

# 皮膚へのせん断力提示による手の動作制御の研究

A Study of Hand Motion Control by Presenting Shear Force on Skin

ヤェムヴィボル<sup>1)</sup>, 大槻麻衣<sup>2)</sup>, 葛岡英明<sup>1)</sup>, 矢野博明<sup>1)</sup>

Vibol YEM, Mai OTSUKI, Hideaki KUZUOKA, and Hiroaki YANO

1) 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

(〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, {s1230202@u, kuzuoka@iit, yano@iit}.tsukuba.ac.jp)

2) 立命館大学 総合理工学研究機構

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, otsuki@rm.is.ritsumeai.ac.jp)

**Abstract:** A system that assists hand skill training for using a tool should be able to control a learner's hand motion with precision. It is especially difficult for Outer Covering Haptic Display because it does not directly control the tool's motion but simply applies shear force to the back side of a user's hand. In this study, we conducted an experiment to figure out the characteristic between the way shear force is applied to the learner's hand and the hand's motion that the learner is induced. The result shows the maximum value and duration of presenting shear force affects the learner's hand motion. Based on the results, we proposed an implication for hand motion control strategy for OCHD.

**Key Words:** Hand motion control, Hand skill training, Shear Force

## 1. はじめに

書道のような道具の使い方に関する技能教育の研究ではアクチュエータを用いて道具を直接駆動することによって、道具を握る学習者の掌側に力を知覚させ、正しい動作に誘導する手法が一般的であった[1].

しかし筆者らの研究によれば、強い力で道具を握らなければならない作業の場合、そのような手法は、道具を介して伝えられる誘導力を感じにくくなるという問題がある[2]. この問題に対して筆者らは、道具を直接駆動するのではなく、外力が加わらない手の甲にせん断力を提示して動作を誘導することを提案した. そして、そのような力覚提示を実現する外装型触力覚提示装置 (Outer Covering Haptic Display, OCHD) を開発し、これを用いた実験によって、比較的小さな力でも学習者は提示した力の方向を知覚可能になることを示した.

このように、筆者らのこれまでの研究によって OCHD の基本的な有効性は明らかになったが、この方式によって効果的な冒頭に述べたような技能教育を実現するためには、学習者の手の動きを正確に誘導できなければならない. 道具を直接アクチュエータで制御する方式であれば、道具の位置を正確に制御することによってこれを実現することができるが、OCHD 方式の場合はそう容易ではない. すなわち、手の甲に対してせん断力をどのように提示すると、それを知覚した学習者が手をどのように運動させるかという、せん断力刺激とそれに対する学習者の手の反応の特

性を明らかにしなければならない.

そこで本研究では、せん断力刺激によって生ずる被験者の手の移動距離との関係を明らかにし、手の動作を制御可能かどうかについて検討することを目的とする.

## 2. 皮膚へのせん断力による手の動作制御

### 2.1 先行研究

皮膚へのせん断変形の感覚を用いて、運動方向を誘導する関連研究において、Bark らは、固定軸の周りに回転する2つのエフェクタを利用し、それらのエフェクタによって皮膚のねじれる感覚を与え腕の曲がる角度を誘導するウェアラブル装置を開発している[3]. また Kuniyasu らは、あるユーザの前後左右方向の腕の運動を他のユーザに伝達するため、腕に接着するエフェクタにより皮膚を変形させる方法を提案している[4]. 彼らの研究では、皮膚変形により、提示方向を知覚させることができ、また、皮膚せん断変形を利用することにより、腕の動作を伝達することができることを明らかにしたが、腕や手の移動距離の制御方法については検討されていない.

### 2.2 せん断力知覚特性による手の動作制御

物理的な量に対する知覚特性の研究により、一定刺激を提示し続けると、刺激に対する感度が低下することが知られている[5]. Zigler ら、および Nafer らによると、腕、手、およびひじの上に錘を置いたとき、その重さ感覚が消失す

るまでの時間(圧の順応時間)は錘の重さに比例する[6][7]. すなわち, 刺激が強くなるほど, 圧の順応時間が長くなる. また, ウェーバーフェヒナーの法則によると, 人の感覚量は, 刺激の強度ではなく, その対数に比例して知覚される.

しかしながら, 手の移動量と刺激量の関係は明らかにされていない. 本研究では, 刺激量に対する運動特性を調査し, 基礎的な制御手法を提案する.

### 3. 実験

本実験では, 人の手の甲に対するせん断力と, 人が手を移動させる距離との関係を明らかにする.

ここで, 提示するせん断力は, 図1に示すようなステップ状にした. 提示時間が経過した後は, 提示するせん断力は0 gfに戻した.

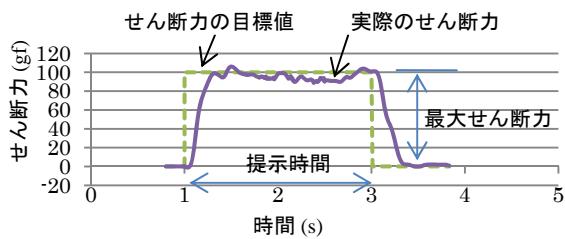


図1 せん断力の提示例

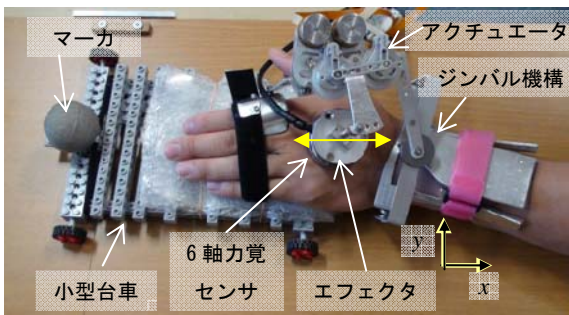


図2 ウェアラブルな実験装置を装着した様子

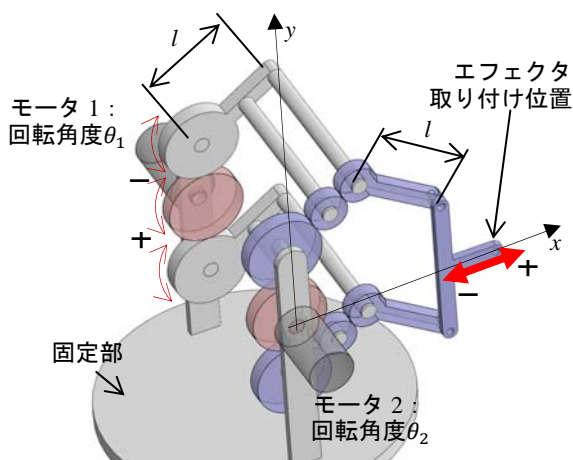


図3 アクチュエータの概略図



図4 エフェクタ

#### 3.1 装置

本実験において, なせん断力提示装置(図2)を設計し製作した. 図2に, 作成した装置の外観を示す. **本装置は, エフェクタを手の甲の上で2次元的に動かすことで, せん断力を提示する.** また, 手が動作しても安定してせん断力を提示できるようにするために, ウェアラブル型とした.

装置は, ジンバル機構, ジンバル機構に取り付けられる2自由度アクチュエータ(図3), エフェクタ(図4)から構成される. ジンバル機構は, アクチュエータを取り付けるための機構であり, 機構の中心点と手首の中心点を一致させることによって, 被験者が手首を自由に動かすことができる.

図3はアクチュエータ機構の概略図である.  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ と $l$ をそれぞれモータ1, モータ2の回転角とリンク長さとするれば, アクチュエータの先端に取り付けたエフェクタの位置 $(x, y)$ は,

$$x = 2l \cos(\theta_1 - \theta_2) \times \cos \theta_2$$

$$y = 2l \cos(\theta_1 - \theta_2) \times \sin \theta_2$$

で表される.

また, 皮膚の変形量 $r$ および変形方向 $\varphi$ は, 以下の式によって算出される.

$$r = 2l \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\varphi = \theta_2$$

本実験では, 簡単化のために, 図5に示すように,  $x$ 軸の方向のみせん断力を提示する. これはモータ1のみ回転させることで,  $\theta_2 = 0$ ,  $x = 2l \cos \theta_1$ ,  $y = 0$ になり, エフェクタが $x$ 軸上を動く(図3の赤矢印).

エフェクタは手の甲の皮膚に接触し, せん断力を与えるためのシリコンシートを貼り付けた, 直径40 mmの円盤である. エフェクタの背面には6軸力覚センサ(ATI-Mini40FT08735)を取り付け(図2), せん断力を計測できるようにした.

皮膚にせん断力を与えるために, エフェクタの移動速度(皮膚変形速度)を入力とした速度型PID制御を用いた.

$$\dot{r}_n = \dot{r}_{n-1} + \Delta \dot{r}$$

$$\Delta \dot{r} = K_p \Delta e_n + K_i e_n + K_d \Delta(\Delta e_n)$$

$$e_n = f_d - f_n$$

$$\Delta e_n = e_n - e_{n-1}$$

$$\Delta(\Delta e_n) = \Delta e_n - \Delta e_{n-1}$$

ここで,  $\dot{r}_n$ ,  $f_n$ ,  $f_d$ はそれぞれエフェクタの移動速度,

せん断力の現在値とせん断力の目標値である。

本装置の重さは約 290g である。本実験では、このせん断力提示装置以外に、手の動きを計測するためにレゴブロックを利用して小型台車を製作した(図4, 図5)。被験者はこの台車に手を乗せて、手の甲に提示されたせん断力に応じて小型台車を動かした。小型車が動いた距離を計測するために、モーションキャプチャ(サイヴァース社, ステレオラベリングカメラ)を用いた。

### 3.2 手順

被験者は22歳~33歳の10名(男性7名, 女性3名)であった。被験者は、2人が左ききであった。被験者は椅子に座り、装置を左手に装着した(図5)。実験を行う前に被験者には、「装置(エフェクタ)は台車を前(負方向)か後ろ(正方向)に動かすように誘導します。装置の誘導に従って、台車を前か後ろに動かして下さい。誘導を感じなくなったら手を止めてください。誘導方向がはっきり分からなければ動かさなくても結構です。」と説明した。せん断力の強度が、移動距離にどのような影響を与えるかを検討するために、その強度と移動距離との関係については被験者に伝えず、被験者自分自身の判断で、自由な速度で小型台車を動かすようにした。

装置が動く様子や動作音による影響を最小限にするために、ホワイトノイズを流したヘッドフォンを被らせ、装置を見ないように指示した。練習では、正負各方向にせん断力を提示し、手を動作させた。この練習は被験者が満足するまで行った。このときのせん断力と提示時間はそれぞれ100gfと2sにした。この練習の後、実験タスクをおこなわせた。実験タスクでは、各試行でせん断力を提示する前に、必ず台車をあらかじめ決められた初期位置に戻すようにした。

提示条件は、提示方向を2条件(正負方向)、せん断力 $f$ を3条件(50gf, 100gf, 150gf)、および提示時間 $t$ を3条件(1s, 2s, 3s)の計18条件とした。実験では、各条件の試行を4回おこなわせたため、各被験者は合計72回の試行をおこなった。各条件における手の移動距離は、その4回の試行の平均値とした。刺激提示条件の順番はラテン方格法によってカウンタバランスをとった。

エフェクタが手の甲に加える垂直方向の圧力は0.16gf/mm<sup>2</sup>とした。これは、せん断力が300gfに達するまで、ほぼすべりが生じない圧力を、予備実験から求めたものである。エフェクタが手の甲に提示するせん断力は6軸力覚センサによって検出し、エフェクタが多少滑った場合でも常にほぼ目標のせん断力を提示できるようにフィードバック制御をおこなった。

実験結果に対する統計的検定は、各提示方向において、3x3の反復測定2元配置分散分析で行った。独立変数は、最大せん断力 $f$ (50gf, 100gf, 150gf)および提示時間 $t$ (1s, 2s, 3s)である。



図5 実験の様子

## 4. 実験結果

図6と図7は、提示時間 $t$ とせん断力 $f$ により、被験者が動かした距離を比較した結果である。

Kolmogorov-Smirnovの検定により、正規性の仮定が成り立っていることが分かった(各群において $p > .1$ )。次に、 $f$ と $t$ を要因とした反復測定二元配置分散分析の結果、両要因に主効果がみられた(正方向においてそれぞれ、 $f$ :  $F(1.25, 11.3)=23.4$ ,  $p<.01$ ,  $t$ :  $F(1.25, 11.25)=17.45$ ,  $p<.01$ , 負方向においてそれぞれ、 $f$ :  $F(1.21, 10.9)=12.7$ ,  $p<.01$ ,  $t$ :  $F(1.28, 11.6)=10.51$ ,  $p<.01$ )。また、 $f$ の要因と $t$ の要因の交互作用について、正方向においては有意傾向がみられたが( $F(3.29, 29.62)=2.4$ ,  $p<0.1$ )、負方向においては有意差が認められた( $F(3.44, 30.95)=4.8$ ,  $p<0.01$ )。

そこで、要因ごとにDunnettの多重比較をおこなった。提示時間については(図6)、3つのせん断力条件全てにおいて、方向によらず提示時間1sと3sの間に有意差がみられた(50gf:  $p<.05$ , 100gf:  $p<.01$ , 150gf:  $p<.01$ )。2sと3sの間では、負方向の50gfにおいてのみ有意傾向がみられたが( $p<.1$ )、他のせん断力条件においては有意な差はみられなかった。1sと2sの間では、50gfにおいては正負両方向とも有意な差がみられなかったが、100gfおよび150gfにおいては、それぞれ有意傾向(正方向:  $p=.05$ , 負方向:  $p=.06$ )、および有意差(正方向:  $p<.05$ , 負方向:  $p<.05$ )がみられた。

せん断力については(図7)、50gfと100gfの間(すべての方向、提示時間において $p<.01$ )、および50gfと150gfの間に(すべての方向、提示時間において $p<.01$ )有意差が認められた。100gfと150gfの間では、正方向の2sにおいては有意傾向がみられたが( $p<0.1$ )、他の提示時間においてはみられなかった。

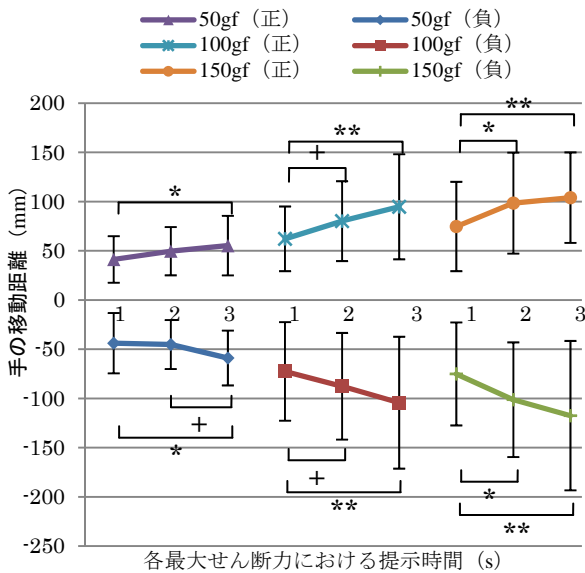


図6 提示時間と、手の移動距離の関係  
(\*\*:  $p < .01$ ; \*:  $p < .05$ ; +:  $p < .1$ )

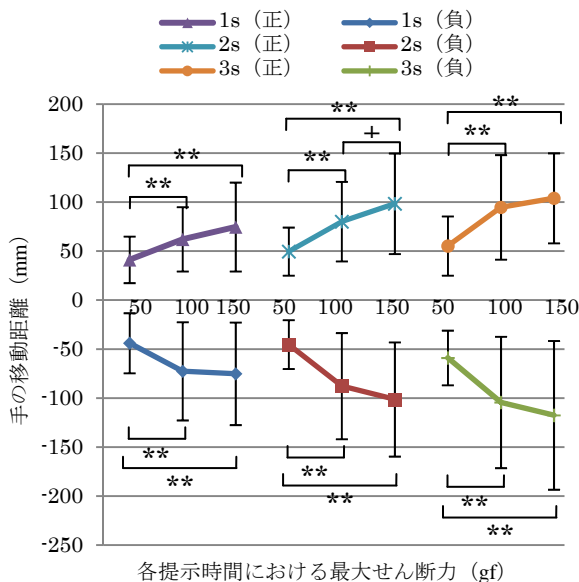


図7 最大せん断力と、手の移動距離の関係  
(\*\*:  $p < .01$ ; \*:  $p < .05$ ; +:  $p < .1$ )

## 5. 考察

本実験結果から、最大せん断力、および提示時間を変えることによって、学習者の手の移動距離を制御できる可能性が明らかになった。

提示時間による移動距離の特性について、1sと2sの間の差に注目すると、50gfにおいて有意差がみられなかったが、100gfおよび150gfにおいて、それぞれ有意傾向および有意差がみられた(図6)。これは2章で述べたように、一定刺激を提示し続けると、刺激に対する感度が低下するが[5]、その一定刺激の強さが大きくなるほど、刺激の強さが消失するまでの時間が長くなる[6][7]ことが原因である

と考えられる。すなわち、提示する最大せん断力を強くすれば、より長い時間学習者の手を移動させることができる。しかしそれでも、今回の実験結果からは、いずれの最大せん断力に対しても、2秒以上のせん断力提示が移動距離に与える効果は小さいことがわかった。

最大せん断力による移動距離の特性について、50gfと100gfの間には移動距離に有意差がみられたが、100gfと150gfの間には、ほとんど有意差が見られなかった。このことから、いずれの提示時間についても、100gf以上のせん断力提示が移動距離に与える影響は小さいと言える。

以上の結果、せん断力の強度や提示時間を様々な変化させることで、手の運動を制御できると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、皮膚へのせん断力の提示が、手の移動距離に与える影響について実験をおこない、触覚刺激に対する手の運動特性を分析した。

今後は、この知見に基づいた手の運動制御アルゴリズムを検討し、定められた時間に目標の位置まで動かせるようにする。

## 参考文献

- [1] C. L. Teo, E. Burdet, and H. P. Lim: A Robotic Teacher of Chinese Handwriting; Proc. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 335-341, 2002.
- [2] ヤムヴィボル, 葛岡英明, 矢野博明, 渋沢良太, 山下淳, 太田祥一, 竹内保男: 気管挿管教育のための外装型力覚提示装置の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.4, pp. 597-605, 2011.
- [3] K. Bark, J. Wheeler, G. Lee, and, J. Savall: A Wearable Skin Stretch Device for Haptic Feedback, Proc. World Haptics Conf., pp. 464-469, 2009.
- [4] Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto: Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin; Augmented Human, CDROM, France, 2012.
- [5] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房出版, 東京都文京区大塚, pp. 3-20-6, 1994.
- [6] M. J. Zigler: Pressure Adaptation Time: A function of Intensity and Extensity; American Journal of Psychology, Vol.44, pp. 709-720, 1932.
- [7] J. P. Nafer and K. S. Wagoner: The Nature of Pressure Adaptation; Journal of General Psychology, Vol. 25, pp. 323-351, 1941.