

背部触覚提示を用いた指揮動作の軌道提示手法

上田 雄斗^{1,a)} 杉浦 裕太^{1,b)}

概要：視覚障害者は、指揮者の手の動きで表現される拍子が見えないため、オーケストラなどの演奏活動に参加することが困難な場合がある。本研究では、振動アクチュエータを用いた触覚提示により、指揮動作を提示する手法を提案する。仮現運動を用いることで、指揮動作の軌道を提示することが可能である。正解データにおける拍のタイミングと、ユーザが計測した拍のタイミングとの反応時間を評価尺度とした比較実験を行った。

キーワード：身体共有, 触覚インタフェース, 仮現運動, 生活支援

1. はじめに

音楽などの文化芸術活動は、障害の有無に関わりなく、誰もが対等に享受・創造する権利をもっている。障害者による演奏活動の推進は、音楽活動への参画における物理的・心理的障壁を取り除き、誰もが多様な選択肢を持ち得る社会の構築に貢献するものである。とりわけ視覚障害者は、指揮者の手の動きで表現される拍子が見えないため、オーケストラなどの指揮を伴う演奏活動に参加することが困難な場合がある。本研究では、視覚障害者に指揮動作を共有することで、演奏補助に貢献することを目的とする。視覚障害者は、日常生活において聴覚や触覚などの感覚情報に頼っている [8] が、演奏活動においては、その性質上聴覚をもちいた演奏補助は難しい。そのため、視覚障害者に対する指揮動作の共有において、触覚を用いた手法が考えられてきた [1][3][4][5][7]。これらの既存手法では、振動アクチュエータを腕や手首など身体の一部に装着し、指揮動作で表現される拍のタイミングに合わせて振動させることで、ユーザに拍を共有している。しかし、これらの手法では、触覚提示部における振動の有無を用いて拍を提示しているため、提示可能な情報量は限定的である。そこで本研究では、複数の振動アクチュエータを用いた触覚提示により、指揮動作を提示する手法を提案する。触覚の仮現運動を用いることで、指揮動作の軌道を提示することを可能とする。

2. 関連研究

2.1 仮現運動を用いた触覚提示

ある位置に刺激が提示された直後に、別の位置に同様の刺激が提示されると、先行刺激点から後続刺激点に刺激が移動しているように感じられる。このように、離散的な刺激の移動が連続した刺激の移動に感じられる現象を仮現運動と呼ぶ [10]。Sherrick らは、触覚において仮現運動が生起することを実験的に確認している [6]。仮現運動を用いた触覚提示に関する研究は多くなされている。坂井らは点字の6点を6本の指に分散して指腹を刺激して呈示する方式を提案し、指腹部に仮現運動感覚を生じる提示条件において点字認識率が向上したと報告している [11]。古屋らは自動車のステアリングホイールに振動デバイスを装着することで、振動触覚刺激を用いた周辺物体の方向提示を検討している [12]。触覚振動の仮現運動は、直感的な情報伝達手段となる可能性を示すことができた結論づけている。Chen らは、仮現運動を用いた下肢部触覚フィードバックによる歩行支援を検討している [2]。最適な刺激時間を用いることで、歩行における左右の知覚精度および反応時間はそれぞれ 97 %、1700 ms 未満を達成し、仮現運動が歩行時の効果的なフィードバック方法となりうることを示している。本研究では、触覚の仮現運動を用いることで、指揮動作の軌道を提示する手法を提案する。

2.2 触覚提示を用いた拍の共有

指揮動作によって表現される拍を共有するために、触覚提示を用いる手法が検討されてきた。浅川らは、指揮者の指揮棒の動きを触覚インタフェースデバイスを用いて演奏

¹ 慶應義塾大学

^{a)} ikimono-3@keio.jp

^{b)} sugiura@keio.jp

者に伝達する電子指揮棒システムの研究を行っている [1]. 電子指揮棒システムでは, 加速度センサが内蔵された指揮棒によって抽出された指揮動作を, 演奏者の手首に装着された触覚インタフェースデバイスを介してそれを伝達している. 河原崎らは, 深度画像センサを用いることで, 指揮動作における拍とともに, 指揮者が指し示す方向を推定し提示する手法を提案している [5]. 触覚インタフェースデバイスを指揮者の向きに応じて振動させることで, 指揮者が指示を出しているかを演奏者に伝達することができる. Turchet らは, 視覚障害のある演奏家とともに実施した 3 回のワークショップを通して, 同期のための触覚ウェアラブルデバイスのプロトタイプ設計, 評価を行っている [7]. 作成したプロトタイプにおける触覚提示部は, 合唱においては腕の中心部, 楽器演奏においては演奏楽器に関係なく手首が最適であることを定性的評価により示している. Giordano らは, 触覚ディスプレイによるメトロノーム信号の提示において, ギターを用いた実演奏を通して, 音楽演奏の文脈において定量的評価を行っている [4]. Galea らは, 触覚と聴覚を用いた指揮のフィードバック方法を検討しており, 聴覚はおもに準備と演奏開始の合図を伝達するために用いられた [3]. 聴覚によるフィードバックは遅延の影響等により混乱を招き, 触覚によるフィードバックに統一することが好まれた. これらの手法では, 主に 1~4 つの振動アクチュエータを用い, 触覚提示部における振動の有無を用いて拍を提示しているため, 提示可能な情報量は限定的である. 例えば, 指揮の軌道やその大小による指揮動作の情報は, 拍のタイミングや演奏表現を伝達するための重要な情報であるが, 既存手法ではこれらの情報を直感的に提示することは難しい. 本研究では, 複数の振動アクチュエータを平面上に配置することで, 指揮動作の軌道を提示可能な手法を提案する.

3. 提案手法

3.1 構成

本研究では, 指揮動作をキャプチャし, 得られた座標情報をもとに触覚ディスプレイを制御することで, 指揮動作の軌道提示を行う. 提案手法の構成を図 1 に示す. まず, モーションキャプチャカメラによって, 指揮動作を座標情報としてキャプチャする. 次に, 得られた座標情報を PC で処理し, 平面に並べられた複数の振動アクチュエータで構成される触覚ディスプレイを制御する. 最終的に, ユーザの背部に振動を提示することで, 指揮動作の軌道を提示する.

3.2 ハードウェア

本研究で使用したハードウェアは, 座標情報を取得するための指揮棒およびモーションキャプチャカメラと, 背部に触覚提示を行うためのオーディオインタフェース,

プリアンプおよび振動アクチュエータである. 指揮動作のキャプチャには, モーションキャプチャカメラである OptiTrackV120:Duo を用いた. OptiTrack では, 3 次元位置座標をキャプチャするために, 再帰性反射材でできたマーカを使用する. 図 2 に示すように, このマーカを 3 つ配置した指揮棒を振ることによって, 指揮動作の座標情報を取得する. 指揮棒には, OptiTrack のマーカセットに付属するプラスチック製のハンド用リジッドを利用しており, サイズは 140 mm × 100 mm ほどである. 触覚ディスプレイは, 16 個の振動アクチュエータ (Acouve Laboratory, Inc., バイプロトランスデューザ Vp2 シリーズ) で構成される (図 3). 4 × 4 の平面に配置された 16 個の振動アクチュエータを制御し, オーディオインタフェース (Roland, OCTA-CAPTURE) とプリアンプ (Cidre IxD Inc., 8ch PreAmplifier for Haptic Devices.) を介して振動させることで, 指揮動作の軌道を提示する.

3.3 ソフトウェア

本研究で使用したソフトウェアは, モーションキャプチャカメラの処理を行うソフトウェアである Motive と座標情報のストリーミングのための Python, 振動アクチュエータの制御のための MaxMSP*1 である. 座標の取得に利用した Motive は, OptiTrack 用のソフトウェアである. Motive を用いることで, マーカの並びによる剛体の登録および認識, 座標データのストリーミングを行うことができる. 図 2 に示す指揮棒のマーカの配置を剛体として登録した. 登録した剛体は, 120 Hz で座標情報が取得され, ソケット通信により座標情報を Python のプログラムでリアルタイムでストリーミングする. 得られた座標情報の x, y 座標を, MQTT 通信により Python から MaxMSP に伝送する. MaxMSP では, 得られた座標情報をもとに振動アクチュエータを制御し, 仮現運動を用いた指揮動作の軌道提示を実現する.

3.4 仮現運動の実装

MaxMSP において 16 個の振動アクチュエータを制御し, 指揮動作の座標情報と対応づけることで, 指揮動作の軌道提示のための仮現運動を実現する. 得られた指揮動作における x, y 座標をそれぞれ 0~1 に正規化する. x 軸, y 軸において, それぞれ 0.25 ずつ均等に 4 つに分割し, xy 平面を 16 の領域に分割する. 分割した各領域において, 振動アクチュエータを 1 つ割り当て, 座標の存在する領域に対応する振動アクチュエータを動作させることで, 指揮動作の軌道を触覚の仮現運動により提示する.

*1 <https://www.mi7.co.jp/products/cycling74/>

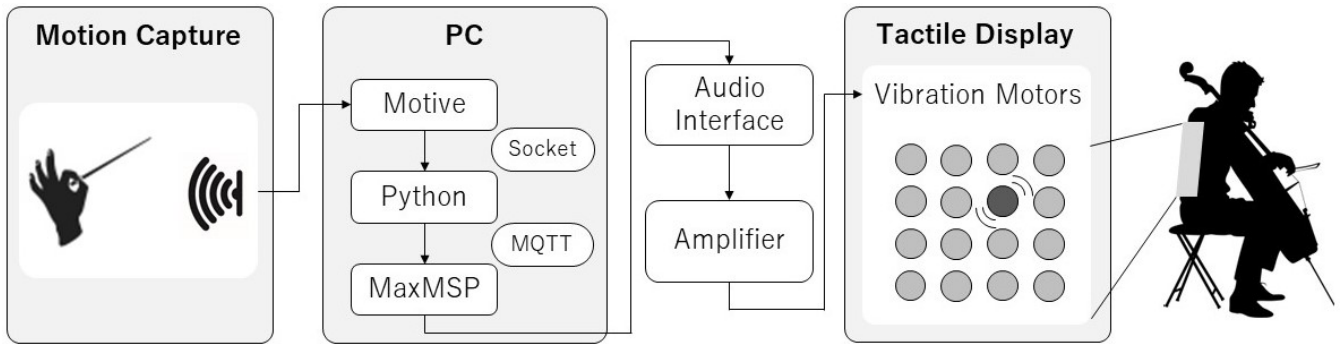


図 1 提案手法の構成

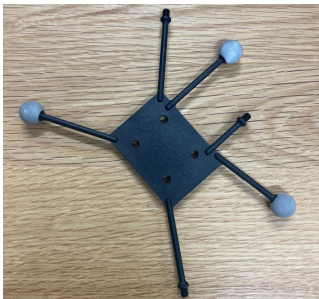


図 2 指揮棒

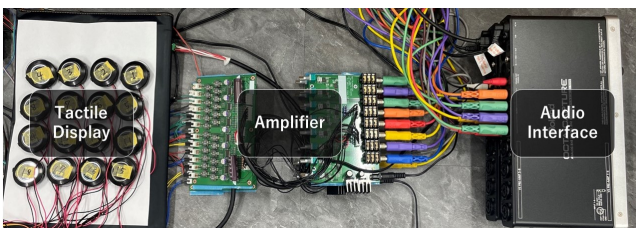


図 3 触覚ディスプレイ

4. 実験

4.1 設定

提案手法の有効性を検証するため、指揮動作の視覚提示と触覚提示において、反応時間を評価尺度とした比較実験を行った。反応時間を以下の式で定義する。

$$T_{\text{reaction}} = |T_{\text{gt}} - T_{\text{pred}}| \quad (1)$$

ここに、 T_{reaction} は反応時間、 T_{gt} は指揮者が指し示す拍のタイミング、 T_{pred} は指揮動作の触覚提示によりユーザが計測した拍のタイミングを表す。

本研究では演奏活動を想定した、テンポ変化と開始のタイミングの2種類の実験を行った。クラシック音楽等の楽曲において、作曲家はしばしば意図したテンポ変化を設定する。実演奏の場面によるテンポ変化において、その程度は指揮動作により提示されるため、指揮を見てテンポを捉える必要がある。また、開始のタイミングは指揮者によって合図されるため、その指揮動作から開始のタイミングを

捉える必要がある。

表 1 に各実験における BPM 設定 (Beats Per Minute) を示す。各実験において、60, 80, 100 を基本とした3種類の BPM を設定した。本実験では、指揮の振り方として、もっとも代表的な「叩き」を採用した [9]。「叩き」は、ボールが床で弾むように、均等に加速・減速を繰り返す指揮法である。拍子において、最も簡易的である一拍子を採用した。評価にあたり正確な指揮動作を再現するために、プログラム上で計算した指揮動作をもとに触覚提示を行った。被験者は 21 歳から 25 歳まで (平均 23.0 歳, 分散 1.83) の 4 名で構成される。

4.1.1 テンポ変化

テンポ変化において、一定、accel, rit の3種類における反応時間を測定した。accel はだんだん速くを示す音楽用語である accelerando, rit はだんだん遅くを示す音楽用語である ritardando を表す。一定において、各 BPM30 拍分提示し、その反応時間を計測した。rit, accel において、各 BPM10 秒間でテンポを変化させ、その間の拍の反応時間を計測した。

4.1.2 開始のタイミング

開始のタイミングにおいて、予備運動における拍として 1 拍と 2 拍の2種類を設定し、予備運動を受けた後の開始拍における反応時間を測定した。予備運動は、演奏開始を補助するために、開始拍の前に指揮者が提示する拍を含んだ指揮動作を示す [9]。各予備運動においてそれぞれ 20 回ずつ拍を提示し、その反応時間を計測した。なお各試行において、BPM は 60~100 からそれぞれランダムに選択した。

4.1.3 触覚提示における点提示と軌道提示

触覚提示において、指揮動作の軌道提示の有効性を検証するために、点提示と軌道提示 (提案手法) の2種類の触覚提示において実験を行った。点提示は1つの振動アクチュエータを、拍のタイミングに合わせて振動させることで提示する手法を示す。振動アクチュエータの間隔は上下左右 10 mm とし、触覚ディスプレイ全体の提示範囲を 190 mm × 190 mm とした。また、振動の周波数を 100 Hz とした。

表 1 各実験における BPM 設定

実験	BPM	
テンポ変化	一定	60, 80, 100
	accel	60 → 80, 80 → 100, 100 → 120
	rit	60 → 40, 80 → 60, 100 → 80
開始のタイミング	60~100	

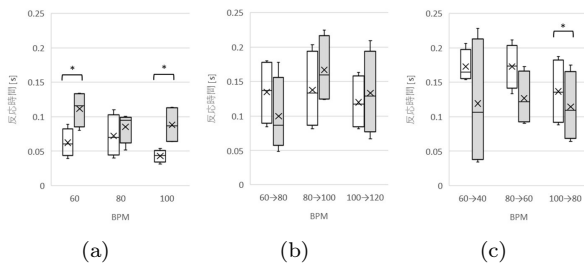


図 4 テンポ変化における反応時間：(a)一定, (b)accel, (c)rit (白は点提示, グレーは軌道提示を表す.)

また、振動音の影響を取り除くために、被験者にはヘッドフォンよりホワイトノイズを聴取してもらった。

4.2 結果

4.2.1 テンポ変化

実験結果を図 4 に示す。テンポ一定 (BPM:80) において、点提示および軌道提示における反応時間の平均は、0.072 秒および 0.085 秒であった。accel (BPM:80 → 100) において、点提示および軌道提示における反応時間の平均は、0.138 秒および 0.167 秒であった。rit (BPM:80 → 60) において、点提示および軌道提示における反応時間の平均は、0.173 秒および 0.127 秒であった。t 検定の結果、テンポ一定において、BPM が 60, 100 では点提示の方が軌道提示より反応時間が有意に小さかった ($p < 0.05$)。一方 rit において、BPM:100 → 80 では軌道提示の方が点提示より反応時間が有意に小さかった ($p < 0.05$)。

4.2.2 開始のタイミング

実験結果を図 5 に示す。予備運動における拍が 1 拍の場合において、点提示および軌道提示における反応時間の平均は、0.193 秒および 0.103 秒であった。予備運動における拍が 2 拍の場合において、点提示および軌道提示における反応時間の平均は、0.078 秒および 0.080 秒であった。t 検定の結果、予備運動における拍が 1 拍の場合において、軌道提示の方が点提示より反応時間が有意に小さかった ($p < 0.05$)。

5. 議論と制約

5.1 考察

テンポ一定において、BPM が 60, 100 では点提示の方が軌道提示より反応時間が有意に小さかった ($p < 0.05$)。また点提示と軌道提示において、被験者から、「刺激を受け続けるのは疲れてしまい、触覚がおかしくなってしまうよ

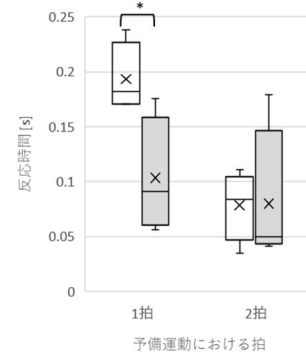


図 5 開始のタイミングにおける反応時間 (白は点提示, グレーは軌道提示を表す.)

うに感じたので、テンポが一定で一回に何度も計測するタスクのみ点提示がよく感じた。」という感想があった。このことから、継続的に同じ刺激を受けるテンポ一定において、点提示の方が軌道提示より有効であると考えられる。また被験者の中から、「軌道提示で速くなっていったとき、逆に拍を感じづらくて混乱した」という感想があった。このことから、軌道提示は点提示に比べ提示可能な情報量が増えたことにより、混乱を招いた可能性があると考えられる。

一方で、予備運動における拍が 1 拍の場合の開始タイミングにおいて、軌道提示の方が点提示より反応時間が有意に小さかった ($p < 0.05$)。また点提示と軌道提示において、被験者から、「点提示は離散的なので、次のタイミングが分かりにくかった。」、「軌道提示はどのくらいのテンポで次の拍が来るのかがわかりやすかった。また、予備運動における拍が 1 拍でもテンポを感じやすかった。」という感想があった。このことから、特に予備運動における拍が 1 拍の場合の開始タイミングにおいて、指揮動作の軌道を提示することは有効であると考えられる。

5.2 制約

本研究では、指揮動作のキャプチャのためにモーションキャプチャを用いているため、これを行うことができる十分なスペースが必要となる。また、モーションキャプチャ用に指揮棒や手に再帰性反射材を取り付ける必要がある。本研究では、ユーザの背部に指揮動作を提示するために、平面に配置された 16 個の振動アクチュエータをクッションに貼り付け、椅子の背もたれに設置している。そのため、演奏形態として椅子に座った状態に限定される。

5.3 今後の課題

演奏形態の制約を減らすために、触覚ディスプレイをウェアラブルにすることを検討する。そのために、デバイスの小型化や軽量化を行う必要がある。また、指揮動作のより詳細な軌道を提示するために、触覚提示の高解像度化を検討する。本研究では、評価にあたり正確な指揮動作を

再現するために、プログラム上で計算した指揮動作をもとに触覚提示を行った。実演奏に近い環境での評価のために、実際の指揮を用いた反応時間の計測を行う必要がある。

6. 終わりに

本研究では、視覚障害者の演奏補助に貢献することを目的とし、振動アクチュエータを用いた触覚提示により、指揮動作を提示する手法を提案した。仮現運動を用いることで、指揮動作の軌道を提示することを可能とした。正解データにおける拍のタイミングと、ユーザが計測した拍のタイミングとの反応時間を評価尺度とした比較実験を行い、特に予備運動における拍が1拍の場合の開始タイミングにおいて、軌道提示の方が点提示より反応時間が有意に小さい ($p < 0.05$) という結果を得た。今後の研究として、触覚ディスプレイのウェアラブル化や触覚提示の高解像度化、実際の指揮を用いた反応時間の計測が挙げられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (課題番号: JP21H03485)、および JST さきがけ (課題番号: JPMJPR2134) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Asakawa, T. and Kawarazaki, N.: An electric music baton system using a haptic interface for visually disabled persons, *2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, IEEE, pp. 602–607 (2012).
- [2] Chen, D. K. Y., Xu, J., Shull, P. B. and Besier, T. F.: Tactile Apparent Movement as a Modality for Lower Limb Haptic Feedback, *EuroHaptics* (2016).
- [3] Galea, C. and Porter, C.: Accessible Choral Ensembles for Visually Impaired Singers (2018).
- [4] Giordano, M. and Wanderley, M. M.: Follow the tactile metronome: Vibrotactile stimulation for tempo synchronization in music performance, *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference. Maynooth, Ireland, Citeseer* (2015).
- [5] Kawarazaki, N., Kaneishi, Y., Saito, N. and Asakawa, T.: A Supporting System of Choral Singing for Visually Impaired Persons Using Depth Image Sensor, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 26, No. 6, pp. 735–742 (online), DOI: 10.20965/jrm.2014.p0735 (2014).
- [6] Sherrick, C. E. and Rogers, R.: Apparent haptic movement, *Perception & Psychophysics*, Vol. 1, No. 3, pp. 175–180 (1966).
- [7] Turchet, L., Baker, D. and Stockman, T.: Musical Haptic Wearables for Synchronisation of Visually-impaired Performers: a Co-design Approach, *ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, pp. 20–27 (2021).
- [8] Wan, C. Y., Wood, A. G., Reutens, D. C. and Wilson, S. J.: Early but not late-blindness leads to enhanced auditory perception, *Neuropsychologia*, Vol. 48, No. 1, pp. 344–348 (2010).
- [9] 齊田好男: はじめての指揮法, 音楽の友社 (1999).
- [10] 廣 大地, 新井啓介, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: 触覚の仮現運動における移動方向逆転現象の観察と分析, 日本バーチャルリアリティ学会第 20 回 Haptics 研究会, PI-18-039, pp. 61–66 (2018).
- [11] 坂井忠裕, 田崎 大, 伊藤崇之: 触覚受容特性を考慮した受動的 6 指分散点字方式の最適刺激呈示評価—盲ろうや点字初心者への情報伝達システムに向けて—, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 90, No. 3, pp. 742–753 (2007).
- [12] 古屋友和, 川島 豪: 振動触覚刺激の仮現運動を用いたステアリングホイールによる周辺物体の方向提示, 自動車技術会論文集, Vol. 53, No. 3, pp. 567–572 (2022).