

# 正確なピッキングタイミング検出を用いた腕時計型エレキギターレッスンシステム

松下 宗一郎<sup>1,a)</sup> 馬場 琉之助<sup>1</sup> 田中 葵<sup>1</sup> 飯野 翔人<sup>1</sup> 馬場 大知<sup>1</sup> 岩柳 舞乃<sup>1</sup> 前田 祥太<sup>1</sup>  
中島 瑛太<sup>1</sup> 加茂 文吉<sup>2,b)</sup>

概要：ワイヤレスにて正確なタイミング情報を共有する腕時計型モーションセンサデバイスにて、正しい演奏運動とリズムを習得するためのエレキギターレッスンシステムを構築した。リズムの基準となるタイミング信号を 2.4GHz 帯ワイヤレス通信にて腕時計型デバイスに送信すると同時にメトロノームのクリック音を発生させることで、1 ミリ秒以内程度の誤差範囲にてシステム全体でのタイミング共有を行なうことができた。6 名のエレキギター初心者がメトロノーム音に合わせて同時に演奏を行うグループレッスンの実験を行なったところ、個々の演奏者におけるピッキングタイミングの外れ具合を数値化することができた。続いて、腕時計型モーションセンサとノート PC 画面を用いることで、演奏中にピッキングタイミングの外れ具合を演奏運動情報と併せて提示するインタラクションシステムを作成した。演奏初心者がレッスン中にタイミングの達成状況を視認しやすくするための画面デザインの検討を行ったところ、数秒ないし 10 秒程度といった時間幅での評価結果を表示し続ける手法が有効であることがわかった。

## 1. はじめに

エレクトリックギター（エレキギター）は金属製の弦を利き手側の指やピックと呼ばれる器具を使って弾く撥弦楽器の 1 つであり、撥弦による小さな音を電氣的に増幅することで大きな音響を発生させている。エレキギターは押弦を厳密に行わなくとも正しい音程の音を出せるフレットと呼ばれる機構を有しており、複数の弦を非利き手側の手指で押さえ、利き手側で弦を弾くコード弾きは初心者が気軽にエレキギター演奏を始める契機となってきた。この一方で、近年のポピュラー音楽では複雑な和音が多用されており、押弦位置やコード変更のレッスンを行う教材やコンピュータによるサポートが幅広く検討されている [1], [2], [3], [4]。また、ギター弦の中から 1 本のみを弾く単音ピッキング奏法はコード弾きと併せてアンサンブル演奏の音楽性を高める重要な位置を占めており、中級以上の演奏者にとって興味の対象となっている [5]。

エレキギターにおける撥弦では、利き手側の手指を用いた運動技巧が中心的な役割を担っているが、主として音程を決定する非利き手側と比較したとき、教材やコンピュータシステムの事例が非常に少なくなっている。とりわけ、

エレキギター初心者を対象とする書籍や動画では、コード弾きにおける正しい音程の演奏にフォーカスした内容が大多数を占めている。ここで、エレキギターの音響における音楽性という視点では、弦を弾く利き手側ではリズム、アクセントに加えてコード弾きにおける和音の鋭さといった部分をカバーしているのに対し、非利き手側は音程とその組み合わせ（ハーモニー）に限定されていることが分かる。このように、音楽性の構成要素を右手と左手で明確に分割していることがエレキギターの大きな特徴の 1 つであり、その多くを担っている利き手側の検討が重要である。

本研究では、エレキギター演奏者の利き手側手首に装着する腕時計型モーションキャプチャーデバイスにより、音楽性を構成する要素と演奏運動との関係性について、プロギタリストを含めた演奏経験者と演奏初心者の計測実験とその結果について論じる。また、エレキギター演奏の結果である音響信号の分析と、演奏音の直接的な原因となった演奏運動の関係性から、コンピュータシステムを用いた楽器演奏レッスンの実践結果を述べる。さらには、演奏リズムの基準となるメトロノームの鳴動タイミングをレッスン教室全体ならびに個別レッスンにて正確に共有することで、数値データによる客観的な演奏技量判断と演奏改善につながるコンピュータインタラクションに支えられた未来の音楽レッスン教室を提案する。

<sup>1</sup> 東京工科大学

<sup>2</sup> 玉川大学

a) matsushita@stf.teu.ac.jp

b) kamof@lba.tamagawa.ac.jp

## 2. 楽器演奏レッスンシステムの事例

### 2.1 音響信号によるサウンドベース手法

エレキギターの音響はエフェクターやアンプといった電気信号を処理する機材によって大きく変化する。このため、演奏技量の計測では撥弦の様子といった演奏運動の違いをできる限り忠実に捉えるピエゾ素子をピックアップ（マイクロフォン）として使用した研究事例が報告されている。Lindroos らは、一般的な磁気式ピックアップでは音響信号が撥弦運動を正しく反映しないことを示している [6]。Moumir らは音響信号のスペクトル分析をもとにしたコードチェンジならびに撥弦タイミングの推定手法を提案しており、一般的なギター音源による演奏リズムの抽出を行っている [7]。Ariga らはコード弾きにおけるギターからの音響信号分析から演奏されたコードを推定し、学習者が挑戦すべき課題を提示しているが、音楽性を構成する要素としては音程（和音の構成）とその変化タイミング（リズム）を演奏結果としての音響から推定するに留まっており、演奏運動における課題を特定するには至っていない [2]。Shin らはピエゾピックアップによる音響分析と、ギターのフレットと弦の電気的な接触による押弦位置の分析を組み合わせたレッスンシステムを提案している [8]。ここでは音響信号は押弦位置との照合に用いられているが、ギターを改造していることやピックアップの種類が限定されてしまう。また、ピックアップの種類に依存しない音響信号分析を用いた演奏内容識別については、深層学習といった人工知能的な手法を組み合わせる事例が報告されているが、シンプルなコード弾きの分析に留まっている [9]。

### 2.2 カメラを用いた演奏様態検出手法

エレキギター演奏における報告事例が最も多いのがカメラを用いた演奏検出手法である。ここでは、Microsoft 社の Kinect 等の深度画像分析による骨格運動モデルを使用するものや、OpenCV, Mediapipe 等の動画画像分析ライブラリを用いる手法が報告されており、ギターに光学マーカーを設置するといった軽微な機材改変にて演奏様態を分析することができる [1], [10], [11], [12], [13], [14], [15]。この手法を用いる多くの事例がコード弾きにおける非利き手側の押弦フォームにフォーカスされており、拡張現実感（AR）を組み合わせる事例が散見される。また、座標レジストレーションでは楽器の形状特徴を利用するもの [1], [16], [17] や、ギター上に基準となるマーカーを設置するもの [10], [11] が報告されている他、身体運動のみに着目する手法 [13], [15] についてもレッスン内容に沿った有効性が示されている。これらの手法では、カメラには映らない死角や、時間分解能の不足といった問題が生じる。また、カメラでは奏者の力の入り具合を正確に捉えることは困難である。

### 2.3 エレキギターや器具へのデバイス埋め込み手法

楽器そのものを改変することで演奏状況に関する詳細な情報を得る方法としては、ピエゾ素子を音響検出素子（ピックアップ）として用いるエレキギターと音響分析回路を用いる機材が知られている。この一方で、音響情報をデジタル変換する際には演奏運動といった原因側の情報が失われており、演奏フォームの改善といった根源的なレッスンにはつながりにくい。Marky らはエレキギターのフレット間に静電式タッチセンサと LED を敷設し、非利き手側におけるコード押弦レッスンに向けたシステムが、初心者へのコード弾き習得に有効であったことを報告している [3]。この方法ではエレキギターを大きく改変する必要があり、気軽に利用することは困難である。また、押弦による弦とフレットの接触を検出し、LED で押弦位置の教示を行う Shin らのシステム [8] にも同様な難点がある。Venegas らは利き手側の手指で把持するピックに圧力センサ（有線式）を設置することで、弦を弾くピッキングにおける力の入り具合を MIDI 信号における Velocity 値として取得するシステムを提案している [18]。この手法では楽器および器具への改変は軽度にとどまるものの、繊細な撥弦運動を行うピックを改変することで、自然な演奏環境が維持できなくなってしまう。

### 2.4 ウェアラブル機器による手法

コンピュータならびにセンサやバッテリー等の小型化技術の進展にともない、利用者の身体に機材を直接取り付けられるウェアラブル機器によるインタラクションの研究開発が実用事例とともに大きく広がってきている。この中では加速度と角速度を計測する慣性運動センサを用いる手法が報告されている [4], [14], [19], [20], [21], [22], [23], [25], [26]。Freire らは、カメラによるモーションキャプチャーとの比較から慣性運動センサによる演奏運動検出の有効性を論じており、両手法によるコード弾きにおける利き手側の位置座標検出値の間に強い相関があることを報告している [14]。松下らは位置座標ではなく、重力に対する利き手側手首の姿勢角度から直感性の高いエレキギター演奏状況の数値化ならびに CG 表現が行えることを報告している [20]。また、演奏者の両手に表面筋電位センサを取り付ける手法 [24] については奏者の運動意図を間接的に捉えられる可能性があるが、筋電位を少ない電極数で観測していることから細かな撥弦運動を個々に分析することは困難である。一方、外部骨格と呼ばれる力覚的なデバイスを演奏者の手に装着することで熟練者の演奏運動感覚を共有する手法が報告されている [27]。以上のような手法ではエレキギターや演奏器具への改変は最小限であるものの演奏様態情報の検出が間接的であり、演奏の結果としての音響との関係性を明確にすることが求められる。

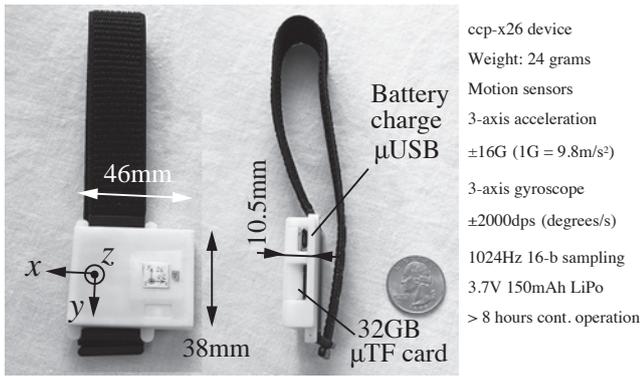


図 1 腕時計型運動センサデバイス

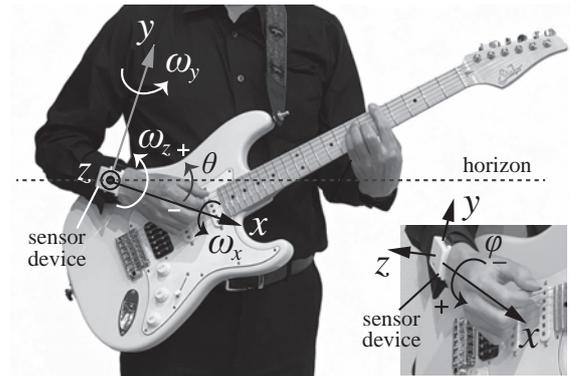


図 2 エレキギター演奏運動計測の様子

### 3. 腕時計型モーションキャプチャーシステム

前述のエレキギターを中心としたポピュラー音楽楽器演奏分析ならびにレッスンシステムの研究開発事例をもとに、本研究では演奏初心者が気軽かつ低コストにて利用できる練習環境のもとで演奏技量を獲得していくことを目標とした腕時計型モーションキャプチャーデバイスによる利き手側のレッスンシステムを提案する。ここでは、従来の研究開発事例ではほとんどカバーされてこなかった利き手側における撥弦運動とギターからの音響における音楽性との関係に関する研究結果をベースに、新しい音楽レッスン手法による初心者の演奏技量獲得状況観測の結果からその有効性を論じる。

#### 3.1 腕時計型センサデバイス

図 1 に本研究にて作成した腕時計型運動センサデバイスの外観を示す。このデバイスは 3 軸加速度センサおよび 3 軸加速度センサを集積した市販の IC チップを中心に、16 ビット CPU、カレンダー時計、マイクロ SD メモリカード、マイクロフォン、2.4 GHz ワイヤレス通信モジュールをプリント基板上に集積したものであり、充電式バッテリーおよび腕時計ベルトを含めた総重量は約 24 グラムとなっている。このデバイスはシンプルな脱着機構により、いつでもどこでも気軽に利用することができる。また、腕時計型デバイス上にてモーショントラッキング演算ならびにエレキギター演奏運動の分析を行うことで、毎秒 32 ないし 64 回のワイヤレスデータパケット通信におけるデータ欠損の影響を防止している [20], [22]。さらには、演奏リズムの基準となるメトロノームの鳴動タイミングをワイヤレス通信にて受信し、腕時計型デバイスに内蔵されたマイクロ SD メモリカードに運動計測データと共に記録することができる。

#### 3.2 エレキギター演奏運動の計測

図 2 に本研究による腕時計型モーションキャプチャーデバイスを装着してエレキギター演奏を行なっている様子を

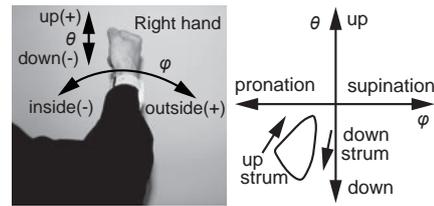


図 3 2 種類の対重力姿勢角度使った演奏運動フォーム表現

を示す。腕時計ベルトは演奏中にデバイスの装着位置がずれない程度の強さで締められており、演奏運動分析では前腕延伸方向である  $x$  軸周りの角速度信号が主たる役割を果たすことで運動アーチファクトの影響を軽減している。プロギタリストを含めたエレキギター演奏者へのインタビューを行った結果、利き手側手首に装着するデバイスは演奏時にほとんど気にならなかったとの回答を得ている。

#### 3.3 演奏運動パラメータとその性質

Matsushita らは腕時計型モーションキャプチャーデバイスを用いた演奏運動パラメータとして、コード弾きと単音弾きの双方について、運動信号とエレキギターからの音響との関係性から表 1 に示すような演奏リズムと揺らぎ、撥弦の鋭さ、撥弦の強さについて高い信頼度にて推定する計算アルゴリズムを提案している [23]。このアルゴリズムでは 1024 Hz とした高いサンプリング周波数による運動信号をもとに、更に高次の時間微分係数を組み合わせたシンプルな演算を行なっている。この結果、コード弾きと単音弾きの双方をカバーした場合の演奏運動終了からパラメータ出力までのレイテンシは最大約 60 ミリ秒となり、リアルタイムでのコンピュータインタラクションを実現している。

#### 3.4 演奏フォームの数値表現

楽器演奏による音響分析をベースとする方法に対し、音響の原因となった演奏運動へと時間を遡って分析する手法が考えられる。このことは光学式モーションキャプチャーを用いる手法 [1], [10], [11], [12], [13], [14], [15] においても達成は可能であるが、カメラやマーカの設定に加え、死

表 1 腕時計位置にて取得できる演奏運動パラメータ

種類	演奏リズム	リズムゆらぎ	撥弦の鋭さ	撥弦の強さ	タイミング偏差	タイミング偏差揺らぎ
記号	Rhythm	Rdev	Sharp	STR	dT	dTdev
説明	1 分間あたりの四分音符演奏数	撥弦時間間隔の標準偏差を	撥弦群が継続して	z 軸方向躍度	メトロノーム	メトロノームからのずれ時間
単位	bpm	平均値で正規化	いる時間	絶対値積算	からのずれ	の標準偏差
		%	ms	任意単位※	ms	ms

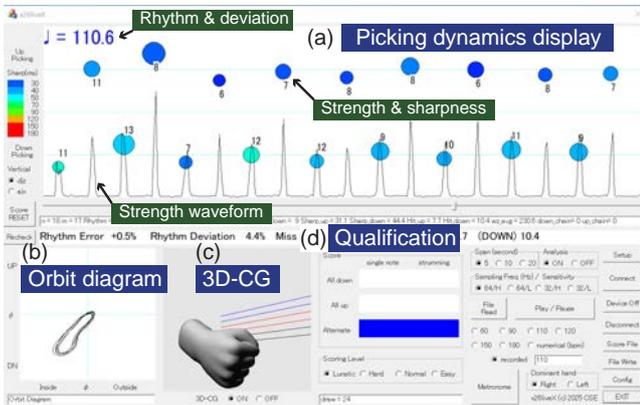


図 4 インタラクティブなエレキギターレッスン PC 画面

角の問題から演奏状況によってはロバストな演奏運動分析が難しくなるケースが考えられる。Matsushita らは図 3 に示すような 2 つの手首姿勢角度  $\theta$  (肘中心前腕姿勢角),  $\phi$  (手首捻り姿勢角) を用いた 2 次元の図による演奏運動表現を提案しており、音楽的に正しい演奏フォームの識別方法を論じている [22]。この図はエレキギターのピッキングが周期運動であることから演奏軌道図 (Orbit Diagram) と呼ばれており、音響による分析 [2], [10] や機材を改変する方法 [8], [18] と比較して環境変化に対してロバストな腕時計型モーションキャプチャーによる分析手法は顕著なアドバンテージを有している。

#### 4. エレキギターレッスンシステムのデザイン

図 4 に本研究にて作成したエレキギターレッスンシステムの PC 画面スクリーンショットを示す [22]。エレキギター演奏者が利き手側に腕時計型モーションキャプチャーデバイスを取り付け、図 1 に示した電源 ON/OFF 用押しボタンスイッチを押した後は、PC にてワイヤレス通信開始のボタンを操作するのみでアプリケーションが作動する。この際に演奏者ごとの事前登録や予備動作は必要なく、約 1 秒間の静止時間による重力方向推定が必要なことを除けばエレキギター演奏を自然に行うことができる。

##### 4.1 ピッキングダイナミクス表示

図 4 に示した PC スクリーンショットの上半分を占める表示窓では、表 2 に示すような演奏運動分析パラメータが様々な形態で表現される。これらのパラメータについては、プロギタリストの演奏計測や初心者向けのエレキ

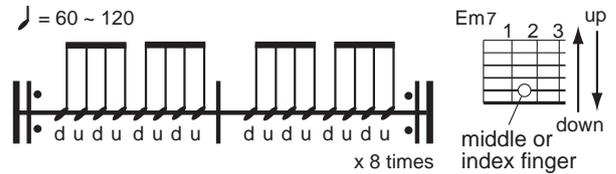


図 5 ギターレッスンクラスにおける演奏技量チェック用譜面

ターレッスン教室における学習曲線の計測結果に基づいて評価基準が決定されている [22], [25]。

#### 4.2 演奏軌道図表示

3 秒前から現在の時刻までの手首姿勢角度  $\phi$  および  $\theta$  をプロットしたものであり、図 3 に示した演奏軌道図をリアルタイムに近い形で観測することができる。コード弾きにおいては軌道図の中央に空白が作られることで、ダウンピッキングとアップピッキングにおける正しい手首姿勢の切り替えがなされていることが直感的に表現されている。

#### 4.3 技量達成認定表示

本研究では演奏における基本的な音楽性を評価するパラメータとして演奏リズムとリズムゆらぎを選択し、過去の演奏データから設定した評価基準が達成されると図 4 における Qualification の表示が点灯するアプリケーションを作成した [22]。また、より幅広い演奏初学者や初心者を対象とすることを考え、表 3 に示すような難易度を設定した。

#### 5. 初心者向けエレキギターレッスンクラス

本研究によるエレキギターレッスンの有効性を検証するため、6 名の情報系学部学生を被験者としたレッスンクラスを 2025 年 4 月から 12 月の期間に実施した。授業冒頭でのアンケート調査では全員がエレキギター演奏の未経験者であった。クラスは毎週 1 回約 5 時間の開講となっており、授業冒頭にプロギタリストによる演奏指導を 30 ないし 60 分程度行った後に演奏運動の計測実験を行なった。授業の後半では図 4 に示したインタラクティブなエレキギターレッスンシステムにより、履修者は自身の演奏に対する評価をリアルタイムで確認しながら技量獲得を進めていた。図 5 はレッスンクラスにおける演奏技量評価にて用いた譜面であるが、非利き手側の押弦技量の影響を最小限としつつ、シンプルな Em7 コードをダウンとアップのピッキン

表 2 ピッキングダイナミクス表示における分析パラメータ

パラメータ	リズムとゆらぎ	鋭さ (Sharp)	強さ (STR)	衝突回数 (Hits)
説明	bpm の値を示すと共に青・緑・黄・赤の 4 段階にてリズムゆらぎを表現	青から赤までの円の塗りつぶし色で撥弦の鋭さを表現	短時間の STR 値を示す折れ線グラフと円の半径で撥弦の強さを表現	ピッキングで発生した撥弦衝突の個数を円の横に数値で表示
ポイント	聴感上問題がない 5%以下のゆらぎと bpm が達成されると数値が青くなる	プロによるコード弾きの Sharp 値である 50ms 以下で円が青色になる	均等な半径の円が画面に収まって表示されれば, STR は適正	コード弾きではプロの値である $13.5 \pm 1.5$ の Hits を目指す

表 3 エレキギター演奏運動採点システムの合格判定基準

難易度	最高	難しい	普通	やさしい
リズム誤差*	±2%	±5%	±10%	±15%
リズムゆらぎ	5%以下	7%以下	10%以下	20%以下
達成人数**	2人	1人	3人	0人

\*リズム誤差は目標からのずれを bpm 目標値で正規化した数値

\*\*120bpm, エレキギター初心者 6人中, 第 14 週

表 4 コードストローク演奏運動パラメータの相関関係

パラメータ	Rdev	Sharp	STR	dT	dTdev
Rhythm	0.23	-0.23	0.11	0.54	-0.05
Rdev		-0.12	-0.28	0.13	0.06
Sharp			0.24	-0.07	0.08
STR				-0.14	-0.22
dT					-0.01

グ (ストローク) を交互に繰り返しつつ 8 小節にわたって演奏する内容となっている。ここで、演奏のテンポとしては、ポピュラー楽曲にて頻出するリズムを念頭に、60, 90, 120 bpm の 3 種類を設定した。

### 5.1 演奏運動パラメータの計測結果

Matsushita らはコード弾きにおけるリズムの評価では、指導者による演奏指導のみでは 14 週のレッスンにて 5% 以内のリズムゆらぎを達成できる初心者はほとんどいなかったことを報告している [23]。本研究ではクラスの初回よりリズムゆらぎを確認しつつレッスンを行なった結果、14 週目では 120 bpm のリズムにて 6 名中 2 名が 5% 以内のリズムゆらぎを達成していた。また、運動データから表 3 に示した基準による到達難易度判定を行ったところ、全員が普通レベル以上の合格に達していた。この一方で、リズムの評価では基準となるタイミングからの絶対偏差を必要がある。本研究ではノート PC よりワイヤレスにてタイミング信号を参加者全員の腕時計型デバイスへ同時に伝送するシステムを作成した。ここではシステムの遅延時間を正確に考慮しつつノート PC 側にてメトロノーム音とタイミング信号を同時に発生させることで、1 ミリ秒程度の平均誤差にてメトロノームからの演奏タイミングのずれを正確に計測することができた。そこで、クラス実施における第 14 週から第 22 週までの 9 週間における被験者 6 名の Em7 コードストローク演奏 (60, 90, 120 bpm にてそれぞれ 8 小節ずつ) の中で、連続する 2 小節におけるリズムゆ

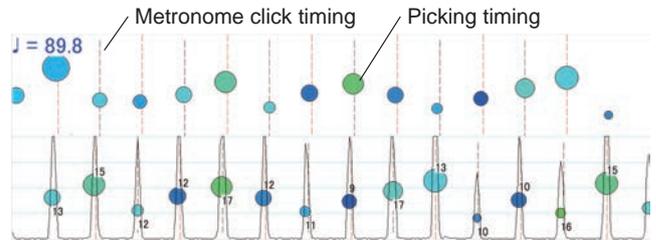


図 6 メトロノームタイミングとピッキングタイミングの対比

らぎ Rdev の値が 10% 以下となった 142 回の演奏について運動パラメータを算出した。ここで、演奏タイミングのずれ dT はメトロノームから遅れる方向で最大約 108ms であり、メトロノームよりも早くなる方向の値である約 69ms よりも大きくなっていった。また、タイミングがメトロノームから外れていることは、レッスンの指導者において音響として明確に知覚することができた。表 4 は表 1 にて示した演奏運動評価パラメータにおける相関関係を 142 回の演奏データから求めたものであり、メトロノーム鳴動タイミングからのずれを表す dTdev と演奏リズムのゆらぎ Rdev との間の相関係数は 0.06 といった小さな値になっていた。一方で、演奏リズム Rhythm とタイミングずれ dT の間には 0.54 といった比較的強い相関係数が認められているが、リズムが速くなったことでコードストローク演奏運動が追いつかなくなったものと考えられる。

### 5.2 メトロノームタイミングを用いたレッスンシステム

グループレッスンの事例に引き続き、演奏リズムの個人レッスンをサポートするシステムを検討した。図 6 は図 4 における上段を上下に二分割し、最上段に直近の演奏タイミングをメトロノームの鳴動タイミングとともに表示した例である。この最上段の表示は一般的な楽譜における音価の表記から想起したものであり、8 分音符のタイミングを縦線にて示しつつ数秒ないし 10 秒間程度毎の静止画として表示することで、演奏者と指導者の双方にとって理解しやすい表現となっていた。この事例では演奏タイミングを示す円の中心付近にメトロノームのタイミングが概ね重なっており、正しいリズムの演奏となっていたことが見て取れる。この一方で、メトロノームから明確に遅れた演奏タイミングとなっている演奏者が散見されており、アンサンブル演奏にて問題が生じる可能性があることが分かった。

## 6. まとめ

本研究ではエレキギター初心者のレッスンにおいて、演奏の音楽性に大きな影響を与える利き手側手首での運動信号計測を用いる手法の適用を試みた。そして、音楽性を構成する要素であるピッキングのリズム、鋭さ、強度、弦衝突の様子を可視化するインタラクションシステムの製作ならびに実証実験を行ったところ、演奏初心者が技量を獲得していく様子を客観的に知ることのできる新しい音楽レッスン教室の可能性が示された。

### 参考文献

- [1] 元川洋一, 斎藤英雄: ギター演奏支援のための構造特徴追跡を利用したマーカレス AR 表示, *The Virtual Reality Society of Japan (TVRSJ)*, Vol. 13, No. 2, pp.267-278, (2008).
- [2] Ariga S., Goto M., Yatani K.: STRUMMER: An Interactive Guitar Chord Practice System, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo (ICME)*, pp. 1057-1061, (2017).
- [3] Marky K., Weiß A., Matviienko A., Brandherm F., Wolf S., Schmitz M., Krell F., Mueller F., Muehlhäuser M., Kosch T.: Let's Frets! Assisting Guitar Students During Practice via Capacitive Sensing, *CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '21)*, 12pages, (2021).
- [4] Matsushita S., Iwase D.: Detecting Strumming Action While Playing Guitar, *Proc. Int. Symp. on Wearable Computers*, pp.145-146, (2013).
- [5] Leavitt, W.: *A Modern Method for Guitar - Volumes 1, 2, 3 Complete*. Berklee Press Publications, Boston, MA, USA, (1999).
- [6] Lindroos N., Penttinen H., Välimäki, V.: Parametric Electric Guitar Synthesis," *Computer Music Journal*, Vol. 35, No. 3, pp.18-27, (2011).
- [7] Mounir M., Karsmakers P.: Watershoot T. v.:Guitar note onset detection based on a spectral sparsity measure, *24th European Signal Processin Conference (EU-SIPCO)*, pp. 978-982, (2016).
- [8] Shin Y., Hwang J., Park J., Seol S.: Real-time Recognition of Guitar Performance Using Two Sensor Groups for Interactive Lesson, *Proc. of 12th Int. Conf. on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '18)*, pp. 435-442, (2018).
- [9] Wang, B., Yang, M. Y., Grossman, T.: Soloist: Generating mixed-initiative tutorials from existing guitar instructional videos through audio processing. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-14), (2021).
- [10] 水戸勇氣:モーションキャプチャを用いた演奏動作計測, *日本音響学会誌*, Vol. 77, No.9, pp.580-586, (2021).
- [11] Skreinig L. R., Kalkofen D., Stancescu A., Mohr P., Heyen F., Mori S., Sedlmair M., Schmalstieg D., Plopski A.: guitARhero: Interactive Augmented Reality Guitar Tutorials, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 11, pp.4676-4685, (2023).
- [12] Tolentino C. T., Leon F. D.: Improving Plucking Point Position Estimation in a Classical Guitar Performance using a Novel Video-Based Approach, *IEEE Region 10 Conference (TENCON2021)*, pp.117-122, (2021).
- [13] Kashiwagi Y., Ochi Y., Miyoshi Y. Mori Y. Okamoto R.: A Study of Performance Detection Method for a Guitar Skill Learning Using Kinect Sensor, *IEEE 4th Int. Conf. on Consumer Electronics (GCCE2015)*, pp. 343-345 (2015).
- [14] Freire S., Santos G., Armondes A., Meneses E. A. L., Wanderley M. M.: Evaluation of Inertial Sensor Data by a Comparison with Optical Motion Capture Data of Guitar Strumming Gestures, *Sensors*, 20, No. 19, 5722, (2020).
- [15] Elashmawi W. H., Emad J., Serag A., Khaled K., Yehia A., Mohamed K., Sobeah H., Ali A.: A Novel Approach for Improving Guitarists' Performance Using Motion Capture and Note Frequency Recognition, *Applied Science*, 13, 6302, (2023).
- [16] Del Rio-Guerra, M. S., Martin-Gutierrez, J., Lopez-Chao, V. A., Flores Parra, R., Ramirez Sosa, M. A.: AR graphic representation of musical notes for self-learning on guitar. *Applied Sciences*, 9(21), 4527, (2019).
- [17] Martin-Gutierrez, J., Del Rio Guerra, M. S., Lopez-Chao, V., Soto Gastelum, R. H., Valenzuela Bojórquez, J. F.: Augmented reality to facilitate learning of the acoustic guitar. *Applied Sciences*, 10(7), 2425, (2020).
- [18] Vanegas R.:The MIDI Pick, *Proc. of 2007 Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME07)*, pp. 330-333, (2007).
- [19] Lee E., Enke U., Borchers J., Jong L. D.: Towards Rhythmic Analysis of Human Motion using Acceleration-Onset Times, *Proc. of 2007 Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME07)*, pp. 136-141, (2007).
- [20] 松下宗一郎, 小松叶芽, 田村黎, 加茂文吉: 身体運動の日常的評価に向けたパーソナルモーションキャプチャーデバイス:エレキギター演奏の運動学的診断への応用, *情報処理学会論文誌*, Vol. 64, No. 6, pp.1123-1133, (2023).
- [21] Matsushita S., Takamoto A.: Interactive Electric Guitar Lesson System Based on Real Time Wrist Motion Analysis, *2025 IEEE International Conference on Consumer Technology-Europe (ICCT-Europe)*, Algarve, Portugal, pp.1-4, (2025).
- [22] Matsushita S., Takamoto A., Kamo F.: A Wearable Guitar Lesson System Using Visual Information on Picking Motions, *IEEE 14th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2025)*, pp. 1125-1129, (2025).
- [23] Matsushita S., Takamoto A.: Fundamental Picking Analysis System for Electric Guitar Using Wrist-Worn Inertial Motion Sensors, *IEEE Sensors Journal*, Vol.25, No.5, pp.8849-8856, (2025).
- [24] Rhodes, C., Garcia-Peguinho, N., Beesley, L., Fan, H., Jay, C., Allmendinger, R., Climent, R.: Ground truths: challenges and opportunities in developing an AI guitar assistant. *Frontiers in Computer Science*, 7, 1549335, (2025).
- [25] Kamo F. and Matsushita S.: Evaluating electric guitar strumming form as musically correct rhythm and sharpness using wrist-worn inertial motion-tracking device, *Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electron. (ICCE2022)*, pp. 881-886 (2022).
- [26] Yoshida K., Matsushita S.: Visualizing strumming action of electric guitar with wrist-worn inertial motion sensors, in *Proc. IEEE 9th Global Conf. Consum. Electron. (GCCE)*, Kobe, Kobe, Japan, pp. 739-742, (2020).
- [27] Ashimori K., Igarashi H.: Skill assist system for musical instruments by skilled players force feedback, *IEEE 26th Int. Symp. on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2008-2013, (2017).