

ラジオ体操における音楽と身体運動の時間的關係性

上原 僚[†] 竹花 瑛[†] 阪口 豊^{†‡}

[†]電気通信大学 大学院情報理工学研究所 [‡]電気通信大学 技能情報学研究ステーション
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: † {tsukasa.uehara, akira.takehana, yutaka.sakaguchi}@uec.ac.jp

あらまし ダンス等の演技において身体の動きを音楽に合わせることは重要であるが、ダンサーが身体運動のいかなる「瞬間」を音楽の拍に合わせているかは明らかではない。本研究では、ラジオ体操を題材として、動作におけるいかなる運動特徴点（運動始点・終点、速度最大点、加速度最大点など）が音楽の拍と同期しているかを身体運動解析により分析した。その結果、音楽の拍に一致しているのは、身体端点（手など）速さの極大点、あるいは、身体運動の終点のいずれかであることが多く、また、運動の種類によって音楽の拍と一致する特徴点異なることがわかった。このほか、異なる被験者のあいだで、同期している音楽の拍と特徴点との時間ずれの傾向に明確な違いがあることも明らかになった。以上の結果は、音楽に合わせた身体運動において音楽の拍とあわせる運動特徴点には一定の法則がある一方で、拍と特徴点の同期性の捉え方には個人差があることを示唆する。

キーワード ダンス、音楽、時間的關係性、身体運動

Temporal relationship between music beats and body movements in Radio Calisthenics.

Tsukasa UEHARA[†] Akira TAKEHANA[‡] and Yutaka SAKAGUCHI[†]

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: † {tsukasa.uehara, akira.takehana, yutaka.sakaguchi}@uec.ac.jp

Abstract It is essential in “dancing to music” to synchronize body movement to music beats. However, the temporal relationship between the music beats and dancers’ movement has not been well elucidated. In the present study, we analyzed the body motion of human subjects performing the Radio Calisthenics, and examined what feature points of their movement (e.g., movement initiation/termination, velocity peak and acceleration peak) coincided with the music beats. We found that the music beats were synchronized either with the velocity peak of tip (i.e., hand/foot) movement or with the movement termination, dependent on the movement type. We also observed remarkable inter-subject difference in the precise asynchrony between these feature points and music beats. The present results suggest that there may be common rules for synchronizing body movement to the music beats, but that the perception (or intention) of their synchronization might be different between individuals.

Keywords Dance, Music beat, Temporal relationship, Body movement

1. はじめに

クラシックバレエからストリートダンスにいたるまで、ダンスの演技においては音楽に合わせて踊ることが重要である。「音楽とずれた踊り」は観察者に違和感を与え、演技の魅力を大きく低下させる。その一方で、ダンスの動きの細かなタイミングは個々のダンサーのあいだで異なっており、そのような個人差がダンサーの踊りの個性を特徴づけていることも考えられ

る。本研究の大きな目標は、このような音楽にあわせた身体表現において運動タイミングがもたらす効果を明らかにすることである。

音楽と身体運動の關係性についてはこれまでにさまざまな研究が行なわれている。例えば、意識的に身体を動かそうとしなくても音楽を聴いているだけで自然に身体が動き出すこと[1,2]や、生後4か月の新生児が音楽に同期させて脚を動かすこと[3]が報告されて

いるが、これらの事実は、音楽に合わせて身体を動かすことがヒトのもつ根元的な機能の一つであることを示している。さらに、オウム[4]やアザラシ[5]が音楽に同期して頭を動かす (head bobbing) ことは、音楽の拍に身体運動を同期させることはヒト以外の動物にとっても普遍的な機能であることを示している。また、拍に合わせた脚や指の屈伸運動では、音楽の拍と身体運動のあいだにテンポに依存した引き込み現象[6,7]が生じることが報告されており、音楽の拍と同期しやすい運動指令生成プロセスの存在を示唆する。

一方で、運動と感覚の同期性の基盤メカニズムを追求することを目的として、キー押しやタッピング等の単純な運動課題を用いた実験室内での研究も多数行なわれている (Repp の総説[8,9]に詳しい)。例えば、メトロノームにあわせてタッピングする課題では、メトロノームよりもタッピングの方が数十 ms 先行すること (negative asynchrony) が知られている[10,11]。タッピングでは、動作あるいは打撃のタイミングが「点」として決まるため (注: 正確には、タッピングにおいても動作の開始から終了までを考えれば連続的な動きである)、目標イベント (メトロノーム音) と同期すべき運動イベントが明確に定まる。加えて、タッピングでは触覚や聴覚を通じてその運動イベントの時刻を伝える感覚信号が脳にフィードバックされる。これに対して、ダンスなどの身体表現においては、動作のタイミングが「点」として決まらない連続的な動きが多く、一口に「踊りが音楽に合っている」といっても、「動きのどの瞬間が音楽の拍 (目標タイミング) と一致しているか」は自明ではない。また、このような連続的な運動では同期すべき運動イベントを告げる特異的な感覚信号 (タッピング時の触覚刺激や聴覚刺激に相当するもの) も与えられない。

このように、ダンスの演技において音楽にあわせて身体運動を実行するメカニズムには不明な点が多い。このメカニズムを明らかにできれば、連続的な運動を離散的なタイミングにあわせる脳の運動制御メカニズムの解明にとどまらず、身体表現のメカニズム、さらには身体表現を通じた情報伝達のメカニズムの理解に向けて有用な手がかりが得られると考えられる。

以上の問題意識に基づき、本研究では、音楽にあわせた身体運動において、いかなる運動特徴点が音楽の拍と同期しているかを身体運動解析により実験的に検討する。具体的には、身体の動かし方が定型化されており、また、実験時に被験者を選ばない「ラジオ体操」を題材として、ピアノ伴奏と体操動作の時間関係を解析した。

2. 実験方法

2.1. 被験者

本実験では、体操動作を明確にかつ再現性高く実行できることを重視して、ラジオ体操の指導資格を持つ被験者 2 人を対象とした。被験者の 1 人は全国ラジオ体操連盟に所属し、連盟が定めるラジオ体操指導委員の資格を有する女性であり、もう 1 人はラジオ体操指導士 2 級の資格を有する女性である。被験者には電気通信大学において定められた金額の謝礼を支払った。

なお、本実験は、電気通信大学の「ヒトを対象とする実験に関する倫理委員会」の承認を受けている。

2.2. 装置

被験者の身体運動計測には光学マーカーを用いた運動計測装置 (モーションキャプチャ) を用いた。実験室内に設置した 6 台の赤外線カメラ (NaturalPoint, Optitrack Prime13) と専用ソフトウェア Motive を用いて、サンプリング周波数 240 fps でデータを取得した。音楽 (ラジオ体操のピアノ伴奏) は、市販されている CD 音源を Windows 7 Professional の動作するデスクトップ PC で Windows Media Player を使い、サウンドカード (Creative Technology, SoundBlaster Audigy Rx) とモニタスピーカ (Yamaha, MSP3) を介して再生した。本実験では、音楽のタイミングを正確に計測する必要があるため、音楽に同期して赤外 LED (NaturalPoint, LED1010) を発光させる電子回路を作成し、LED の光をモーションキャプチャカメラで捉えることにより、音楽再生のタイミングと被験者の身体運動を同一装置内で一括して計測できるようにした。具体的には、伴奏曲の音声信号を左チャンネルに、タイミング信号を右チャンネルに収録したステレオ信号の wav ファイルを作成してサウンドカードから出力し、左チャンネルの信号をモニタスピーカに、右チャンネルの信号を上記の電子回路に接続することで、再生される音楽と赤外線 LED の発光タイミングが同期するようにした。

2.3. マーカー貼付位置

被験者の全身運動を調べるため、28 個の反射マーカーを身体に密着するスーツの上から被験者に貼付した。マーカーの貼付位置は頭部 4 か所 (ヘッドバンド)、第 7 頸椎棘突起 (C7)、胸鎖関節、第 5 腰椎 (L5)、肩峰 (左右)、外側上顆 (肘, 左右)、橈骨茎状突起 (左右)、尺骨茎状突起 (左右)、第三中手骨頭 (左右)、大転子 (左右)、外側上顆 (膝, 左右)、外果 (左右)、踵骨 (左右)、第 3 趾先 (左右) である。これらの骨指標の探索は文献[12,13]を参考にして行った。

2.4. 手続き

ラジオ体操第一[14]を構成する 13 種類の運動すべてを通して行うことを 1 試行とした。ピアノ伴奏の音源には、「実用ベスト NHKCD ラジオ体操第 1・第 2

「みんなの体操」(日本コロンビア COCE-38028) に収録されている「ラジオ体操第一(号令なし)」を用いた。1 試行の所要時間は約 200 秒で、試行ごとに休憩を挟み、計 5 試行を行った。

マーカの貼付等の準備時間を含め、実験時間は 90 分程度であった。

2.5. データ処理

取得した身体運動データは数値解析ソフトウェア Matlab (Mathworks) を用いて処理した。身体軌道データは、遮断周波数 10Hz のローパスフィルタ (20 次の Kaiser ウィンドウ FIR フィルタ) を通したのち、数値微分することにより、速度や加速度を求めた。

音楽の拍のタイミングは、以下の方法により CD 音源の信号波形から抽出した。先行研究[3]で用いられていた拍自動抽出ソフトウェア[15]により抽出した時刻を参考にしつつ、ピアノ伴奏譜に基づいて各拍での音高を確認したうえで音声信号波形のピーク時刻および音声信号のスペクトル解析で求められる音高とピーク時刻を目視により調べ、拍のタイミングを定めた。

3. 実験結果

ラジオ体操第一の全運動に関し、すべてのマーカの 3 次元位置と速さの時間変化を目視で調べ、音楽の拍との関係性を検討した。その結果、音楽の拍とほぼ同期している特徴点をいくつか見出した。以下ではまず、2 番 (腕を振って脚を曲げ伸ばす運動)、8 番 (腕を上下に伸ばす運動)、9 番 (体を斜め下に曲げ、胸を反らす運動) (図 1) を例にとって音楽の拍と運動軌道との時間的関係性を具体的に説明したのち、すべての運動に共通してみられた一般的傾向について述べる。

3.1. 2 番の運動

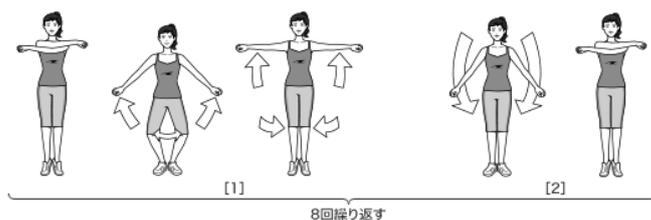
2 番の運動 (図 1A) では音楽にあわせて両腕を広げたり閉じたりすることから、腕の先端である手 (第三中手骨頭) の動きに注目して解析を行った。

図 2 は、2 人の被験者のある試行における左手の速さを示したものである。図の横軸は時間、縦軸は速さ、垂直な点線は音楽の拍の時刻、丸印は速さの極大点および極小点を示している。

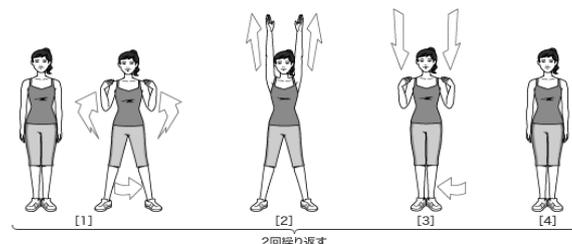
この図から、2 人の被験者に共通して手の速さの極大点が音楽の拍とほぼ一致していることがわかる。極大点と拍との時間関係を細かく見ると、被験者 1 では、拍に対して極大点が先行気味である一方、被験者 2 では極大点が遅れ気味であることが読み取れる。

これらの傾向は、速さ極大点と拍の平均時間差を見るとより明確になる。図 3 は、2 番の運動の全 16 拍について、手の速さ極大時刻と拍時刻の時間差との試行間平均値を被験者ごとに示したものである。この図からわかるように、手の速さ極大時刻は平均して音楽の

(A) 2 番



(B) 8 番



(C) 9 番

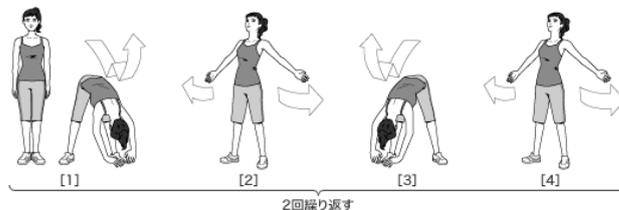


図 1 ラジオ体操第一 2, 8, 9 番の運動 ([14]より)

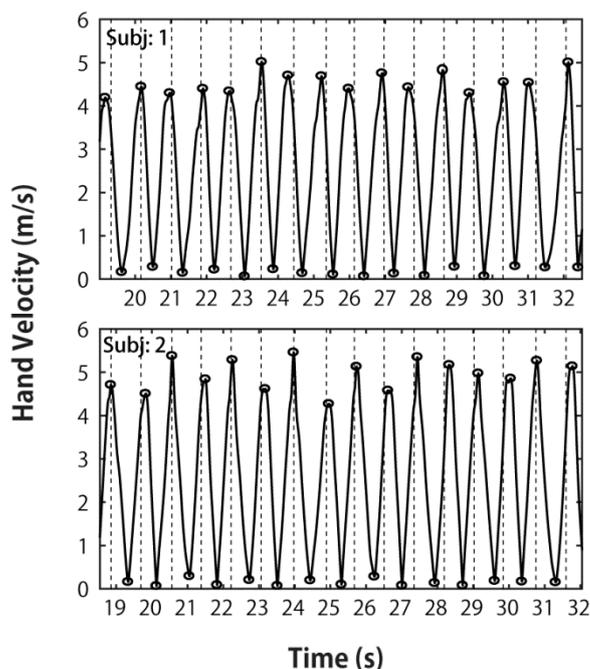


図 2 2 番における左手の速さ

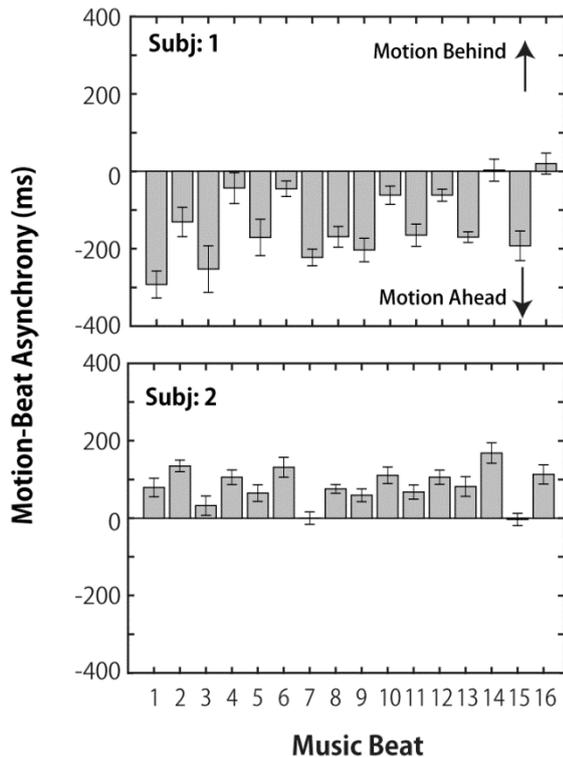


図3 手の速さ極大時刻と音楽の拍との関係

拍と 50-200 ms 程度ずれていて、ずれの方向は、被験者 1 では極大点の方が早く、被験者 2 では極大点の方が遅い。また、奇数拍と偶数拍を比較すると、奇数拍の方が速さ極大点の方が先行する傾向が読み取れる（奇数拍と偶数拍では腕の回転方向が逆になっている）。

以上の結果から、二人の被験者では、動作中の同じ特徴点（手の速さ極大点）を音楽の拍に合わせてようとしているものの、特徴点と拍の同期の捉え方に違いがあることがうかがえる。

3.2. 8 番の運動

8 番の運動（腕を上下に伸ばす運動：図 1B）は、音楽の拍に合わせて、肩を介して腕を上下に素早く伸ばす動作を 4 回繰り返す運動である。この運動で大きく動くのは腕であることから、前節と同様に、手（第三中手骨頭）の動きに注目して分析を行った。

図 4 は、被験者 2 について、右手の高さおよび速さの時間変化を表したものである。高さについては運動の終点・到達点（運動後高さ変化が零になる点）を、速さについては極大点と極小点に丸印を付してある。この図をみると、高さ変化の終点、速さの極大点のタイミングはいずれも音楽の拍に近いことがわかるが、細かく見ると、音楽の拍とほぼ一致しているのは速さの最大点であり、高さ変化の終点は拍よりも遅れていることが読み取れる。

被験者 1 についても同様の傾向が観察されたが、被験者 1 では、速さ極大点は音楽の拍に先行し、むしろ、

高さ変化の終点の方が音楽の拍と一致していた。

これらの観察結果は、高さ変化終点および速さ極大点と音楽の拍との時間差を調べることでより明確になった。図 5 は、二人の被験者に対し、手を上に伸ばすタイミング（第 2, 6, 10, 14 拍）に関してこれらの運動特徴点と音楽の拍の時間差の試行間平均をまとめたものである。被験者 1 では、高さ変化終点が音楽の拍とほぼ一致しているか多少（100ms 程度）先行しているが、速さ極大点は拍より 100-200ms 程度先行している。一方、被験者 2 では、速さ極大点と音楽の拍との時間差がほぼ零であるが、高さ変化終点は拍に比べて 200 ms 程度遅れている。

このように、この運動では、音楽の拍に同期しているのは、運動の終点と運動の最速点のいずれかであることが推測される。二人の被験者で結果にずれが生じたことは、これらの被験者のあいだで、音楽に合わせてようとしている特徴点異なるためか、あるいは、同じ特徴点にあわせようとしているが、拍と動きの同期性の捉え方が異なるためかは現時点では不明である。

3.3. 9 番の運動

これまで説明してきた 2 番と 8 番の運動の解析では腕や手の動きに注目したが、次に、体幹の動きに関する特徴点の例として 9 番の運動について説明する。

9 番の運動（体を斜め下に曲げ、胸を反らす運動：図 1C）では、1, 2 拍で音楽にあわせて上半身を前方に曲げ倒し、3, 4 拍でゆっくり後方にそらせる動作を 4 回繰り返す。ここでは、このうち 1, 2 拍における上半身運動のタイミングを調べるため、第 7 頸椎（C7）の高さに着目して解析を行った。

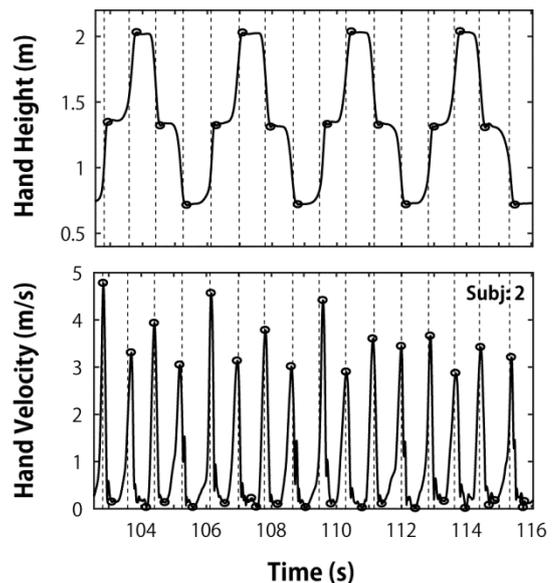


図 4 8 番における右手の高さと速さ

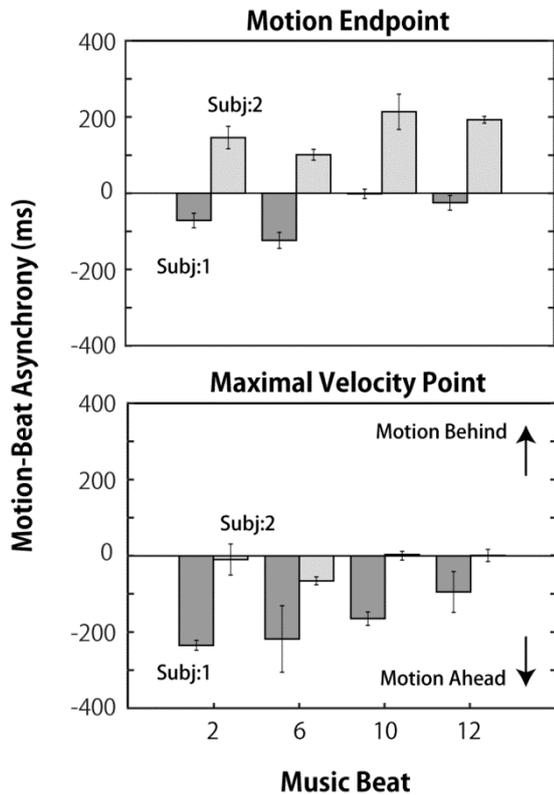


図5 8番での運動終点・速さ極大点と拍の時間差

図6は、C7の高さの時間変化を被験者ごとに示したものである。この図から、C7の最下点が音楽の拍と同期していることがわかるが（ただし、最初の2拍は、前の運動との過渡期にあるために時間ずれが大きい）、より細かくみると、被験者1では最下点が拍とほぼ一致する一方、被験者2では最下点が拍に遅れる傾向が読み取れる。これらの傾向は、最下点と拍との時間差の試行間平均値（図7）から確認できる。以上の実験結果から、被験者2は被験者1に比べて、一貫して動きのタイミングが遅れているといえる。

C7の最下点においてC7の動きの速さはゼロになることから、9番の運動では、2番の運動とは異なり、速さの極大点は音楽の拍と一致していないことになる。また、上半身の曲げ運動の到達点（最大屈曲点）にあたることから、最下点が音楽の拍と一致したという結果は、運動の到達点（目標点）を音楽の拍に合わせようとしていることを示唆している。

3.4. 一般的傾向

前節までで、三つの運動を例から、音楽の拍に一致している運動特徴点は①身体パーツの速さの極大点と②身体パーツの動きの終点（目標点）のいずれかであることを明らかにした。

同様の解析をすべての運動に対して行ったところ、他の運動についても、音楽の拍と一致している特徴点はこれら二つのいずれかであることをわかった。

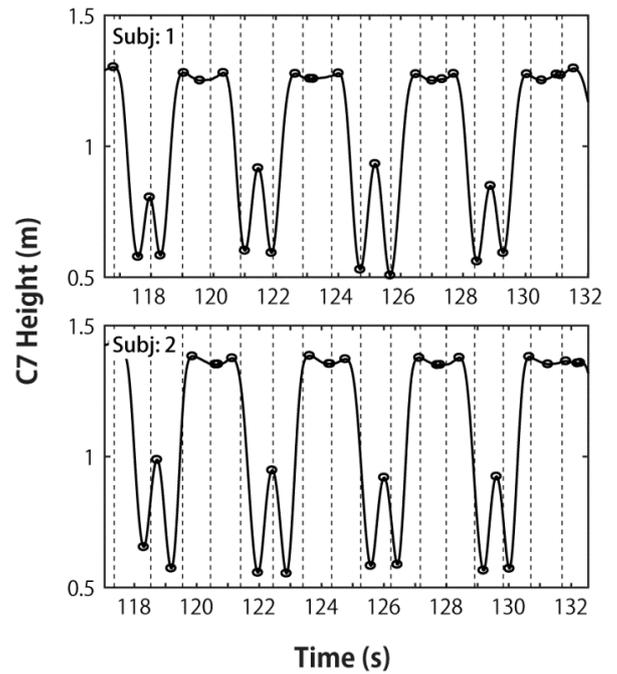


図6 9番における頸椎C7の高さ

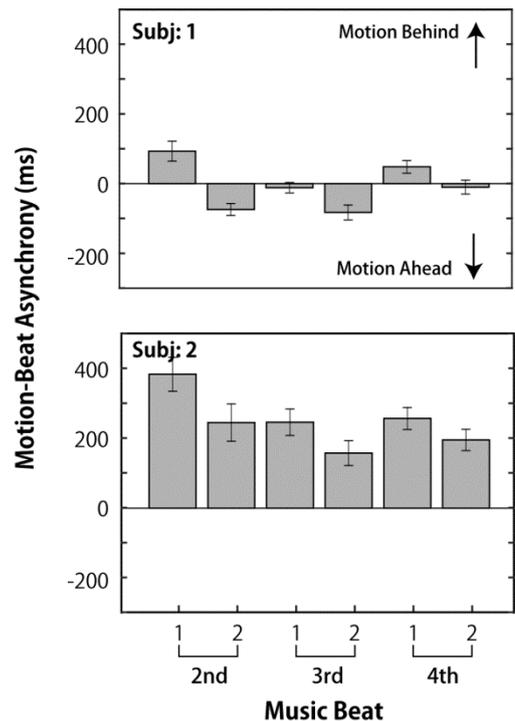


図7 頸椎C7高さ最下点と拍との時間差

具体的には、①速さ極大点と拍が一致している運動は2,3番、②運動終点と拍が一致している運動は5,6,7,8,9,11番であった。一般に、速さ極大点が拍と一致しているのは、運動が連続的で到達点を持たない周期的な（または回転的な）運動である。なお、これらの運動では、速度極大点はそのパーツの最下点とほぼ一

致していることから、重力の影響が関与している可能性が考えられる。一方、運動終点と拍が一致しているのは、運動が離散的・弾道的で到達点（目標点）が明らかなもので、多くの場合直線的な運動であった。

なお、1番（伸びの運動）、4番（胸をそらす運動）、10番（体を回す運動）、13番（深呼吸）については音楽の拍と同期した特徴点を特定できなかった。ただ、これらの運動は、身体をゆっくりと伸ばす運動（4番）や連続して大きく動かす運動（1番、10番）、または深呼吸（13番）であって、音楽の拍を意識するような動きではないことから、拍と同期する運動特徴点が見いだせなかったことは妥当な結果であるといえる。

3.5. 個人差

今回の実験では、二人の被験者の間に音楽の拍と運動特徴点の同期性について明確な違いが見られた。具体的には、被験者1は、拍に一致している特徴点が拍に対して先行する傾向にあったのに対して、被験者2では、特徴点が拍に遅れる傾向が見られた。このような違いは、音楽の拍と運動特徴点との同期性の捉え方が被験者間で異なるために生じたと考えられる。

また、3.2節で述べたように、8番の運動では、被験者1は手の運動終点が拍と一致していたのに対し、被験者2は手の速さ極大点が拍と一致していた。3.2節でも述べたように、この運動では二つの特徴点が互いに近接しており、二人の被験者がそれぞれどちらの特徴点を拍にあわせようとしていたかは明確ではないが、この例については、二人の被験者間で拍に合わせようとする特徴点が異なっていた可能性も考えられる。

このような個人差が生じる原因についてより具体的に検討するためには、被験者を増やして被験者間の違いを詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、ラジオ体操を題材として、音楽の拍と身体運動の特徴点の時間的関係性を解析した。その結果、音楽の拍と一致しているのは、手などの身体パーツの速さ極大点、あるいは、動作の到達点（目標点）のいずれかであることが明らかになった。これらの運動特徴点と音楽の拍の時間ずれはおよそ200ms以下であるが、その大きさやずれの方向には被験者による差があることがわかった。

本研究では、音楽と身体運動の時間的関係性について「運動者」の立場から解析を行ったが、ダンスなどの身体表現芸術においては、演技を鑑賞する「観察者」の立場からの検討も重要である。聴覚刺激と視覚刺激の同期性知覚についてはすでに豊富な知見があるが、それらを踏まえつつ、音楽と身体運動の時間的関係性が身体表現において果たす役割を「運動者」「観察者」

双方の視点から明らかにすることが大きな課題である。本研究の一部は科学研究費補助金（26280101）の援助を受けて行った。

文 献

- [1] Burger, B., Thompson, M., Luck, G., Saarikallio, S., and Toiviainen, P. (2013). Influences of Rhythm- and Timbre-Related Musical Features on Characteristics of Music-Induced Movement. *Frontiers in Psychology*, 4, 183.
- [2] Burger, B., Thompson, M. R., Luck, G., Saarikallio, S. H., and Toiviainen, P. (2014). Hunting for the beat in the body: on period and phase locking in music-induced movement. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 903.
- [3] Fujii, S., Watanabe, H., Oohashi, H., Hirashima, M., Nozaki, D., and Taga, G. (2014). Precursors of Dancing and Singing to Music in Three- to Four-Months-Old Infants. *PLoS ONE*, 9(5), e97680.
- [4] Patel, A., Iversen, J., Bregman, M., and Schulz, I. (2009). Experimental Evidence for Synchronization to a Musical Beat in a Nonhuman Animal. *Current Biology*, 19(10), 827-830.
- [5] Cook, P., Rouse, A., Wilson, M., and Reichmuth, C. (2013). A California sea lion (*Zalophus californianus*) can keep the beat: motor entrainment to rhythmic auditory stimuli in a non vocal mimic. *Journal of comparative psychology (Washington, D.C. : 1983)*, 127(4), 412-427.
- [6] Miura, A., Kudo, K., and Nakazawa, K. (2013). Action-perception coordination dynamics of whole-body rhythmic movement in stance: A comparison study of street dancers and non-dancers. *Neuroscience Letters*, 544, 157-162.
- [7] Miura, A., Fujii, S., Okano, M., Kudo, K., and Nakazawa, K. (2016). Finger-to-Beat Coordination Skill of Non-dancers, Street Dancers, and the World Champion of a Street-Dance Competition. *Frontiers in psychology*, 7, 542.
- [8] Repp, B. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic bulletin & review*, 12(6), 969-92.
- [9] Repp, B. and Su, Y.H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006-2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403-452.
- [10] Dunlap, K. (1910). Reaction to rhythmic stimuli with attempt to synchronize. *Psychological Review*, 17(6), 399-416.
- [11] Aschersleben, G. and Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: The role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, 57(3), 305-331.
- [12] 林 典雄, “改訂第2版 運動療法のための機能解剖学的触診技術 上肢”, 株式会社メジカルビュー社, 2011.
- [13] 林 典雄, “改訂第2版 運動療法のための機能解剖学的触診技術 下肢・体幹”, 株式会社メジカルビュー社, 2012.
- [14] かんぼ生命<図解>ラジオ体操第一 Available: http://www.jplife.japanpost.jp/aboutus/csr/radio/abt_csr_rdo_dai1.html.
- [15] Music Audio Tempo Estimation and Beat Tracking. Available: <http://labrosa.ee.columbia.edu/projects/beattrack/>.