



Pseudo-haptics に牽引力錯覚を組み合わせることによる 知覚される抵抗力・推進力の増強

Enhancement of Perceived Resistance and Propulsion by Combining Pseudo-haptics and pulling illusion

河岸知浩¹⁾, 伴祐樹¹⁾, 宇治土公雄介²⁾, 割澤伸一¹⁾

1) 東京大学 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, tkawagishi@s.h.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 日本電信電話株式会社 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

概要: Pseudo-haptics は視覚を利用して疑似的な触力覚を提示可能な技術として注目されているが、その効果には限界がある。そこで本研究では Pseudo-haptics により知覚される力を増強させるため、非対称振動刺激による牽引力錯覚を組み合わせるという手法を提案する。実験からそれぞれ単体の力覚提示を行う場合より、両方を提示する場合の方が力を強く感じられる傾向があることが示された。

キーワード: Pseudo-haptics, Haptics, 牽引力錯覚, Cross-modal

1. はじめに

Pseudo-haptics はユーザの身体動作を反映したポイントの位置や速度を適切に変化させることで、触力覚提示デバイスを用いずに視覚フィードバックのみで疑似的な触力覚を提示可能であるため VR やインターフェースの分野で注目を集めている [1].

しかし Pseudo-haptics により提示できる疑似力覚の強さには限界がある [2]. これは Pseudo-haptics により強い力覚提示を行おうとすると実際の身体運動と見かけの身体運動のずれを大きくする必要があり、そのズレが大きすぎると違いが明らかになり、視覚による身体知覚と触力覚知覚の補正が行われず違和感だけが生じてしまうためである。

先行研究では Pseudo-haptics の効果を向上または拡張させるために振動による触覚刺激を組み合わせ、衝撃感や平面の凹凸感を提示した例があるが、疑似力覚の強さを向上させる研究は少ない [3, 4].

そこで Pseudo-haptics により知覚される力を増強させるため、非対称振動刺激による牽引力錯覚を組み合わせるという手法を提案する。牽引力錯覚は急激に変化する加速度と緩やかに変化する加速度が繰り返される非対称な振動を提示することで、振動を一方に牽引されるような力として錯覚させ把持したデバイスを振動させるだけで疑似力覚を提示できるため使用環境の制約が少ない手法である [5]. 本研究では提案手法の効果を検証するため Pseudo-haptics と牽引力錯覚をそれぞれ単独または組み合わせて、抵抗力と推進力を提示する実験を行なった。

2. 関連研究

Pseudo-haptics による力覚提示は、ユーザのコントローラーを動かす、マウスを動かすといった操作により入力する移動量 (Control) に対して、表示される移動量 (Display) に一定のゲイン (Control/Display 比: CD 比) をかけること

で生起される。先行研究から CD 比が 1.0 より大きいと軽く、小さいと重く感じる事が明らかになっている [1]. 例えば、HMD を装着した人が物体を持ち上げる際、VR 上で見える手や物体の移動量を実際よりも小さく (大きく) 表示することで、体験者はその物体を実際よりも重たく (軽く) 感じる事が知られている [2].

牽引力錯覚は把持したデバイスが非対称に振動することにより生起される。これまでの研究では入力波形として PWM 信号、正弦波の一部を反転させた波形、のこぎり波などが用いられ、錯覚が最も明瞭的に生起する周波数は明らかになっていないが、周波数により錯覚される牽引力の明瞭度が変化することが報告されている [5]. また、振幅の大きさにより牽引力の大きさを制御する研究も行われている [6]. 本研究ではこれらの研究を参考にして抵抗力、推進力を提示する Pseudo-haptics と牽引力錯覚を実装した。

Pseudo-haptics に振動提示を組み合わせることで Pseudo-haptics の効果を向上させた例がいくつかある。VR アプリケーションにおいて、衝撃感を提示するコントローラの振動と、HMD の映像に遅延をかけることによる Pseudo-haptics を組み合わせることで、衝撃感を増強できるという報告がある [4]. また、振動子が着けられたマウスによってカーソルを操作する際に、二次元平面状に設定された上り坂を通るときは遅く、下り坂を通るときは速くカーソルが動くようにすることによる Pseudo-haptics と、カーソルの移動速度に応じた振幅の振動を提示することによって平面の凹凸感を増強できることや [3], 振動子のついたペン型のデバイスによってカーソルを操作する際に、画面上でカーソルを前後左右にぶれさせることによる Pseudo-haptics と、デバイスによる振動提示を組み合わせることで感じる粗さを増強できることが知られている [7]. このように Pseudo-haptics に振動提示を組み合わせることで効果を向上させる研究はあるが、牽引力錯覚などの錯覚を生起するような振動を

組み合わせた例はない。

一方で、牽引力錯覚に視覚提示を組み合わせた先行研究として、人差し指と親指で振動装置を把持し、振動装置と導電性繊維で繋がった錘が静電容量式タッチパネルから離れたとき、タブレット PC で表示されている魚が食いついていると、指先に非対称の振動が加わりことで牽引力錯覚を提示し、魚が糸をかじる感覚や引っ張る感覚を提示することに成功した研究がある [8]。また、HMD を装着した状態で手に振動子とブレーキ機構が組み込まれたデバイスを装着し、VR 空間でバーチャル物体を持つとブレーキ機構により剛体感を、牽引力錯覚により物体の重さ感覚を再現した研究もある [6]。しかし、牽引力錯覚に組み合わせた視覚提示は単なる映像でしかなく、視覚提示による疑似力覚の提示を牽引力錯覚に組み合わせた例はない。

以上の先行知見をもとに本研究では、Pseudo-haptics と牽引力錯覚を組み合わせることで視覚提示と振動提示の両方で疑似力覚を提示し、知覚される抵抗力、推進力を増強する手法を提案した。

3. 実験

Pseudo-haptics に牽引力錯覚を組み合わせることでより強い抵抗力または推進力が知覚されるかについて検証するため、手の位置と VR 空間の物体との位置を対応させ、VR 空間の一部の領域で抵抗力または推進力を視覚・振動刺激により提示するシステムを開発し、それぞれの組み合わせにおける知覚された抵抗力または推進力に関する評価を行った。

実験参加者は 22 歳から 28 歳 (平均年齢 24.1 歳) で男性 9 人、女性 3 人の合計 12 名であった。全員の利き手は右であり、視力に異常はなかった。

3.1 実験装置

実験にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) として Vive Cosmos Elite, トラッキングデバイスとして Vive Tracker (3.0), そして振動子としてバイプロトランスデューサ Vp216 を用いた。図 1 のように実験参加者は右手に Vive Tracker のついたバンドを嵌め、振動子を人差し指と親指で振動方向が水平になるように把持した。VR 空間における実験環境は

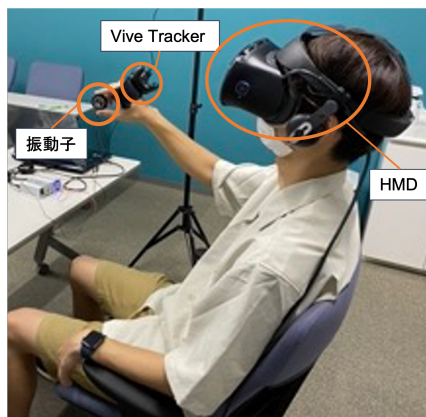
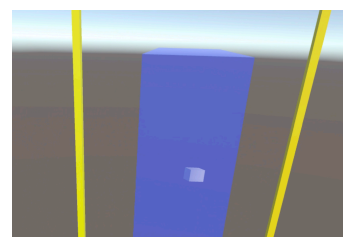
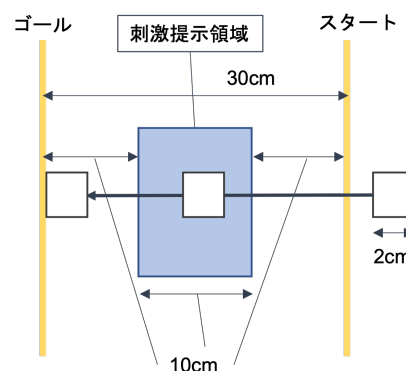


図 1: 実際の実験環境

Unity により作成した。VR 空間では図 2(a) のように、参加者が把持している振動子の位置を反映するポインタとして白い立方体、スタートラインとゴールラインとして二本の黄色い棒、刺激提示領域として半透明な青い直方体が存在している。ポインタが刺激提示領域に重なっている間、抵抗力または推進力が提示されるよう設定した。ポインタは、Vive Tracker により参加者の手の位置をトラッキングしているため、そこからオフセットをかけることで振動子の位置を算出した。また正面から見た位置関係は図 2(b) のようになっており、スタート・ゴールラインや刺激提示領域の中心は実験開始時に HMD での視点から 40cm になるように調整した。振動子は Unity の音声出力をアンプ (LP-2020a+) により増幅し駆動させた。



(a) 実際の映像



(b) 概念図

図 2: VR 空間内の実験環境

3.2 刺激

本実験での刺激は視覚提示が 2 条件、触覚提示が 3 条件の全 6 条件を用いた。視覚提示では Pseudo-haptics の提示ありと提示なしの 2 条件を設定した。Pseudo-haptics の提示ありの場合、Pseudo-haptics の先行研究から CD 比が 1.0 より大きいと軽く、小さいと重く感じる事が明らかになっているため [1], 抵抗力の提示では CD 比を 0.7, 推進力の提示では CD 比を 1.3 に設定した。

触覚提示では非対称振動, 対称振動, 振動なしの 3 条件を用いた。これは非対称振動による牽引力錯覚の効果と振動による効果を区別するためである。図 3 に触覚提示に用いた非対称振動と、対称振動の入力波形を示す。非対称振動の入力波形とその周波数 (75Hz) は先行研究から決定した [5]。非対称振動の入力波形は正弦波 2 周期 $[0, 4\pi]$ のうち 0.5 から 1 周期 $[\pi, 2\pi]$ の部分を反転した波形なので、正弦波 (150Hz) の一部を反転させることによって作成した。対

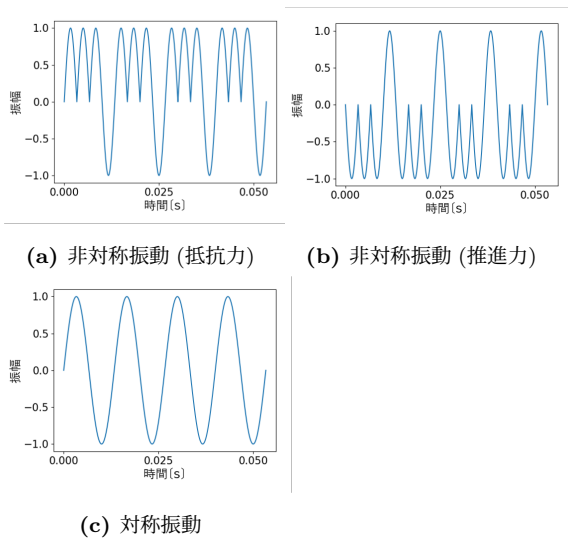


図 3: 振動子の入力波形

称振動は正弦波を用い非対称振動と同じ周波数とした。また予備実験で 4 人に非対称振動の振幅を自由に調整させ、最も牽引力を強く感じた振幅を記録し平均を取ることで、非対称振動の振幅 ($9.5m/s^2$) を決定した。また、対称振動の振幅を自由に調整させ、決定した振幅の非対称振動と比較して同じ強度に感じるような振幅を記録し平均を取ることで、対称振動の振幅 ($9.1m/s^2$) を決定した。

3.3 実験手続き

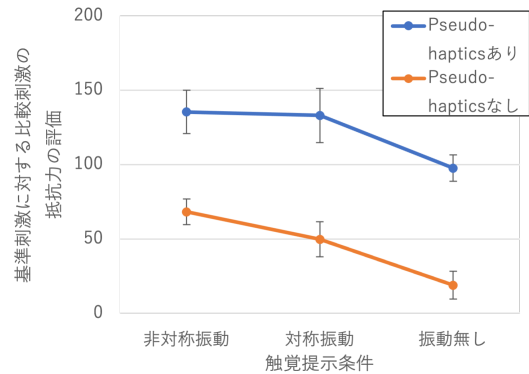
タスクの流れは以下の通りである。参加者は VR 空間内でポインタをスタートラインに合わせた後、刺激提示領域を通るようにゴールラインまで真横に動かした。ゴールラインまで到達すると視界が暗転し、その後参加者は抵抗力または推進力の強さの評価を行った。

実験前にいくつかの練習を行なった。まず HMD をつける前に非対称振動による牽引力錯覚を体験させた。これは牽引力錯覚を体験したことがないまたは久しぶりに体験する場合に牽引力錯覚を感じられず、牽引力錯覚による効果が評価されない可能性があるためである。次に画面上の立方体を動かす速度の目安 ($15cm/s$) を提示し同じ速度で動かす練習を行なった。これは、C/D 比が同一の条件間で手を動かす速度を統制するためである。

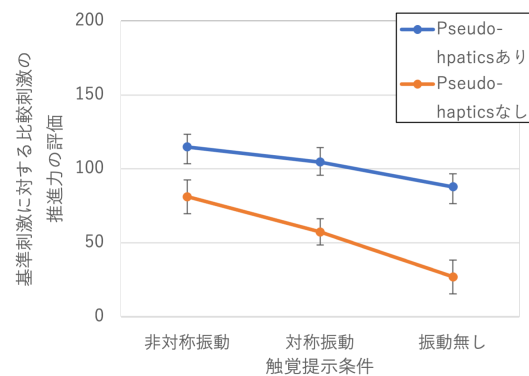
感じた抵抗力・推進力についてマグニチュード推定法により評価を行なった。1 回目を基準刺激として感じた力の大きさを 100、何も感じない場合を 0 とし、2 回目を比較刺激として数値で口頭により回答する。回答は 0 または提示している抵抗力 (推進力) と逆の方向である推進力 (抵抗力) を感じた場合負の値でも可とした。基準刺激は Pseudo-haptics の提示あり、振動なしの条件を用いた。抵抗力・推進力それぞれ 6 条件について 3 回ずつタスクを行った。実験参加者は先に抵抗力提示タスクを 18 試行、その後腕の疲れを少なくするため休憩をとった上で、推進力提示タスク 18 試行を行なった。提示される条件の順番は被験者間でカウンターバランスをとった。全試行が終わった後、抵抗力と推進力の

提示における違いについてのアンケートに回答させた。また、スタートからゴールまでのポイントの座標を 0.1 秒間隔で記録した。

4. 結果



(a) 抵抗力



(b) 推進力

図 4: 抵抗力・推進力の主観評定値 (平均 ± 標準誤差)

実験結果として、各条件における抵抗力と推進力の評価値の平均、標準誤差を図 4 に示す。グラフの縦軸の値が大きいほど 4a では抵抗力を強く、4b では推進力を強く参加者が感じたことを表している。実験条件ごとに 6 群の正規性を Shapiro-Wilk 検定にて確認したところ、抵抗力提示では 6 群、推進力提示では 5 群に対して正規分布との有意差が認められた。よって抵抗力と推進力の評価値についてノンパラメトリックデータとして 2 要因 Aligned Rank Transformed (ART) ANOVA を実施した。抵抗力提示では、視覚提示条件 ($F_{1,199} = 351, p < 0.001$), 触覚提示条件 ($F_{2,199} = 41.0, p < 0.001$) の主効果と、交互作用 ($F_{2,199} = 3.2929, p < 0.05$) が認められた。推進力提示でも、視覚提示条件 ($F_{1,199} = 99.5308, p < 0.001$), 触覚提示条件 ($F_{2,199} = 29.5051, p < 0.001$) の主効果と、交互作用 ($F_{2,199} = 6.2607, p < 0.01$) が認められた。要因間の交互作用が認められたため、下位検定として BH(Benjamini / Hochberg) 法により多重性を補正した Wilcoxon の符号付き順位検定を実施した。結果を表 1,2 に示す。抵抗力提示条件では、Pseudo-haptics ありでの非対称振動と対称振動、Pseudo-haptics なしでの非対称振動と対称振動以外の組み合

わせでは ($p < 0.001$) 有意差が認められた。また、推進力提示条件では、全ての組み合わせで ($p < 0.05$) 有意差が認められた。抵抗力提示と推進力提示の違いのアンケートでは、

表 1: Pseudo-haptics の主効果分析についての下位検定結果 (中央値)

視覚提示条件	抵抗力提示			推進力提示		
	非対称振動	対称振動	振動なし	非対称振動	対称振動	振動なし
Pseudo-hapticsあり	130	130	100	120	105	100
Pseudo-hapticsなし	80	45	0	90	60	0

***: $p < .001$

表 2: 振動提示の主効果分析についての下位検定結果 (中央値)

	抵抗力提示		推進力提示	
	Pseudo-hapticsあり	Pseudo-hapticsなし	Pseudo-hapticsあり	Pseudo-hapticsなし
非対称振動	130	80	120	90
対称振動	130	45	105	60
振動なし	100	0	100	0

*: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .001$

抵抗力の方が強く感じるという意見や対称振動の提示により抵抗力を感じたり、推進力が弱められているように感じたという意見があった。また、タスク中のポインタの座標ログより、非対称振動を提示した際に参加者の手の動きが抵抗力提示では減速し、推進力提示では加速したことが確かめられた。

5. 考察

Pseudo-haptics ありで非対称振動を提示したとき、振動提示なしに比べて知覚される抵抗力・推進力が有意に強いことから、Pseudo-haptics に非対称振動を組み合わせることで、知覚される抵抗力または推進力の増強が可能であることがわかった (表 2)。また、Pseudo-haptics の提示の有無に関わらず、抵抗力提示では触覚提示条件で非対称振動と対称振動に有意差が認められなかったが、推進力提示では有意差が認められた。これはアンケートで述べられていたように、参加者は対称振動の提示であっても抵抗力を感じていたことに起因する可能性がある。つまり抵抗力提示において、対称振動を提示する条件では非対称振動を提示した際と同等の抵抗力を参加者が感じたため、両条件の間に有意差が生じなかったと考えられる。視覚提示と触覚提示の交互作用について、図 4 から Pseudo-haptics あり条件の方がなし条件に比べて、対称振動に対しての非対称振動の抵抗力・推進力提示効果が低いことがわかる。これは、抵抗力提示では非対称振動による牽引力錯覚で参加者の手の動きが減速したことで、刺激提示領域にポインタが入った際の CD 比による減速量が減り Pseudo-haptics が知覚しづらかった可能性がある。一方推進力提示では非対称振動提示による牽引力錯覚で参加者の手の動きが加速したことで、ポインタが刺激提示領域をすぐに通過ぎてしまうため提示した刺激を十分に知覚できず効果が小さくなった可能性が考えられる。以上より、抵抗力を強く感じさせたい場合

Pseudo-haptics と振動提示を組み合わせると良く、推進力を強く感じさせたい場合 Pseudo-haptics と非対称振動を組み合わせると良いことがわかった。

6. まとめ

本研究では Pseudo-haptics に牽引力錯覚を組み合わせることでより強い抵抗力または推進力が知覚されるかについて検証を行なった。実験の結果、抵抗力の提示では、Pseudo-haptics と非対称振動、対称振動を組み合わせた際の違いは見られなかったが、これらの振動提示を組み合わせることで、Pseudo-haptics 単体での提示よりも強い抵抗力を知覚させられることが示唆された。また、推進力の提示では、Pseudo-haptics と非対称振動を組み合わせることで、Pseudo-haptics 単体または対称振動を組み合わせるよりも強い推進力を知覚させられることが示唆された。今後、CD 比と振動子の振幅を変更することによって、知覚される抵抗力と推進力の変化について調べていきたい。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤 B) 「課題番号 21H03478」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Yusuke Ujitoko and Yuki Ban. Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals. *IEEE ToH*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711, 2021.
- [2] Majed Samad, et al. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proc. of the 2019 CHI*, pp. 1–13, 2019.
- [3] 蜂須拓ほか. 2p1-p01 触振動覚刺激付加による pseudo-haptic feedback の拡張: 平面上の凹凸感呈示 (触覚と力覚 (2)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2011, pp. 2P1-P01.1. 一般社団法人 日本機械学会, 2011.
- [4] Yuki Ban and Yusuke Ujitoko. Hit-stop in vr: Combination of pseudo-haptics and vibration enhances impact sensation. In *2021 IEEE WHC*, pp. 991–996. IEEE, 2021.
- [5] 田辺健ほか. 非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 291–301, 2020.
- [6] Inrak Choi and othres. Gravity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 119–130, 2017.
- [7] Yusuke Ujitoko, et al. Modulating fine roughness perception of vibrotactile textured surface using pseudo-haptic effect. *IEEE TVCG*, Vol. 25, No. 5, pp. 1981–1990, 2019.
- [8] 高椋慎也ほか. Vr 魚釣りにおける牽引力錯覚の表現と応用. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 87–94, 2016.