



VRにおける pseudo-haptics の拡張を目的とした腱振動の活用

平尾悠太郎¹⁾, 雨宮智浩¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, Ferran Argelaguet²⁾, and Anatole Lécuyer²⁾

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656, 東京都文京区本郷 7-3-1, hirao@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) Inria (35000 Rennes, France)

概要: pseudo-haptics とは, 身体の動きに対して主に視覚的なフィードバックを適切に変化させることで触知覚を編集する手法である. 本研究では, 腱への振動刺激が体性感覚に影響を与えるという知見を活用し, 腱振動によって pseudo-haptics の効果を高める手法を提案する. 本論文では, 腱の振動によって引き起こされる重量知覚と視覚的な運動ゲインによって引き起こされる重量知覚の主観的な等価点を求める実験の結果を報告する.

キーワード: pseudo-haptics, tendon vibration, weight sensation

1. 背景

近年, バーチャルリアリティ (VR) 技術の進歩は目覚ましく, 視覚や聴覚の情報を提示することで, あたかもバーチャル物体がそこに存在しているかのように感じさせることができるようになった. しかし, 触覚情報は視覚情報に比べて未だ表現の幅が狭い. この課題に対して触覚情報を提示するための様々なアプローチが提案されてきた. これらのアプローチのうち, pseudo-haptics は, 認知過程における感覚情報の相互作用を利用し, 身体の動きに対する視覚的フィードバックを適切に変化させることで触知覚を補正する方法である [1]. pseudo-haptics は主に視覚刺激によって触力覚を提示することができ, 比較的簡易な装置で実現され得るという利点から盛んに研究されている. しかし, pseudo-haptics は基本的に視覚と触覚の間にズレによって生じるものの, そのズレが大きくなるとユーザーが違和感を覚えるため, その提示可能な触覚強度範囲には制限がある. これらの課題に対し, 本研究では, 腱への振動刺激が体性感覚に影響を与えるという知見に基づき, 腱振動によって pseudo-haptics の提示可能範囲を広げること検討する.

振動が体性感覚に及ぼす影響にはいくつか考えられる [2]. 筋や腱に振動を与えると, 筋紡錘の一次求心性神経が活性化される. 筋紡錘は位置と運動のセンサであるため, この振動は筋の伸張方向に運動しているような錯覚を与えることができる. また, この振動は筋肉を持続的に収縮させ, 拮抗筋の活動を抑制する, 緊張性振動反射 (TVR) も誘発する. ここで運動に抵抗して静止しようとする, TVR と逆向きの運動錯覚が生じる. さらに, 収縮している筋肉や腱に振動を与えることで, 力や重さの感覚が増加することも確認されている. これらの知見から, 腱への振動刺激と視覚的運動ゲインの両方をそれぞれ精緻に制御することで, pseudo-haptics の提示可能範囲を拡大できると考えた.

腱振動と pseudo-haptics の併用に関する体系的な検討として, 腱振動が pseudo-haptics によって提示可能な触力知覚の強度範囲とその分解能に及ぼす影響を調べることが必

要であると考えた. これに先立ち本研究では, VR 空間におけるバーチャル物体の持ち上げに対して, 腱振動と運動ゲインそれぞれによって生じる重量知覚の主観的等価点を調査する. これにより, 腱振動と pseudo-haptics を同時に用いた際にどの程度重量知覚が拡張され得るかの指針を得ることができると考えた.

2. 方法

2.1 実験環境

図 1 に実験環境を示す. 実験は着座にて行われた. 参加者は右腕の手首と肘に 2 つの振動子 (VIBRO transducer VP210, Acouve Lab. Inc.) を装着したリストバンドを着用した. 振動子は, 手首と肘それぞれの内側と外側の腱を刺激するように配置された. なお, 本実験では内側の振動子のみ使用する. また, 参加者は VR ヘッドセット (Oculus Quest 2) とノイズキャンセリングヘッドフォンを装着し, 両手に VR コントローラーを把持した. 振動の周波数は 80Hz, 振幅は 5G とした.

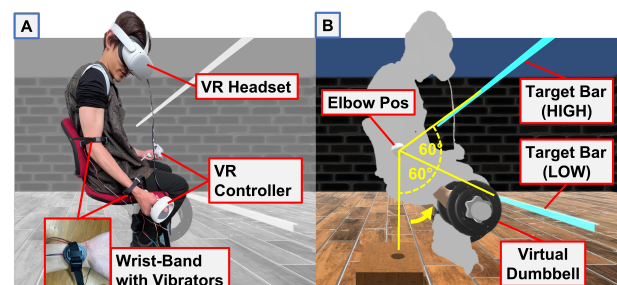


図 1: 実験システム (A) とバーチャル実験環境 (B). なお, 実験中参加者はノイズキャンセリングヘッドフォンを装着した. また, (B) に提示されている 2 つのターゲットバーは, 実際は同時には提示されず, 1 つずつ提示された.

2.2 実験タスク

2.2.1 腱振動による運動錯覚量の測定

実験は2つのパートに分かれている。前半のタスクの目的は、振動子の位置のキャリブレーションと、腱振動によって生じられる運動錯覚の量を測定することである。参加者には事前に、振動によって運動錯覚を感じる可能性があることを教示した。なおバイアスを避けるために、錯覚する運動方向については言及しなかった。参加者は閉眼状態で椅子に座り、右腕はリラックスさせてまっすぐ下ろしていた。次に、実験者は参加者の右手首と右肘の内側の腱に振動刺激を提示した。振動は6秒間続き、その後、参加者は振動刺激提示中に腕の運動錯覚が生じたか否かを回答した。ここで、運動錯覚が生じない場合は実験者が振動子の位置をわずかに調整した。この手順を運動錯覚が生起するまで最大5回繰り返した。振動子の位置のキャリブレーションが終了した後、運動錯覚の方向と量の測定を行った。ここではキャリブレーションの時と同様に、まず参加者の手首と肘の内側に6秒間の振動刺激が提示された。その後、参加者は右手に把持したVRコントローラのトリガーを押した状態で、腱振動によって生じた運動錯覚を再現し、再現終了と共にコントローラのトリガーを離した。この測定は3回行われた。

2.2.2 腱振動と運動ゲインによる重さ知覚の主観的等価点の検討

本タスクの目的は、腱の内側に振動させることによって生じる重量知覚と、運動ゲインによって生じる重量知覚との間の主観的等価点を求めることである。実験は階段法に従って行われた。階段法の課題として、参加者はVR空間において基準ダンベルと比較ダンベルの2つのダンベルを順に持ち上げ、「どちらのダンベルの方が重く感じましたか」という質問に「前者」または「後者」の二肢強制選択で回答するという課題を設計した。VR空間でのダンベルの持ち上げタスクについて、図1に示されるように、参加者は座位にて手を垂直に下した状態から、肘を曲げることでVR空間のダンベルを持ち上げた。このとき、VR空間のダンベルの位置は、実際の肘の回転角にゲインを適用した位置として提示された。

階段法の具体的な流れについて、課題は主にvib-ref群とcon-ref群の2つのグループに分けられた。vib-ref群では基準条件は腱振動を伴い、運動ゲインが1.0に設定された。また比較条件は、振動刺激を伴わず、運動ゲインが0.4から1.0までの10段階のうちの1つに設定された。一方con-ref群では、基準条件は振動を伴わず、運動ゲインが1.0に設定された。また、比較条件は腱振動を伴い、運動ゲインは1.0から2.5までの10段階のうちの1つに設定された。これらの運動ゲインの値は予備実験で検討された。ここで、vib-ref群における主観的等価点は、腱振動で生起される重さ知覚と同じ重さ知覚を誘発する運動ゲインを示す。一方、con-ref群における主観的等価点は、腱振動によって生起する重さ知覚を打ち消すため必要な運動ゲインを意味する。vib-ref群、

con-ref群それぞれについての階段法の実験において、最小運動ゲイン(vib-ref群では0.4, con-ref群では1.0)及び最大運動ゲイン(vib-ref群では1.0, con-ref群では2.5)を初期値とする上昇系列と下降系列の2系列が存在した。これら2つの系列は交互に提示される。比較ダンベルのゲインは、参加者の回答に伴ってvib-ref群では0.06, con-ref群では0.15間隔で増減した。参加者が比較ダンベルの方が重いと答えた場合は運動ゲインを1段階増加させ、基準ダンベルの方が重いと回答した場合は運動ゲインを1段階減少させた。1つの群についての階段法の実験は各系列においてゲインの増減に関する方向転換が5回なされた時点で終了した。また、運動ゲインは設定された最小値及び最大値を超えることはなく、参加者の回答の結果、それらの値を超える場合は、直前と同じゲインに留まり、方向転換の折り返し数のみを増加させた。基準条件と比較条件の提示順序はランダムにした。また、各群の提示順序は参加者間で統制を行った。

VR空間においてダンベルを持ち上げるタスクの詳細について、VR空間では、参加者が座った状態で右腕を自然に垂直に下した位置にダンベルを配置した。また、参加者の右手の位置には手モデルが表示された。タスクの間、ノイズキャンセリングヘッドフォンからはホワイトノイズが提示された。まず初めに、参加者はダンベルをつかんだ後に6秒間そのまま待機した。このとき、振動刺激が提示される条件であれば振動提示が開始され、6秒間のカウントダウン表示と120bpmのメトロノームの音が同時に提示された。この6秒間は振動刺激によって運動錯覚を生起させやすくするための準備期間である。ダンベルを把持してから6秒後、参加者はダンベルを、2秒間かけて目の前に提示された青いバーの高さまで持ち上げた。青いバーはvib-ref群では右腕の初期姿勢から60度、con-ref群では120度の位置に配置された。ダンベルが青いバーに到達すると、VR空間上で質問肢が表示され、参加者は左手のコントローラを用いて質問に回答する。

2.3 実験データ

階段法における各折り返し地点での運動ゲインを記録し、それらを平均化することで主観的等価点を算出した。

2.4 実験手順

実験には20名の参加者(20代の男性12名、女性8名)が参加した。まず、参加者に対して実験の目的、方法、手順が説明された。次に参加者は同意書に記入した。そして、参加者は実験システム一式を装着した。その後、肘の位置の計測を行い、参加者とバーチャル環境のキャリブレーションを行った。参加者は実験中に肘を動かさないように指示された。腱振動による運動錯覚量の測定タスクの後、主観的等価点を求めるタスクの前に、vib-ref群とcon-ref群それぞれについて、比較ダンベルのゲインが基準ダンベルのゲインから最も離れた条件において練習課題を行った。実験の後、参加者は謝礼としてAmazon Gift Card 5€が支払われた。

表 1: 腱振動と運動ゲインの主観的等価点

実験群	主観的等価点 (平均値 $\pm 2sd$)
vib-ref	0.64 \pm 0.22
con-ref	1.62 \pm 0.76

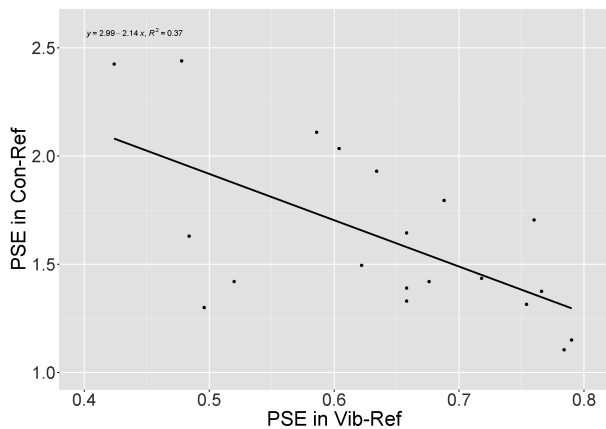


図 2: 各参加者における主観的等価点 (PSE) の結果の散布図

2.5 実験結果

実験前半のタスクにおいて、すべての参加者が腱振動によって運動錯覚が生起することを確認した。階段法における各ブロックの10個の折り返し点における運動ゲインを平均し、主観的等価点を算出した。表1に結果を示す。また、2群の主観的等価点の結果の相関を分析し、各参加者内で結果の傾向が一致しているかどうかを確認した。Fig2は、vib-ref群とcon-ref群に対する各参加者の主観的等価点の結果をプロットしたものである。vib-ref群とcon-ref群の主観的等価点の結果の関係についてピアソンの相関検定を行った結果、有意な負の相関が見られた ($r = -0.61, p = 0.0042$)。また、前半のタスクで計測した安静時の運動錯覚量の絶対値と各主観的等価点の結果との関係についても同様の相関検定を行った。その結果、con-ref群では、運動錯覚量と主観的等価点の結果の間に有意な正の相関が認められた ($r = 0.68, p = 0.00093$)。

2.6 考察

vib-ref群の結果からは、肘及び手首の内側の腱振動によって、0.64の運動ゲインを用いた場合と同じ重量知覚増加が生起することが示唆された。また、con-ref群の結果からは、同腱振動の重量知覚増加を打ち消すために、1.62の運動ゲインが必要であることが示唆された。先行研究でも指摘されているように、腱の振動が筋紡錘や腱器官からの信号を増加させ、結果として重量知覚の増加につながった可能性が考えられる [2]。2群の主観的等価点是对称的な関係であったことから、腱振動と運動ゲインの重量知覚に与える相互作用は大きくなく、そのために、腱振動と運動ゲインを同時に用いることで、一方だけよりもより大きな重量知覚提示が可能となることが示唆された。しかし、1よりも大きなゲ

インと小さなゲインの知覚への影響がそもそも対称ではない可能性があることや [3]、今回の実験では腱振動刺激と1より小さな運動ゲインを同時に用いたときの効果を直接検証しているわけではないことから、この議論を深めるためにはさらなる検証が必要である。

また、主観的等価点の結果には個人差が見られた。Fig.2と相関検定の結果により、vib-ref群とcon-ref群の主観的等価点に関する参加者ごとの結果には一貫性があることが示唆された。これは、腱振動が重量知覚に与える影響に個人差があることを示している。このことは、安静時の運動錯覚量の大きさとcon-ref群の主観的等価点の結果に有意な相関がみられたことから支持される。このことから、実際のアプリケーションでは、腱振動に対する運動錯覚感度を計測し、個人ごとに腱振動とゲインの組み合わせ設計に関するキャリブレーションを行うフェーズを取り入れることが良いと考えられる。

3. 結論

本研究では腱振動を pseudo-haptics と併用することで、比較的簡易なセットアップにてより広い範囲の重さ知覚提示を行う手法を提案した。その第一歩として、腱振動と pseudo-haptics で提示可能な重量知覚の主観的等価点を求める実験を行った結果、周波数 80Hz、振幅 5G の振動を肘と手首の内側の腱へ提示した場合、0.64 の視覚的運動ゲインを適用した時と同等の重さ知覚を提示可能なことが分かった。今後は異なる腱や異なる振動パラメータについて検討を進めるとともに、今回取り扱った持ち上げ動作における重さ知覚以外の pseudo-haptics についても検討することで、腱振動と pseudo-haptics 技術を併用する際の設計ガイドを作成していく。

謝辞本研究の一部は科研費基盤研究 (S) (19H05661)、基盤研究 (B)(22H03628)、挑戦的研究 (萌芽) (20K21801)、JSPS 科研費 (21H04883)、及び科研費特別研究員奨励費 (21J12284) から支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Pusch Andreas and Lécuyer Anatole :Pseudo-haptics: from the theoretical foundations to practical system design guidelines, Proceedings of the 13th international conference on multimodal interfaces, pp.57–64, 2011.
- [2] Mitchell W. Taylor, Janet L. Taylor, and Tatjana Seizova-Cajic :Muscle vibration-induced illusions: review of contributing factors, taxonomy of illusions and user 's guide, Multisensory Research, Vol.30, No.1, pp.25–63, 2017.
- [3] Eric Burns and Frederick P Brooks : Perceptual sensitivity to visual/kinesthetic discrepancy in hand speed, and why we might care, Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp.3–8, 2006.