

相補的学習支援システムにおけるグローブ型デバイスの開発

芦森 和茂^{*1} 五十嵐 洋^{*2}

Development of Haptic Glove for Complementary Learning Assist System

Kazushige Ashimori^{*1} and Hiroshi Igarashi^{*2}

Abstract – Haptic assist is focused on some fields such as rehabilitation, interaction system, and skill assist. In this research, we suppose a haptic interaction system aiming to adapt those systems. The glove supposed in this research able to measure human finger joint angle and also, the glove can control human finger motion by each finger force feedbacks. By this glove we examined haptic interaction, to attaching the glove for two subjects. And the result, the glove controlled each finger motion as a haptic interaction.

Keywords : Haptics, Learning assist, Haptic Glove, Haptic interaction, Force feedback

1. 序言

触覚はヒトの感覚器官において非常に重要な役割を担っている。触覚から得られる情報は、時としてヒトの五感の中で最も重要な情報を持つとされている視覚を超える重要性を持つ。例えば、繊細な力加減を要求される機械加工においては連続した均等な力が必要とされる場合が存在するが、この作業においてヒトは視覚より得た位置情報よりも、手指からフィードバックされる触覚情報をもとに作業を行う。さらに、バリとり作業や研磨作業においては、加工対象の表面情報を、指でなぞることによって確認する事象が挙げられる。

先にあげた例のように、触覚情報が作業に対して有用な役割を持つことは非常に多い。しかしながら、視覚情報や、聴覚情報におけるカメラやテレビ、マイクやスピーカー等の、情報を記録、再生する手法は触覚においては確立されていない。

そこで、様々なデバイスにおいて、視覚や聴覚だけでなく、触覚を記録する手法が研究されている。触覚を記録することのできるデバイスとして例に挙げられるのが、データグローブやそれに触覚フィードバック機能を追加したハプティックグローブであり、それら研究手法の主な目的は、リハビリテーションに向けた利用や、熟達支援、インタフェースとしての応用である^{[1]~[5]}。本研究では、そのような触覚提示デバイスにおいて、触覚情報を記録するだけでなく、再生し、デバイスの装着者が触覚を体感することのできるシステムを開発する。

2. 研究目的

本研究では、触覚を記録、再生することのできるデバイスを開発する。本研究にて開発するデバイスの応用目的は、学習支援システムに適用することであるが、既存のハプティックグローブのような、リハビリテーションや、仮想現実空間内における操作デバイス等の応用も可能である^{[6][7]}。

さて、本研究の目的である学習支援システムにおいては、学習者が学びやすいシステムであることが重要とされるが、同時に学習者を支援する教示者が支援を行いやすいシステムとなることが重要である。この条件は、支援を行う媒体にかかわらず常に必要とされ、その学習タスクが複雑であればあるほど重要となる。従って、触覚によって学習提示を行う場合にも、学習者が教示者の触覚を提示されるだけでなく、教示者が学習者の触覚の提示を受け、学習者の不慣れな部位を理解することが重要となる。そこで、本研究では触覚情報を教示者、学習者間で互いに伝搬することのできるシステムを開発し、操作者の各指、各関節にフォースフィードバックが可能なグローブ型デバイスの開発を行い、触覚提示による操作者間の指動作制御を目的とする。

3. 提案手法

3.1 グローブの設計：機構

本研究では、各関節にフィードバック可能なグローブ型のデバイスを提案する。本研究が提案するグローブ型デバイスの概観を図1に示す。図は、左手を手前にし、指先を右腕側に、手の平を地面に向けた際の人差し指に装着するデバイスのイメージを示している。グローブには中節 (Middle phalanx)、基節 (Proximal phalanx)、及び手の甲に小型モータを取り付けることによって指の内転、外転以外の各関節におけるフィー

*1: 東京電機大学大学院 工学研究科

*2: 協調ロボティクス研究室 東京電機大学

*1: Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University.

*2: Corporative Robotics Laboratory, Tokyo Denki University.

ドバックを行う。DIP 関節から爪にかけての部位である、爪を有する末節 (Distal phalanx) には指を固定するためのマウントのみが装着されている。

本研究においては、先ほどと同様に、左手を手前にし、指先を右腕側に、手に平を地面に向けた際の手首から指先に向かう方向の軸を x 軸、手の平から手の甲にかけての軸を y 軸、小指から親指にかけての軸を z 軸とする。各関節に取り付けられた小型モータは関節に対して垂直に配置されている。この状態のモータの回転軸は、 y 軸であるため、 z 軸を中心に回転する各関節へのフィードバックができない。そのため、小型の平歯車を z 軸に対して垂直に取り付けることによって、モータの回転軸を y 軸から z 軸に軸替えしている。

指の各節を結合する、DIP 関節、PIP 関節、MP 関節にあたる部位には z 軸を回転軸に持つ自由度が 1 のリンクを有し、各リンクの終端には z 軸を回転軸にもつ自由回転のマウントが取り付けられている。マウントは指にとりつけられ、PIP 関節、及び MP 関節に接続される部位には、その先端のマウントを動作させるためのモータが取り付けられているが、DIP 関節のリンクに関しては、その先に動作点が存在しないため、マウントにモータが取り付けられていない。

さて、各関節に対してグローブが力をフィードバックできる自由度が 1 であるのに対し、リンクは更に 2 の自由度をもつ。ヒトの各関節は、 xy 平面に対して 1 つの自由度しか持たず、

グローブと指の自由度に対して、末節から基節にかけて考える。指は xy 平面に対して、MP 関節を固定端とする 3 リンク機構と考えることができるため、グローブと指は図 2 のように表すことができる。

3.2 グローブの設計：外骨格

グローブの重量は、図 1 に示す 1 本指の機構において、モータ、マウント、電源用のコード等を含め、74[g] である。このことより、グローブ全体の重量は、5 本指機構において、グローブを手固定するためのマウントの重量を 100[g] だと仮定し、約 470[g] となる。

図 1 に示した、本研究が提案するグローブの各指に配置するマウントにおける最大幅は 20[mm] である。ヒトの人差し指、中指、薬指、小指の幅はそれぞれ、約 18[mm]、17[mm]、16[mm]、15[mm] であるため、マウントの幅が指の幅を超えてしまうが、実際に各マウントを指に装着する場合には、マウント下部の穴にマジックテープを通し、指の周りで 1 周まわして固定を行うため、マジックテープの厚み 2[mm] の倍の 4[mm] が指の幅として加算されるため、小指以外のすべての指の上にマウントが収まることになる。小指に関しては、小指の外側にマウントがはみ出しても阻害される指がなく、親指は全ての指の中で最も太いので、この

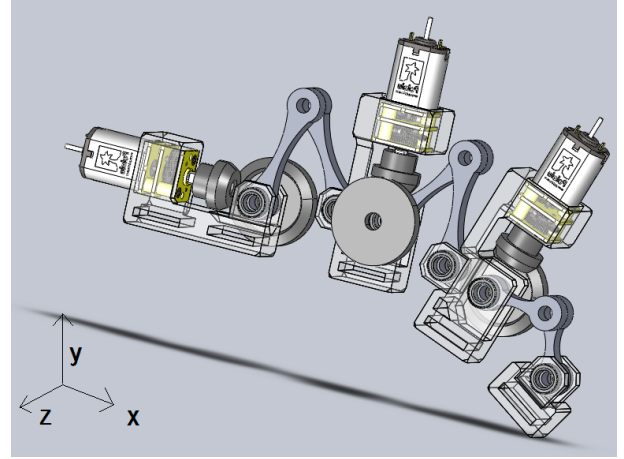


図 1 Block diagram of haptic glove.

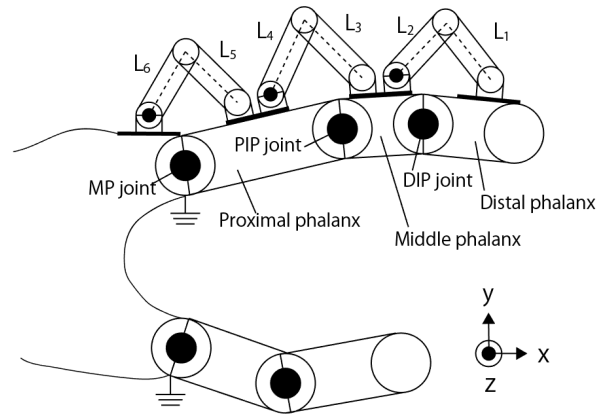


図 2 Block diagram of haptic glove.

グローブの構造では、すべての指に対してグローブのマウント幅が指の幅を満たすことになる。

3.3 グローブの制御

本研究が提案するグローブの制御ブロック図を図 3 に示し、そのときの各パラメータを表 1 に示す。ギヤドモータの制御用モータドライバには ESCON24/2, Nucleo F746ZG を使用した。制御周期は 1[kHz] であるモータのギヤ比は 75:1 であり、傘歯車のギヤ比が 2:1 であるため、全体のギヤ日は 150:1 であり、モータの分解能は 3600[pulses/rev.] である。

ギヤ比の影響、特に傘歯車の導入により、本グローブは指を自然な範囲で動かすことにおいて非常に大きな静止摩擦を有している。グローブ型デバイスにおいて、静止摩擦は触覚に直接作用するパラメータであるため、理想的には 0 であることが望まれる。

触覚のフィードバック制御において、外乱オブザーバ^[8]と反力推定オブザーバ^[9]を用いた制御センサレス力制御^[10]が大西らによって提案されている。本研究ではこれらの手法を取り入れ、制御を行った。

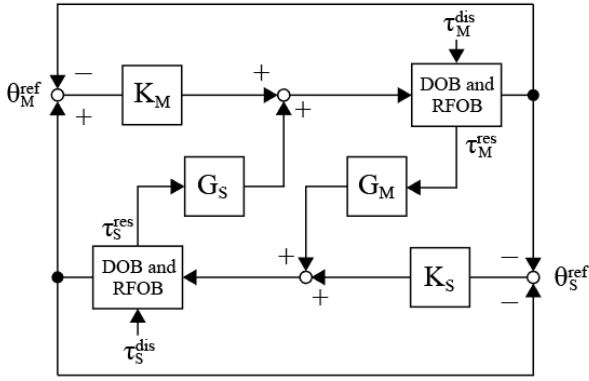


図3 Block diagram of haptic glove.

本研究にて用いたブロック線図を Fig. 3 に示す．図中，熟達者をマスタ，非熟達者をスレイブとすると，変数は表 1 のようになる．

表 1 EXPERIMENTAL PARAMETERS

Parameter	Value
θ_M^{ref}	Position of master
θ_S^{ref}	Position of slave
K_M	Position gain of master
K_S	Position gain of slave
τ_M^{dis}	Disturbance torque of master
τ_S^{dis}	Disturbance torque of slave
τ_M^{res}	Reacyion force of master by RFOB
τ_S^{res}	Reacyion force of slave by RFOB
G_M^{res}	Torque gain of master
G_S^{res}	Torque gain of slave

4. 実験手法

4.1 フリーモーションにおけるスレイブの応答

先に示したグローブを用いて，ヒト-ヒト間の指関節制御を行う．制御の都合上，本実験では図 4 のように，末節から基節にかけての 2 自由度にグローブの関節を制約し，実験を行う．

はじめに，グローブの制御応答を確認するために，グローブのマスタ側を操作者左手の人差し指に装着し，スレイブ側を自由運動ができるように平面に置いた状態で無負荷状態の応答を計測する．操作者は指を完全に伸ばした状態から，DIP 関節，及び PIP 関節を可能な限り折り曲げ，その後指を再び伸ばした．そのときの各関節の応答を示したものを，図 5 に示す．

4.2 マスタ-スレイブ間の指関節制御

続いて，ヒト-ヒト間の各関節制御を行うため，マスタ側，スレイブ側共に操作者がグローブを取り付け，

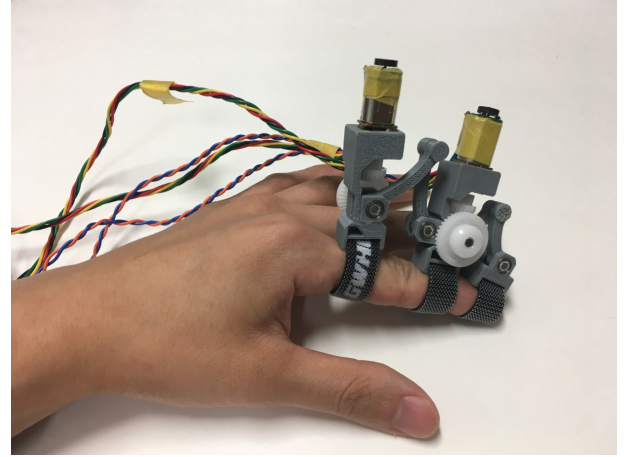


図 4 Block diagram of haptic glove.

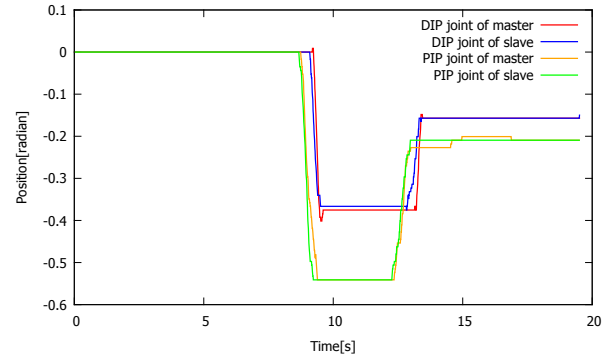


図 5 Block diagram of haptic glove.

マスタ-スレイブ間の制御を行う．実験ではマスタ側の操作者がグローブをつけた左手人差し指を滑らかに駆動させる．そのとき，スレイブ側は目を閉じ，グローブから伝わってくる力に沿うように指を駆動させた．このときのマスタ-スレイブ間の各関節の応答を図 6 に示す．

5. 実験結果

5.1 フリーモーションにおけるスレイブの応答

図 5 より，マスタ側が指を折り曲げた状態から約 0.1 秒後にスレイブ側がマスタ側と一致することが読み取れる．本実験に使用したモータは，ギヤボックス及びかさ歯車によってトルクが 150 倍になっている．しかしながらその反面，モータの速度は 1/150 になっているため，制御のリアルタイム性に影響が現れている．また，10[sec.] における誤差は 0.009[radian] であり，約 9[sec.] の地点における DIP 関節のオーバーシュートは約 0.3[radian] である．

5.2 マスタ-スレイブ間の指関節制御

図 6 より，DIP においてはマスタ側が微小に発振しながらも，両関節の角度が一致していることがわかる．この発振は，指にグローブを固定する際の固定力が弱

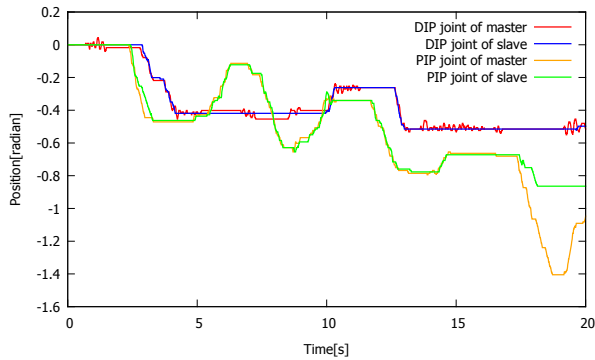


図6 Block diagram of haptic glove.

かったため発生したと考えられる。人間の皮膚はやわらかく、変形するため、マスター-スレイブ間の指の固定を均一にする必要がある。

また、PIP 関節において、マスタ側の角度が約 17[sec.] 付近において大きくオーバーシュートしていることが読み取れる。これは、実験中このマスタ側のマウントが指の甲に対して水平でなくなってしまい、中節のマウントに引き込まれたことによって発生した誤差である。先に述べた発振の原因と同様に、これも指がやわらかくあるために生じる誤差である。

6. 結言

本研究では、ヒト-ヒト間の触覚伝達システムを利用することによる教示方法、相補的教示支援に向けた、操作者の指の各関節の制御を行うグローブ型デバイスの提案を行った。実験では、グローブがもつフィードバック機能によって実際に操作者 2 名による指の各関節制御が行われた。結果としては、本実験で提案したデバイスの機構が、各関節ごとに独立にフィードバックを行えることを示した。

しかしながら、実験において生じた発振や、オーバーシュート、制御の遅延等が生じた。本研究で採用した力センサレスバイラテラルシステムは、モータの静止摩擦以下の力は測定することができない。また、マウントを指に固定したときの指に加わる圧力も測定できない。そこで、本研究では今後の展望として、グローブに加わる外力を測定する方法として、グローブのマウントと指の間に薄型圧力センサ FSR 等を挿入し、これらの問題を改善する。

7. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 15K05912 の助成により行われた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu and R. Boian, "The Rutgers Master II-new design force-feedback glove," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 7, no. 2, pp. 256-263, Jun 2002.
- [2] S. H. Winter and M. Bouzit, "Use of Magnetorheological Fluid in a Force Feedback Glove," in IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 15, no. 1, pp. 2-8, March 2007.
- [3] Pihas Ben-Tzvi: "Sensing and Force-Feedback Exoskeleton(SAFE) Robotic Glove", IEEE Transactions on natural systems and rehabilitation engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 992-1002, 2015
- [4] J. Blake and H. B. Gurocak, "Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 14, no. 5, pp. 606-615, Oct. 2009.
- [5] Sungman Park, Yeongtae, Joonbum Bae: "A Teleoperation Interface with a Motion Capture System and a Haptic Glove", International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Vol. 13, pp. 544-549, 2016
- [6] K. Ashimori and H. Igarashi, "Complementai learning assist for musical instruments by haptic presentation," 2018 IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), Tokyo, 2018, pp. 175-180.
- [7] K. Ashimori and H. Igarashi, "Skill assist system for musical instruments by skilled players force feedback," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 2008-2013.
- [8] S. Komada, M. Ishida, K. Ohnishi and T. Hori, "Motion control of linear synchronous motors based on disturbance observer," Industrial Electronics Society, 1990. IECON '90., 16th Annual Conference of IEEE, Pacific Grove, CA, 1990, pp. 154-159 vol.1.
- [9] T. Murakami, R. Nakamura, F. Yu and K. Ohnishi, "Force sensorless impedance control by disturbance observer," Conference Record of the Power Conversion Conference - Yokohama 1993, Yokohama, Japan, 1993, pp. 352-357.
- [10] T. Murakami, F. Yu and K. Ohnishi, "Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, Apr 1993.