

視覚及び聴覚刺激によるクロスモーダル現象を利用した力覚の錯覚

臼井亮人^{†1} 中島武三志^{†2} 菅野由弘^{†3}

近年クロスモーダル現象（五感が相互に作用しあうことによって起こる現象）による錯覚を利用して知覚情報を提示しようとする研究が盛んに行なわれている。特に触覚や力覚に関する錯覚は擬似触力覚（Pseudo Haptics）と呼ばれ、触力覚提示の方法としての応用が考えられている。これらの研究では視覚刺激のみを提示して錯覚を誘発しているが、実用を考えると得られる感覚が微弱であるなど未だ問題は多い。本研究では視覚刺激だけでなく、聴覚刺激からも感覚を得られるか調べた。具体的には弾力性のある仮想物体に対するインタラクションから擬似力覚を得られるか実験を行った。実験の結果、視覚刺激と同程度の擬似力覚を聴覚刺激から得られた。また、視覚刺激と聴覚刺激を組み合わせて提示することで、より強く擬似力覚を得られた。

Haptic illusion using cross-modal perception by visual and auditory stimulus

AKITO USUI^{†1} MUSASHI NAKAJIMA^{†2} YOSHIHIRO KANNO^{†3}

In recent years, researches have been actively made to present perceptual information by using cross-modal perception (perception that involves interactions between two or more different sensory modalities). Especially, those related to tactile and haptic sensation is called pseudo-haptics and applied to a method of haptic sense presentation. Many of these researches utilize visual stimuli only, but there are still many problems such as the sensation obtained is weak when considering practical use. In this research, we investigated whether we could get a sensation from not only visual stimulus but also from auditory stimuli. Specifically, we investigated whether we could get pseudo-haptics about interaction with elastic virtual object. As a result of the experiment, pseudo-haptics equivalent to from visual stimulus was obtained from auditory stimulus. In addition, by presenting visual stimulus and auditory stimulus in combination, we could get pseudo-haptics more strongly.

1. はじめに

五感のクロスモーダルな相互作用を利用して、提示している刺激と直接対応していないような感覚を錯覚させる知覚情報提示の手法が登場し、またその手法をVR・ARに持ち込んだ研究も多く行われている。例えば、視覚的な食事ボリュームを変化させることで満腹感を操作する検討[1]や、ユーザの手の上に表示される仮想キャラクタの動きに対応した触覚を提示することでキャラクタの現実感を高める研究[2]が報告されている。

その中でも視覚刺激による触覚や力覚の錯覚は、擬似触力覚（Pseudo Haptics）として、バーチャル空間における触力覚提示の手法への応用が考えられている。有名な研究だと、ピストンを押した際の反力を視覚刺激によって提示するもの[3]や、マウスカーソルの動きの緩急で粘性を提示するもの[4]がある。これらの研究については、触力覚提示デバイスを利用して元の触力覚を視覚刺激によって変化させるという方法を用いている。そのためVR・AR環境への応用や実際に利用する場合を考えた時に触力覚提示デバイスを装着・接触させる必要があり、手間や制限がかかること

が考えられる。

これに対し、触力覚提示デバイスを装着・接触させずに視覚刺激から誘発される錯覚のみを利用して触力覚を提示しようという研究も幾つか行われている。シースルー型のHMDで表示した映像と実際の手が接触しているように見せることで微触感錯覚を提示するもの[5]や、スリングショットによる奥行き方向の引っ張り力錯覚を映像上の動作を速度変化させることによって誘発する研究[6]が挙げられる。しかし、このような錯覚から得られる感覚は微弱であり、人によって知覚する感覚が違うことも考えられるので、未だ検討の余地が多い。

これらの擬似触力覚に関する研究のほとんどは視覚刺激に変化を加えることで錯覚を誘発しているが、得られる感覚を高めるためには、より複合的な刺激を提示することが必要だと考えている。人が五感を通じて外部情報を知覚する割合が、視覚83%、聴覚11%、嗅覚3.5%、触覚1.5%、味覚1.0%と言われている[7]ように視覚からの知覚への影響は際立って大きい。視覚以外の情報も組み合わせてクロスモーダルな刺激を提示することでより現実に近い感覚を得られると考えられる。

その中でも視覚の次に多い割合を占めている聴覚に注目する。聴覚刺激を提示してクロスモーダルな相互作用の効果を得ようとする研究としては、表情刺激と音声刺激を提示することによって知覚される情動について調べたもの

^{†1} 早稲田大学
Waseda University

^{†2} 東京工芸大学
Tokyo Polytechnic University

^{†3} 早稲田大学
Waseda University

[8]や、咀嚼音をフィードバックすることにより食感を拡張するシステムを提案したもの[9]が挙げられる。

また、触覚に関するところでは、聴覚刺激が触覚的な粗さ判断に及ぼす影響を検討したもの[10]があるが、これは呈示したテクスチャに聴覚フィードバックを加えると粗さ判断に変化が起きるという意味合いが強く、0 から触覚を呈示するものではない。また、著者の知りうる限り擬似的な力覚を視覚だけでなく聴覚刺激によって誘発させようとする研究はない。

そこで本研究では、視覚及び聴覚刺激を用いて、弾力性のある仮想物体に対するインタラクションから得られる感覚（力覚）について検討する。

2. 呈示する刺激について

2.1 視覚刺激

視覚刺激には、CG で表現された「ばねオブジェクト」及びユーザの実際の手の動きに追従する「手オブジェクト」の2つの仮想物体が含まれる（図1）。手の動きに関しては「Leap Motion」という内蔵された赤外線カメラと赤外線LEDによってユーザの両手と10本の指の動きを独立して認識することができるデバイスを使用する。認識した動作を視覚刺激にリアルタイム反映させることで、ユーザはこの「手オブジェクト」を実際の自分の手のように扱うことができる。

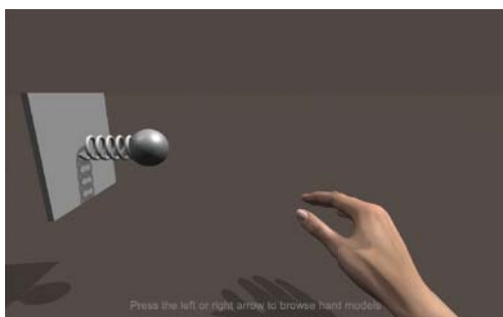


図1 呈示される視覚刺激
Figure1 Visual stimulus presented.

ユーザは「手オブジェクト」を使用して「ばねオブジェクト」の先のおもりを掴むことができる。この状態で「手オブジェクト」を左右に動かすと「ばねオブジェクト」は動きに追従して伸縮する。また、おもりを離すと復元力により元の形に戻る。「ばねオブジェクト」はこのような弾力性を表現した動作を行う。

視覚刺激においては、「ばねオブジェクト」を掴んでいる状態における「手オブジェクト」の動作量を実際よりも低減させて表示することで、力覚の錯覚を誘発できるか検討する。

動作量の増幅率 R については、初期位置から引っ張った距離を $d[m]$ として、

$$R = 0.5 - 0.7 \times d \quad (1)$$

で表される。この数式や数値については複数ユーザによる試行錯誤の上、経験的に得たものである。この増幅率 R に従って低減させた場合のユーザに呈示される「手オブジェクト」の動作量を図2に示す。

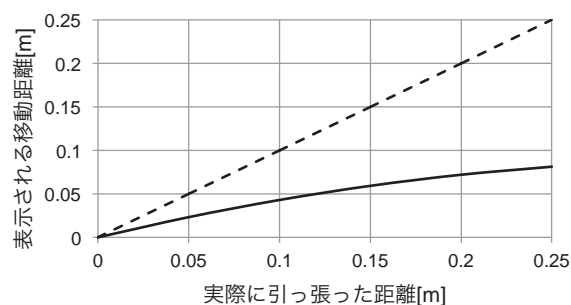


図2 実際の動作量と呈示される動作量
Figure2 Actual motion amount and presented motion amount.

2.2 聴覚刺激

聴覚刺激は視覚刺激における「ばねオブジェクト」の動きに連動して変化する。自己帰属感を高めるため、移動平均を用いて聴覚刺激に使用する音の周波数を設定する。

音の周波数 $N[Hz]$ は、一つ前のフレームにおける周波数を $N'[Hz]$ 、「ばねオブジェクト」の先のおもりの初期位置からの距離を $s[m]$ として、

$$N = 0.9 \times N' + 0.1 \times s \quad (2)$$

として変化する。

正弦波オシレータを音源としてこの周波数 N をLFOで発振する。LFOとは人間の可聴域よりも低い周波数の波を発振するモジュールである。今回は、LFOによって-1~1の範囲で1秒間に30回周期的に周波数を上下させている。聴覚刺激として使用する音の音色や周波数の変化については複数ユーザによる試行錯誤の上、経験的に得たものである。

3. 擬似力覚についての評価実験

3.1 実験環境

没入感を高めるため、視覚刺激の呈示には両眼・非シースルー型HMD (HMZ-T3, SONY)、聴覚刺激の呈示にはヘッドフォン (MDR-CD900ST, SONY)を使用した。実際の実験の様子を図3に示す。

3.2 実験条件

実験条件として、「視覚刺激（動作量を低減させない）のみ呈示」を条件A（標準刺激）、「視覚刺激（動作量を低減させる）のみ呈示」を条件B、「視覚刺激（動作量を低減さ

せない)と聴覚刺激を呈示」を条件C、「視覚刺激(動作量を低減させる)と聴覚刺激を呈示」を条件Dとして設定した。

実験参加者は成人14名であった。



図3 実験の様子

Figure3 Overview of experimental environment.

3.3 実験方法

実験参加者には、まず実験の概要や取得するデータについての説明し、HMD及びヘッドフォンの装着感やピントの調整について確認を行った。また、条件Aにおいて右手を動かして「手オブジェクト」を自由に制御できるか、「ばねオブジェクト」を掴み伸縮させることができるか確認を行った。

実験の順序について、比較のために条件Aを行ってから条件B~Dからランダムで選んだ条件を呈示した。この二つの条件の呈示と比較を1セットとし、条件Aと条件B~Dの組み合わせで全3セットの試行を行った(例:第1セットA→C,第2セットA→D,第3セットA→B)。

各条件における観察時間は、参加者が「ばねオブジェクト」を最初に掴んだ時点から10秒間とした。その間参加者は「ばねオブジェクト」を自由に伸縮させたり、掴んだり離したりして知覚される力覚について確かめる。

各セット終了後、マグニチュード推定法による評価を行った。条件Aで「ばねオブジェクト」を引っ張った時に知覚した力覚(手応え)の評価値を100として、2回目の条件の評価値を整数値で回答させる。また同時にインタビュー調査を行う。インタビューでは、「条件Aで得られる感覚はどのようなものか」、「条件Aと比較して2回目の条件では得られる感覚に違いはあったか」といった質問を行い、自由に回答させた。

また、全試行の評価が終了した後、実験試行全体で感じた印象などについて内省報告を求めた。

3.4 結果と考察

条件B~Dにおいて得られた評価値の平均を図4に示す。エラーバーは標準誤差を表す。条件A~Dの評価値について分散分析を行った結果、有意差が見られた($F(3,39)=12.129$,

$p<0.05$)。Ryan法による多重比較を行った結果、条件AとB,条件AとC,条件AとD,条件BとD,条件CとDの組み合わせにおいて有意差があることがわかった。

この結果から、視覚刺激において動作量を低減させて得られた擬似力覚と同程度の擬似力覚を聴覚刺激から得られたと言える。また、それらを組み合わせて呈示すると、より強く擬似力覚を得られたと言える。

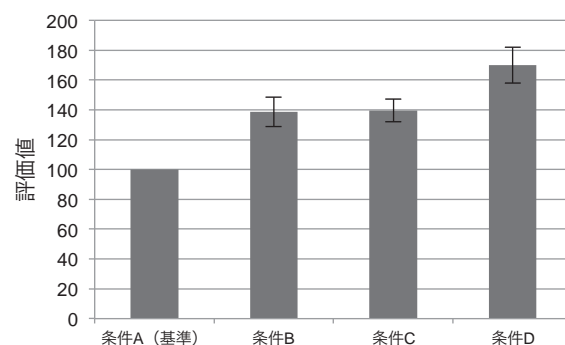


図4 各条件における知覚した力覚の評価値

Figure4 Evaluation value of perceived force sense.

インタビュー調査について、「条件Aで得られる感覚はどのようなものか」という質問に対しては、「特に何も感じない」、「弱いばねで遊んでいる感覚」、「ばねのおもりの見た目が重そうなので実際引っ張った時に軽くて違和感がある」といった意見が報告された。

「条件Aと比較して条件Bでは得られる感覚に違いはあったか」という質問に対しては、「条件Bの方が伸びにくいので力が入る」、「自分の思い通りに動かないのが実際のばねに似ている」、「条件Bの方が固く感じる」といった意見が報告された。条件Aのように単に自分の動作に連動する映像を呈示しただけでは知覚される感覚は曖昧であり、動作量を低減させた条件Bと比較することで初めて擬似力覚が知覚されたと考えられる。

「条件Aと比較して条件Cでは得られる感覚に違いはあったか」という質問に対しては、「音があることによって実在感が増す」、「低い音なので重量感を感じる」、「ゲームのような感覚」といった意見が報告された。実世界において、ばねを引っ張る時に音は聞こえないが、今回呈示したようなCGで作られた仮想的な空間では逆に音があることで現実感が増したとも考えられる。また、「条件BやDと比べると絵的には変化がないため違いを感じにくい」という意見があった。聴覚よりも視覚から得る情報の割合が大きいために原因の一つとして考えられる。動作量を低減させた条件BやDを呈示した後に条件Cを呈示すると無意識に視覚刺激を比較してしまい、聴覚刺激に集中できていない可能性がある。ただし、先ほど述べたように条件BとCから得られた擬似力覚は同程度と言えることから、今回の実験において得られる情報量に差はさほど無かったというよ

うに捉えることもできる。

「条件 A と比較して条件 D では得られる感覚に違いはあったか」という質問に対しては、条件 B と C の場合と似た意見が多く報告された。

また試行全体で感じた印象について数人の参加者から「ばねを掴む動作が難しい」、「操作が難しい」といった意見が報告された。原因としては事前の操作の練習や確認が十分でなかった、各観察時間が 10 秒では短かった、などが考えられる。操作のし易さに関しては参加者によって差があったのでシステムの見直しも検討する必要がある。

4. おわりに

本研究では、視覚及び聴覚刺激を用いて、弾力性のある仮想物体に対するインタラクションから擬似力覚を得られるか検討した。視覚刺激だけでなく聴覚刺激からも擬似力覚を誘発させることができ、またそれらを組み合わせることでより強い感覚を得られることを明らかにするため、呈示する条件を変えて実験を行い、マグニチュード推定法による評価とインタビュー調査から各条件の関係を調べた。その結果、以下のような知見が得られた。

- ・ 弾力性のある仮想物体に対するインタラクションの視覚的な動作量を低減させると擬似力覚を得られる
- ・ 弾力性のある仮想物体に対するインタラクションに聴覚刺激を加えて呈示すると擬似力覚を得られる
- ・ 動作量の低減と聴覚刺激では同程度の擬似力覚が得られる
- ・ 動作量の低減と聴覚刺激を同時に呈示することでより強く擬似力覚を得られる

視覚及び聴覚刺激を用いて擬似力覚を誘発することはできたが、どのような映像、音でより力覚を錯覚しやすいのかなど詳しい部分の検討には余地が残る。また主観的評価では限界もあるため、筋電位測定など客観評価法を利用した実験の試行やシステムの再構築なども考慮に入れて引き続き検討を進める。また、今回得られた結果を VR の臨場感の向上やメタリアリティの発展に応用することが期待できる。今後の検討としては、擬似力覚を用いたコンテンツの構築や、力覚提示を応用したインターフェースの開発などを考えていく。

参考文献

- 1) 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 拡張現実感による満腹感の操作に関する基礎的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2011-43, 111(235), p.63-68 (2011).
- 2) 高瀬裕史, 姜長安, 澤田秀之: 拡張現実空間における触覚呈示による仮想キャラクタとのインタラクションシステム, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.3, p.83-90 (2011).
- 3) A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet:

Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?, Proc. Virtual Reality Conference, IEEE, p.83-90 (2000).

4) Regan L. Mandryk, Malcolm E. Rodgers, Kori M. Inkpen: Sticky Widgets: Pseudo-haptic Widget Enhancements for Multi-Monitor Displays; CHI'05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, p.1621-1624 (2005).

5) 盛川浩志, 飯野瞳, 金相賢, 河合隆史: シースルー型 HMD を用いた微触感錯覚の呈示と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18(2), p.151-159 (2013).

6) 竹内凌一, 橋本渉: 奥行方向の引っ張り力錯覚の強調について, インタラクション 2017(インタラクティブ発表), (2017).

7) 教育機器編集委員会編: 産業教育機器システム便覧, 日科技連出版社, (1972).

8) 荒井宏太, 井上康之, 小野和也, 板倉昭二, 北崎充晃: 表情と無意味音声のクロスモーダル情動認知: モダリティ情報の強度と信頼性の効果の検討, 日本認知科学会, Vol.18(3), p.428-440 (2011).

9) 田中秀和, 小泉直也, 上間裕二, 南澤孝太, 稲見昌彦: 咀嚼検出デバイスを用いた食感拡張システムの提案, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.16, p.694-697 (2011).

10) Steve Guest, Caroline Catmur, Donna Lloyd, Charles Spence: Audiotactile interactions in roughness perception, Experimental Brain Research 146, p.161-171 (2002).