

掌握運動中に提示される音が力覚に及ぼす影響

宮下翔¹ 中島武三志² 菅野由弘¹

概要: 近年、五感が相互に補完しあい、そこにはないはずの刺激を感じる現象（クロスモーダル知覚）の研究が注目を浴びており、その中でも擬似的に力覚を生じさせる研究が盛んに行われている。これらに関する先行研究の多くは視覚刺激と聴覚刺激の両方、もしくはいずれかを用いて力覚の誘発ができることを明らかにしてきた。しかし、現実空間で何も触れていない状態で仮想的に力覚を聴覚刺激のみで感じさせるような研究はまだされておらず、音そのものが力覚に及ぼす影響を解明する余地がまだある。仮想空間における力覚の再現性向上を目的として、本研究では聴覚刺激のみを用いて擬似的に力覚を誘発できるか実験を行った。実験参加者は目隠しをした状態で掌握運動を行い、手の開閉に連動する音源を4種類聴取した。聴覚刺激がある状態とない状態での力覚の大きさの違いを検証し、音が掌握運動中の力覚に及ぼす影響を明らかにする。また、実験参加者は音源の心地よさについても評価をし、エンタテインメント分野への応用を考察する。

キーワード: クロスモーダル知覚, 擬似力覚, 聴覚刺激, 視覚障害

The effect of audio stimuli on pseudo-force sense while executing a grasping movement

SHO MIYASHITA¹ MUSASHI NAKAJIMA² YOSHIHIRO KANNO¹

Abstract: In recent years, the research for the phenomenon which occurs while receiving sense stimuli of some other sense (a.k.a. cross-modality), is drawing attention. Especially, a pseudo-force sense is becoming popular. Most studies tried out were induced by either audio stimuli or the mix of visual and auditory stimuli and no studies of pseudo-force sense are found induced without touching anything. The effect that sound does to pseudo-force sense needs more attention and consideration. In this study, we researched the possibility of obtaining the pseudo-force sense enhancing in the virtual environment only using auditory stimuli. Participants with blind fold listened to four types of audio sounds while executing a grasping movement. Participants also evaluated each audio sound on the level of the comfortableness, which could be applied to the use in entertainment field.

Keywords: cross-modality, pseudo-force sense, audio stimuli, visual impairment

1. はじめに

近年、視覚や触覚などの五感が相互に補完しあい、そこにはないはずの刺激を感じる現象（クロスモーダル知覚）の研究が注目を浴びており、これらの技術はゲームなどのエンタテインメントや医療、教育など様々な分野への応用が期待されている。

クロスモーダル知覚の中でも擬似的に力覚を生じさせる研究が多く報告されている。先行研究の多くは視覚刺激と聴覚刺激の両方、もしくはいずれかを用いて力覚の誘発ができることを明らかにしてきた。主に視覚刺激を提示することで錯覚を誘発した研究の例として、初期の先行研究では Lecuyer らによるバネを用いた研究が有名である[1]。この実験からは実際のバネを押し込む際に、新しく視覚提示されたバネの変化量を変えることで同じバネの弾性にも変化を感じることができたことを報告している。その他に、宇治土公らはタッチパネルのスイープ操作において画面上の背景移動量を変化させることで擬似触力覚を得ることが

できることを明らかにした[2]。臼井らは視覚刺激と聴覚刺激を用いた擬似力覚の誘発を検証した[3]。その結果、聴覚刺激からは視覚刺激と同程度の擬似力覚を得られることを報告している。また、その二つを組み合わせ提示することでより強い擬似力覚が得られたことを報告している。他にも、奥行き方向の引っ張り動作を仮想空間上のスリングショットを用いて誘発するもの[4]が挙げられる。

このように、擬似力覚を生じさせる研究は多数報告されている。しかし、これらの研究の多くは視覚に異常のない健常者を前提としており、視覚障害者が対象となる、クロスモーダル知覚を応用した力覚提示に関する研究は数少ない。本研究ではこうした問題に対し、聴覚刺激を用いた力覚提示に焦点を当てる。聴覚刺激に着目した研究の例として、定司らの研究では実験参加者が視界を遮った状態で反力提示デバイスを使い、様々な音や硬さのパラメータを持つバーチャル物体に触れて感じた硬さを答え、音が硬さの知覚に及ぼす影響について調べた[5]。その結果、音刺激の種類や有無によって異なる影響を力覚知覚に及ぼすことが明らかになった。木やガラスなどの日常的な音刺激をバーチャル物体に触れた時に受けると、硬さ感覚の知覚がより硬くなることを報告している。一方、[3]や[4]の研究では力覚デバイスを用いないことでより簡易的に仮想空間の体験

¹ 早稲田大学
Waseda University

² 東京工芸大学
Tokyo Polytechnic University

ができることを示すことができたが、視覚情報がなければこうした利点を活かすことができない。そのため、力覚デバイスをを用いない状況下で、音そのものが力覚に及ぼす影響については解明する余地がまだある。

また、音や触感による心地よさがエンタテインメント分野にも応用されている。擬似的な触力覚を感じて楽しむような商品は実際に発売されており、一例として、株式会社バンダイは缶を開ける、板チョコを割るなどの日常的な動作に伴う音や触感を再現した「 ∞ (むげん) にできるシリーズ」の玩具が多く発売されており^{3,4}、中でも気泡緩衝材を押すとプチプチ音が鳴る様子を再現した「 ∞ プチプチ」は、押した時の音と感触の心地よさが評価され、大ヒットを博した[6]。音の心地よさについては他にも ASMR[7]が近年流行しており動画共有サービス YouTube では、耳元で囁き声や耳かきをしているような音声を載せた動画が多く投稿されており、これらを聴くと心地よさを感じ、落ち着くと言われている。このことから心地よい音や感触はエンタテインメントの分野で大きく生かされ、玩具や楽器など何か遊べる物を作る上で非常に重要であると考えられる。

本研究では、仮想空間における力覚の再現性向上とエンタテインメント分野への応用を目的として、聴覚刺激のみを用いて、掌握運動中に擬似的に力覚を誘発できるか実験を行った。聴覚刺激がある状態とない状態での力覚の大きさの違いを検証し、音が掌握運動中の力覚に及ぼす影響力を明らかにする。また、音源を聴取した時の心地よさと、その際に生じる力覚の関係を検証し、エンタテインメント分野への応用についても考察する。

第2章では、掌握運動中に聴覚刺激を用いて擬似的に力覚を誘発できるかと、聴取した音源の心地よさについて検証を行うための実験手順の詳細、実験に使用した音声刺激やその提示方法、アンケートの回答方法について述べる。第3章では、本実験で得られた音源を聴取した際に手に力を込める感覚の大きさ、4つの音源に対する心地よさの評価の結果についてまとめる。第4章では、本実験で得られた掌握運動中に提示される音が力覚に及ぼす影響、聴取する音から感じられる力覚と心地よさの関係、本研究の応用例について考察する。第5章では、本研究をまとめ、結論を述べる。

2. 実験

本章では、掌握運動中に提示される音が力覚に及ぼす影響、聴取する音から感じられる力覚と心地よさの関係について検証するために行った実験の詳細について述べる。

2.1 実験概要

本実験で実験参加者は掌握運動を行い、手の開閉に連動する音源を4種類聴取した。視覚情報を遮断し、聴覚刺激のみで力覚を誘発できるか確かめるため、目隠しをした。聴覚刺激がある状態とない状態での力覚の大きさの違いについて検証した。また、実験参加者は各音源の心地よさについても順位をつけて評価をした。

2.2 実験参加者

実験には20歳から25歳の男女12名が参加した。場所は早稲田大学西早稲田キャンパス59号館405号室の静音な環境で行った。

2.3 提示刺激

聴覚刺激には片栗粉の入った巾着、ビー玉、ペットボトル、空き缶(それぞれ音源 α , β , γ , δ)の4種類の素材を手でつぶす音を録り、使用した。ペットボトルを Brüel & Kjaer TEDS microphone 4190-B-001型、その他を RØDE Microphone NT5 で録音をした。

2.4 実験環境

聴覚刺激の出力はコンピュータ (iMac Pro, OS 10.14.5) を使用して行った。掌握運動の読み取りには Leap Motion 社の Leap Motion⁵、聴覚刺激の提示にはヘッドフォン (MDR-CD900STSONY) を使用した。掌握運動と聴覚刺激の連動には Cycling '74 社のビジュアルプログラミング言語 Max⁶を導入した。握る際にはその閉じ具合で、音源をいくつかに分割したものを順番に鳴らし、閉じ切ったあとに手を開くと物体が圧縮から解放されたような音が再生される仕組みである。また閉じると同じように音が再生される。

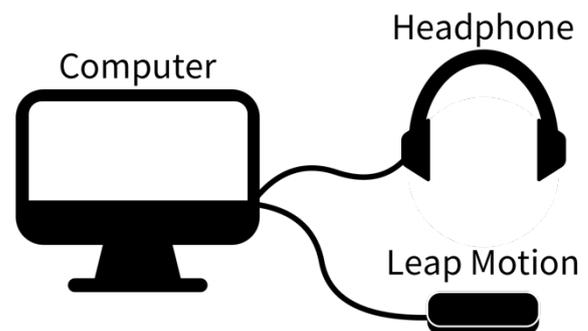


図1 システム構成図

Figure 1 System configuration

2.5 実験手順

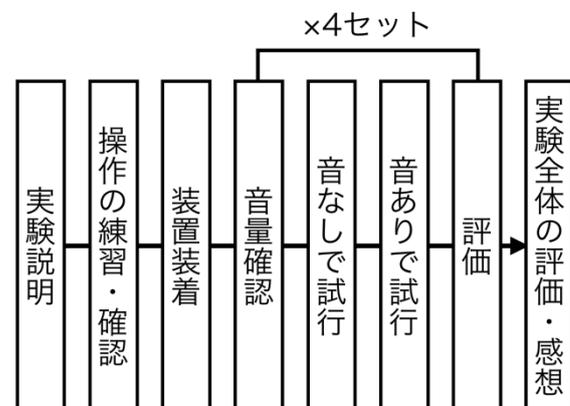


図2 実験の手続きの概略

Figure 2 Outline of experiment procedure

3 ∞ 缶ビール : <https://www.asovision.com/can/about.html>

4 ∞ チョコレート : <https://www.asovision.com/choco/index.html>

5 Leap Motion : <https://www.leapmotion.com/ja/>

6 Max : <https://cycling74.com/products/max-features/>

実験の手続きは図2のとおりである。はじめに実験参加者は実験の概要や取得するデータについて説明を受け、図3のように手を土台の上に置き、事前に用意した動画を参考にして掌握運動の練習をした。参考動画の中では手が開閉される様子を映しており、運動速度、手の形を統制するために用意した。土台の高さはLeap Motionから約205mmとした。この時参加者は音源が聞こえない状態で、実験者が正しくLeap Motionが動作しているか音の確認を行った。

ここから4つの音源について実験をした。順序効果をなくすため、実験参加者ごとに音源の順番をランダムで提示した。各音源で実験する際、はじめに実験者がLeap Motion上で掌握運動をし、実験参加者はその際に流れる音源をヘッドホンで聞き、コンピュータのキーボードを使って音量の調節をした。音の細かい表現も感じ取るため、心地よいより少し大きい程度の音量に調節をするように指示した。実験参加者がアイマスクとヘッドホンを装着し、音量の調節をしてから1分間安静にした後、音源がない状態で掌握運動を1分間、音源がある状態でさらに1分間掌握運動をした。音源を聴取した後、「音がなかった状態で手を握りこんだ時の力を100%とした時、それとくらべて手に力を込めている感覚の大きさは何%でしたか。数字を記入してください」、「音を聞いて何を想像しましたか」の設問について回答した。4つの音源について評価後、実験全体について表1の設問に回答した。



図3 実験の様子

Figure 3 Overview of experimental environment

表1 実験全体についてのアンケート

Table 1 Evaluation for the entire experiment

音がある状態で握った時とない状態とでは、どのような感覚の違いがありましたか。
どういう音の方が力を込めやすいと感じましたか。
それぞれの音は聞いてみて心地よさは感じましたか。
それぞれの音の心地よさの順位を記入してください。理由も教えてください。
その他、実験について感想があれば教えてください。

3. 実験結果

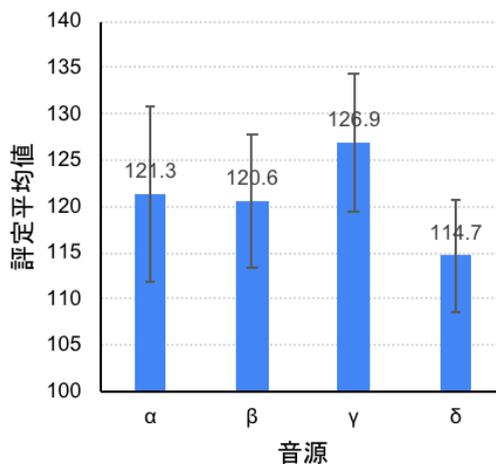


図4 音がない状態で手を握りこんだ際の力を100%とした時の、音源を聴取した状態で手に力を込めている感覚の大きさ。

Figure 4 Evaluation of grasping force while participants listen to the sound of audio files with assumption that the grasping force with no audio is 100%

各音源について、音がなかった状態とくらべて手に力を込めている感覚の大きさの平均は図4のようになった。また、実験参加者が評価した4つの音源の心地よさの順位は表2のようになった。

音源を聴取した際、手に力を込めた感覚の大きさの母平均が100に等しいという帰無仮説に対して、 t 検定を実施すると5%の水準で有意な差が出た。また、4つの音源の評価について分散分析を行なった結果、 $F(3, 11) = 1.10$ となり、有意差は見られなかった。

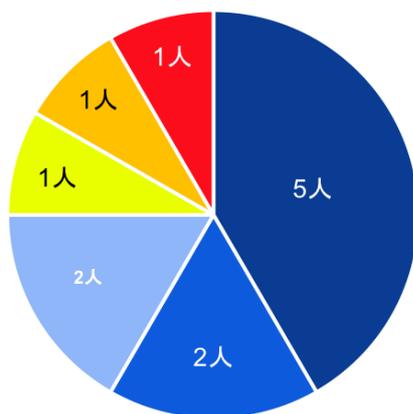
実験参加者が評価した4つの音源の心地よさの順位については、正規化順位法を用いて評価者間の評価一致度を調べた。表2よりKendallの一致性の係数 W について求めると、 $W=0.16$ 、カイ二乗統計量 $\chi^2=5.8$ となり、フリードマン検定のカイ二乗統計量の検定表より $\chi^2=7.9 > \chi^2$ となるため、一貫性に有意な差は見られなかった。

図6は4つの音源の心地よさの評価をまとめた円グラフである。「それぞれの音は聞いてみて心地よさは感じましたか」の設問での回答を参考にして振り分け、それぞれの音源に対して「普通」や「不快」といった指摘があれば各評価に分類し、それ以外については全体の評価として心地よいと述べていれば「心地よい」に分類した。

表2 実験参加者が評価した4つの音源の心地よさの順位

Table 2 The comfortableness rank of
 4 audio files evaluated by participants

実験参加者	α	β	γ	δ
A	4	1	3	2
B	1	2	3	4
C	3	2	1	4
D	3	2	4	1
E	1	2	4	3
F	1	4	2	3
G	1	3	2	4
H	1	2	3	4
I	3	1	4	2
J	3	1	4	2
K	3	2	1	4
L	3	1	2	4



- すべての音源が心地よい
- 音源のうち2つ心地よい, 2つ普通
- 音源のうち2つ心地よい, 1つ普通, 1つ不快
- すべての音源が普通
- 音源のうち1つ不快, 他普通
- すべての音源が不快

図6 4つの音源に対する心地よさの評価

Figure 6 The comfortableness of 4 audio files evaluated by participants

4. 考察

t 検定において5%の水準で有意な差が出たことから、手の掌握運動中にそれと連動する音を聴取することで、力を込める感覚は増加することが確認できた。このことから例えば共感覚[8]のような一部のみにしか見受けられない感覚ではないことがわかった。しかし、アンケートの「音がある状態で握った時とない状態とでは、どのような感覚の違いがありましたか」の設問では様々な回答を受け、「物を握るような抵抗を感じた」という回答もあれば、「物は感じ

ないが、力を込めさせたい」という回答、「音源を聞くことでかえって力が抜けた」などがあり、言葉に表すことでその感覚の違いは大きく異なるといえる。実際に筋電位測定で握力を測り、主観の評価と数値としてわかる握力の違いについて検討することでより詳細に知見を得ることができると考えられる。

音源による力覚の大きさの違いは、分散分析で有意差が見られなかったことから、4つの音源に関して違いがない可能性が高いことがわかった。そのため、手の動きと連動した音源を変えても手に力を込める大きさは大きく変動しないと考えられる。実際にアンケートで「あまり差は感じない」という答えも二つあった。

音源の心地よさについては、順位に一貫性が示されず、個人差が大きいことがわかった。例えば、「それぞれの音は聞いてみて心地よさは感じましたか」の設問で得られた結果について参照すると、ペットボトルを使った音源が一番心地よいと感じる評価者もいれば、一番不快な音だったという答えもあり、評価者によって音の評価は大きく変わった。後者の回答をした実験参加者はその音源に一番力覚を感じたと答えていたため、人によっては力覚を大きく感じる要因を持つ音源を聴取した際に、不快に感じる場合があると考えられる。

本研究が期待できる応用例についてまとめる。本稿では視覚情報を遮断していたため、GUIやVR・ARを扱うヘッドマウントディスプレイのいずれでも応用が期待できる。映像などの視覚情報を合わせた検証をすることで、臼井らの研究[3]のように力を込める感覚をさらに強くできると考えられる。

また、音刺激のみを利用して身体動作に連動する力覚の提示ができたことから、視覚障害者の空間認知や環境把握支援に応用が期待できる。例えば視覚障害支援のための仮想触力覚[9]に関する研究もされており、視覚障害者の仮想環境への参入促進に繋がると考えられる。

身体動作に連動する聴覚刺激が力覚や心地よさに及ぼす影響をさらに解明できれば、視覚障害者も楽しむことができるエンタテインメントコンテンツへと応用できると考えられる。また健常者であっても、視覚を遮断しそれ以外の感覚で楽しむことをコンセプトとした体験型イベントが行われており[10]、こうしたコンテンツへの応用も考えられる。

5. おわりに

本研究では、視覚情報を遮断した状態で、聴覚刺激のみを受けて擬似的に力覚を掌握中に誘発できるか実験を行った。マグニチュード推定法による評価とインタビューの調査から各音源の効果について検証した。その結果、以下のような知見が得られた。

- ① 手の掌握運動中にそれと連動する音を聴取することで、力を込める感覚は増加する。
- ② 手の動きと連動した音源を変えても手に力を込める大きさは大きく変動しない可能性が高い。

- ③ 音源の心地よさの感覚は個人差が大きく、力覚との関係は人それぞれである。

今回の実験環境では握る度に音の鳴り方が変わるためにリアリティが増しているとの評価もあった。現実との相違を感じた実験参加者もいたことから、音源の素材やその鳴らし方、掌握運動と連動させるシステムを変えることで握る感覚の現実との違和感を解消できる余地はあると考えられる。しかし、②の知見より、力覚自体の主観の評価は変わらない可能性もあるため、大幅なシステムの変更による検討をする必要がある。また、今回は実際に録ったリアリティのある音で検証したが、正弦波のような人工的な音の場合では効果に違いがあるかについても比較する必要がある。

身体動作に連動する聴覚刺激が力覚や心地よさに及ぼす影響をさらに解明することで、視覚障害者も楽しむことができる自由度の高いコンテンツの発展が期待できる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費若手研究 18K18095 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 宇治土公雄介, 鳴海拓志, 伴祐樹, 広田光一. 背景移動量操作を利用した視触覚間相互作用によるタッチパネルでの疑似触力覚提示. 日本バーチャルリアリティ学会誌. 22(3), 305-313 (2017).
- [3] 白井亮人, 中島武三志, 菅野由弘. 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. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集. pp.184-187(2017).
- [4] 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)
- [5] 定司栞, 盛川浩志, 小宮山撰. 音刺激の提示を伴う合成反力知覚に関する研究. 第 78 回全国大会講演論文集. pp.349-350 (2016).
- [6] Yokota Masaru. “高橋晋平 (ウサギ) 累計 335 万個の大ヒットおもちゃのアイデアはどう生まれた?”. HAPTIC DESIGN. http://hapticdesign.org/designer/file002_takahashi/ (参照 2019-11-15)
- [7] Dr. Craig Richard. “What is ASMR?” ASMR University. <https://asmruniversity.com/about-asmr/what-is-asmr/> (参照 2019-11-15)
- [8] “5 + 3 が 7 になるのはなぜ? 共感覚という個性.” NHK NEWS WEB. <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20191030/k10012157301000.html> (参照 2019-11-15)
- [9] 巽久行, 村井保之, 関田巖, 徳増眞司, 宮川正弘. 視覚障がい支援のための仮想触力覚の利用. FIT2014(第 13 回情報科学技術フォーラム), 第 3 分冊 pp.421-422(2014)

[10] “Exhibition.” DIALOGUE IN THE DARK.
<http://www.dialogue-in-the-dark.com/about/exhibition/>
(参照 2019-11-15)