

# 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～

松下宗一郎<sup>1</sup> 小松叶芽<sup>1</sup> 田村黎<sup>1</sup> 加茂文吉<sup>2</sup>

**概要:** 利用者の日常的な運動記録ならびに評価を行う対環境ロバスト性の高いパーソナルモーションキャプチャーデバイスの検討を行った。3軸加速度ならびに3軸角速度センサからなる慣性運動センサ IC チップに低消費電力マイクロコントローラを組み合わせることで、連続最大約15時間の運動信号をSDメモ리카ードへ記録することができる。3Dプリンタによる腕時計型ケースへの実装ではデバイスの総重量は約39グラム以下となり、日常的な利用が十分に可能であった。このデバイスをエレキギター演奏技法レッスンの開発を行う大学の演習クラスに適用したところ、参加者の演奏技量をリズムの正しさ、リズムのゆらぎ、アクセントの鋭さについて数値化することができた。そして、28週にわたる演習クラスでは、参加者の顕著なエレキギター演奏技量向上を確認した。また、デバイスの対重力姿勢角度を計算するモーションキャプチャー機能をワイヤレス通信モジュールとともに搭載することで、コードストローク奏法によるエレキギター演奏における利き手側の運動学的診断をリアルタイムにて行うシステムを製作した。クラスにおける様々な技量レベルにある16名のアマチュア奏者による評価実験の結果、リズムの正しさが達成された後は、演奏フォームの正しさへと比重が移っていく奏者が出現することが分かった。

**キーワード:** モーションキャプチャー, 慣性運動センサ, エレキギター, コードストローク

## Personal Wearable Motion Capture Device for Daily Physical Activity Evaluation ～ Application for Kinesiological Diagnosis of Electric Guitar Play ~

SOICHIRO MATSUSHITA<sup>†1</sup> KANAME KOMATSU<sup>†1</sup> REI TAMURA<sup>†1</sup>  
FUMIYOSHI KAMO<sup>†2</sup>

**Abstract:** A wrist-worn personal motion capture device by using inertial motion sensors has been investigated to record and evaluate daily physical activity. The developed device utilizing a 3-axis accelerometer, a 3-axis gyroscope, a low power microcontroller, and a microSD memory card can be operated for up to 15 hours. A wristwatch-like device including a rechargeable battery weighs less than 39 grams. A motion tracking calculation algorithm without using a magnetometer may expand the applicable situation for the motion capture device. A chord strumming technique of the electric guitar was chosen as an application for the proposed device worn on the player's dominant hand. Sixteen amateur subjects having a wide range of playing experience participated in the motion diagnosis experiments. The kinesiological diagnosis may show the accuracy of strumming rhythm, the sharpness of accent, and the guitar-playing form in terms of attitude angles toward the ground. The guitar playing tasks were able to be found by using timestamps and the characteristic features in the attitude angle waveforms in a 5-hour-long guitar lesson and development class. The participants showed remarkable progress in the class held for 28 weeks. In addition, Some of them became to pay attention to the attitude angles by referring to the playing-form of the professional guitarist.

**Keywords:** Motion capture, Motion tracking, Inertial sensor, Electric guitar, Chord strumming

### 1. はじめに

#### 1.1 モーションキャプチャー技術の現状

利用者の身体運動を正確に測定するシステムとしては、カメラを周囲に配置する光学式や、精密な磁場計測によるモーションキャプチャーが知られているが、身体へのマーカーや有線式磁場センサーの貼付けといった準備が必要となることから、日常生活において気軽に利用できるものとはなっていない。また、加速度センサ及び角速度センサに

よる慣性運動センサにより、身体への装着部位における対重力姿勢角度や空間座標を推定するモーションキャプチャーシステムでは地磁気センサによる方位角情報が必要となることから、利用環境には一定の制約が生じる。この一方で、運動センサ技術の進歩や小型低消費電力コンピュータの高性能化に伴い、利用者の日常生活における身体運動評価システムにおいては、活動量計測を利用した健康維持といった医療分野を中心とした幅広い応用が期待されている[1]。このようなシステムでは深度カメラによる身体部位の

<sup>1</sup> 東京工科大学コンピュータサイエンス学部  
School of Computer Science, Tokyo University of Technology

<sup>2</sup> 東京工科大学大学院コンピュータサイエンス専攻  
Graduate School of Computer Science, Tokyo University of Technology

認識に加え、加速度センサによる身体運動強度の推定や、準安静時における対重力姿勢角計測を利用した身体姿勢推定が行われているが、表面筋電位計測 (EMG) を用いた例を除けば、運動様態のわずかな違いを正確に識別するような分野への応用例は数少ない。

### 1.2 モーションキャプチャーによる精密作業評価

このような状況の中で我々の研究グループでは、周囲環境への依存性が低い加速度と角速度の信号のみを利用した身体装着型モーションキャプチャーデバイスとその応用についての検討を行ってきた。例えば、繊細な運動技巧が要求される内視鏡手術鉗子操作技量の評価では、外科医の両手首に装着した小型軽量の慣性運動デバイスによる対重力姿勢角度の推定により、施術トレーニング機器の1つであるドライボックスにおける結紮・縫合タスクにおいて技術認定医と未認定医を明確に区別する運動特徴パラメータを見出した[2]。この研究では、施術者の前腕における対重力姿勢角度を肘中心回転角と手首ひねり回転角とに分解し、2次元平面上への運動軌跡図により鉗子操作の様態を直感的に可視化している。内視鏡外科手術では、施術者の両手の運動範囲が限定されており、前腕の対重力姿勢角度情報のみにて施術状況を推定できたことが、精度の良い運動特徴パラメータの導出につながったものと考えられる。

### 1.3 ギター演奏技巧診断に関する研究事例

内視鏡外科手術トレーニングによる身体装着型モーションキャプチャーデバイスによる運動評価技術開発の事例をもとに、より日常生活に近い場面でのアプリケーションとしてエレクトリックギター演奏に伴う身体運動の精密計測を考えた[3][4][5][6]。ギター演奏にて生じる音響信号の特性は、非利き手側での押弦による音程選択と、利き手側による撥弦方法に大きく左右される。ここで、非利き手側の運動では個々の手指による押弦を正確に分離した計測が必要となることから、手首に装着する単一の慣性運動センサデバイスの適用は困難である。このため、従来の研究例ではギターの押弦部分に触覚センサを取り付ける手法や、カメラによる押弦位置認識が試みられている[7][8]。しかしながら、これらの方法ではギターそのものの改変や機材の準備といった視点から、いつでもどこでも気軽に利用できる状況とはなっていなかった。そこで、ギターから生じる音響信号のみを用いた演奏解析が試みられているが[9]、エレキギターの多くが搭載している強力なマグネットを用いた集音デバイス (ピックアップ) の音響特性により、演奏技量との関係性を正しく評価することは困難である。

一方、利き手側の手指にて保持されるピック (plectrum) による撥弦 (ピッキング) が広く用いられているエレクトリックギターの演奏では、前腕中心軸に沿った運動軸を有する親指・人差し指の運動がピッキング運動の主体をなしている。そして、利き手側手首における運動信号から、コードストローク奏法と呼ばれる複数弦を同時に弾く技法で

の演奏リズムやピッキング運動の鋭さといった音楽表現において重要な役割を果たすパラメータが見いだされている。

### 1.4 本報告における検討内容

本研究報告では、利用者の手首に装着するパーソナルモーションキャプチャーデバイスについて、大学学部におけるギターレッスンシステム開発授業での適用事例[10]をもとに、その有効性を論じる。また、この授業の中で見出された運動センサ情報へのタスク実施タイミングアノテーション問題を解決しつつ、より高い計測精度を有するデバイスの開発事例を紹介する。さらには、エレキギター演奏技法の学習者に対し、客観的な指標による技量レベルの可視化とその改善を導くリアルタイムインタラクションシステムのデザインと予備的な検討結果について報告する。

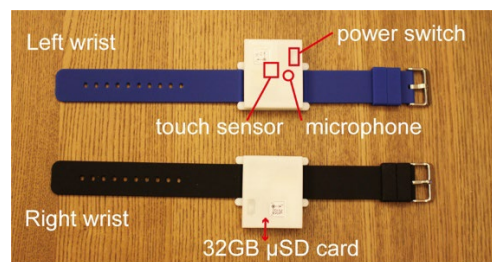


図 1 腕時計型モーションキャプチャーデバイス

Figure 1 Wrist-worn motion capture devices.

## 2. 腕時計型モーションキャプチャーデバイス

### 2.1 デバイスの構成と性能諸元

図 1 は本研究において作製した手首装着型デバイスであり、3D プリントにより硬質 ABS 樹脂にて整形したケース (右手・左手の両方に対応) に市販のシリコンラバー製腕時計ベルトを着脱可能な治具にて装着している。ケース内にはマイクロマシン技術によるモーションセンサ IC チップ (加速度 3 軸, 角速度 3 軸, 温度) に加え、低消費電力 16 ビットマイクロコントローラ、高精度リアルタイムクロック (1 ヶ月にて誤差±20 秒程度)、マイクロ SD カード用ソケット、電池充電用マイクロ USB コネクタを搭載した回路基板を基本構成として内蔵している。また、デバイスのケースは簡易防水となっており、屋外での使用や装着者の発汗等による影響を受けにくいデザインとなっている。

表 1 はデバイスの性能諸元を示したものであるが、電力消費が比較的大きいワイヤレス通信モジュールや、運用環境によっては利用に制約が生じるマイクロフォン等を搭載した着脱可能なサブ回路基板を用途に応じて組み込む拡張構成とすることができる。図 2 は手首装着型ケース内に搭載できる全ての構成要素を反映した回路ブロック図であり、運動信号と音声信号を同時に記録した場合、32GB のマイクロ SD カードに総計約 486 時間分のデータを保存することができる。また、運動センサ特性の温度補償をソフトウェア的に行なっており、環境変化による計測誤差を低減している。

表 1 腕時計型デバイスの性能諸元  
 Table 1 Specifications for the wrist-worn devices.

Configuration	Base device	Extended
Size	43.0 <sup>w</sup> x 35.0 <sup>d</sup> x 10.5 <sup>t</sup> mm (w/o watchband)	
Total weight	37 grams	39 grams
Battery	3.7V 110mAh	3.7V 150mAh
Battery Life	11 hours (w/o RF)	15 hours (w/o RF)
Sensing Range	±16G (1G = 9.8m/s <sup>2</sup> ), ±2000dps	
Sampling Freq.	500 Hz	500 / 512 Hz
Remarks	2.4GHz Wireless	2.4GHz Wireless Microphone, Touch sensor

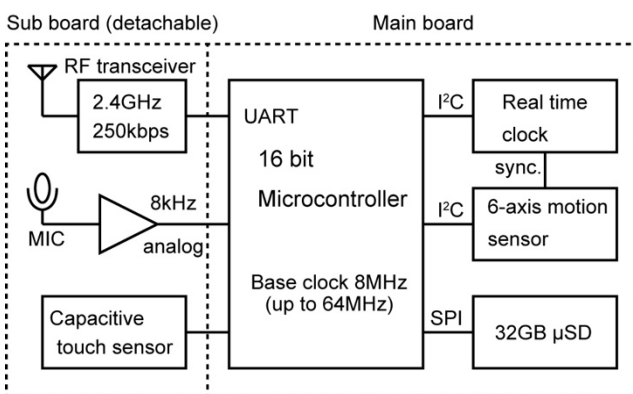


図 2 腕時計型デバイスの回路ブロックダイアグラム  
 Figure 2 Circuit block diagram of the wrist-worn devices.

## 2.2 地磁気センサを用いないモーショントラッキング

本研究による運動センサデバイスでは、500ないし512Hzのサンプリング周波数にて3軸加速度および3軸角速度の信号計測を行ない、各々16（基本構成）ないし20（拡張構成）ビットにてデバイス内蔵のマイクロSDカードに記録している。また、マイクロSDカードへの記録と並行してセンサフュージョンの原理に基づく対重力姿勢角度トラッキング演算を行うことで、エレキギター演奏に関わる評価パラメータを算出し、ワイヤレスにて外部PC等にデータを送出することができる。ここでセンサフュージョンによるトラッキング演算では、一般的には加速度、角速度、地磁気の9軸信号により、最も信頼度が高い姿勢角度推定結果に比重をおいたカルマンフィルタ的な計算が用いられている。しかしながら、エレキギターの利き手側運動分析では、ギターのピックアップに用いられる強磁性体により地磁気を精度良く計測することは非常に困難である。そこで、本研究ではギター演奏開始直前に奏者の手が準静止状態となることを利用し、加速度センサによる対重力姿勢角度を推定する。そして、演奏運動中は衝撃の影響を受けにくい角速度センサの特性を利用し、60秒以内程度といった短時間にて連続する演奏運動による姿勢角度変化を角速度セン

サのみで追跡する演算法を用いている。また、エレキギター演奏における利き手側手首位置での運動信号計測では、ギター弦等への急峻な接触により重力加速度の10倍(10G)を上回る加速度がしばしば計測される。このため、センサ雑音の統計的性質を利用するカルマンフィルタによるセンサフュージョンの手法を用いることは困難である。そこで、本研究ではカルマンゲインに相当する0から1までの間の値をとる係数 $\alpha$ により、回転行列表現による姿勢角ベクトルの値を(加速度センサによる姿勢角ベクトルの推定値) $\times \alpha +$ (角速度ベクトルから計算した姿勢角ベクトルの推定値) $\times (1 - \alpha)$ の線形和にて推定している。ここで、係数 $\alpha$ は加速度信号による推定が信頼できる度合いを意味することから、信頼度係数と呼んでいる。信頼度係数 $\alpha$ は直近の加速度と角速度の計測値により決定するが、本研究では3軸合成加速度の絶対値が0.95~1.05Gの範囲外にある時は $\alpha$ の値を0とした。そして、市販の磁気式モーションキャプチャシステム(Polhemus社Liberty240/8)にて、非磁気式ピックアップを用いたギターによる演奏運動計測を行ったところ、準静止状態からのコードストローク演奏では、1分間にわたり約1度以内の計測誤差に留まっていた。

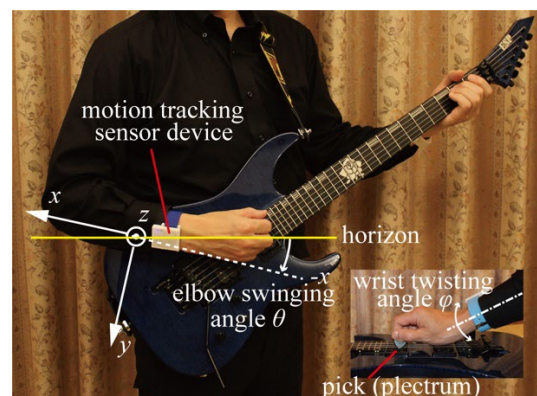


図 3 ギター演奏における座標軸と姿勢角の定義

Figure 3 Definition of coordinate system and attitude angles.

## 3. エレキギター演奏に関する運動パラメータ

図3にエレキギター演奏における手首装着型運動センサデバイスの使用例を示す。ここでは、前腕の延伸方向が水平線となす角度を肘中心回転姿勢角 $\theta$  (elbow-swinging angle)、前腕の上面が水平線となす角度を手首ひねり回転姿勢角 $\phi$  (wrist-twisting angle)と定義することで、ギターのピッキングにおける直線軌道と回転軌道に対応する角度を表現することができる[6]。また、前腕に並行するデバイスのx軸まわりの角速度 $\omega_x$ を2階時間微分した角躍度 (angular jerk)  $a_{jx}$ は、ピックとギター弦との衝突を感度良く反映することが知られている[5][6]。更には、肘中心回転角速度に対応するz軸まわりの角速度 $\omega_z$ は、その極大・極小値をとる時刻が演奏のタイミングと強い相関関係にあることが報告されている[3][6]。

alternate (down-and-up) chord strums  $\text{J} = 90 \sim 200$

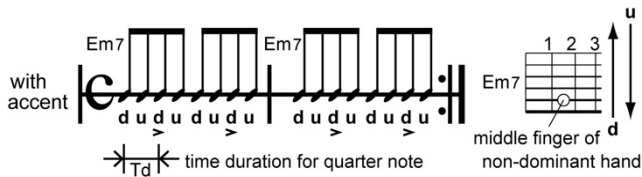


図 4 アクセント付きコードストロークによる演奏譜面  
 Figure 4 Musical score for chord strumming with accent.

表 2 コードストローク演奏の運動評価パラメータ

Table 2 Motion evaluation parameters for chord strumming.

Parameter	Description	Unit
Td	Time duration between the consecutive down strums	sec
Rerr	Rhythm error from reference duration Tr $Rerr = (Td - Tr)/Tr$	%
Rdev	Rhythm deviation in the specified strums $Rdev = stdev(Td)/average(Td)$	%
Sharp	Time duration for 10-90% of cumulative angular jerk in down strums with accent	msec
$\Delta\theta$	Peak-to-peak amplitude of the elbow swinging angle $\theta$	deg
$\Delta\varphi$	Peak-to-peak amplitude of the wrist twisting angle $\varphi$	deg

図 4 に演奏技量評価に用いるエレキギター演奏の譜面を示す。ギター初心者からプロギタリストまでの幅広い技量レベルにある演奏者の評価を行うため、非利き手側の押弦は指 1 本だけを用いるシンプルな Em7 コードを選択した。また、6 本のギター弦全てを上下方向に繰り返し弾くオルタネートコードストロークは多くのエレキギター楽曲にて頻出する基本奏法であるが、小節内の 2 拍目と 4 拍目のダウンストロークにて親指を弦に急峻に接触させ、鋭い音響を得るアクセント奏法を演奏タスクとして設定した。

表 2 にコードストローク奏法を評価する運動パラメータを示す。リズムの正しさは演奏の良さを判別する上で重要な項目の一つであるが、ダウンストロークにおける肘中心回転角速度  $\omega_z$  がピークとなる時刻の時間間隔 Td は音響による演奏タイミング推定の結果と強い相関関係を持っており、音響信号によるリズム推定に代えて利用できることが報告されている[6]。そこで、演奏期間内における各ダウンストローク時間間隔 Td の平均値と標準偏差により、基準となるリズム (時間間隔 Tr) からのずれ Rerr とリズムのゆらぎ Rdev を演奏タイミングの評価指標とした。続いてアクセント奏法にて重要となる音響の鋭さについては、手首ひねり回転角速度の時間 2 階微分値  $\dot{a}_{jx}$  の絶対値をダウンストロークの開始時点 ( $\theta$  の上死点) から終了時点 ( $\theta$  の下死点) まで積算した値の 10%-90% 遷移時間にて評価することができる[6]。更には演奏評価期間中の肘中心回転姿勢角  $\theta$  と手首ひねり回転姿勢角  $\varphi$  の最大振幅から演奏運動の大きさを表現することとした。これらの運動評価パラメータ

をデバイス内にて導出することで、500 ないし 512Hz での演奏タイミング推定精度を確保しつつ、ワイヤレス通信におけるデータ欠損への耐性を高めることができる[5]。

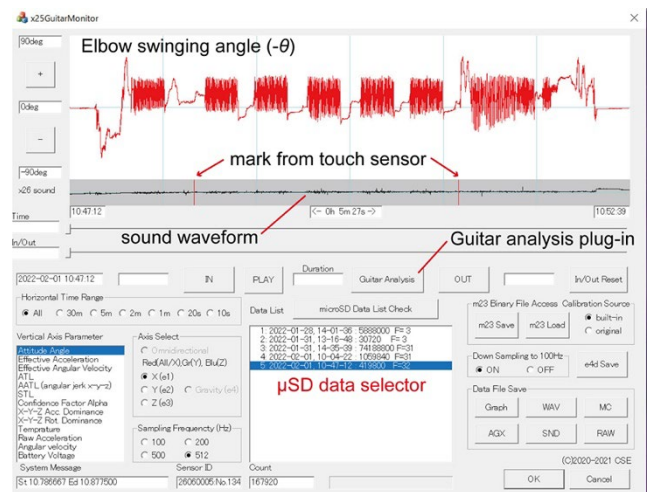


図 5 演奏の事後分析用 PC アプリケーション画面  
 Figure 5 Screenshot of PC application for post analysis.

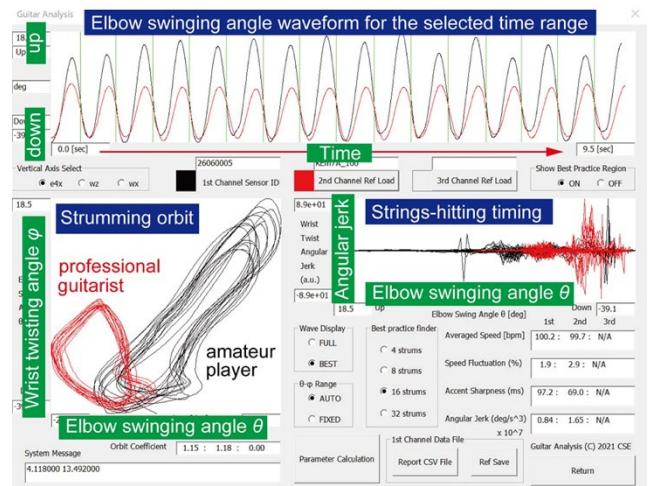


図 6 コードストローク演奏分析用プラグイン画面  
 Figure 6 Screenshot of strumming analysis application.

## 4. 演奏の事後分析アプリケーション

### 4.1 演奏タスクの実施タイミングアノテーション

図 5 は腕時計型モーションキャプチャーデバイスにて取得した運動データを、マイクロ SD カードを経由して Windows PC にて事後分析するアプリケーション画面例である。演奏運動の記録から一定の時間が経過していることから、どのタイミングで注目すべき演奏タスクを実施したのかを特定するアノテーションが重要となるが、本研究によるデバイスでは以下のような手法を試みた：

- リアルタイムクロックによる演奏時刻
- 利き腕を上方に挙げること等による姿勢角変化
- ギター弦を素早く連続してノックする際の衝撃
- デバイスのタッチセンサによるマークアップ
- 音声録音による口頭でのメッセージとギター演奏音

これらのタイミングアノテーション手法では、演奏者への負担が少なく、幅広い状況にて安定したタスク抽出が行えるのは、演奏時刻と音声録音による方法であった。また、ギターを演奏する際に生じる利き腕側前腕の肘中心回転姿勢角  $\theta$  が特徴的な数値範囲を示すことや、タスク開始前の準静止期間により、音声録音やタッチセンサを用いない場合であってもアノテーションを実施することができた。この一方で、将来的にコードストローク奏法以外の演奏内容に適用範囲を拡大したり、1 時間以上といったギターレッスン授業の中で臨機応変に演奏タスクを実施するような条件のもとでは、上記のようなアノテーション手法を効果的に組み合わせる必要が生じるものと考えられる。

#### 4.2 運動学的なコードストローク演奏の分析

評価対象となる時間区間を決定した後は、図 6 に示すコードストローク演奏分析アプリケーションをプラグイン形式にて実行する。このプラグインでは肘中心回転姿勢角  $\theta$  の上死点と下死点からオルタネートコードストロークの実施期間を推定し、表 2 に示した評価パラメータの計算を行う。ここで、評価対象とする演奏期間はコードストロークの実施回数にて指定するが、リズムゆらぎ Rerr が最小となる演奏時間帯を自動的に抽出することができる。また、演奏タスクを単調なものとしていることから、演奏初心者に見られる突発的な演奏ミスを除外することで、演奏技量のポテンシャルに着目した評価を行なっている。演奏分析プラグイン画面では、3 つの小画面にて演奏様態を可視化している。ここではアマチュアギタリスト（演奏歴 40 年以上）を黒色、プロギタリストを赤色にて重畳表示しており、両者の違いを視覚的に確認することができる。図 6 の画面上段では時間経過に対する肘中心回転姿勢角  $\theta$  の推移を示しているが、アマチュア奏者とプロ奏者では姿勢角変化の振幅が顕著に異なっていることが分かる。続いて画面下方左側の 2 次元姿勢角 ( $\theta$ - $\phi$ ) 軌跡投影図では、前腕の運動軌道に明確な差異が認められる。また画面下方右側の肘中心回転姿勢角対手首ひねり角躍度  $aj_x$  のプロットでは、両者ともにコードストロークにおける前腕の下死点付近に数値の顕著な増大が認められており、アクセント奏法による急峻な撥弦操作が行われていたことが分かる。

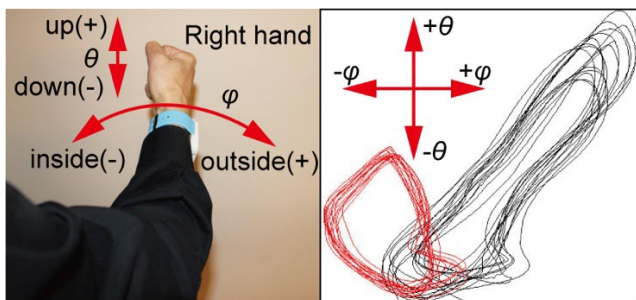


図 7 前腕姿勢角 2 次元軌跡投影における座標系設定  
 Figure 7 Intuitive coordinate system for the  $\theta$ - $\phi$  trace plot.

演奏者がギターを構えた状態では、前腕の上下動と手首ひねりは両者ともにピックの位置をギターに対して上下させる動きとなっているため、2 次元での表現には適していない。図 7 は 2 次元姿勢角軌跡図における座標軸の設定を示したものであるが、演奏者が利き手側の前腕を前方に伸ばした状態では手首ひねり回転運動を左右への運動として表現することができる。この結果、演奏フォームの修正トレーニングを直感的に行うことが可能となった。



図 8 腕時計型デバイスを用いたギターレッスン授業風景  
 Figure 8 Guitar lesson class with the wrist-worn sensor devices.

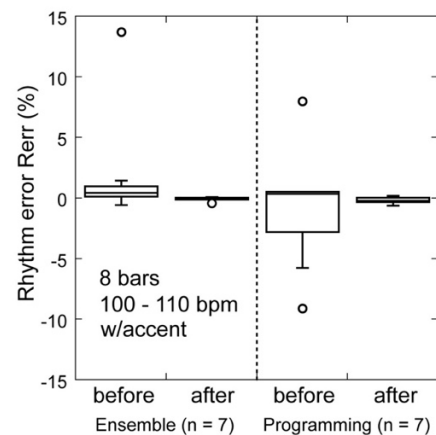


図 9 初学者によるレッスン前後のリズムエラー分布  
 Figure 9 Changes in rhythm error in the lesson class.

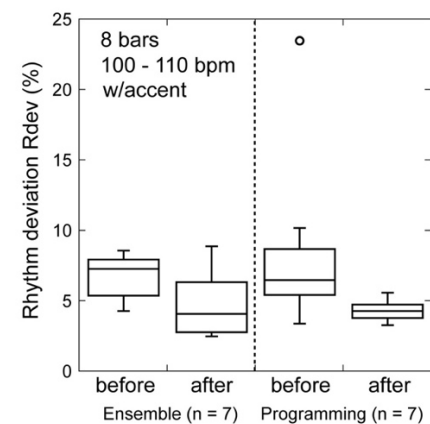


図 10 初学者によるレッスン前後のリズム揺らぎ分布  
 Figure 10 Changes in rhythm deviation in the lesson class.

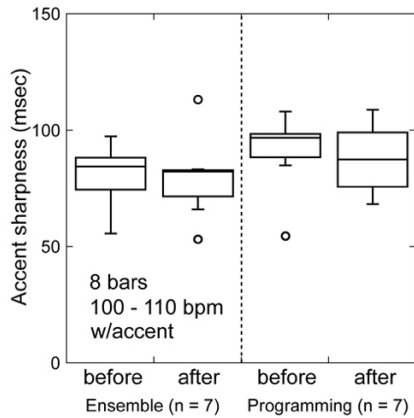


図 11 初学者によるレッスン前後のアクセント鋭さ分布  
Figure 11 Changes in accent sharpness in the lesson class.

## 5. ギターレッスン授業における事後分析事例

### 5.1 理系大学学部による演習授業への適用

本研究によるパーソナルモーションキャプチャデバイスの有効性を検証するため、2021年4月から2022年1月にかけて東京工科大学コンピュータサイエンス学部（入学定員290名）にてエレキギター奏法トレーニングシステムの開発ならびにギターレッスンの授業を実施した。この授業は週1回、連続5時間にて開講される学部3年次の計28週にわたる演習授業であり、エレキギター演奏に関心をもつ学生15名を音楽に関するアンケート調査にて選抜している。図8は授業風景を示したものであるが、センサデバイス工学を専門とする学部教員1名に加え、日本工学院ミュージックアーティスト科に所属するプロギタリスト1名が演奏面でのサポートを行う形式にて授業を実施している。また、この授業は芸術と科学を融合するSTEAM型授業となっており、履修者はデータ分析やアプリケーションプログラミングといった情報科学系の学習を行いつつ、一人1台ずつ支給された腕時計型モーションキャプチャデバイスによる演奏タスク運動計測を継続的に実施した。

### 5.2 長期間のレッスンによる技量向上効果の検証

図9、図10、及び図11は授業におけるエレキギター初学者14名のリズムエラーRerr、リズムゆらぎRdev、及びアクセント鋭さSharpの分布を示した箱ひげ図であり、授業の通算第13週（2021年7月16日）において基礎レッスンが一通り完了した時点（before）と、授業最終回の第28週（2022年1月14日）の時点（after）での計測結果を掲載している。また、授業第16週（2021年10月15日）以降はコードチェンジを伴う実践的な楽曲によるアンサンブルでの演奏技量向上を目指すグループ（8名、うち1名はギター演奏中級者）とギターレッスン用のゲームソフトウェアを開発するグループ（7名）に分かれてプロジェクトベース型の演習を行なっている。一方、両グループともに

毎週の演習の中でギター演奏レッスンを継続したことから、図9及び図10に示すように演奏リズムの正確さを両グループともに獲得している様子が見て取れる。アクセント鋭さSharpの評価では、図11からはアンサンブルに注力したグループの方が授業最終回での数値が小さく（アクセントが鋭く）なっており、多くの被験者が第13週までにプロギタリストから学んだ演奏技量を維持できていることが示唆された。ここで、アクセントつきコードストローク奏法は一般に習得に時間を要することが知られているが、リズムのみの評価では技量の定量評価が困難であることから、エレキギター演奏の音楽性評価ではアクセント鋭さSharpが有効であることが分かった。

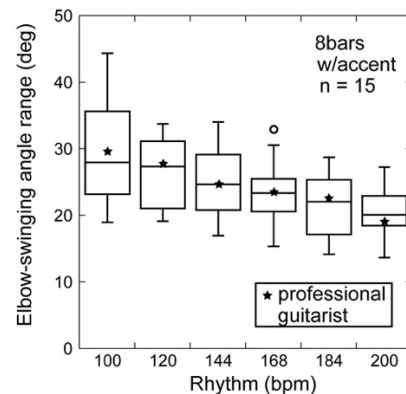


図 12 演奏リズムによる肘中心回転姿勢角範囲の分布  
Figure 12 Elbow-swinging angle amplitude along with rhythm.

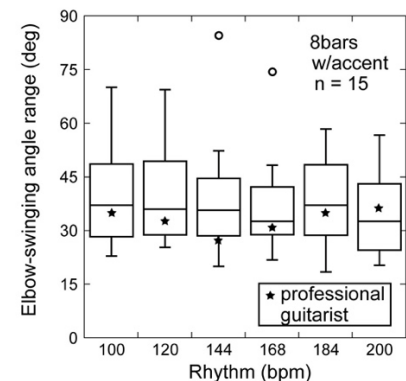


図 13 演奏リズムによる手首ひねり回転姿勢角範囲の分布  
Figure 13 Wrist-twisting angle amplitude along with rhythm.

図12及び図13は授業最終回（第28週）において、履修者15名全員によるアクセントつきコードストロークの演奏を図4の演奏譜面に沿って演奏リズムを比較的低速な100bpmから非常に高速な200bpmまで変化させつつ16小節ずつ演奏を行った際の肘中心回転姿勢角 $\theta$ の振幅及び手首ひねり回転姿勢角 $\phi$ の振幅分布を示したものである。ここでは電子メトロノームにより基準となるリズム音を教室全体で聞こえる音量にて放送し、履修者は各自の座席にてエレキギター（生音）を演奏する形にて計測実験を行った。

実験の結果、一般的には達成が非常に困難である 200bpm のリズムでのアクセント付きオルタネートコードストローク演奏を 15 名中 13 名が少なくとも 8 小節の間、1% 以下のリズムエラーにて達成していることが分かった。また、授業にて演奏指導を行ったプロギタリストの模範演奏による運動パラメータ計測の結果を★印にて図 13 及び図 14 に重畳したところ、全履修者の中央値付近に値が存在していた。ここで、授業開始当初である第 1 週（2021 年 4 月 16 日）の時点では中級者を除く大多数の履修者は 8 小節以上に及ぶコードストローク演奏を行うことは非常に困難であったことから、全 28 週の授業期間に渡るプロギタリストによるギターレッスンは演奏フォームの確立に対し大きく寄与していたことが客観的な数値評価によって示された。

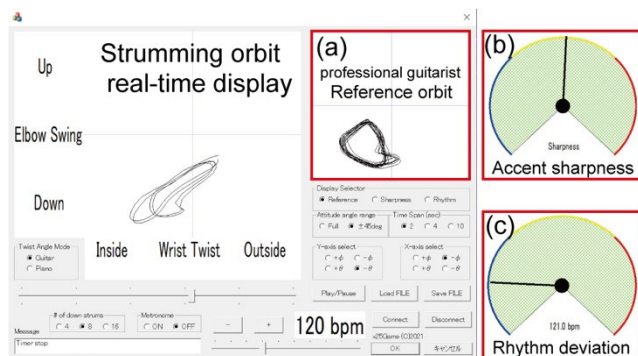


図 14 リアルタイムギターレッスンアプリケーション  
Figure 14 Screenshot of real time guitar lesson application.

## 6. リアルタイムでのギターレッスンシステム

### 6.1 直感的なフィードバックに向けたシステムデザイン

ギター演奏の事後分析システムは、演奏中に PC 画面等を確認する余裕のない初学者の学習支援に有効である。この一方で、非利き手側の押弦や利き手側でのピッキング操作に慣れてきた学習者にとっては、姿勢や力の入れ方といった様々なエレキギター演奏フォームを試しながら、その場にて演奏運動を状態についてのフィードバックを得ることが効果的となることが考えられる。本研究にて製作した腕時計型運動センサデバイスでは、運動信号をマイクロ SD カードに記録することと並行してモーショントラッキング演算ならびにコードストローク奏法に関する運動パラメータを計算し、2.4GHz 帯のワイヤレスデータ通信モジュールを介して PC 等のエンドデバイスへ演奏解析結果を伝送することができる。そこで、事後分析による知見から、コードストローク奏法のフォームを改善していくために必要な下記のようなフィードバック情報を選定した。

- (A) ピッキングを行う利き手の姿勢角軌跡 ( $\theta$ - $\phi$ )
- (B) アクセントの鋭さ (Sharp)
- (C) リズムの正確さ (Rerr および Rdev)

ここでは、リズムの正確さをキープしつつ、音楽的に重要であるアクセントのシャープさが達成されていることを知

ることに加え、望ましい演奏結果を得るための手の動かし方を試行錯誤していくことを考えた。そして、プロギタリストによる模範演奏の運動計測結果より算出した評価パラメータを元にした採点評価を行うとともに、利き手の姿勢角軌跡図をリファレンスとして画面表示するアプリケーションを作成した。図 14 はリアルタイムでのコードストローク演奏レッスンを行う際の PC 画面であるが、画面右上の小ウィンドウへは (a) プロギタリストによる姿勢角軌跡図、(b) ダウンストロークにおける Sharp 値、(c) リズムのゆらぎ Rdev と平均演奏リズム、のいずれかを選択して表示している。(a) の姿勢角軌跡図は、図 14 の画面左に配置された小ウィンドウ内への重畳表示が考えられるが、演奏者がギターを構える際の前腕姿勢が異なることや、自身の演奏による姿勢角軌跡図との識別が難しくなることから、別ウィンドウでの表示とした。一方、円形メーターの最外周には数値が小さい方から青・黄・赤の 3 色の着色がなされており、Rdev については 3% 以下、Sharp では 50msec 以下にてプロギタリストのレベルを示す青色の着色領域とした。各運動パラメータは現時刻より一定の拍数だけ遡った運動データから算出するが、計測期間は図 4 に示したオルタネートコードストローク (8 ビート) の譜面では 2, 4, 8 小節から指定する仕様とした。また、姿勢角軌跡図については毎秒 50 回にて更新を行い、運動パラメータの評価対象期間分の表示を行ったところ、体感上はほぼリアルタイムでの運動反映が達成されていた。

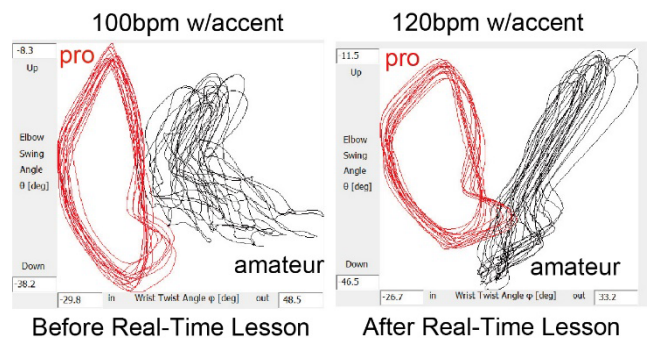


図 15 リアルタイムレッスンによる姿勢角軌跡図の変化  
Figure 15 Changes in  $\theta$ - $\phi$  trace plot after the real-time lesson.

### 6.2 エレキギター初心者による実験結果

図 4 に示した単一押弦コードによるアクセントつきコードストロークについて、授業最終回である第 28 週以後にリアルタイムギターレッスンシステムの利用実験を行った。授業に参加をしていた 2 名のギター初心者により、図 14 に示したリアルタイムギターレッスンアプリケーションを利用しつつ、120bpm の演奏練習を 30 分間にわたり実施した。また、演奏練習の中ではプロギタリストの演奏軌跡図、アクセントの鋭さ、リズムの正確さの中から 1 つを自由に選択して画面に表示させた。そして、レッスン終了時にイン

タビューを行った結果、以下のような回答を得た：

- 手が静止していても姿勢角の状態が表示されていることから、試行錯誤によるフォーム変更を行いやすい。
- 利き手の姿勢角軌跡に留意しすぎると、リズムの正確さやシャープさが失われる感じがする。
- プロギタリストの姿勢角軌跡を真似ようとする、ピックが弦から受ける抵抗力が増大し、音が悪くなる。
- リズムやシャープさが良くなっても、良い音を出すプロギタリストの演奏方法との差異が依然気になる。

ここで、図 15 はレッスンの前後における実験参加者の利き手側姿勢角軌跡図を示しているが、演奏中の軌跡が安定していくことが分かった。そして、これらのことから利き手側の姿勢角軌跡図に意識を置くことは、初心者の演奏フォームトレーニングに有効であることが示唆された。

### 6.3 中級アマチュアギタリストによる実験結果

リアルタイムでのギターレッスンシステムの評価をライブ演奏経験のある中級アマチュアギタリスト(演奏歴 40 年以上)にて実施したところ、次のような結果を得た。

- Rdev については 90~200bpm のリズム域では容易に青色のゾーン(リズムゆらぎ 3%以下)に入ることから、演奏中に注視する必要性は低い。
- Sharp を青色ゾーンに留めることは難しく、120bpm 以下といった比較的遅いリズムでは肘中心回転を使った演奏フォームの維持に集中することで、赤色ゾーン(Sharp > 100msec)への遷移を防いでいた。
- 姿勢角軌跡図では、図 14 (a) に示すプロギタリストの軌跡図への接近を試みたところ、手首ひねり回転姿勢角に大きな違いがあることが分かった。とりわけアップストロークにて手首がアウトサイド側(軌跡図では右側)へと外れていく傾向が顕著であり、このことがコードストロークによる音響の鈍さにつながっていることが強く示唆された。

図 16 はこの実験におけるアマチュアギタリストがコードストローク演奏を行なっている際の連続写真であるが、目視では演奏運動における前腕姿勢角変動の特徴を正しく指摘することは困難である。これらのことから、正確なリズムキープについては問題のない中級以上のエレキギター奏者であっても、本研究によるリアルタイムでのフォームの修正は有効であることが分かった。

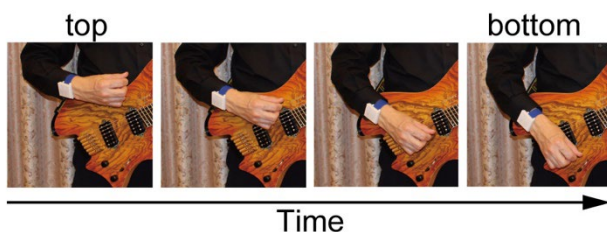


図 16 アマチュア奏者によるコードストローク連続写真  
Figure 16 Sequential strumming images of amateur guitarist.

## 7. まとめと今後の展望

本研究による小型軽量なパーソナルモーションキャプチャードバイスでは、カメラ等の光学機器や磁場センサの適用が難しい環境であっても利用可能であり、15 時間といった長時間での連続計測によりデバイスの存在にほとんど留意することなく対重力姿勢角を含めた有用な運動パラメータを得ることができる。また、装着部位の正確な姿勢角計測では短時間の準静止時間が必要となるものの、エレキギター演奏レッスンにおける 10 小節前後(約 1 分以内)といったコードストローク奏法の運動学的な診断を大学での演習授業といった日常的な場において行うことができた。

今後は実際的なエレキギター演奏レッスンの場におけるパーソナルモーションキャプチャーの有用性を検証するとともに、コードストローク以外の演奏技法への適用を検討していく計画である。

**謝辞** ギターレッスン開発授業に参加をいただいた履修者の方々に、この場をお借りして深く感謝をいたします。

## 参考文献

- [1] Herrera-Luna, I., Rechy-Ramirez, E. J., Rios-Figueroa, H. V., and Martin-Hernandez, A.. Sensor Fusion Used in Applications for Hand Rehabilitation: A Systematic Review. IEEE SENSORS JOURNAL. 2019, vol.19, no.10, p.3581-3592.
- [2] 松下 宗一郎, 八木 浩一, 愛甲 丞, 瀬戸 泰之. 体動を捉えるモーションセンサーによる腹腔鏡手術の上達度計測. 臨床外科, 2020, Vol.75, No.4, p.495-499.
- [3] Matsushita, S. and Iwase D.. Detecting Strumming Action While Playing Guitar. Proc. of IEEE 17th Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'13). 2013, p.145-146.
- [4] Yoshida, K. and Matsushita, S.. Visualizing Strumming Action of Electric Guitar with Inertial Motion Sensors. Proc. of IEEE Global Conf, on Consumer Electronics (GCCE2020). 2020, p.505-508.
- [5] Kamo, F. and Matsushita, S.. Interactive Diagnosis System for Electric Guitar Strumming Using Wrist-worn Real-time Wireless Motion Tracking Device. Proc. of IEEE Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2021). 2021, p.698-701.
- [6] Kamo, F. and Matsushita, S.. Evaluating Electric Guitar Strumming Form as Musically Correct Rhythm And Sharpness Using Wrist-Worn Inertial Motion-Tracking Device. Proc. of IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics (ICCE2022). 2022, p.881-886.
- [7] Marky, K., Weiß, A., Matvienko, A., Brandherm, F., Wolf, S., Schmitz, M., Krell, F., Müller, F., Mühlhäuser, M., and Kosch, T.. Let's Frets! Assisting Guitar Students During Practice via Capacitive Sensing. Proc. of the 2021 Conference on Human Factors in Computer Systems (CHI'21). 2021, Article No.746, 12p.
- [8] Shin, Y., Hwang, J., Park, J., and Seol, S.. Real-time Recognition of Guitar Performance Using Two Sensor Groups for Interactive Lesson. Proc. of the 12th Int. Conf. on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2018). 2018, pp.435-442.
- [9] Lindroos, N., Penttinen, H., and Välimäki, V.. Parametric Electric Guitar Synthesis. 2011, Computer Music Journal, vol.35, no.3, p.18-27.
- [10] 加茂文吉, 松下宗一郎. 理系大学における幅広い学びへの気づきをもたらす STEAM 型ギターレッスン開発授業. コンテンツ教育学会誌, 2022, vol. 4, no. 1, p.14-25.