

3軸加速度データを用いた指揮法の評価手法の開発

安田隆¹ 葉田善章²

概要: 吹奏楽やオーケストラといった合奏活動における指揮法の技術を独学で身に付けようとした場合、学習者は初学者であるほど指揮の良し悪しを自分自身の目視で客観的に評価することは困難である。本研究では、学習者の手に持った3軸加速度センサーのデータを用いることで、指揮者向けの教材のひとつ『指揮法教程』(斎藤メソッド)に基づいた動きかどうかを診断し、指揮の良し悪しを学習者に提示することで独習の支援を図るシステムを提案する。指揮の良し悪しの診断では、斎藤メソッドで最も基本的な腕の動きである1拍子の「打法(叩き)」の特徴に着目し、試行錯誤を通してリアルタイムに判別できるよう可視化するアルゴリズムの導出を行った。

キーワード: 指揮法, 加速度センサー, 斎藤メソッド, 自学自習

1. はじめに

1.1 本研究の対象

指揮法は、吹奏楽やオーケストラなどの合奏活動における指揮者特有の身体の技術のひとつである。指揮棒を振る腕の使い方だけでなく、棒を持たない腕、表情など体全体の動かし方を対象とする場合もあるが、本研究では、指揮棒を振る腕の使い方のうち、特定の個人の技術によらず教育機関等で一般に教授可能な技術を対象とする。

俗に斎藤メソッドと呼ばれている書籍『指揮法教程』[1]に記載されている技術は具体的な指揮法の一つである。

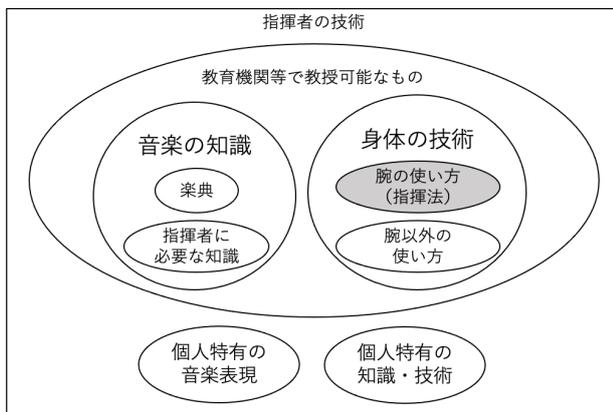


図1 本研究の対象(着色部)

1.2 指揮法の自学自習に対する課題

指揮法は見よう見まねで身につけることもできるが、体系化された知識に基づいて学習するほうが効率良い。

体系化された知識を得る一般的な手段の一つは、書籍やDVDメディアのような専門教材を利用することである。『指揮法教程』は音楽大学などの教育機関においても教材として活用されている。教材には指揮の理想的な動きについての情報が掲載されている。学習者は教材の文章・写真・映像を参照しながら腕を振るなどして学習を進めることができる。しかし教材の示す通りに腕をコントロールできて

いるかどうか学習者自身が鏡を見ても自己判断しづらく、どのように腕の使い方を矯正すれば上達できるか具体的にわからないという課題がある。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、指揮法を人間の指導者の力を借りずに身につけられるようにするシステムの開発である。学習者の腕の動きが理想的な動きと比べてどこがどのように異なっているのか可視化できる機能を備えた指揮法の学習支援システムである。システムによって腕の動きをどの程度コントロールできているかどうか評価することで、学習者は教材を使った自学自習の効率を高めることができる。

本研究のシステムは、指揮法を自学自習する学習者のために、3軸加速度センサーを用いて腕の動きの特徴を可視化し腕の振り方の改善案を提示する。指揮法の自学自習のために、他のセンサーを用いた先行事例もある。指揮法の学習にシステムを用いる先行研究は存在する。例えば学校などでの集団教育を対象にモーションキャプチャーを用いて指揮の改善すべき点を可視化する研究[2]や、コンピューター用のマウスを用いて指揮者の腕の動きの速度を検出し、音楽演奏の速度とのずれ具合を可視化して指揮者自身に腕の動きを矯正させようとする研究[3]である。

2. 学習対象とする指揮法

指揮法は、どんな場合にも対応できるたった一つの理想的な動かし方というものには存在しない。同じ楽曲を対象に指揮をする場合でも、目指す音楽表現が異なれば採用される指揮法も当然変わってくる。しかしながら2拍子の場合にはVの字のような図形を描く、3拍子の場合には三角形のような図形を描くといった型(パターン)は存在しており、指揮者と演奏者との間で共有できる「音楽の知識」として現在広く知られている。指揮の図形はどのような拍子で演奏すべきかを表し、図形を描く軌道はどのような音色で演奏すべきかを表し、図形を繰り返し描く速度はどのような速度で演奏すべきかを表す。

¹ 放送大学大学院 情報学プログラム 修士課程
² 放送大学

1章で触れた『指揮法教程』は指揮法の型を定義した専門教材として広く知られたものであり、「指揮における基本運動を理論的に細かく分類し、そして基本運動の速度の変化に最も重点をおいたことにより指揮法をよりわかりやすくした」[4]と評されている。

本研究ではこの『指揮法教程』に登場する型を学習対象として借用し、型をどの程度身につけることができているか学習者が客観的に判断できるシステムの実現を目指す。

2.1 1拍子の打法（叩き）

『指揮法教程』は図2にある7種類の型（運動）が示されているが、本研究では最も基本的な型である「打法（叩き）」のみを対象とする。また、同じ型であっても適用する拍子によって図形が変化するため、最も基本的な1拍子の型のみを対象とする。

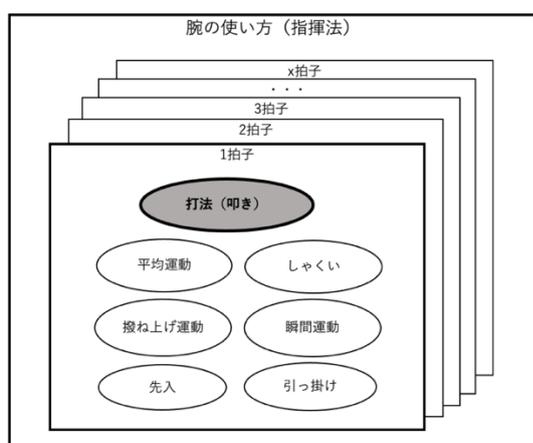


図2 本稿で対象とする『指揮法教程』の型

1拍子という拍子は実際の音楽において楽譜上で登場することはまれであるが、1拍子の打法（叩き）は『指揮法教程』にて「種々の指揮法の基礎」として紹介されており、2拍子以上の指揮は1拍子の指揮の応用として表現されている。つまり1拍子の打法（叩き）の学習支援システムを実現することは、同じ手法を転用することによって他の拍子、他の型を対象とした学習支援システムへ発展させることができる可能性を含んでいる。

2.2 1拍分の腕の動き

打法（叩き）は行進曲のような軽快な音楽や、弾むような音を表現するために適した腕の動きのひとつである。1拍子の場合の指先はI字の軌道を描く。ひじを伸ばし頭上に掲げた腕を自由落下させ、腕が腹部へたどり着いたら急反転させ、そのまま頭上へ向かってだんだん速度を落として戻すまでの一連の動きを音楽上の1拍で行う。I字の軌道を指先が描く様子は、『指揮法教程』では図3のように示される。線の太さは指先が動くスピードを表現し、太いほど早い動きであることを意味する。下部の丸部は腹部（拍の位置、拍点）である。線に沿って描かれた矢印の向きは指先が運動する方向を示す。矢尻の二つある矢印は加速、

打ち消し線のついた矢印は減速を示す。

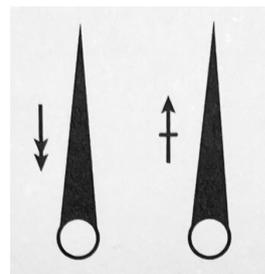


図3 1拍子の打法（叩き）を示す図形

1拍分の腕の動きは図4にて示す3つの動きにさらに分解することができる。点とは音楽の拍の位置を示している。点前および点後の動作とは、点の位置がどこにあるか指揮を見る人へ想起させるための運動である。各動作に含まれる指先の移動速度、指先の描く軌道という特徴は、3軸の加速度を用いて評価するのに向いている。



動きの名称	概要
点前の動作	頭上から点へ加速しながら落下。肩と腕の力を同時に抜く（＝脱力する）所作が特徴。指先の移動速度は、腕と同じ重さの物体が落下する場合の速度と等しい。
点の動作	腹部で急に頭上方向へ跳ね上げる。打法の中で指先の移動速度が最も速い状態。
点後の動作	点から頭上へ減速しながら上昇。指先の移動速度・軌道は、点前の動作を逆再生した状態と等しい。

図4 打法（叩き）の構成

2.3 音楽のテンポとの関係

打法（叩き）の図形を描く大きさは演奏する音楽のテンポに依存する。ゆっくりとした音楽で使用する場合は点前の動作において、静止状態（頭上）から最高速へ到達する瞬間（腹部）までの移動距離を稼ぐために図形を大きく描くことになる。一方で速い音楽の場合は逆に図形を小さく描くことにある。例えば行進曲の場合、一般的なテンポは120 BPM (Beats per Minute) 程度である。実際に行進曲で使用する場合は打法（叩き）を1分間に約120回繰り返すことができる大きさで描けば良い。指揮法に基づく指揮をするうえで重要なのは、特定の1拍を示す腕の振りが打法（叩き）として定義された軌道・速度となることと、使用

する音楽のテンポに適した大きさの図形で打法（叩き）を繰り返していることの両立を確認できるかどうかである。

3. 学習者の習熟度を示す状態分け

本研究では学習者の現状と目指す状態を定義するために、学習者の指揮法の習熟度を形の美しさ（Quality）、テンポの正確さ（Tempo）という2つの尺度を組み合わせることで図5のように習熟度を定義する。

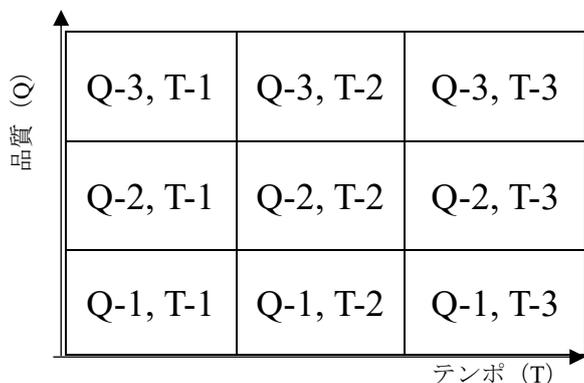


図5 学習者の習熟度のマトリクス

3.1 指揮の形の美しさ（Quality）

2.2章で述べた、とある1拍分の腕の振りが、『指揮法教程』で示される1拍子の打法（叩き）として定義された軌道・速度となっているかを示す指標である。状態 Q-1 は、全くの初心者の状態である。初学者は1拍子の打法（叩き）として腕を振っても、考えているとおりに腕が動かず安定しないため、その指先が描く軌道・速度が打法（叩き）の特徴とはならない。状態 Q-2 は、訓練によって打法（叩き）の特徴的な軌道・速度のどちらかを示せるようになった学習者を表し、状態 Q-3 は、軌道・速度の両方を示せるようになった学習者を表す。本稿では、表1の条件を満たした時に学習者が特徴的な軌道・速度を示したものとみなす。

表1 形の美しさ（Quality）の基準

観点	基準
軌道	点後の動作における指先の軌道が直前に行われた点前の動作の軌道と一致すること。
速度	点前の動作における指先の移動速度が腕を十分に脱力させた時と同じ速度で落下すること。

3.2 指揮のテンポの正確さ（Tempo）

2.3章で述べた、腕の振りを繰り返すことで認識されるテンポの正確さについての指標である。状態 T-1 は全くの初心者の状態である。初学者はメトロノームの奏でるリズムに沿って規則正しく腕を振ることが難しい。状態 T-2 はメトロノームに沿って正確に腕を振ることができるように

なった学習者である。状態 T-3 は、メトロノームがなくとも正確なテンポで腕を振ることができるようになった学習者である。本稿では行進曲のテンポを参考に、120 BPM のテンポで腕を振ることができるかどうかを基準とする。

3.3 習熟度のマトリクス

2つの尺度をそれぞれ X 軸、Y 軸に取り二次元のマトリクスにしたものが図5である。本研究のシステムはマトリクスのいずれかの状態に属する学習者を、マトリクスの最も右上にある（Q-3, T-3）状態へ遷移させるように補助する。

4. 開発するシステム

開発するシステムの構成を図6、画面表示イメージを図7、システムを用いた学習の流れを図8にそれぞれ示す。

学習者に利き手（一般に指揮棒を持つ手）で3軸加速度センサーを握ってもらい、1拍子の打法（叩き）を一定のテンポで一定回数実践している腕の動きの加速度を計測し、パソコンを使ってその加速度の特徴量を分析し結果をグラフ等で表示する。また、学習者の習熟度を自動的に判定して3章に示した尺度で表示し、より上位の状態へ遷移するための助言をテキスト表示する。助言内容は教育機関や音楽教室などで指導者から指導される事項を参考に設定する。

学習者はシステムの表示する内容を見て、教材の内容をどの程度身につけているのかを理解することができる。さらに助言テキストを読む試行錯誤しながら腕の振り方を矯正することによって、指揮の上達を図ることができる。

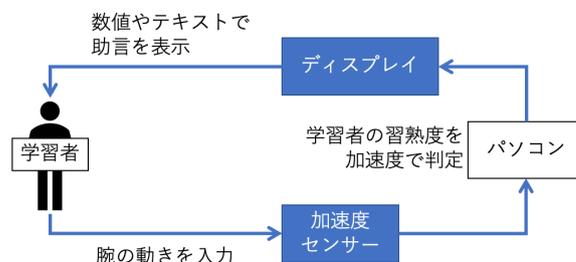


図6 システム構成図

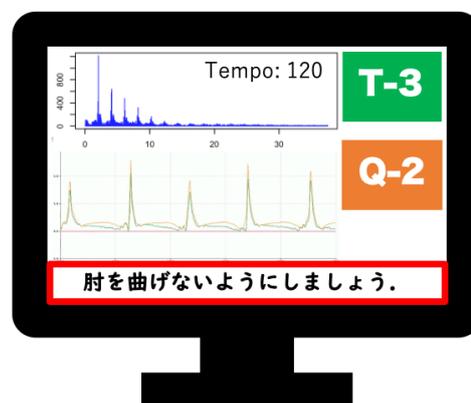


図7 システムによる画面表示イメージ

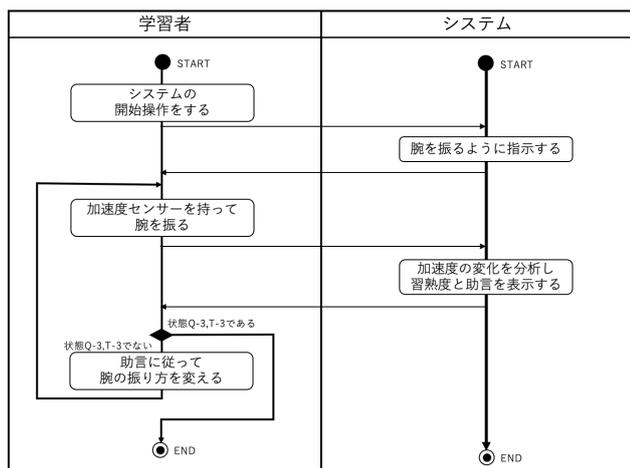


図 8 システムを用いた学習の流れ

5. 習熟度の評価アルゴリズムの導出

本研究のシステムを開発するには、学習者の行う指揮が 3.3 章で示した習熟度のマトリクスのどこに位置するのか、加速度の変化から評価するためのアルゴリズムが必要である。そこで本稿では 2 章で示した 1 拍子の打法（叩き）の特徴を踏まえたアルゴリズムを導出する。

5.1 指揮の形の美しさ（速度）の評価手法

点前の動作における速度の変化を加速度センサーの値の変化から検知できるかを確認する。点前の動作については 2.2 章にて、肩と腕の脱力によって腕を自由落下させる動きを含んでいることに触れた。腕に人為的な力が加わらず地球の重力に任せて落下している時の加速度の変化に規則性がみられれば、その規則から逸脱するデータを含んでいるかどうかで速度の良し悪しを評価できる。

本稿では腕と同じ重さ=およそ 4kg である[5]と仮定し、2L の水が入ったペットボトル 2 本を腕と同じ重さの物体として 3 軸加速度センサーを取り付けて頭上から落下させた。比較のために 2kg, 0kg の物体でも試行する。0kg の物体とは加速度センサー単体で落下させた場合を指す。



図 9 用意した物体（4kg, 2kg, 0kg）

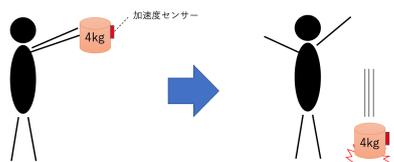


図 10 物体の落下実験の模式図

3 軸加速度センサーを用いると X 軸, Y 軸, Z 軸の 3 種類のデータを得ることができるが、落下中に回転するかもしれない物体にセンサーを取り付けたとき特徴的な情報がある軸に現れるかは事前にわからない。本稿では対策として、各軸の加速度データから数式 1 の式で算出できる合成加速度を比較時に参照する値として利用した。

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

数式 1 合成加速度

4kg, 2kg, 0kg の物体を落下させた合成加速度のデータをグラフ化して比較した結果が図 11 である。物体の重さの違いによって落下中の合成加速度の減り方が変わっていることをグラフから読み取れる。理想的な落下速度についての規則性を見出すにはさらに分析する必要があるが、指揮の形の美しさ（速度）を評価するためには少なくとも腕の重さを加味する必要があるということが明らかになった。

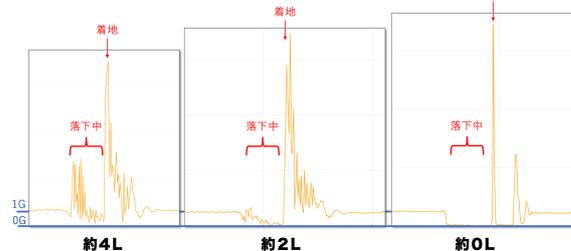


図 11 グラフの比較

5.2 指揮の形の美しさ（軌道）の評価手法

腕の動きの軌道の変化を 3 軸加速度から得られるデータの変化で検出できるか確認する。本稿では指揮経験者の力を借りて『指揮法教程』に沿った「正しい叩き」と「誤った叩き」(点後の動作において意図的にひじを曲げて軌道を変化させた叩き)を行ったときの加速度データを比較する。数式 1 で示す合成加速度では 3 次元の動きを検出できないため、3 軸いずれかの加速度と合成加速度とを組み合わせたもの（X 軸+合成加速度, Y 軸+合成加速度, Z 軸+合成加速度）を比較データとして用いる。また加速度センサーの持ち方によって X 軸, Y 軸, Z 軸の反応が変わるため、本稿では図 12 のように握った場合で確かめる。



図 12 使用した 3 軸加速度センサーとその持ち方

図 13 は Z 軸+合成加速度, は X 軸+合成加速度, 図 15 は Y 軸+合成加速度のグラフである。それぞれ上が正しい叩きの場合, 下が誤った叩きの場合である。

図 13 にて正しい叩きと誤った叩きを比較したとき、前者は2つの線の軌跡がほぼ一致しているのに対して、後者は2つの線の軌跡が明確にずれている箇所が生じている。また高い山（点）を基準として左右に伸びるZ軸の線が線対称かどうかをみると、後者は線対称ではなく点前の動作と点後の動作の軌跡が一致していないことを読み取れる。一方で、図 15 では図 13 のように2つの線の軌跡には明確なずれが見られない。

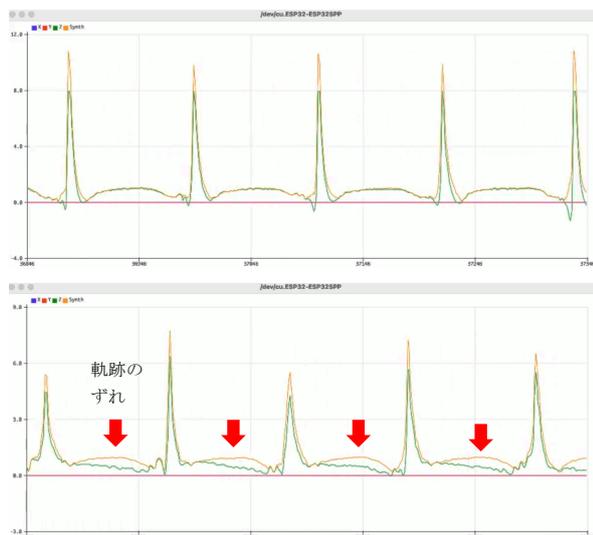


図 13 Z 軸+合成加速度
 (上：正しい叩き，下：誤った叩き)
 緑線が Z 軸，黄色線が合成加速度

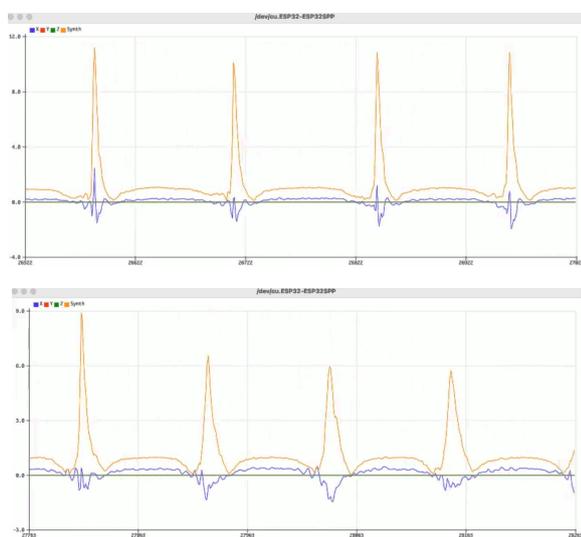


図 14 X 軸+合成加速度
 (上：正しい叩き，下：誤った叩き)
 青線が X 軸，黄色線が合成加速度

加速度センサーを図 12 のように握った場合において指揮の形の美しさ（軌道）を評価するとき、Z 軸を参照するとひじが曲がってしまっていることによる問題を検出することが明らかになった。本稿では Z 軸と合成加速度の値

の差を指揮の形の美しさ（軌道）を評価するアルゴリズムとして採用する。

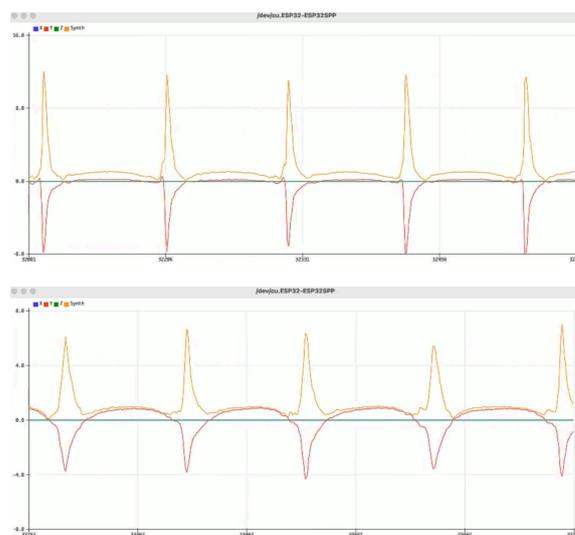


図 15 Y 軸+合成加速度
 (上：正しい叩き，下：誤った叩き)
 赤線が Y 軸，黄色線が合成加速度

5.3 指揮のテンポの正確さの評価手法

120 BPM のテンポで打法（叩き）を繰り返していることを検出できるかどうか確かめる。

繰り返される打法（叩き）の動きには周期性があるため、時系列の加速度センサーデータを FFT (高速フーリエ変換) にかけることで周波数成分を得ることができると考えられる。例えば 120 BPM の速度で指揮を振るということは、1 分間に 120 回 (=1 秒に 2 回) のスピードで腕を上下させるという意味であり、FFT によって約 2 Hz の周波数成分が強く表れる可能性がある。

指揮経験者に 120BPM の速度で鳴るメトロノームを聴きながら 1 拍子の打法（叩き）を振ってもらった時の合成加速度のデータが図 16、さらに FFT で解析した結果が図 17 である。図 17 を参照すると約 2 Hz の周波数成分が最も強く表れていることを読み取ることができる。

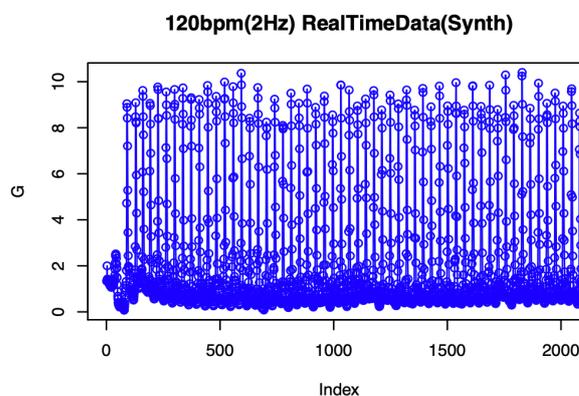


図 16 120 BPM で打法を行ったときの
 3 軸加速度合成データ

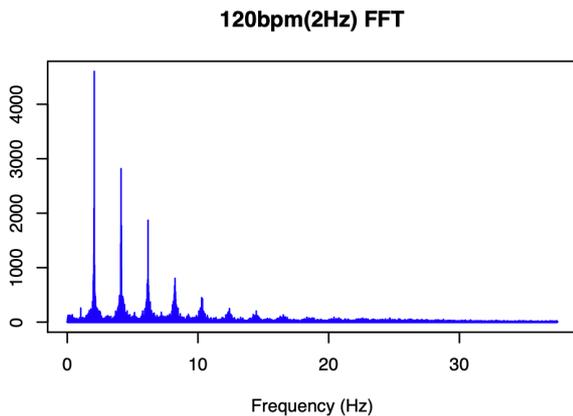


図 17 120 BPM で打法を行ったときの FFT 解析結果

指揮のテンポの正確さを検出するには、学習者の腕の動きから得た合成加速度のデータを FFT にかける手段が有効であることが明らかになった。本稿では FFT によって得られる周波数成分を指揮のテンポの正確さを評価するアルゴリズムとして採用する。

6. 実験

5章で導出したアルゴリズムを用いて4章で示したシステムを開発し3章で示した習熟度で評価できるか実験することにした。本稿の時点ではメトロノーム機能、習熟度の自動判定機能、助言テキスト表示機能は未実装であるため、習熟度の評価は2つのグラフの内容を人間の目視で確認することによって行う。

開発したシステムを用いて実際に1拍子の打法（叩き）を行った時の様子が図18、図19である。画面右側に写っている2つのグラフのうち、上はZ軸+合成加速度の変化を、下はFFTによる合成加速度の周波数成分を示している。

図18は実験3で行った「正しい叩き」を試した場合である。Z軸と合成加速度の動きは概ね同期していることから型の美しさ（Quality）の尺度はQ-2であると判断できる。またメトロノームの音がなくとも約2Hzの周期で指揮を振ることができていることから、テンポの正確さ（Tempo）の尺度はT-3相当であると判断できる。以上を踏まえてこの場合の学習者の習熟度は（Q-2, T-3）であると評価できる。

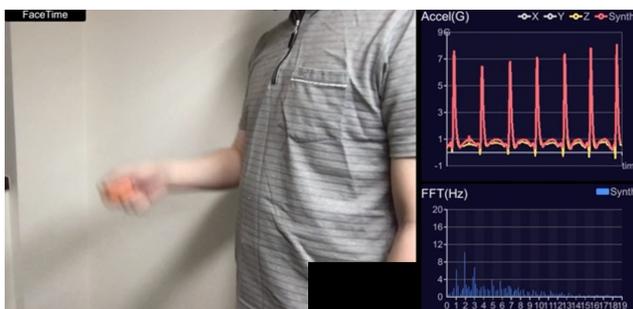


図 18 システムを用いた実験（正しい叩き）

図19は「誤った叩き」を試した場合である。Z軸と合

成加速度の動きが同期していないため、型の美しさ（Quality）の尺度はQ-1であると判断できる。テンポの正確さ（Tempo）の尺度については約1Hzの棒が最も高く120BPMのテンポで腕を振ることができていると評価し難い。以上を踏まえてこの場合の学習者の習熟度は（Q-1, T-1）であると評価できる。

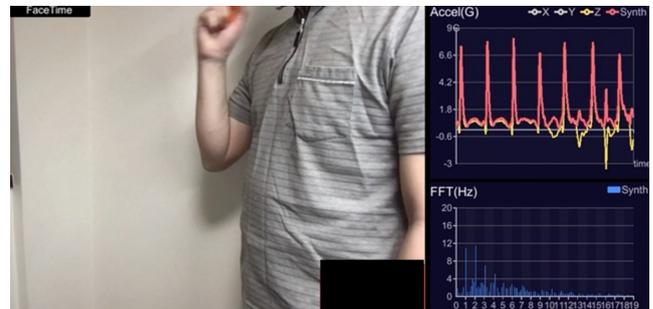


図 19 システムを用いた実験（誤った叩き）

7. おわりに

本稿では教材と関連づけられた指揮法を自学自習する学習者のために、3軸加速度センサーを用いて得られる情報を加工して提示する学習支援システムの可能性を示した。Z軸+合成加速度のグラフは1拍子の打法（叩き）の形の美しさを評価するのに有用で、FFTによる周波数成分のグラフは1拍子の打法（叩き）の繰り返しによるテンポの正確性を評価するのに有用である。

しかしながら2章にて示した1拍子の打法（叩き）のすべての要素を評価できるようになったわけではない。点前の動作の速度を評価するアルゴリズムの導出、点後の動作の軌道を評価するアルゴリズムの改良、システムに未実装の機能を用いた実験などは今後の課題である。

参考文献

- [1] 斎藤秀雄. (2010). 【改訂新版】指揮法教程. 音楽之友社.
- [2] 志民一成, 耳塚日香里, 大石幸史, 小長谷恭平, 紅林秀治. (2016). モーションキャプチャを活用した指揮法指導の可能性 KINECT センサーを用いた簡易動作分析システムを利用して. 静岡大学教育学部研究報告(教科教育学篇), 47, pp. 131-144.
- [3] 若林裕介, 市村洋. (1996). コンピュータミュージック演奏の指揮に関する同期処理の一考察. 情報処理学会全国大会講演論文集, 52, pp.431-432.
- [4] 松元宏康. (2018). 音楽大学生が学ぶべき指揮法の内容及び教授法の考察: 教職課程履修を視野に入れて. 1, pp. 165-176.
- [5] ※「腕」の重さについて, 整体院 みどり健康館のブログ, 入手先
 〈<https://beauty.hotpepper.jp/kr/slnH000254478/blog/bidA028596240.html>〉(参照 2021-08-20)