

[研究助成 (A)]

マイクロモータを用いた触覚情報伝達インタフェース

2231016



研究代表者

岡山大学 学術研究院
環境生命自然科学学域

准教授

芝 軒 太 郎

[研究の目的]

近年、VR 技術の発展はめざましく、エンターテインメントや教育、医療などの幅広い分野で活用が期待されている。人は視覚、聴覚、味覚、嗅覚、触覚などの多種多様な感覚器を用いて外界のさまざまな情報を取得しているがその大部分を視覚と聴覚に依存している。そのため、例えば VR 体験において、主にヘッドマウントディスプレイなどを使用した視覚刺激や聴覚刺激が利用されているが、近年の VR 技術の発展に伴い、触覚情報伝達に関する検討がさまざま行われるようになってきている。

触覚には主に筋、腱、関節などで起こる深部感覚と皮膚表面で起こる皮膚感覚があり、皮膚感覚には触覚、圧覚、痛覚、冷覚、温覚などが存在する。本研究では主に皮膚感覚、その中でも触覚と圧覚に着目する。従来、指先へ圧力を生じさせることを目的とした研究や、指先表面の接線方向へ動作を生成する研究などが行われてきた。また、Peizhi らによって全方向への連続的な移動を指先にフィードバックするデバイスや、Samuel らによる指腹面に 3 自由度の力覚提示を実現するデバイスなどが開発されており、重量、摩擦、剛性などの情報を複数の方向に提示できている。Maeda らは 2 個の DC モータを駆動に用いる 2 つの回転軸で指側面を挟み込み、さらに爪側に振動モータを配置したデバイスを開発し、指側面のモータと爪側のモータの動作を組み合わせることで粗さなどの

表面の質感からスイッチなどの機械的な感覚までを提示可能なデバイスを開発している。このデバイスは、指腹面が開放されているため、タッチパネルとの併用ができるなどの利点がある。しかしながら、これらの研究ではデバイスの機構が複雑でありアクチュエータの数も多くなる傾向にあり、開発コストが高くなってしまいう課題があった。

本研究では、単純な構造で複雑な指先触覚を再現可能な新たなフィードバックデバイスの開発および、指先感覚の再現を目的とする。

[研究の内容、成果]

1. デバイス設計のコンセプト

本研究では、複雑な触覚を再現するために主に指先で物体を押したときなどに感じる圧力、物体表面をこすったときの摩擦力、指先に伝わる微細な振動情報の伝達を行う。この 3 つの組み合わせにより、まず複雑な触覚を指先に再現することを試みる。

本研究で開発するデバイスは指先に装着できる程度に小型であり、かつ、操作者の動作を制限しないよう、軽量である必要がある。製作の難易度やコスト、メンテナンス性を考慮すると、アクチュエータやセンサの数は少なく、構造として単純であることが望ましい。

そこでまず、2 種類の回転軸を指先の上下に配置し、圧力、摩擦力、振動などの情報を提示する構造を検討した (図 1 参照)。図 1 左に示

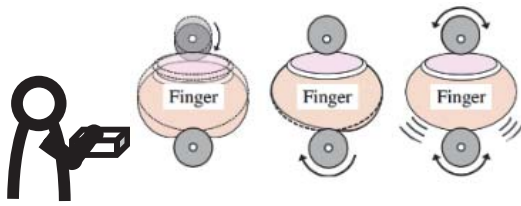


図1 触覚フィードバックデバイスの開発コンセプト

すように、爪側の回転軸を偏心軸とし、軸を回転させることで指を指腹面側の軸へ押しつけ可能とした。各回転軸で指先を挟み込むことで鉛直方向への圧力を提示できる。指腹側の回転軸の回転運動を行うと図1中央のように指腹面へ摩擦力を提示可能である。また、図1右のように、各回転軸の往復運動により微細な振動情報を提示できる。この構造では指腹面を完全に覆ってしまうデメリットが存在するものの、指腹面に対して正確に触覚を提示できるメリットがある。ここで、駆動軸に採用するアクチュエータとしては小型軽量で発生トルクの大きいものが望ましい。そこで、アクチュエータとして市販のマイクロ DC モータとマイクロステッピングモータ、およびマイクロ超音波モータを開発し検討を行った。図2には開発したマイクロ超音波モータの外観を示す。本報告では主に定格電圧 3 V、直径 8 mm のバイポーラステッピングモータを使用した際の結果について述べる。ステッピングモータには減速比約 100 の金属ギアのギアボックスを装着しており、フィードフォワード制御によって各軸の回転角を制御可能である。

次に、開発した触覚フィードバックデバイスの詳細と制御法について述べる。

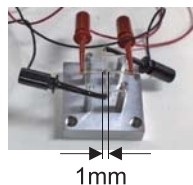


図2 マイクロ超音波モータ

2. マイクロ触覚フィードバックデバイス

図3は、触覚フィードバックデバイス実際の写真である。指に装着する部分の大きさは幅 25 mm であり、高さとお行きが約 35 mm である。爪側の偏心軸の回転軸が 0.75 mm 偏心しており、最大で 1.5 mm の変位を発生させることができる。ギアボックスに指先が干渉しないように直径が 13.5 mm となっている。指腹側の軸は底面の直径が 11 mm、側面と中心軸のなす角が 20° である先端を丸めた円錐形としている。また、ギアボックスの出力軸の軸間距離は 20 mm である。各パーツは素材に PLA を用い、3D プリンターで制作した。指先に装着する部分の重量は約 25 g となった。各モータの制御にはマイクロコントローラ、モータドライバを2つ用いることとし、電源は充電電池を使用し約 3.2 V をマイクロコントローラとモータに供給する。また、Bluetooth によるシリアル通信で PC と接続し、各モータの動作を任意に制御可能とした。

2つのステッピングモータは周期と振幅を指定し、独立制御することができる。触覚を提示する開始および終了時間を同時に指定できるため、各制御パターンを自由に制御できる。例えば圧力を提示する場合、爪側の回転軸の回転量 θ° (偏位量 x mm)、摩擦力提示では指腹面側の回転方向と回転角速度 θ°/s 、微細な振動提示では各軸往復回転運動の角速度および周期 T s を、任意のタイミングで任意の時間制御可能である。

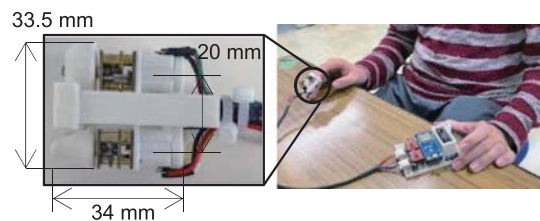


図3 触覚フィードバック装置の外観と詳細

3. 小型触覚フィードバックデバイスの検証

3.1. 振動パラメータの決定

開発したデバイスを用いて指先に物体表面の微細な情報を提示するためには、指先への提示振動を適切に設定する必要がある。そこでまず、往復回転運動の振幅を一定にしてその周期を変更した場合と、周期に比例して振幅を大きくした場合との比較を行った。振幅一定の検証において、振幅は約 0.027 mm、振幅が周期に比例する場合では、周期が 10 ms のとき 0.013 mm、90 ms のとき 0.12 mm である。いずれの場合でも周期を 10 ms から 90 ms まで 10 ms ずつ刻んだ 9 段階をランダムで提示する。

被験者には振動の提示ごとにどのように感じたかを 0：ほとんど振動を感じない、1：かすかに振動を感じる、2：はっきり振動を感じる、3：強い振動を感じる、4：揺れを感じる、の 5 段階で評価するよう指示した。

図 4 は各パラメータで最初に提示された 10 回分の結果の平均である。図の左側は振幅一定の結果であり、周期が大きくなるに連れて振動を感じにくくなることがわかる。図の右側は振幅が周期に比例している場合の結果であり、周期が短い方が振動を感じにくい傾向にある。このとき、周期が長い場合でも (a) と異なり振幅も大きくなるため、振動を感じなくなることはなかった。周期が短くなると振幅一定の場合振動は感じやすくなるが、振幅が周期に比例する場合、振幅も小さくなるので感じにくくなる。

振幅や周期が大きいと粗さなどの表面感覚を提示するための振動としては適さない。また、ステッピングモータの性能上振幅一定のまま周期を短くすると必要な回転速度に届かず脱調し

てしまい、正しく振動を発生させられない。これらの結果より、物体の表面質感の提示に、20 ms～30 ms 程度の周期振動を用いることとした。

3.2. 機械的な触覚提示の評価

まずスイッチなどの機械的動作を再現可能か評価するため、被験者 4 名 (27.75±5.93 歳) を対象に実験を行った。この実験では 2 種類のスイッチ：垂直に表面を押下するスイッチおよび、左右に切り替えるスイッチの動作を提案デバイスで再現する。(a) では、仮想空間内でオブジェクトに触れた際、偏心軸を圧力を加える向きに 150 ms 回転させ、離すとき同じ時間逆方向に回転させる。(b) ではスイッチを操作する方向に合わせて 200 ms 間下側の軸を回転させる。また、それぞれのスイッチの触覚提示中に周期 30 ms の振動提示を発生させた際の比較を行った。

図 5 は実験風景である。被験者は利き手の人差し指にデバイスを装着する。実験中被験者は画面を確認し、オブジェクトに触れる瞬間と離れる瞬間に仮想的にスイッチを操作するように人差し指を動作する。各実験は個々に実施し、振動ありと振動なしの触覚をそれぞれ 10 回ずつ交互に提示し、その感覚がどの程度現実のスイッチに近いかを 7 段階で評価させた。7 段階の指標は従来研究との結果の比較のため、被験者がイメージした通りの触覚が最高評価の 7 となるように指示し、実際に提示された触覚の評価を数値で回答させる。

結果は図 6 に示す。左側押下するタイプのスイッチに置いては振動ありの場合の中央値は 4

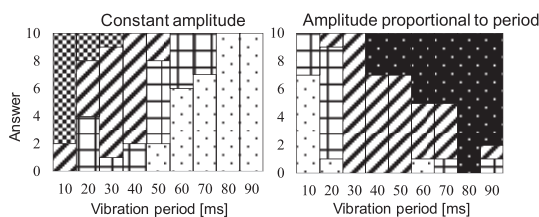


図 4 振動パラメータの同定実験結果



図 5 提案デバイスを用いた触覚提示風景

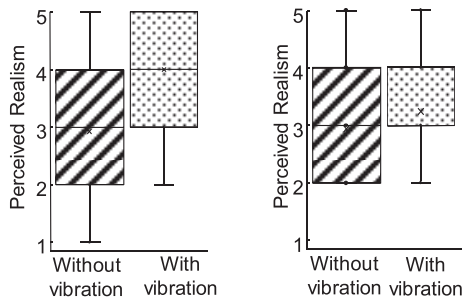


図6 2種類のスイッチ動作の再現検証結果

であった。また、左右切り替えを行う種類のスイッチでは、振動ありとなし両方の場合で中央値は3程度であった。Maedaらの研究に示される既存のデバイスと比較しても中央値が3から4と同程度であり、提案デバイスを用いて機械的動作の再現ができることを確認できた。

3.3. 表面粗さ提示の評価

つぎに物体の表面質感を提示可能か評価するため、提案デバイスを用いて物体表面の粗さを表現し、その違いの識別が可能かを評価した。被験者は健常大学生3名(29±6.38歳)を対象とし、画面上で3種類のオブジェクトのテキストを確認しながら提案デバイスで粗さの提示を行う。このとき、1方向への回転運動と往復運動を組み合わせ、振幅を、1. 振動なし、2. 約0.024 mm、3. 約0.034 mmの3段階を用いて粗さを表現する。また、振動の周期を25 msおよび30 msの2種類で実験を行った。実験では、接触を提示するために偏心軸で0.2 mmの変位を同時に与え、指腹面側は30 rpmで回転させている。各振動周期で各被験者にそれぞれ10回ずつの計30回をランダムな順番で提示した。

図7に結果を示す。図は各周期で3段階の粗さをランダムに提示した際の各被験者の回答を示している。周期30 msの場合、正答率はそれぞれ83%、60%、50%であり、25 msの場合、正答率はそれぞれ97%、83%、73%であった。結果には個人差があるが、全被験者に共通して同じ振幅の場合は周期が短い方が識別率はよくなる傾向であった。以上より、振動のパラメー

Period [ms]	Amplitude [mm]	A			B			C		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
30	(1) 0	8	2	0	6	4	0	5	5	0
	(2) 0.024	0	7	3	2	5	3	4	3	3
	(3) 0.034	0	0	10	0	3	7	1	2	7
25	(1) 0	9	1	0	7	1	2	9	1	0
	(2) 0.024	0	10	0	1	8	1	0	7	3
	(3) 0.034	0	0	10	0	0	10	0	4	6

図7 3段階の粗さ提示検証結果

タを調整することで物体表面質感を提示できる可能性を示した。しかしながら実験では物体の識別可否にのみ着目しており、指先に目的の触覚を再現するためには、より広い範囲での制御パラメータを用いて検証する必要がある。現在のデバイスではトルクや速度に制限があるため、アクチュエータや減速機の変更を含むデバイスの再設計が今後必要である。

4. 前腕部における触覚再現

開発したデバイスを用いて指先触覚をある程度再現できる可能性を示したものの、上肢切断者などがデバイスを使用することは不可能である。そこで、指先触覚を前腕などの他部位で再現する方法として前腕部への刺激による指先触覚の再現性評価を行った。刺激提示には音声振動刺激および電気刺激を用い、DA変換を介した交流信号を用いて刺激波形を生成した。

本報告では振動刺激装置を用い、5種類の粗さの紙やすりを人手および義手を介してどの程度識別できるかを検証した結果について示す。図8は義手指先に指向性マイクロフォンを装着し、物体に触れた際に指先に生じる微細な振動 $w(t)$ を計測・再現している様子である。計測



図8 振動刺激による前腕部への触覚提示風景

した信号はアンプを介して振動装置の制御信号 $A(t)=aw(t+d)$ として用いられる。ここでは、対象に人手および振動装置を用いた前腕部への触覚再現により、各紙やすりをどの程度判別が可能かを比較した。図9に計測波形の一例を示す。各条件において振幅に若干の違いが見られるものの全体にほとんど差が見られないことがわかる。実験では被験者1名を対象に、各粗さを2回ずつランダムに提示し、その正答率を評価した。なお、人手および前腕に装着した義手で実際に紙やすりに触れた際の結果と比較した。

図10に結果を示す。人手では60%強の正答率であるのに対し、義手を介した場合には20%を下回りほとんど判別ができていない。提案する振動刺激による結果では人手と比較して正答率は低いものの義手単体と比べ高い傾向となった。被験者は指先に生じる微細な振動情報を前腕部で感じることができ、各条件を判別できるようになったと考えられる。確率共振現象に基づき300 Hzのホワイトノイズを重畳した際の結果を示している。ホワイトノイズを加

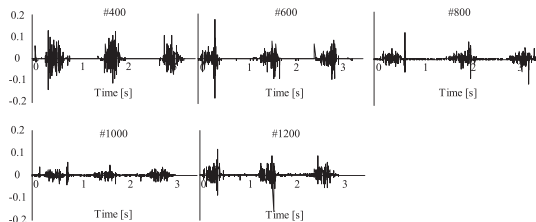


図9 5種類の紙やすりにおける計測波形の一例

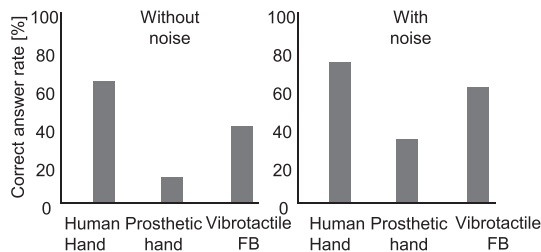


図10 人手および義手による判別精度検証結果

えた場合、全条件においてノイズを加える前よりも正答率は向上しており、提案法を用いて人手と同程度の結果が得られた。以上より、指先感覚を前腕部で再現できる可能性を示した。今後は身体他部位での温覚などを含む指先触覚の再現を目指す。

[成果の発表、論文など]

1. 徳島孝恒, 芝軒太郎, 錯覚現象を利用した移動ロボットのための仮想反力フィードバック法, ライフサポート学会第34回フロンティア講演会, 2025
2. 芝軒太郎: 筋電義手に代表される生体信号インタフェース, おかやま生体信号研究会 第41回例会, 2024
3. 芝軒太郎: 生体信号パターンの「学習」と識別およびその応用, 第29回パターン計測シンポジウム(第109回パターン計測部会研究会), 2024
4. Taro Shibasaki, Takahisa Tokushima: Virtual Force Feedback Based on Phantom Sensation for Teleoperated Robot, 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics, 2024.
5. Tomoya Shirai, Taro Shibasaki: A Compact Tactile Feedback Device for Fingertips Based on an Eccentric Mechanism, 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics, 2024.
6. Taro Shibasaki, Shunji Hashiguchi, Kosuke Jin: Myoelectric Prosthetic Hand with Sensory Feedback that Generates Discomfort, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 10(3), 247-252, 2024.
7. Yoshitaka Mizumoto, Taro Shibasaki: Haptic Sensation Enhancement via the Stochastic Resonance Effect and Its Application to Haptic Feedback for Myoelectric Prosthetic Hands, Proceedings of The 2024 International Conference on Artificial Life and Robotics, 2024.
8. 水本祥宇, 芝軒太郎: 違和感フィードバックを内包した3Dプリンタブル筋電義手, 第34回バイオフロンティア講演会, 2023

最後に、本研究のご支援をいただきました公益財団法人立石科学技術振興財団に深く感謝の意を示します。