

## 研究報告

## サラウンド環境における音響フィードバックが動作に与える影響について

高野 衛, 安藤 大地

Mamoru TAKANO, Daichi ANDO

東京都立大学システムデザイン研究科

Tokyo Metropolitan University Faculty of System Design

## 概要

音響フィードバックを用いた動作情報の研究において、動作者の身体イメージや動作の印象に変化が生じることが報告されている。先行研究では音が実際よりも遠い距離からフィードバックされる環境下において、被験者の動作と身体印象を変化することが示されている。著者らは Leapmotion<sup>1</sup> による手の動作を用いた電子音響作品やインスタレーションを製作してきた。本研究ではこれまでに制作したシステムを利用して、先行研究と同様に音響フィードバックが動作に影響を及ぼすかについて検証した。実験ではクアドロフォニック環境を用いて、手の動きに連動して変化する音源の定位範囲の違いが、手の動作範囲や動作の印象に影響を与えるかについて調査した。その結果、音響の定位範囲が広がるほど、動作の印象が大きくなり、手の動作範囲は縮小する傾向があることが明らかとなった。

## 1. はじめに

拡張現実 (Augmented Reality) の分野において、情報の知覚化を応用し、デジタル技術によって生成した視覚情報や触覚情報による様々な形でのフィードバック情報を実空間に重ねることによる身体感覚の拡張を体感する手法が用いられている。一般的には触覚情報と視覚情報を用いた研究や制作が行われているが、その一方で、聴覚情報を用いたフィードバックによる身体感覚の拡張に関する事例が近年報告されており、音を用いたフィードバックによる拡張手法の可能性も考察されている。

著者らは音による動作の変容の事例を背景に、これまでに製作した音響フィードバックシステムを用いて動作の可聴化研究を行ってきた。動作に音を付加することによって、電子音響作品や VR/AR におけるインタラクティブな音での印象の補間や、音による運動支

<sup>1</sup> Leap Motion 社による、手のジェスチャーによってコンピュータの操作ができる入力機器。 <https://www.leapmotion.com>



図 1: 動作変化のイメージ

援、ユーザインタフェースにおける操作印象の補強などが可能となる。

本稿では、音による身体動作変容や印象の変化の事例に基づいて、4ch のクアドロフォニック環境下での動作への影響についての実験とその結果について述べる。2 節において音のフィードバックを用いた身体拡張表現の事例について記述する。3 節では著者らが作成したシステムと実験環境、実験の手順について述べる。4 節では実験の結果について述べ、5 節にて結果についての考察を行う。

## 2. 先行事例と本研究の位置付け

コンピュータによる知覚情報の提示を利用して被験者や体験者の身体感覚を変化させる研究が行われている。一般的に用いられる知覚情報としては視覚情報が多く、HMD による VR 空間での視覚情報の提示による身体感覚の変容が顕著である (小川奈美 et al., 2018; 石原由貴 et al., 2017)。一方で、聴覚情報による身体感覚の変容についての報告が近年増えてきている (北川智利, 2013)。

Jiménez らは動作に応じてフィードバックする音源の提示距離の違いによって、フィードバック環境に順応した被験者の腕の長さの印象や手を伸ばす動作の距離が変容することを報告している (Tajadura-Jiménez et al., 2012, 2016)。Jiménez らの実験では、被験者が目隠しを

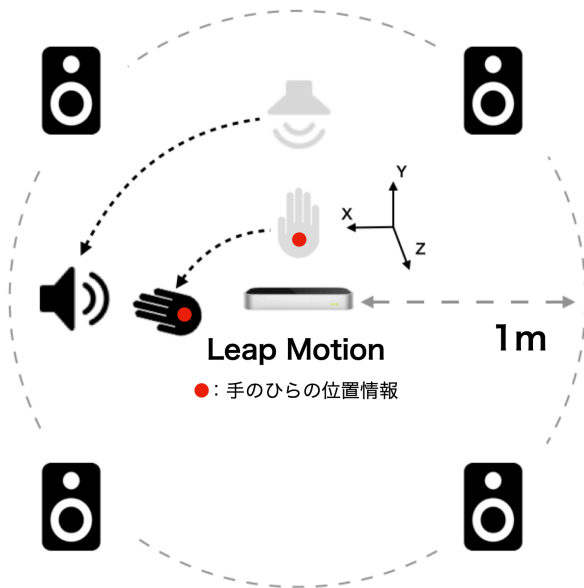


図 2: 実験環境のイメージ

した状態で、床やテーブルを叩くタイミングに合わせて実際に叩いた位置より離れた場所に配置したスピーカから音を提示した。実際より遠い位置から音がフィードバックする環境を体験した被験者は、目的の位置に手を伸ばすタスクにおいて、実験前のタスクよりも手を短く出すことが示された。この結果から Jiménez らは、音が遠くからフィードバックする環境を体験することによって、被験者は腕の長さが実際より長くなったと錯覚したことで手を伸ばす距離が短くなったのではないかと考察している。また Jiménez らは別の実験でも同様な結果を確認しており、フィードバックする音の遅延によって足の長さの印象が変容することを報告している (Tajadura-Jiménez et al., 2018)。

著者らはこれまでに手の動作情報を用いたマルチチャンネル環境での電子音響作品の制作を行ってきた (高野衛 et al., 2018, 2019)。本研究では Jiménez らの実験で得られた動作の変容と同様の結果を著者らがこれまでに作成した音響提示システムでも得られるか検証を行った。実験では固定配置の 4ch スピーカ環境 (クアドロフォニック) を用いて、異なる定位範囲によって被験者の動作や印象が変化するか実験を行った。固定配置のスピーカでの音源の定位操作を用いることで同様な結果が得られれば、多くのスピーカを利用せずに仮想的な音像の操作による動作の変容が可能になるのではないかと著者らは考えた。次節では実験で用いたシステムと実験の手順について述べる。

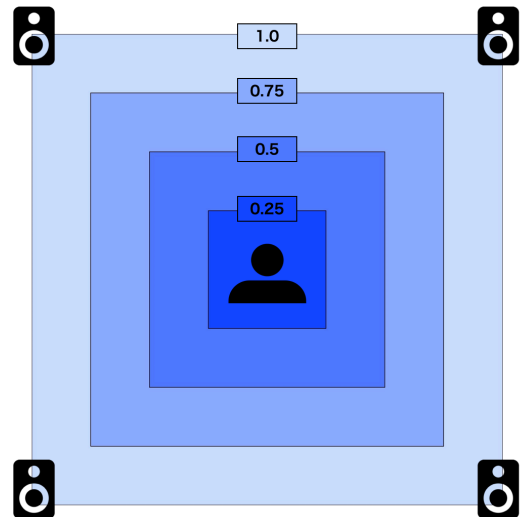


図 3: 音源の定位範囲のイメージ

### 3. 4CH 環境による音響フィードバック実験

本節では実験で用いたシステムと環境について述べ、動作への影響を確認する際に用いた動作課題について詳述を行う。

#### 3.1. 実験環境

実験ではクアドロフォニック環境を用いて、手の動作によって操作される音のフィードバックを行った (図 2)。スピーカは Genelec の 8020 を使い、被験者が動作を行う場所から 1m 離れた位置に配置している。赤外線センサ (Leapmotion) で取得した手の位置情報をもとに提示音の定位を操作が可能となっており、手をセンサ上で動かすことで四方に配置されたスピーカから手の動きに合わせて音源が定位する。

センサの情報の Node.js を用いて取得し、Open Sound Control (OSC) を用いて手の位置情報を音響プログラミング言語の Max8<sup>2</sup> に送信している。Max8 で受信した手の位置情報は、クアドロフォニックで用いるパンニングの定位位置にマッピングしており、手の X 軸 (左右方向) の位置情報が左右の定位、Z 軸 (奥行き方向) の位置情報が前後の定位にそれぞれ対応している。

実験では 4 種類の音源の定位範囲を設定し、定位範囲の違いが動きの変化や印象の違いを生じさせるかを検証した (図 3)。音源の定位範囲の大きさはクアドロフォニック環境下において、フルレンジでの定位が変化する設定を「1.0」とし、その 3/4 の設定を「0.75」、

<sup>2</sup> Max“<https://cycling74.com/products/max>”

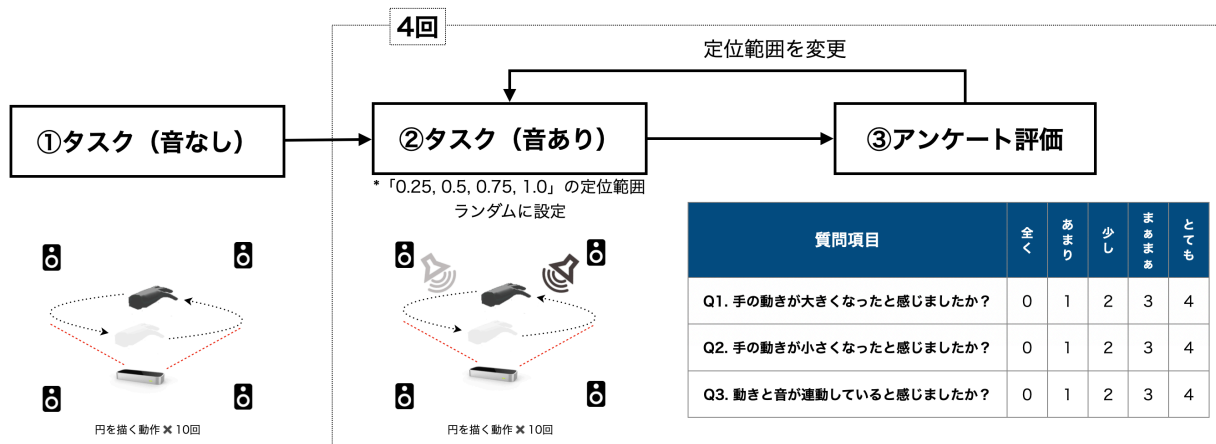


図 4: 実験手順

1/2 の設定を「0.5」、1/4 の設定を「0.25」とした。定位範囲の値が小さくなるにつれてスピーカ間の音量差が無くなり、音像の定位がなくなっていき、定位範囲の値が大きくなるにつれてスピーカ間の音量差が大きくなることで、音像の定位が大きくなっていく。定位操作はクアドロフォニック環境で用いられる等距離パンニングを使用した。提示音は Band Pass Filter をかけたホワイトノイズを使用している。音源の周波数帯域は 10Hz から 16kHz となっており、定位認識に必要な高周波を含んでいる (森川大輔 and 平原達也., 2010; 竹内彩乃 et al., 2017)。

### 3.2. 実験方法

実験では被験者に動作タスクとしてセンサ上で円を描く動作を 10 回行ってもらい、タスク終了後に動作の印象について主観評価の回答を依頼した (図 4)。はじめに「音のフィードバックなし」でタスクを行い、2 回目か 5 回目は「音のフィードバックあり」の状態で行った。2 回目から 5 回目のタスクにおいて、音の定位範囲は「0.25、0.5、0.75、1.0」の中からランダムに設定している。動作の範囲について、一辺が 30cm の四角形の枠内にセンサを配置し、指定した枠内で動作を行うと指定した。

また、「音のフィードバックあり」のタスクにおいて、各定位範囲の設定でのタスク終了ごとに動作の印象についてアンケートへの回答を依頼した (表 1)。それぞれの項目にどの程度同意ができるか 5 段階の主観評価を行い、定位範囲の設定ごとに印象が動きの異なるかについて確認を行った。

表 1: アンケートの項目

Q1. 手の動きが大きくなったと感じましたか?
Q2. 手の動きが小さくなったと感じましたか?
Q3. 動きと音が連動していると感じましたか?

## 4. 実験結果

### 4.1. 主観評価

一元配置分散分析 (one-way ANOVA) による主観評価の分析を行った (図 5)。主観評価の分析において、「Q1: 動きが大きくなった」と「Q2: 音と動作が同期している」の項目において、狭い定位範囲 (0.25,0.5) と広い定位範囲 (1.0) のそれぞれの組で有意差が確認された (「0.25 - 1.0」(Q1:p=0.015、Q3:p=0.035), 「0.5 - 1.0」(Q1:p=0.01、Q3:p=0.037))。一方で、「Q2: 動きを狭く感じた」の質問においては、有意差は得られなかった。

### 4.2. 動作分析

動作の分析においては、Leapmotion から得られた位置情報をもとにタスクごとの円動作の半径の平均値を計算した、その平均から回帰分析を行った (図?)。動作データの分析において、本実験で用いた環境とシステムを用いた音の定位範囲が大きくなるにつれて、動作の範囲が小さくなる傾向が示された。また、狭い定位から大きい定位になるにつれて、被験者ごとに動作の範囲が収束する傾向が見られた。音が無い場合と音の定位変化が少ない設定 (0.25) では動作にばらつきが

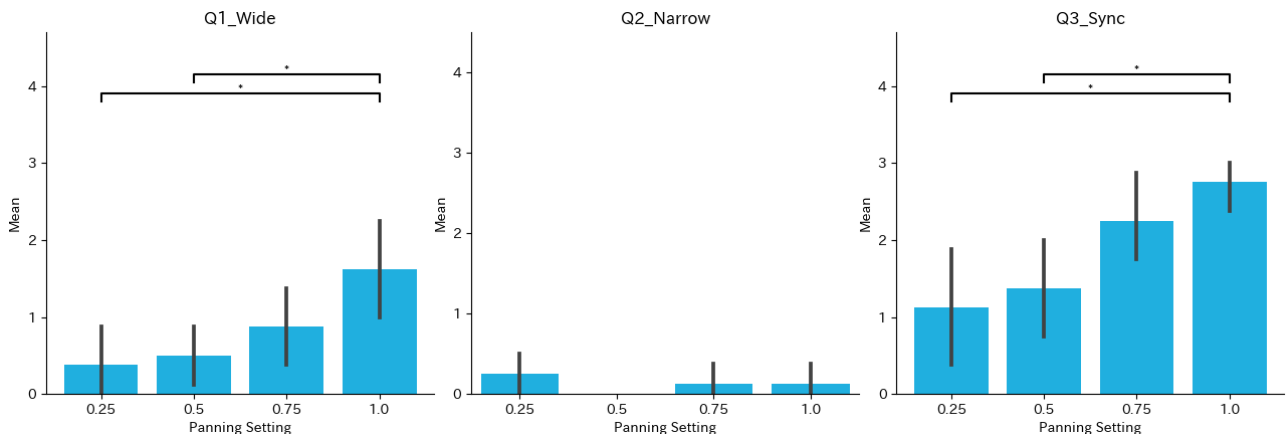


図 5: 主観評価の分析結果

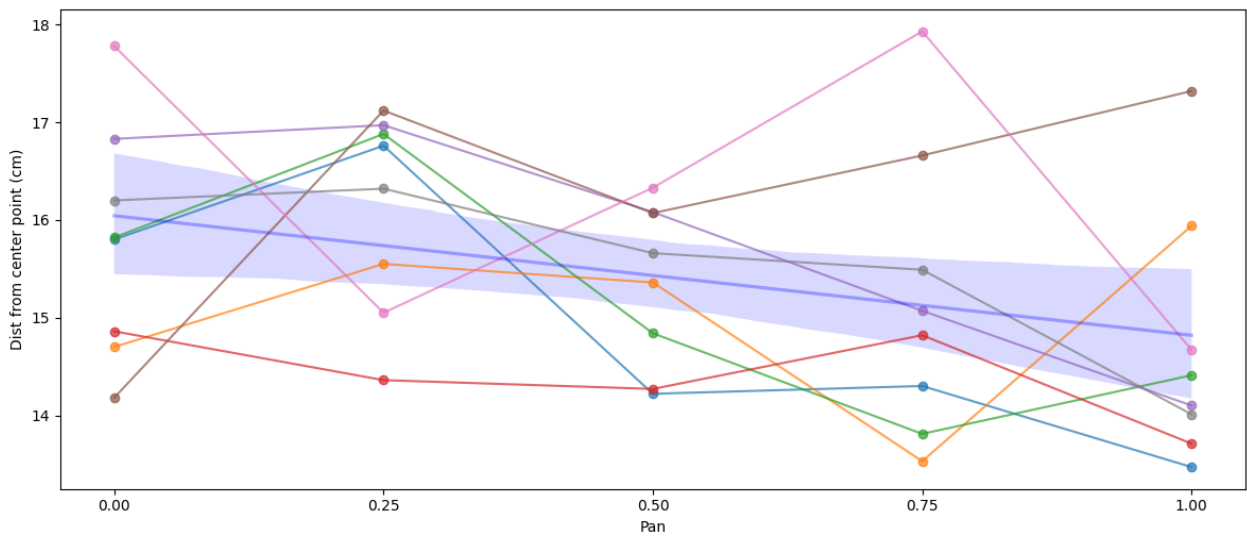


図 6: 動作データの分析結果 (円動作の半径の平均をもとに回帰分析)

大きい。音の定位変化が大きくなるにつれ、被験者全体で動作が近い範囲にまとまっていった。

## 5. 考察

主観評価において「Q1: 動きの大きさ」において有意差が得られたが、あまり大きな印象の変化は得られていない。理由としては、センシング範囲の狭さや動きが小さい範囲の課題だったことが影響した可能性が考えられる。

また動きの大きさの減少傾向が確認されている点においても、動作変化は0.5cmから1cmとなっておりあまり大きな変化は得られなかった。主観評価と同様に、動作範囲の狭さの影響があったと思われる。Leapmotionのセンシング範囲に限界があるため、WebカメラやKinectなど広い範囲で身体情報を取得できるセンサを

利用することでより大きな変化が確認できる可能性はある。

動作のデータにおいて、狭い範囲の定位(0.25)では動きの大きさの平均値にばらつきが見られた。また、数人の被験者から「操作感が感じられない」「音が動いていない」などコメントがあった。今回用いた4chの環境でのスピーカ間での音量差による定位表現では、受聴位置付近の定位表現が難しいため、影響がなかった可能性がある。

## 6. まとめ

本研究では、4ch環境下での動作情報に伴う音響フィードバックの空間定位の変化によって、動きの変化や動作認識の変化があるかを検証した。先行事例では物理的な音源の距離によって動きの変化が生じており、本研究では固定スピーカの仮想的な音像定位によっても同

様に動きの変化が生じることを確認した。Leapmotionのセンシング範囲に限定した影響で動きの変化は小さい範囲となったが、より大きな動きに対しても同様な効果が見られるかについては今後の検討が必要である。

今回は位置情報と音の定位範囲を関連づけた提示だったが、動作情報と音響情報にはそのほかにもパラメータが存在する。動作の加速度や角度などの情報を周波数や音量などのパラメータとマッピングすることで、動作に影響を与えることも考えられるため、今後は位置情報と定位以外のパラメータを用いた手法についても検討する必要がある。

本実験で得られた結果から音による動きの変容が示されたことから、特定の動作に音によるフィードバックを付加することで、ユーザや被験者の動きを制御または支援することが可能になるのではないかと著者らは考える。応用範囲としては、ユーザーインターフェースやVR/ARにおける音による動作印象の補強・拡張や、スポーツなどにおける動作支援などが考えられる。

## 参考文献

- Tajadura-Jiménez, A., O. Deroy, T. Marquardt, N. Bianchi-Berthouze, T. Asai, T. Kimura, and N. Kitagawa (2018). Audio-tactile cues from an object's fall change estimates of one's body height. *Plos one* 13(6), e0199354.
- Tajadura-Jiménez, A., T. Marquardt, D. Swapp, N. Kitagawa, and N. Bianchi-Berthouze (2016). Action sounds modulate arm reaching movements. *Frontiers in Psychology* 7.
- Tajadura-Jiménez, A., A. Väljamäe, I. Toshima, T. Kimura, M. Tsakiris, and N. Kitagawa (2012). Action sounds recalibrate perceived tactile distance. *Current Biology* 22(13), R516-R517.
- 北川智利 (2013). 聴くことと身体を感じるのかかわり (特集 ころまで伝わるコミュニケーションを支える音声言語と聴覚研究の最前線). *NTT 技術ジャーナル* 25(9), 30-33.
- 小川奈美, 鳴海拓志, 伴祐樹, 櫻井翔, 谷川智洋, and 廣瀬通孝 (2018). えくす手: バーチャルな拡張身体を用いたピアノとのインタラクション. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌* 23(3), 91-101.
- 森川大輔 and 平原達也. (2010). 帯域通過および帯域阻止雑音による水平面音像定位. pp. 465-466.
- 石原由貴, 森光洋, 室田ゆう, 小鷹研理, et al. (2017). Hmdを介したポールを引っ張り合うことによる腕が伸縮

する感覚の誘発. *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 2017*, 380-382.

- 竹内彩乃, 石井要次, and 飯田一博. (2017). 方向決定帯域を卓越させた広帯域信号による音像定位. pp. 439-442.
- 高野衛, 安藤大地, and 串山久美子. (2019). 動作情報を用いたインタラクティブな定位情報の制御による空間音響の操作に関する考察. *Volume 11*, pp. 11-15.
- 高野衛, 安藤大地, 馬場哲晃, and 串山久美子. (2018). 空間音響による身体イメージの変化を用いたインスタレーション “quad” sonification for hand stroke. *Volume 10*, pp. 1-4.

## 7. 著者プロフィール

### 高野 衛 (Mamoru TAKANO)

東京都立大学システムデザイン研究科博士課程後期所属。大学時代より現在にかけてコンピュータを用いた音響作品や映像作品の制作を行っている。2009年に玉川大学メディア・アート学科に入学。音響プログラミングや作曲をジョナサン・リー、キャシー・コックス、高岡明に師事。2012年、国立音楽大学大学院に入学し、音響プログラミングを今井慎太郎に師事。2016年、首都大学東京(現 東京都立大学)システムデザイン研究科に入学し、音響プログラミングを安藤大地に師事。

### 安藤 大地 (Daichi ANDO)

国立音楽大学音楽学部声楽学科を経て、2002年同大学同学部音楽デザイン学科卒業。2005年 Sweden Chalmers University of Technology より MSc. 授与。2009年東京大学大学院新領域創成科学研究科基盤情報学専攻博士課程修了。博士(科学)。同年より東京都立大学システムデザイン学部インダストリアルアートコース准教授。情報処理学会、先端芸術音楽創作学会それぞれ正会員。



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂るか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。