



仮想環境での振動触覚グローブを用いた力分布の提示による 把持動作の強調表現

Emphasizing Grasping Movements through Force Distribution Presentation
Using Vibration Haptic Gloves in a VE

伊藤那月¹⁾, 五十嵐洋²⁾

Natsuki ITO, Hiroshi IGARASHI

1) 東京電機大学 工学研究科 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5)

2) 東京電機大学 電子システム工学科 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5)

概要: 本研究では物体を把持するときの手の各部にかかる力を「力分布」として、この力分布を振動触覚グローブで再現した。これにより、仮想環境での把持動作の操作性向上を目的とした。具体的には、現実の環境で物体を把持する際の力分布を測定し、仮想物体を把持するとき振動振幅を制御して力分布を再現した。また現実と異なる力分布を再現した場合、把持動作にどのような影響があるか調査した。実験の結果、実際の操作速度よりも速い速度での力分布を基に振動提示したところ仮想物体の操作加速度が低下し、過剰な操作を抑制しうることが明らかとなった。

キーワード: 把持感覚, 振動触覚グローブ, 力分布

1. はじめに

遠隔での教育や開発など様々な作業において仮想環境の利用が注目されている [1]。自身と仮想物体とのインタラクションにおいて、触覚提示は直感的でスムーズな作業に寄与すると示されている [2]。

さらに触覚提示デバイスのウェアラブル化により、装着者の自由な動作を妨げない触覚提示が可能となる。

ウェアラブル触覚デバイスは数多く提案されており、それらの提示手法は大きく2つに分類できる。1つは実際に力を加えて仮想物体への接触時の反力を再現する手法である。先行研究では、ワイヤによる手の牽引 [3] や複数のモータを手に載せ指先の位置を制御 [4] するもの、せん断力や圧迫を指先に提示 [5] するデバイスがこれに該当する。もう一方は実際の力とは異なる振動を用いる手法である。先行研究では、振動によりスイッチのクリック感 [6] や仮想物体との衝突感を再現した [7]。また仮想空間内の物体位置をVRゴーグルに装着した振動子によって通知する研究もある [8]。前者は大型なアクチュエータが必要であり、複雑な機構となるため、それに伴う重量増加や触覚提示部位の限定される。後者の振動提示は小型軽量のデバイスで実装が可能であり、手だけでなく身体全体への触覚提示も容易に実装可能である。

そこで本研究では軽量、小型で実装可能である振動触覚グローブに注目した。しかし振動は力の代替刺激である。そのため力の制御が伴う作業に向けた提示方法の検討が必要である。

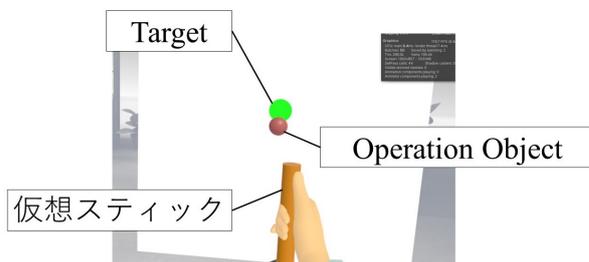


図 1: 仮想環境での追従操作

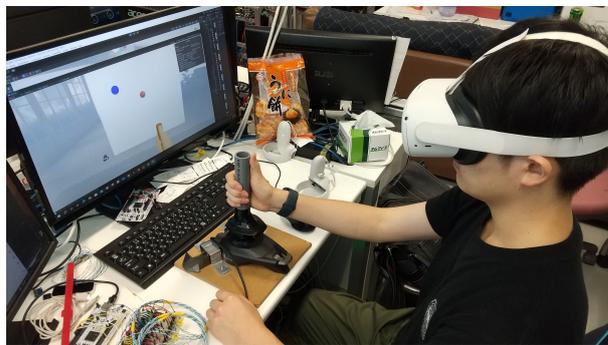


図 2: 力分布測定環境

教育や開発の作業においては物体の「掴む」「保持」「操作」の一連の把持動作が頻繁に行われる。よって我々は把持動作の表現が仮想環境を用いた作業の操作性向上に重要であると考えた。先行研究では把持した仮想物体のせん断力

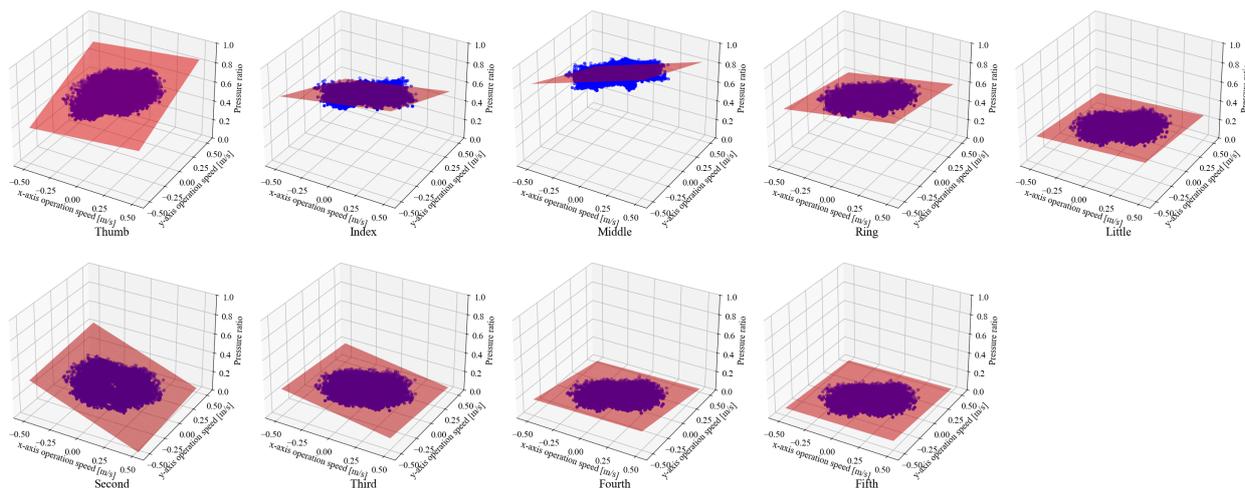


図 3: 力分布の測定結果

を振動により再現し、手の向きを誘導する手法が提案されている [9]。また手全体に複数の振動モータを設置して仮想物体の形状を識別させる手法が提案された [10]。これらの先行研究での振動提示部位や振動方法の決定方法については、「物体との接触の有無」や使用する指に関係無く指の位置のみで「物体の接触時に生じる物理量」をもとに決定された。つまり、実際の把持動作における各指や手掌部の使用具合や機能の違いを考慮しない振動提示であると言える。

そこで我々は道具を把持したときの力分布に着目した。把持姿勢や道具の重さ・大きさに応じて手にかかる力分布は変化する。実際に、金づちを使用する場合において、把持、振り上げ、振り下ろして力分布が異なった [11]。またペンや球体、本などの物体を把持する 25 種類の把持姿勢において力分布を測定した先行研究がある [12]。この研究は 25 種類の把持姿勢を力分布の情報から分類可能であるとした。

このことから力分布と道具の操作には密接な関係があり、仮想物体の操作においても力分布の再現が操作性向上に繋がる。そこで本研究では実際に物体を把持したときの力分布を分析する。そして力分布を基にして提示振動を調整することで仮想物体の把持動作にどのような影響を与えるか調査することを目的とする。

2. 追従動作における力分布の測定

2.1 実験概要

本実験では実物のジョイスティックを操作した場合の力分布の変化を測定した。図 1 に示すよう仮想環境内のジョイスティックにより二次元平面内で、四葉の正葉曲線型の経路を 30 秒周期で循環運動する追従対象に操作対象を追従させる作業を行った。実験の際、経路線により追従方向を予想することを防ぐため経路線は非表示としている。被験者は図 2 のように HMD を装着して実物のジョイスティックを把持しつつ仮想環境内でも同じ位置に表示された仮想ジョイスティックを把持する。実物のジョイスティックは把持する上

で均等に力が掛かるように円柱状のハンドルを採用している。さらに力分布を測定するため、各指先、第 2 から第 5 中手骨頭に計 9 個の圧力センサを設置した。手の大きさには個人差があるため圧力センサは各部位に正確に設置するために個別に固定している。

20 代男性 6 人の被験者に対して事前に操作系に慣れるために 60 秒の練習を行った。その後実験の本番として 90 秒間の追従作業を行った。ジョイスティックの把持姿勢は、右手の各指先と中手骨でジョイスティックの左右を挟み、拇指を縦て手前から押し当てる形で全被験者統一させた。

2.2 結果・考察

力分布は全被験者のデータをジョイスティックの X 軸の操作速度 V_x と Y 軸の操作速度 V_y に対する力分布を正規化した値により評価した。図 3 に各測定部位の結果を示す。図 3 では力分布の推移を最小二乗法により平面に近似することでジョイスティックの操作速度に対する力分布の推移を推測している。力分布の主な変化部位は拇指、示指、中指、第二中手骨頭であった。拇指は Y 軸の操作速度に対して手前から奥に倒す速度が速いほどより大きな力を加える。示指、中指ではジョイスティックを左から右に倒す速度が速いほどより大きな力を加えている。また第二中手骨頭では X 軸の操作速度に対して左側にジョイスティックを倒す速度が速いほど大きな力を加える。環指、小指、第四、第五中手骨頭では力分布の変化が小さく、被験者全体の把持方法として手の拇指寄りの部位を主に使用してジョイスティックの操作を行っていたのだと分る。これはジョイスティック操作において、根元から離れた部位を持って操作する方が仕事の原理のように操作する距離は増えるものより小さな力で操作できるからでないかと考えられる。この結果よりジョイスティックの操作では手各部位を使い分けて操作しているとわかる。また手掌部に比べ指先の方が加える力が大きい。これは指先では狭い範囲で力を加え細かい操作をしており、手掌部では力を分散させ把持対象を支えるような役割分担

があるからと考えられる。

3. 追従動作における振動提示

3.1 実験概要

本実験では仮想のジョイスティックのみを把持して振動触覚を与えた場合の操作への影響を調査した。実験環境として力分布の測定実験と同様の追従作業を行う。被験者は図4に示す振動触覚グローブを装着して、図5のように実物のジョイスティックは把持せず、仮想のジョイスティックのみを把持して作業する。振動触覚グローブは圧力センサと同じ部位に設置した。手の大きさには個人差があるため振動モータは各部位に正確に設置するためにゴムベルトにより図4のように個別に固定している。使用したHMDはMeta Quest2であり、仮想のジョイスティックの操作において本機のハンドトラッキング機能により把持と操作を実現している。振動提示にはHAPTIC Reactorを使用しており、周波数は160 [Hz] 固定として振幅を0~3.3 [V] の範囲で推移させることで力分布を再現した。

20代男性6人の被験者に対して事前に操作系に慣れるために60秒の練習を行った。ただし操作途中でジョイスティックを離してしまったり、著しく追従精度が低い場合は改善するまで練習を行わせた。その後実験の本番として以下の五つのパターンでそれぞれ90秒間の追従作業を行い操作特性を測定した。各条件は被験者ごとにランダムな順番で実施している。

- 振動なし
- 力分布に合わせた振動
- 実操作の二倍の速度での力分布
- 実操作の半分の速度での力分布
- 操作速度に比例した振動

振動なしの条件では操作条件を揃えるために振動グローブは装着したままで操作を行わせた。力分布に応じた振動提示では仮想のジョイスティックの操作速度から、力分布の測定実験で求めた手各部位の力分布の推測に合わせて振動振幅を制御した。操作速度に比例した振動では操作方向に関係なく、速度に対してすべての振動子が均一に振幅を変化させ、速度が速いほど振動振幅が大きく、停止している場合は振動しない。

3.2 結果・考察

追従対象に対する操作対象の追従誤差の標準偏差を図6に示す。各条件間での追従誤差の標準偏差に有意差は確認されなかった。図6より振動なしの条件が他の条件に比べてやや追従誤差が大きいとわかる。しかし各振動の条件間では差が小さく、振動提示手法による追従誤差への影響は小さいのではないかと考えられる。

ジョイスティック操作の加速度の標準偏差を図7に示す。各条件間での加速度の標準偏差に有意差は確認されなかった。図7より振動なしの条件に比べ力分布に合わせた振動と実操作の二倍の速度での力分布に合わせた振動の条件に

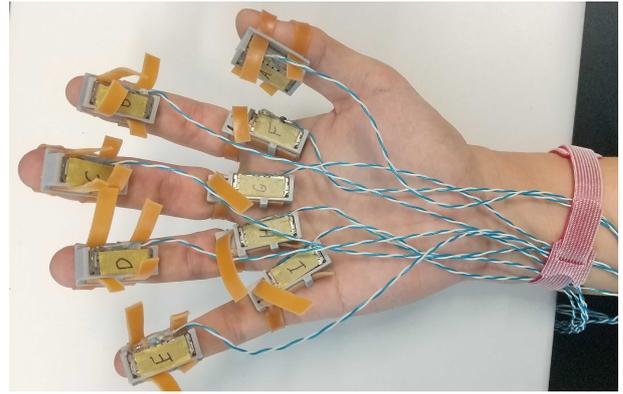


図4: 振動触覚グローブ

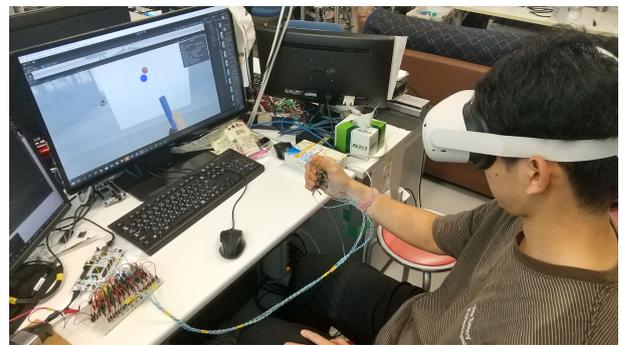


図5: 振動提示環境

において操作の加速度が低下するとわかる。さらに実操作の二倍の速度での力分布の条件では加速度がより小さく、振動が過剰な操作を抑制していると考えられる。対して速度に合わせた振動では他の条件に比べ加速度が大きいことから実際の動作にすぐわない触覚提示では過剰な操作を誘発するのではないかと考えられる。また二倍の速度での力分布では加速度標準偏差の分散が他の条件に比べ最も小さくなっていることから、どの被験者にとっても操作のしやすい振動提示条件であったのではないかと考えられる。

4. おわりに

本研究では実際に物体を把持したときの力分布を測定し、得られた力分布から手各部の使用具合に応じた振動提示を行った。そして仮想環境での追従作業に対してどのような影響を与えるか調査した。実験結果よりジョイスティックの操作において手各部位で力の掛け具合が変化しており、それぞれ役割を持っていることが確認された。そして力分布を基にした振動提示により操作の加速度が減少すると示唆された。さらに実際よりも操作速度が速い場合の力分布を基にした振動提示により加速度が減少しており、より無駄のない追従動作が実現できると示唆された。

今後の展望として、力分布を元にした振動提示において仮想物体の操作を誘導、熟達が可能かについて検討する。また今回の実験では指定された経路を追従する内容であったが、より複雑な経路や自由操作など更なる自由度を持たせ

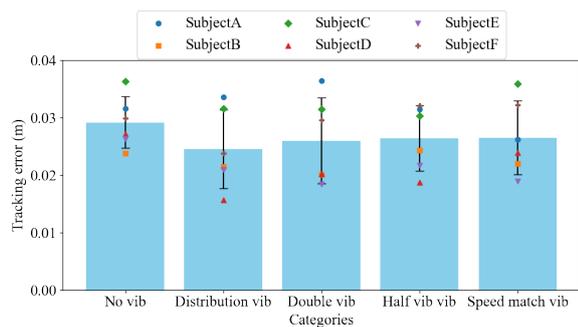


図 6: 追従誤差の標準偏差

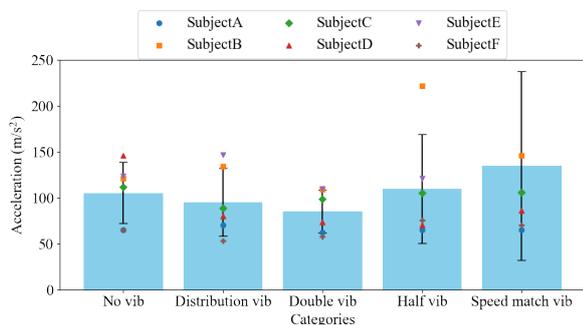


図 7: ジョイスティック操作における加速度の標準偏差

た場合での振動提示に対する操作への影響を調査していきたい。力分布は物体の操作に応じて変化するため単調でない操作においてより大きな影響があると考えられる。

参考文献

- [1] M. L. Chenechal, T. Duval, V. Gouranton, J. Royan and B. Arnaldi: “Vishnu: virtual immersive support for HelpiNg users an interaction paradigm for collaborative remote guiding in mixed reality”, 2016 IEEE Third VR International Workshop on Collaborative Virtual Environments (3DCVE), pp. 9-12, 2016.
- [2] J. A. Fishel et al: “Tactile Telerobots for Dull, Dirty, Dangerous, and Inaccessible Tasks”, 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 11305-11310, 2020.
- [3] Cathy Fang, Yang Zhang, Matthew Dworman, Chris Harrison, “Wireality: Enabling Complex Tangible Geometries in Virtual Reality with Worn Multi-String Haptics”, CHI '20: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-10, 2020.
- [4] Jerome Perret, Quentin Parent, Bernard Giudicelli, “HGlove: A wearable forcefeedback device for the hand”, 14th annual EuroVR conference, 2017.
- [5] M. Gabardi, M. Solazzi, D. Leonardis and A. Frisoli, “A new wearable fingertip haptic interface for the ren-

dering of virtual shapes and surface features”, 2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 140-146, 2016.

- [6] Fukumoto Masaaki, Sugimura Toshiaki, “Active Click: Tactile Feedback for Touch Panels”, CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 121-122, 2001.
- [7] J. Martinez, A. Garcia, M. Oliver, J. P. Molina and P. Gonzalez, “Identifying Virtual 3D Geometric Shapes with a Vibrotactile Glove”, in IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 42-51, 2016.
- [8] V. A. de Jesus Oliveira, L. Brayda, L. Nedel and A. Maciel, “Experiencing guidance in 3D spaces with a vibrotactile head-mounted display”, 2017 IEEE Virtual Reality (VR), pp. 453-454, 2017.
- [9] T. L. Baldi, N. D’Aurizio and D. Prattichizzo, “Hand Guidance Using Grasping Metaphor and Wearable Haptics”, 2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 961-967, 2020.
- [10] J. Martinez, A. Garcia, M. Oliver, J. P. Molina and P. Gonzalez, “Identifying Virtual 3D Geometric Shapes with a Vibrotactile Glove”, in IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 42-51, 2016.
- [11] 菊池季比古, 佐藤滋, 中田隆夫, 佐野吉雅: 「把持動作と道具の操作」, The role of fingers in tool manipulation, 人間工学 第 28 卷 特別号, pp. 230-231, 1992.
- [12] B. Abbasi, E. Noohi, S. Parastegari and M. Zefran, “Grasp taxonomy based on force distribution”, 2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), pp. 1098-1103, 2016.