 方向の移動距離が大きくなった. われわれは, これが 2.2 節で述べた, 機序により説明されると考える. また, Y 方向の移動距離の増加も観察された. Y 方向の移動距離が大きくなったことは, 参加者が紙面の摩擦の増加に異方性がないと仮定していたことが原因と考えられる. 参加者は, X, Y 方向共に紙面の摩擦の増加を感じ, その結果, 呈示デバイスによるせん断変形呈示により, X 方向の移動距離だけでなく, Y 方向の移動距離も増加したと考えられる.

Outer 条件においても，ほとんどすべての参加者で，なぞり運動の移動距離の増加が確認された．この条件においても，大多数の参加者に作用する何らかの機序が存在することが示唆される．このような機序の追求は今後の課題としたい．

6. 結 論

本論文では，指腹へのせん断変形呈示がなぞり運動に影響を与えるかどうかを調査した．なぞり運動として，直線と円の運動をとりあげた．直線的なぞり運動(実験1)では，指腹のせん断変形を増幅させる Amplify 条件下で，なぞり運動の移動距離が増加することを確認した．指腹のせん断変形を反転させる Reverse 条件では，全参加者の平均ではなぞり運動の移動距離が増加したが，参加者によっては減少した．円のなぞり運動(実験2)では，Amplify 条件と円の外側へのせん断変形を呈示する Outer 条件において，なぞり運動の移動距離が増加することを確認した．この結果は，指腹へのせん断変形呈示が呈示された変形に直交する指の運動成分にも影響することを示した．一方で，Reverse 条件，Inner 条件では，移動距離の増加は確認できなかった．Amplify 条件では，実験1,2ともになぞり運動の移動距離が6 mm 程度増加したことを確認したため，指腹のせん断変形を増幅させることでなぞり運動の移動距離が増加すると言える．このなぞり運動の移動距離の増加量は，参加者がなぞった距離150 mm と比較すると必ずしも大きくない．今後，さらに大きななぞり運動への影響が生じる条件を追求する．同時に，タッチパネル型インタフェースなどにおいて，誤操作の修正を誘導するためには，なぞり運動の移動距離に6 mm 程度の影響を与えられれば十分であるとも言える．また，現在，指腹のせん断変形量を計測可能な呈示デバイスを用いて，本論文と同様の実験を追試している．この結果から，指腹のせん断変形量となぞり運動の移動距離の増加の関係を定量的に記述することができる．

参 考 文 献

- (1) A. Berthoz, "The Brain's Sense of Movement," pp. 9–11, 21–24, 166–172, *Harvard University Press*, 2000.
- (2) R. S. Johansson, G. Westling, "Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during Precision Grip," *Experimental Brain Research*, Vol. 66, pp. 141–154, 1987.
- (3) M. Nakamoto, M. Konyo, T. Maeno, S. Tadokoro, "Reflective Grasp Force Control of Humans Induced by Distributed Vibration Stimuli on Finger Skin with ICPF Actuators," *Proceedings of the 2006 IEEE International*

- Conference on Robotics and Automation*, pp.3899–3904, 2006.
- (4) H. Kinoshita, "Effect of Gloves on Prehensile Forces during Lifting and Holding," *Ergonomics*, Vol. 42, No. 10, pp. 1372–1385, 1999.
- (5) J. Watanabe, H. Ando, T. Maeda, "Shoe-Shaped Interface for Inducing a Walking Cycle," *Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-existence*, pp. 30–34, 2005.
- (6) A. Kavounoudias, R. Roll, J. P. Roll, "Specific Whole Shifts induced by Frequency-Modulated Vibrations of Human Plantar Soles," *Neuroscience Letter*, Vol. 266, pp. 181–184, 1999.
- (7) B. E. Maki, S. D. Perry, R. G. Norrie, W. E. McIlroy, "Effect of Facilitation of Sensation from Plantar Foot-Surface Boundaries on Postural Stabilization in Young and Older Adults," *Journal of Gerontology: Medical sciences*, Vol. 54A, No. 6, pp. 281–287, 1999.
- (8) I. Watanabe, J. Okubo, "The Role of the Plantar Mechanoreceptor in Equilibrium Control," *Annals New York Academy of Sciences*, Vol. 374, pp. 855–864, 1981.
- (9) L. Peper, R. J. Bootsma, D. R. Mestre, F. C. Bakker, "Caching Balls: How to Get the Hand to the Right Place at the Right Place at the Right Time," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 20, pp. 591–612, 1994.
- (10) V. Levesque, V. Hayward, "Experimental Evidence of Lateral Skin Strain During Tactile Exploration," *Proceedings of the Eurohaptics*, pp. 261–275, 2003.
- (11) 松井健哉, 岡本正吾, 山田陽滋, "指腹へのせん断変形呈示がなぞり運動と触覚・深部感覚に与える影響," *Proceedings of the 2011 JSME conference on Robotics and Mechatronics*, 2A2-P0, 2011.
- (12) W. R. Provancher, N. D. Sylvester, "Finger Pad Skin Stretch Increases the Perception of Virtual Friction," *Proceedings of the IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 2, No. 4, pp. 212–223, 2009.
- (13) Y. Kurita, S. Yonezawa, A. Ikeda, and T. Ogasawara, "Weight and Friction Display Device by Controlling the Slip Condition of a Fingertip," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2127–2132, 2011.
- (14) W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing," *Cambridge University Press*, pp. 650–655, 1992.