



力覚提示時に視覚刺激による誘導によって 重畳される疑似力覚の定量化

Quantification of Pseudo-Force Sensation Superimposed by Visual Guidance during Force Presentation

船引大輝¹⁾, 山崎陽一²⁾, 井村誠孝³⁾

1) 関西学院大学大学院 理工学研究科 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, fpf09160@kwansei.ac.jp)

2) 関西学院大学 感性価値創造インスティテュート (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1)

3) 関西学院大学 理工学部 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, m.imura@kwansei.ac.jp)

概要: 疑似力覚提示を利用した力覚提示デバイスの開発において, 視覚刺激による誘導が多く利用されているが, 複合提示した際に体験者に知覚される力の大きさを定量的に決定する要因は明らかではない. 本研究では, 視覚刺激による誘導を付与した力覚提示の主観的な力の大きさを定量的に明らかにすることを目的とする. 視覚刺激によって誘導した刺激の主観的な力の大きさを体験者に力覚提示のみで再現させ, 各条件の力覚提示デバイスの出力の大きさの差から, 視覚刺激の誘導によって知覚される力の大きさを定量化する.

キーワード: マルチモーダル, ハプティクス, 疑似力覚

1. はじめに

VR コンテンツにおける没入感や, スマートフォンのようなタッチ操作を伴うデバイスにおける操作性の向上のために, 力触覚提示デバイスの研究が盛んに行われている. 振動を用いる触覚提示デバイスと比較して, モータなどを用いて力覚提示を行う PHANToM[1] のようなデバイスの多くは, 機構が複雑であるために, 大型で重量が大きいなどの問題があり使用される環境が限定的である. 力覚提示機構を単純化することで, デバイスの小型・軽量化を実現し, デバイス使用時のユーザへの負担の低減により, 没入感及び操作性を手軽に向上させることが可能である. また, 力覚提示を行う際に, 直接力を出力するのではなく視覚提示によって疑似的に力覚提示を行う疑似力覚提示 (PseudoHaptics)[2] という手法がある. アクチュエータを用いないため身体的に自由でかつ知覚的に力が加わっているが, 比較的小さい力しか再現できず, 知覚される力が定量的に明らかになっていないという問題がある. 本研究では疑似力覚提示と力覚提示を複合することで目標トルクの提示に必要なデバイスの出力を削減可能な点に着目し, 疑似力覚提示によって知覚される力を定量的に整理することで, 力覚提示デバイス開発のための設計手法を確立し, 単純な機構による小型かつ軽量な力覚提示デバイスを開発する.

2. 関連研究

疑似力覚提示と力覚提示を複合させて提示する研究として, 疑似力覚提示にスピーカによる振動を付加することでより鮮明に力覚提示を行う研究 [3] や, 振動生成と視覚提示のタイミングを遅延させることにより衝撃力の提示を行う研究 [4] などがあるが, 既存の研究において視覚提示によ

って知覚される力の大きさの定量化はなされていない. 疑似力覚提示と力覚提示を複合させて提示を行う際, デバイスの出力として必要最低限のトルクを決定するためには, 疑似力覚提示によって知覚される力の定量化が必要不可欠である.

3. 提案手法

3.1 力覚提示手法

本研究では, 視覚提示と力覚提示を複合的に提示することによって, デバイスの出力するトルクより大きなトルクを知覚的に出力し力覚提示を行う. 視覚提示は, VR 空間における自身の手や, PC 画面上におけるマウスカーソルといった自身の運動によってコントロールされるオブジェクトを, 力覚提示の際に力が加わっているように加速及び減速することで行う. デバイスの出力による力覚提示は, 小型にした際に体積当たりの出力の大きいネオジウム磁石に着目し, ネオジウム磁石と電磁石を利用した力覚提示を行い, 運動方向に対してブレーキをかけて運動を制限することによって行う手法を用いる. デバイスが運動方向に対してブレーキをかけた際には視覚提示としてコントロールしているオブジェクトを減速し, ブレーキを緩めた際には加速することによって, 視覚刺激を重畳した力覚提示を行う.

3.2 疑似力覚の定量化

デバイスの出力を決定するためには視覚提示によって知覚される力の大きさを定量化する必要がある. 定量化のための実験として, ある速度で視覚提示を付加した力覚提示の際に知覚された力を基準として, 視覚提示なしで知覚された力を再現するようにデバイスの出力を実験協力者に調整させる. 視覚提示によって知覚された力は, 基準として

与えたデバイスの出力から再現されたデバイスの出力を差し引いた力として得られる。視覚提示として与える速度を変更して同様に実験を行うことで、速度と知覚される力を定量的に整理する。

4. 実験システム

4.1 システム構成

複合的な力覚提示システムとして、力覚提示デバイスのユーザの運動を入力として視覚提示システムに送信し、オブジェクトの運動として反映し、視覚提示システムからはオブジェクトの座標値を力覚提示デバイスへ送信し、力覚提示を行う領域内であったら力覚提示を行うシステムを構築する。複合的な力覚提示システムの構成を図1に示す。視覚提示システムは Processing を用いて作成し、力覚提示デバイスの制御は Arduino を用いた。人間の運動を入力として Arduino から Processing へシリアル通信で送信し、オブジェクトを移動させる。オブジェクトが力覚提示を行う領域内に移動したときにオブジェクトの移動速度を変更することで疑似力覚提示を行う。同時に Processing から Arduino に信号を送信し、力覚提示を行う。

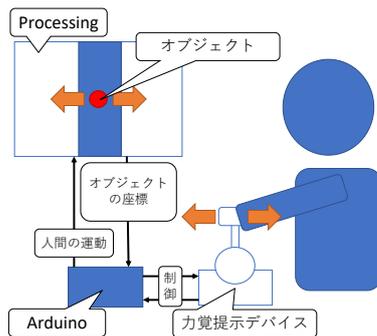


図 1: システム構成

4.2 デバイス構成

力覚提示デバイスの構成および試作デバイスを図2に示す。デバイスの形状はボールジョイント型の力覚提示ジョイスティックとした。ジョイスティックの先端部に加速度センサを設置することで、ジョイスティックの運動状態を入力として得る。力覚提示機構はボールジョイント内部にネオジム磁石、ベース部分に電磁石を設置し入力に合わせて電磁石の磁場の強さを変化させ、垂直抗力を変化させ、ボールジョイント部と接するベースとの摩擦力を制御し出力の大きさを調節する単純な機構とした。試作デバイスでは、加速度センサ (Kionix KXM52-1050)、ネオジム磁石 (N40 $\phi 25 \times 30$)、電磁石 (TRUSCO 電磁ホルダ TMEH-A4) を使用し、デバイスのパーツは PLA を用いて 3D プリンタで作成した。軸の部分は強度確保のためにエポキシパテ (TAMIYA エポキシ造形パテ) で補強を行った。

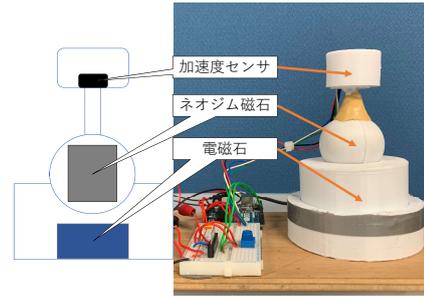


図 2: デバイス構成及び試作デバイス

4.3 摩擦力測定実験

試作したデバイスによる力覚提示性能を確認するために出力の測定を行った。測定方法はデバイスの先端部をばねはかりで水平に引き、最大静止摩擦力を測定した。測定時の状態は対向している磁石と電磁石を吸着 (24V)、非通電 (0V)、反発 (-24V) させた 3 状態である。測定した結果を表1に示す。各状態において、出力されている摩擦力が明確に異なっており、差を知覚可能であるため力覚提示可能であることを確認した。

表 1: 摩擦力測定実験結果

測定状態	摩擦力 (N)
吸着	1.7
非通電	1.0
反発	0.3

表 2: 提示パターン

パターン	摩擦力	視覚刺激
Vf	小	あり
VF	大	あり
f	小	なし
F	大	なし

4.4 疑似力覚の実装

加速度センサは、左右水平方向が x 軸となるように、ジョイスティックの把持部に設置する。ジョイスティックの傾きに応じた重力加速度の x 軸方向成分の変化を加速度センサで取得する。初期状態での測定値を a_{x0} 、現在の測定値を a_x とし、オブジェクトの速度 v_x を以下の式で決定する。

$$v_x = a_x - a_{x0} \quad (1)$$

疑似力覚提示に必要な減速量 Δv は、オブジェクトの位置 x に依存し、画面中央で最も遅くなるよう、以下の正規

分布に従うものとする。

$$\Delta v = \frac{15}{\sqrt{2}} \exp \left[-\frac{(x - S_x/2)^2}{1000} \right] \quad (2)$$

ここで S_x は画面の横画素数である。

減速量 Δv をオブジェクトの速度 v_x から差し引くことで、実際に提示するオブジェクトの速度を決定する。

画面には図 3 に示す画像を提示し、暗い領域であるほどオブジェクトの速度を減速させ、力が加わっているかのように視覚刺激を重畳する。

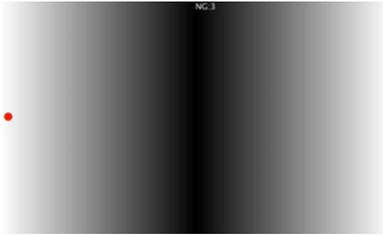


図 3: 提示画面

5. 実験

5.1 疑似力覚提示効果の検証実験

構築した実験システムによる疑似力覚の効果を検証するために主観評価実験を行った。実験の様子を図 4 に示す。実験方法は提示摩擦力 2 種類 (吸着, 非通電) と視覚刺激の重畳の有無の各 2 パターンを組み合わせた 4 パターン (表 2) について、実験協力者に一対比較法によって知覚された力がどちらの方が大きかったか答えさせる。視覚刺激としてコントロールオブジェクトがある一定の範囲内の時に減速させることで力が加わったような動きを重畳する。

手順としてまず、実験協力者にコントロールオブジェクトを一定の速度で動かすことができるように練習させたあと、各パターンを順に提示し大きな力として知覚された方を答えさせる。これを順序効果を考慮して、12 試行行う。実験協力者は疑似力覚について知識のない 5 名である。

知覚された力の強さの比較結果を表 3 に示し、比較結果から求めたサーストンの一対比較法による尺度値を図 5 に示す。表の数値は、横軸と縦軸の提示パターンを比較した際に、横軸の提示パターンの方が力を大きく知覚された回数の確率を示したものである。視覚提示を行っているパターンの方が大きく知覚される傾向にあることが確認できたため、疑似力覚提示が実際にできていることが実証された。また、実験後にどのように力の大きさを判断していたか聞いたところ、5 名中 3 名がオブジェクトの速度を判断基準の一つとしていると答えた。Vf と VF、f と F をそれぞれ比較した時に、摩擦力が大きい VF と F の方が小さく知覚されたのは、デバイスの出力が瞬間的なものであったため、力の差を知覚できなかったのではないかと考えられる。

5.2 疑似力覚の定量化実験

視覚刺激の重畳によって増強される力の大きさを定量的に明らかにするために実験を行った。

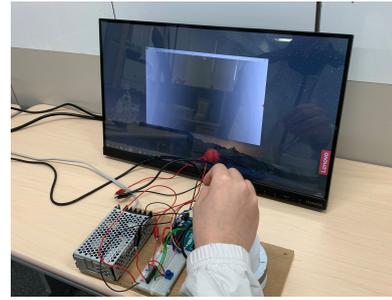


図 4: 実験時の様子

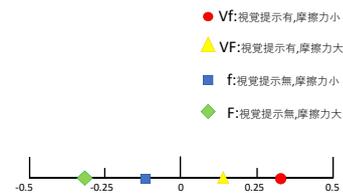


図 5: 一対比較法より求めた尺度値

表 3: 疑似力覚提示効果検証実験結果

[%]	Vf	VF	f	F
Vf	0	50	90	90
VF	50	0	70	90
f	10	30	0	60
F	10	10	40	0

実験方法は、実験協力者に、視覚刺激を重畳した力覚刺激と同等の力の大きさを感じる、視覚刺激を重畳しない力覚刺激を答えさせることで、重畳した視覚刺激によって増強された力の大きさをデバイス出力の差として得ることで定量化する。

手順として、まず視覚刺激を重畳した力覚刺激を与え、力の大きさを覚えさせる。次に、視覚刺激を重畳しない力覚刺激を与え、同等に感じる力になるようにボリュームを調整させる。実験協力者は疑似力覚について知識のない 5 名である。

結果を表 4 に示す。個人差はあるが、視覚刺激の重畳によってデバイスの出力より、平均 1.3 倍程度大きく知覚された。

今後、重畳する視覚刺激のパターンを増やし、速度と知覚される力の関係を整理する。

6. おわりに

本稿では、視覚提示と力覚提示を複合的に提示することでデバイスを小型・軽量化する手法、およびデバイス設計のための視覚提示による知覚される力の定量化手法を提案

表 4: 疑似力覚の定量化実験結果

実験協力者	デバイス出力 (N)	再現された力 (N)
A	1	1.3
B	1	1.7
C	1	1.3
D	0.9	1.1
E	0.9	1.1

した。また、提案手法に基づいた実験システム、およびデバイスを製作し、簡易的な評価実験を行い、デバイスの力覚提示性能の確認と、試作デバイスを利用した疑似力覚提示の効果を検証した。今後は、視覚提示によって知覚される力を定量化する実験を行い、視覚提示によって知覚される力を定量的に整理し、実験結果をもとにデバイスを設計・試作し、設計通りのトルクが知覚されるか実験を行う。

参考文献

- [1] SensAble Technologies. <http://www.sensable.com/>.
- [2] 雨宮智浩. 触覚・身体感覚の錯覚を活用した感覚運動情報の提示技術. 基礎心理学研究, Vol. 36, No. 1, pp. 135-141, 2017.
- [3] 横山綾亮, 小村啓, 坪井諭之, 大岡昌博. Pseudo-haptics と触覚刺激の複合呈示による硬さ表現能力の向上. 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 868, pp. 18-00283, 2018.
- [4] 雨宮智浩. 視触覚への過渡振動重畳による疑似衝突感覚の生成. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 2, pp. 381-384, 2016.