



装着型力覚提示デバイスを用いた反力表現とその知覚特性評価

信川凜佳¹⁾, 前川和純²⁾, 門内靖明²⁾, 稲見昌彦²⁾

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1,
{azumi, monnai, inami}@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

概要: 手に把持した道具に対して力覚を提示する装着型デバイスを提案する。このデバイスで反力を提示した際の知覚特性を評価するため、接地型力覚提示デバイスを基準刺激として、反力のばね定数を調整法により比較する実験課題を実施した。その結果、装着型デバイスでは接地型に比べて感じる力覚にばらつきがみられた。特に、基準刺激のばね定数が大きな値のときに、それと同等に感じる刺激の大きさには大小両極への偏りがみられた。

キーワード: 力触覚、装着型デバイス、反力フィードバック

1. はじめに

作業や技能を適切に実行したり、VR 空間で臨場感を実現させたりするには、触覚が重要となる。VR の機器として力触覚を提示するデバイスの開発が進められており、代表的なものに PHANToM が挙げられる [1]。PHANToM が用いられている一例に外科手術のリハーサルシステムがある [2]。ただし、PHANToM のような接地型力覚提示デバイスは、机などの上に置くことができないと使用できず、可動範囲も手首を中心とした一部分に限られている。もし、装着型デバイスによって PHANToM と同様の機能を実現できたとすると、接地型と比較してより広範な利用が可能になると考えられる。

そこで、図 1 に示すような、手に把持した道具に対して力覚を提示する装着型デバイスを提案する。既存道具に対して力触覚を付与することで触覚の拡張現実や技能拡張を試みた事例として、野嶋らによる SmartTool が挙げられるものの、これは接地型の触覚ディスプレイを用いている [3]。また、装着型かつ道具把持型の触覚提示デバイスとしては廣瀬らのが研究があるが、こちらはデバイス自体が装着者の背中に接地しているため、本研究とは構成が異なる [4]。提案デバイスでは腕と指先の間に内力を発生させており、指先が装着部である腕と比べて敏感であることによって、提示する内力を外力のように錯覚させることができる。過去には岩田らによって比較的近いデバイスが提案されているものの、これは VR 空間での触覚提示を目的としていたことに加え、提示される力覚が実際の外力と比較してどのような知覚特性を持っているかは明らかになっていない [5]。よって、提案デバイスで提示する力が実際の外力と比べてどのように知覚されるのかを解明することを最終的な目標とし、本論文では特に仮想的な弾性体の反力表現に着目して実験を行った。具体的には、接地型デバイスのペンを左手に持ち、装着型デバイスを右手に装着して、調整法によって反力の主観的等価点を計測した。

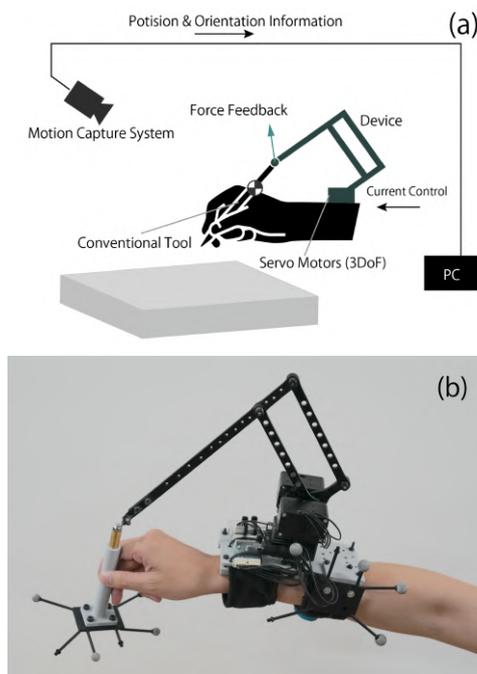


図 1: 提案デバイスの概要 (a) と概観 (b)

2. 装着型デバイスの動作原理

目的の大きさ・方向に力を提示するための計算を以下に示す。

まず、図 2 のように、目標力を $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ 、各モータの角度を $\mathbf{q} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ 、各モータのトルクを $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 、手先の位置を $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ とおく。図 2 より

$$\begin{cases} x = k \sin \theta_1 \\ y = l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 \\ z = k \cos \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

平行リンクの平面内に着目して、

$$\begin{cases} k = l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_3 \\ y = l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (2)$$

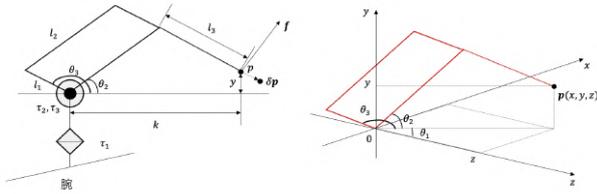


図 2: 装着型デバイスの機構

(2) 式より (1) は

$$\begin{cases} x = l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - l_1 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ y = l_2 \sin \theta_2 - l_3 \cos \theta_3 \\ z = l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (3)$$

と書ける。これを微分して整理すると、

$$\begin{cases} \dot{x} = (l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3) \cdot \dot{\theta}_1 \\ \quad - l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 + l_3 \sin \theta_1 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_3 \\ \dot{y} = l_2 \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 - l_3 \cos \theta_3 \cdot \dot{\theta}_3 \\ \dot{z} = (l_3 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 \\ \quad - l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 - l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 \cdot \dot{\theta}_3 \end{cases} \quad (4)$$

ここから、

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J(\mathbf{q}) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となるように $J(\mathbf{q})^{-1}$ をおく。仮想仕事の原理より、

$$\mathbf{f}^\top \delta \mathbf{p} = \boldsymbol{\tau}^\top \delta \mathbf{q} \quad (6)$$

また、手先と関節変位の関係より

$$\delta \mathbf{p} = J(\mathbf{q}) \delta \mathbf{q} \quad (7)$$

(6)、(7) より

$$\boldsymbol{\tau} = J^\top(\mathbf{q}) \mathbf{f} \quad (8)$$

各モータの電流値を $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^3$ 、モータのトルク定数を k とすると、 $\boldsymbol{\tau} = k \mathbf{i}$ より、 $\mathbf{i} = \frac{1}{k} \boldsymbol{\tau}$ をモーターに入力すれば、目標とする力を提示できる。

3. 実験方法

3.1 システム構成

実験環境の模式図を図 3 に示す。実験環境は、PHANToM 型デバイス、装着型デバイス、位置計測のための光学式モーションキャプチャシステム、両手が塞がった被験者が操作を行うためのフットペダル、それらと通信・制御を行うパーソナルコンピュータからなる。PHANToM 型デバイスとして、今回は 3D Systems 社製の Touch² を用いた。装着型デバイ

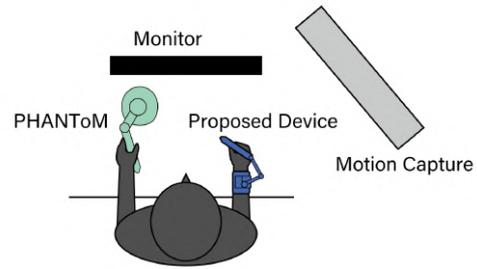


図 3: 実験の模式図

表 1: PHANToM から提示した力における k の値

index	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
value	0.05	0.1	0.25	0.4	0.5

表 2: 装着型デバイスの力における k の初期値

index	k_s	k_l (ID=1~5)	k_l (ID=6~8)
value	0.01	0.6	0.55

スで用いたモータは Dynamixel 社製の XM430-W210-R³ であり、位置計測には OptiTrack 社製の V120: Trio⁴ を使用した。また、制御周期は位置計測では 120 fps、PHANToM では 240 fps、装着型デバイスでの Python プログラムでは 20 fps である。

各装置から提示される力 f に関しては、PHANToM と装着型デバイスそれぞれのペン先の y 座標を取得して、以下のように与えた。

$$f = \begin{cases} \max(-ky, 3.3) \text{ N} & (y < 0) \\ 0 \text{ N} & (y \geq 0) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、上向きが正であり、画面上の平面との相対座標を y 、ばね定数を k とした。また、3.3 N は使用した PHANToM の瞬間最大提示力である [6]。PHANToM から提示した 5 種類の力における k の値を表 1、装着型デバイスにおける力の初期値 2 種類の k の値を表 2 に示す。ただし、ID は被験者ごとに割り当てた識別子である。なお、実験途中で装着型デバイスのストッパーが外れ、力が大きいときに装置の可動域を超えてしまうエラーが頻発したため、初期値を途中から変更している。

3.2 実験手順

被験者は計 20 回 (PHANToM の k が 5 種類、装着型デバイスの k の初期値が 2 種類の、全通りの組み合わせを 2 回ずつ) の調整法を用いた実験課題を行った。この課題ではまず、PHANToM のペンを左手に持ち、装着型デバイスを右手につけて、両手を同様に上下させて仮想的な平面に上か

¹

$J(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 & -l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ 0 & l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \\ l_3 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 & -l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{bmatrix}$

²<https://www.ddd.co.jp/haptics-devices/3d-systems-touch/>

3d-systems-touch/

³<https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xm430-w210/>

xm430-w210/

⁴<https://www.optitrack.jp/products/camera/trio.html>

ら触れた。なお、反力が提示される閾値を分かりやすくするため、平面と、PHANToM のペン先に連動して動くカーソルを表示した画面を被験者に見せた。その際、PHANToM からの反力と等しく感じられるように、足元のペダルの左右を踏むことで装着型デバイスにおけるばね定数 k を増減させた。被験者は 8 人であるが、計 20 回の試行を完了しなかった 1 人に関する結果は除外した。被験者は実験課題についての説明を受けた後、数回の練習試行を行ってから実験に臨んだ。

4. 実験結果

横軸に PHANToM の k 、縦軸に装着型デバイスの k をとり、7 人の被験者の全試行と、PHANToM の k の値ごとの装着型デバイスの k の平均値、またそこから算出した近似関数をプロットすると図 4 のようになった。

図 4 より、PHANToM の k の値に関わらず、装着型デバイスでは小さい値と大きい値に偏っているように見える。これは装着型デバイスの初期値が大小に分かれているためではないかと考え、次に、初期値の大小それぞれで平均値と近似関数を表示すると、図 5 のようになった。

5. 考察

図 5 より、例えば ID=3 では平均値が座標平面の上下で分離しているが、被験者全体の傾向としては断言できない結果となったため、大小の偏りには別の原因があると思われる。よって、今回は図 4 における全データの散らばり具合から読み取れることを考える。

まず、近似関数を見ると、PHANToM の力の増減に比べて、装着型デバイスでは変化が少ない。この原因として、PHANToM では手先に力が加わるのに対して、装着型デバイスでは手首や前腕等にも反動が来るため、手先の力変化が少ない場合でも感じる変化は大きくなった可能性が挙げられる。また、今回の実験条件では右手と左手が受ける反力を比べているため、両者の感覚が異なるということも原因として考えられる。

さらに、全試行の結果に着目すると、PHANToM の力の大きさに関わらず、装着型デバイスの k は 0.1 以下から 0.5 以上まで幅のある値をとっていることも多い。また、PHANToM の k が小さな値のときはばらつきが少なかった被験者でも、大きな値では大小への偏りが見られる。これらの原因としては、被験者が 20 回の試行の中で慣れていったためだんだん精度が上がったことや、 k の値が大きい状態では値を調節する際の相対的な変化が少ないため、絶対的な変化量は大きくなったことが考えられる。一方で、被験者の中には「力が 0 なのか、微弱な力が加わっている状態なのか、もしくはエラーでデバイスが動いていないためペダルを踏んでも力が変わっていないのか判別がつかない」という声もあった。よって、 k の値が小さい状態でどれほど力の増減を感じ取れるかに関しては、個人差もあると思われる。また、特に連続して実験を行った際に、デバイスの動作が停止してしまうエ

ラーが発生することがあり、このことが装着型デバイスのパフォーマンスや実験条件の一貫性を損なった可能性がある。今後の研究ではこの点を検証し、改善する必要がある。

6. おわりに

手に把持した道具に対して力覚を提示する、装着型デバイスを提案した。また、このデバイスの知覚特性を評価するために、非装着型デバイスである PHANToM のペンを左手に持ち、装着型デバイスを右手に装着して、調整法によって両者から受ける力覚フィードバックの主観的等価点を計測する実験課題を実施した。PHANToM の力の大小に比べて装着型デバイスでは変化の幅が少なく、PHANToM の力の大きさによらず装着型デバイスでは大小様々な値をとったり、特に PHANToM の k が大きな値のときに大小への偏りが見られたりした。

今後の課題としては、まず、結果に現れた差異がアーティファクトや外部的な要因によるノイズである可能性も考えられるため、それらの影響を取り除けるような実験条件の構築が必要である。今回の実験に影響を与えた人間の感覚や特性としては、装着型デバイスを装着した右手に加わる重みや圧迫感、左右差、慣れや集中力が挙げられる。例えば、考察で言及した左右差については、実験方法を工夫して同じ手で比べることでなくすことができる。また、今回と同様の実験を「右手も左手も PHANToM」や「左手に装着型デバイス・右手に PHANToM」、「利き手に装着型デバイス・もう一方を PHANToM」等の多様な手の組み合わせで行うことで、左右による感覚差による影響を検討することができる。さらに、装着型デバイスに固定値を与えて PHANToM の値を調整してもらったり、手を動かすのではなく画面上の平面が動いて衝突してくるような実験系を作成したりすることで、感覚差によるノイズを減らせる可能性がある。

また、今回の実験で得られたデータにはばらつきがあったため、被験者数や試行数を増やしたり、より連続して安定した実験を行える環境を作ったりすることで、より詳細な原因を調査する必要がある。

そして、最終的な目的は、装着型と接地型でどのような違いや限界があるのかを明らかにすることで、装着型デバイスを適切に設計できるようにすることであるが、今回の実験のような仮想的な弾性体への触感を近づけるという点においては、力の式をさらに検討することができる。例えば、今回は手先の位置に依存する関数としていたが、力を定数として力そのものを増減させた場合も興味深い結果が得られるかもしれない。さらに、手首と手先の位置関係による感覚への影響を補完するような関数があると、両デバイスから受ける感覚が近くなると予想される。

また、興味深い点として、どのような PHANToM の k に対しても、対応する装着型での k は 0.1 付近であると一度は判断した被験者が多かったことが挙げられる。すなわち、装着型デバイスでは、提示する力の大きさは同じでも、容易に異なる大きさの力であると感じさせることができる可

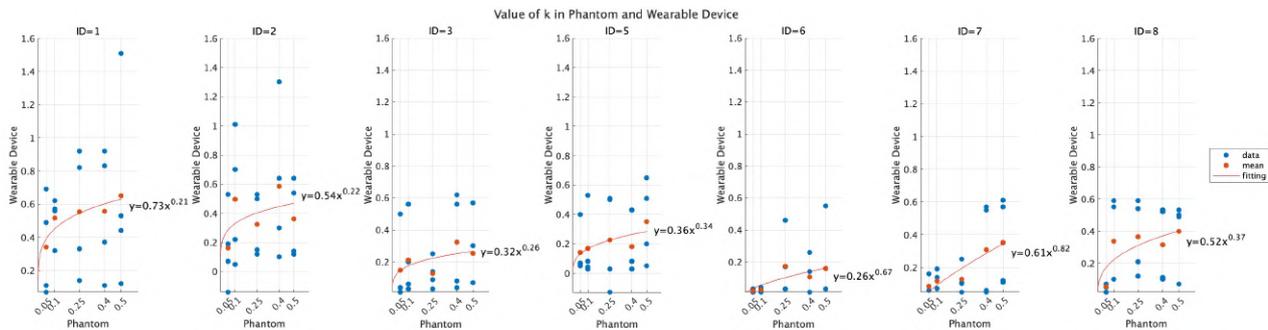


図 4: 全被験者の結果

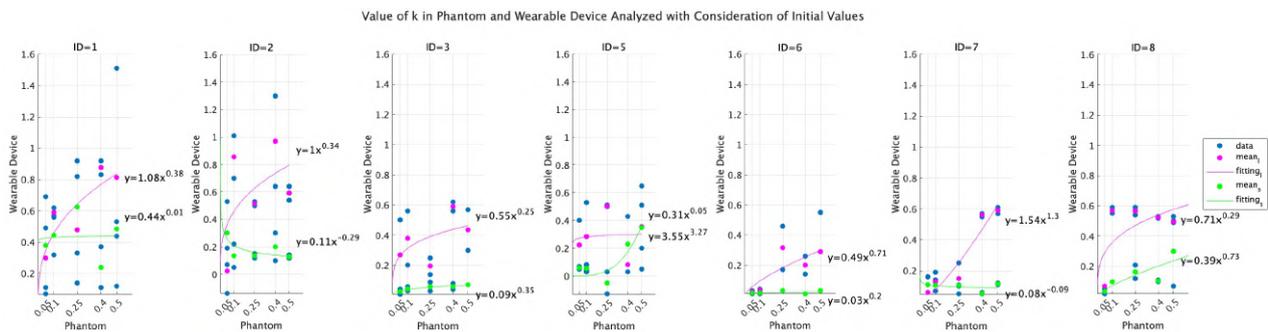


図 5: 装着型デバイスの初期値を考慮した全被験者の結果

性能がある。このことは装着型デバイスのさらなる応用への見込みを示す。

参考文献

- [1] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Vol. 55, pp. 295–300. Chicago, IL, 1994.
- [2] Timothy R. Coles, Dwight Meglan, and Nigel W. John. The role of haptics in medical training simulators: A survey of the state of the art. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 4, No. 1, pp. 51–66, 2011.
- [3] T. Nojima, D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi. The smarttool: a system for augmented reality of haptics. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002*, pp. 67–72, 2002.
- [4] M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito, and M. Nakashige. Hapticgear: the development of a wearable force display system for immersive projection displays. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 123–129, 2001.
- [5] 岩田洋夫, 中川博憲. 着用型力覚帰還ジョイスティック. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 22.28, pp. 15–18, 1998.
- [6] 株式会社スリーディー. 3d systems touch – hid < タッチ > | 株式会社スリーディー. <https://www.ddd.co.jp/haptics-devices/3d-systems-touch/>, 参照日: 2023/7/7.