

洗濯ばさみによる疑似力覚生起現象を再現するデバイスの予備的検証

宮上昌大^{†1} 中村拓人^{†1,2} 梶本裕之^{†1}

概要：洗濯ばさみを指に挟むと疑似的な力覚が発生する現象が知られている。本現象は指に対して掌側から洗濯ばさみを挟むと屈曲方向に牽引感を感じ、甲側から洗濯ばさみを挟むと伸展方向に牽引感を感じる。本稿では洗濯ばさみ現象を再現したデバイスを作成し、疑似的な力覚の生起頻度を確認することでヒューマンインタフェースへの応用可能性を示す。

1. はじめに

人が指で触れた物体の硬さや大きさ、質感といった触力覚情報をバーチャルリアリティ (VR) 空間で再現するための手法が提案されており、手に装着する外骨格型デバイス [1][2] や把持型デバイス [3][4] などが挙げられる。しかし多くの手法は装置が大型で複雑化しやすいという問題がある。現在、省エネルギーかつ簡便に力覚を提示するために錯覚現象を利用することによる力覚提示手法が複数提案されている。指先の皮膚へ圧迫等による圧迫刺激を行うことにより疑似的な力覚を提示する手法が提案されている [5][6][7][8]。これらのデバイスは VR 空間において触覚を提示するという目的に対しては好適である。一方で実空間での AR 的な応用を考えると指腹を完全に覆うこうした手法は指腹の現実の感覚を阻害するという課題を持つ。指の中節や基節付近にデバイスを装着する触覚提示手法 [9][10] も提案されているが、いずれも力覚提示というよりは方向知覚を解釈可能な皮膚感覚を提示するものであった。筋電気刺激でも疑似力覚を指先に提示する手法 [11][12] は提案されており、これらは指先を覆うことなく疑似力覚を提示可能な手法であるが、電気刺激は皮膚のインピーダンスによって刺激強度が変化してしまうという実用上の課題がある。

我々は洗濯ばさみを指に挟むことにより疑似的な力覚が生起可能であることを発見した [13]。本現象は指に対して掌側から洗濯ばさみを挟むと屈曲方向に牽引感を感じ、甲側から洗濯ばさみを挟むと伸展方向に牽引感を感じる (図 1)。我々は洗濯ばさみを指のどの部位に挟むと伸展方向と屈曲方向に疑似力覚が生起するかを確認した。この結果から指腹を覆うことなく指に対して疑似的な力覚が生起可能であることが確認された。本稿では洗濯ばさみ現象を再現したデバイスを作成し、疑似的な力覚の生起頻度を確認することでヒューマンインタフェースへの応用可能性を示す。

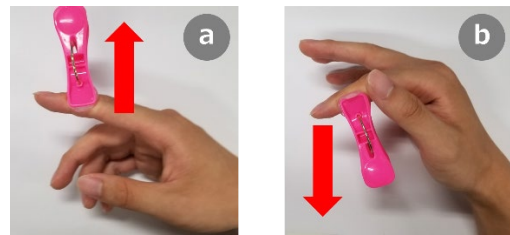


図 1 洗濯ばさみによる疑似力覚提示

(a) 甲側から洗濯ばさみを挟むと伸展方向に、(b) 掌側から洗濯ばさみを挟むと屈曲方向に疑似力覚を感じる

2. デバイス設計

2.1 洗濯ばさみの動作

本現象を再現するため我々は洗濯ばさみの動きに着目した。本現象のメカニズムは完全に解明されていないが、洗濯ばさみを挟んだ際に特定方向の皮膚変形が生じていることが確認されている (図 2)。先行研究として指の皮膚をせん断変形させることによって姿勢錯誤が誘発されることが知られている [14]。また腱への機械刺激によって感覚神経が刺激され、運動感覚が生じることも知られている [15]。我々は本現象にはこれらの一部ないし全体が関わっていると考えている。そこで本現象を再現するにあたって、指に対してある一定以上の強さの圧迫提示を行い、それによって皮膚の変形を生起させることとした。

圧迫位置に関しては、前報の実験の結果に対して今回 Kruskal-Wallis 検定および Dunn-Bonferroni 検定による多重比較を行った結果 (図 3)、指の中節部分が本錯覚現象にとって最も効果的な部位であることが判明したため、中節を用いることとした。洗濯ばさみの圧迫強度に関しては 5 kgf まで計測可能なばねばかり (SANKO 社) を使用して予備的に計測を行った。洗濯ばさみの片方の圧迫部位を固定し、もう片方の圧迫部位を想定する指の直径の長さまでばねばかりで牽引した。本計測は筆者の人指し指の中節

^{†1} 電気通信大学 大学院情報学専攻

^{†2} 日本学術振興会 特別研究員

(直径 1.5cm 程度) に対して行った結果、約 2kgf 程度の圧力で指を挟んでいることが分かった。



図 2 洗濯ばさみの圧迫により生じる皮膚変形
甲側から挟むと伸展方向に、掌側から挟むと屈曲方向に皮膚変形が生じている

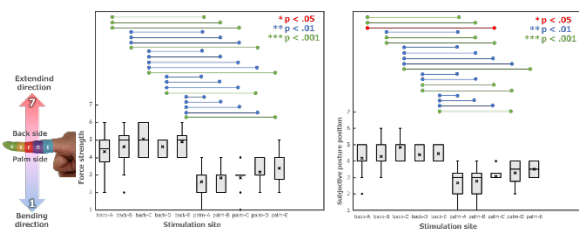


図 3 人指し指における洗濯ばさみ現象の生起頻度の確認
指を A~E の 5 つの部位に分け、各部位に対して甲側と掌側からそれぞれ洗濯ばさみを挟む。被験者は感じた力覚と主観的な指位置についてそれぞれ 7 段階リッカートスケールで回答するよう指示した。

2.2 デバイスによる現象の再現

デバイスを設計するにあたって、指に装着するため実空間でのタスクに影響を及ぼさないように軽いことが望まれる。そのため指を圧迫するアクチュエータは可能な限り軽いものを選定する必要がある。今後は空気圧アクチュエータ(空気圧によって膨張し皮膚を圧迫するバルーン)を使用し、頭部または腰部に対して圧迫及び皮膚変形を提示することで疑似力覚が提示可能であることを報告している[16][17]。本デバイスではこの機構を使用し、外枠であるアルミフレームと内枠であるステンレス板の間に軽量の空気圧アクチュエータを設置した。空気圧アクチュエータを駆動することによりステンレス板が内側に駆動し、指に対して圧迫及び皮膚変形提示を行う(図 4)。空気圧圧迫に使用するバルーンの大きさは縦 20mm×横 20mm であり、ソレノイドバルブ(SC415GF 6.0V, SEJOO MOTION 社)によりエアーマータ(SC3710PML, SEJOO MOTION 社)からの空気供給を 700ms、空気開放を 300ms と設定した。空気開放を行うことにより洗濯ばさみで挟んだ瞬間のインパル的な力覚提示が可能であり、加えて順応を防ぐことが期待される。輪ゴムでデバイスと指を外れないようにし、圧迫時、痛みを抑えるためステンレスの内側にスポンジを貼り付けた。

本デバイスの圧迫強度を圧力センサ(感圧センサ(円形・小), SWITCH SCIENCE 社)を用いて計測した。人指し指

に対して 2 つの圧力センサを挟み込み、その上からデバイスを装着、空気圧アクチュエータにより圧迫を行う。その結果、約 1.2kgf 程度の圧迫強度で指を挟んでいることが分かった。洗濯ばさみの場合と比べると十分に強いとは言えないが今回はこの強度で実験することとした。また圧迫を行わない場合には約 640g 程度の圧迫強度で指を挟んでいることが分かった。本デバイスでは伸展方向に力覚を提示する場合は甲側に、屈曲方向に力覚を提示する場合は掌側にデバイスを装着し、空気圧アクチュエータを駆動することで皮膚を変形させる(図 5)(図 6)。

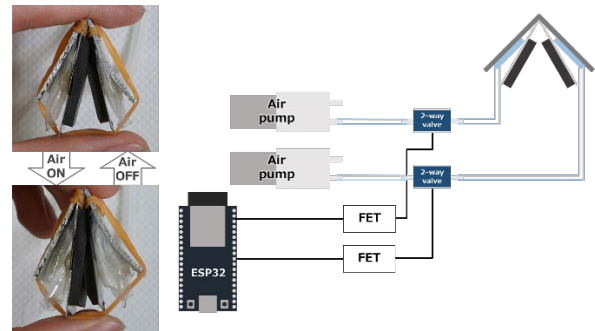


図 4 デバイス構成

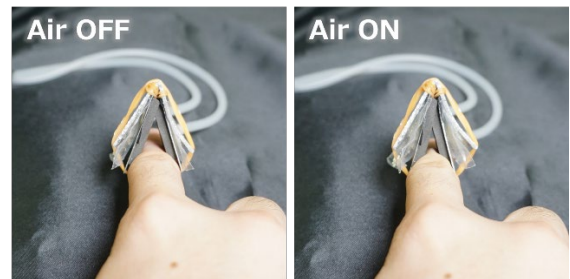


図 5 甲側からデバイスを装着した時の様子
空気圧アクチュエータを駆動させた際に皮膚が甲側に寄せ集まるように変形している様子が観察される

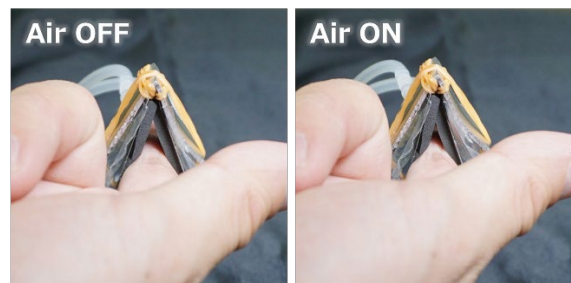


図 6 掌側からデバイスを装着した時の動作
空気圧アクチュエータを駆動させた際に皮膚が掌側に寄せ集まるように変形している様子が観察される

3. 予備実験

3.1 実験概要

本実験では作成したデバイスによって洗濯ばさみ現象と同様の現象が生じるかを確認するとともに、生じた力覚によって指をどの程度動かされているように感じるかを検証した。

3.2 実験条件

被験者は男性 10 名(21~28 歳, 全員右利き)で, 実験中は閉眼させ, ヘッドホンによって外部音を遮断した。被験者には感じる力覚に対して抗わないように指示を行った。また, デバイスは洗濯ばさみ現象が最も効果的に生起する中節部位に装着した。空気圧圧迫によって本現象が再現されたかを確認するためにデバイスを指の甲側に装着して空気圧圧迫を提示する/しない条件, 掌側に装着して空気圧圧迫を提示する/しない条件の 4 つの刺激条件を設定した。

3.3 実験手続き

被験者は図 7 のように肘置きに右の前腕を置き, 実験担当者が被験者の人差し指の中節部位に対してデバイスを装着した。デバイス装着後は実験担当者がホワイトノイズを提示し, それを刺激開始の合図とした。被験者には感じた力覚と指の主観的な姿勢位置について 7 段階リッカートスケールでそれぞれ回答させた。感じた力覚では 4 を”どちらも感じない”とし, 7 を甲側に, 1 を掌側に力覚を感じるとした。指の主観的な姿勢位置では 4 をデバイスを装着していない状態の位置とし, 7 を甲側に, 1 を掌側に指があるように感じるとした。回答後は実験担当者がホワイトノイズを停止し, 被験者の人差し指からデバイスを脱着し, 再度特定の向きでデバイスを装着した。これを各条件 5 試行ずつ, 合計 20 試行を行った。条件を提示する順番はランダムで決定した。



図 7 実験中の様子

3.4 実験結果

図 8 に被験者が感じた力覚についての実験結果を示す。縦軸は被験者が回答した主観的な力覚強度, 横軸は刺激条件である。横軸の Back および Palm はデバイスの装着を手の甲側から行ったか, 掌側から行ったかを示し, Air は空気圧圧迫を行ったことを示している。Kruskal-Wallis 検定を行

った結果, 主効果が確認された ($\chi^2(2) = 160.736, p < 0.001$)。Dunn-Bonferroni 検定による多重比較の結果, Back(Air)-Back(None) 間, Palm(Air)-Palm(None)間等においてそれぞれ有意差が見られた。この結果より, 空気圧圧迫を行うことで被験者が伸展方向と屈曲方向にそれぞれ力覚を感じる事が確認された。

図 9 に被験者が感じた指の主観的な姿勢位置についての実験結果を示す。縦軸は被験者が回答した指の主観的な姿勢位置, 横軸は刺激条件である。Kruskal-Wallis 検定を行った結果, 主効果が確認された ($\chi^2(2) = 104.079, p < 0.001$)。Dunn-Bonferroni 検定による多重比較の結果, Palm(Air)-Palm(None)間等においてそれぞれ有意差が見られた。この結果より, 空気圧圧迫を行うことで被験者が屈曲方向に指が動いているように感じる事が確認された。

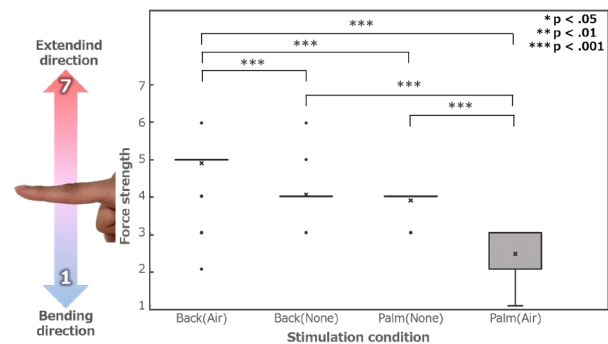


図 8 感じた力覚についての回答結果

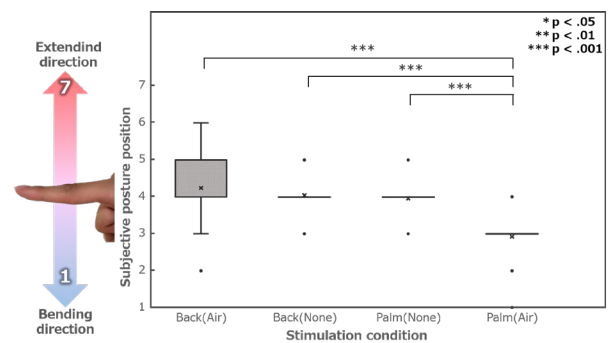


図 9 指の主観的な姿勢位置についての回答結果

4. 考察

実験結果より空気圧圧迫によって被験者が伸展方向及び屈曲方向への力覚提示を知覚することが有意に確認された。一方で主観的な指の姿勢位置に関しては, 伸展方向に指が動かされたという感覚は有意に確認されなかった。これは指の脱力時の姿勢位置から伸展方向への駆動可能角度と屈曲方向への駆動可能角度が同じではないことが原因として考えられる。人間の指の脱力時の姿勢位置は掌側よりも少し甲側の方向に位置するため, この位置の差が駆動のし辛さを引き起こしたのではないかと考える。そのため指を脱

力時の姿勢位置からより屈曲方向へ曲げた状態で空気圧アクチュエータを駆動させるとより疑似力覚を知覚しやすくなり、指が動かされたという感覚が生起されると期待される。これを予備的に検証するため、伸展方向への力覚や指の移動感を弱く感じたという被験者に対して実験終了後に空気圧圧迫中に指を能動的に屈曲方向に駆動するように指示した。その結果、受動的な知覚と比較して伸展方向への力覚が分かりやすいというフィードバックがあった。そのため VR 空間上で物体を把持するなどの能動的運動をさせる状況下で本デバイスを駆動させることで力覚の知覚が容易になると期待される。

5. おわりに

本稿では被験者に対して洗濯ばさみを利用した疑似力覚生起現象を再現した空気圧圧迫デバイスが有効であるかを検証した。その結果、空気圧圧迫中によって被験者が伸展方向及び屈曲方向への力覚提示を知覚することが有意に確認された。一方で主観的な指の姿勢位置に関しては屈曲方向にのみ指が動かされたという感覚が生じた。また、本稿で作成したデバイスの圧迫強度は洗濯ばさみの圧迫強度より小さいが被験者に対して力覚提示を行うことが可能であることが確認された。

今後はデバイスの改良とともにデバイス装着時の指を能動的に動かす条件下における洗濯ばさみ現象の生起頻度を検証する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものです

参考文献

- [1] Sato, K., Minamizawa, K., Kawakami, N., Tachi, S.: Haptic telexistence. In: ACM SIGGRAPH emerging technologies, Article No. 10, Orlando, USA (2007).
- [2] EXOS, exiii, <http://exiii.jp/exos/> (2017).
- [3] Kim, S., Hasegawa, S., Koike, Y., Sato, M.: Tension based 7-DOF force feedback device: SPIDAR-G. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality Symposium, pp. 283–284 (2002).
- [4] Garrec, P., Friconeau, J.P., Louveau, F.: Virtuouse 6d: A new industrial master arm using innovative ball-screw actuators. In: Proceedings of International Symposium on Robotics, Paris, France (2004).
- [5] Yem, V., Okazaki, R., Kajimoto, H.: Vibrotactile and pseudo force presentation using motor rotational acceleration. In: Proceedings of IEEE Haptics Symposium, pp. 47–51, Philadelphia, USA (2016).
- [6] Minamizawa, K., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: A wearable haptic display to present gravity sensation - preliminary observations and device design. In: Proceedings of IEEE World Haptics Conference, Tsukuba, Japan (2007).
- [7] Solazzi, M., Provancher, W.R., Frisoli, A., Bergamasco, M.: Design of a SMA actuated 2-DoF tactile device for displaying tangential skin displacement. In: Proceedings of IEEE World Haptics Conference, pp. 31–36, Istanbul, Turkey (2011).
- [8] Inaba, G., Fujita, K.: A pseudo-force-feedback device by fingertip tightening for multi-finger object manipulation. In: Proceedings of EuroHaptics 2006 Conference, pp. 475–478, Paris, France (2006).
- [9] Minamizawa, K., Tojo, K., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: Haptic interface for middle phalanx using dual motors. In: Proceedings of the EuroHaptics 2006 Conference, pp. 235–240, Paris, France (2006).
- [10] Pacchierotti, C., Salvietti, G., Hussain, I., Meli, L., Prattichizzo, D.: The hRing: A wearable haptic device to avoid occlusions in hand tracking. In: Proceedings of the 2016 IEEE Haptics Symposium, pp. 134–139, Philadelphia, USA (2016).
- [11] Tamaki, E., Miyaki, T., Rekimoto, J.: PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In: Proceedings of the 2011 SIGCHI Conference,
- [12] Yem, V., Vu, K., Kon, Y., Kajimoto, H.: Softness-hardness and stickiness feedback using electrical stimulation while touching a virtual object. In: Proceedings of IEEEVR2018, Reutlingen, Germany (2018).
- [13] Miyakami, M., Kajimoto, H.: Presenting a Pseudo-Force Sensation Using a Clothespin. In: Proceedings of Asia Haptics 2018, Songdo Convensia Incheon (2018).
- [14] Edin, B.B., Johansson, N.: Skin strain patterns provide kinaesthetic information to the human central nervous system. *Journal of Physiology* 487(1), pp. 243–251 (1995).
- [15] Collins, D.F., Refshauge, K.M., Todd, G., Gandevia, S.C.: Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow, and knee. *Journal of Neurophysiology* 94(3), pp. 1699–1706 (2005).
- [16] Kon, Y., Nakamura, T., Sakuragi, R., Shionoiri, H., Yem, V., Kajimoto, H.: HangerOVER: Development of HMD-embedded haptic display using the Hanger Reflex and VR application. In: Proceedings of IEEEVR2018, Reutlingen, Germany (2018).
- [17] Kon, Y., Nakamura, T., Kajimoto, H.: HangerON: A Belt-type Human Walking Controller Using the Hanger Reflex Haptic Illusion. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, Los Angeles, CA (2017).