

目次

1	はじめに	1
1.1	ポピュラー音楽教育を取り巻くこれまでの状況	1
1.2	STEAM教育を取り巻くこれまでの状況	2
1.3	モーションセンサを活用した事例	4
1.4	研究の範囲	5
1.5	本論文の構成	7
2	エレКТリックギター演奏分析を取り巻くこれまでの状況	9
2.1	エレクトリックギターとアンプ・エフェクター・ピックアップの関係	9
2.2	非利き手側の演奏分析	10
2.3	利き手側の演奏分析	11
2.4	エレクトリックギターのピッキング法概略	13
2.5	本研究で対象とした奏法について	14
2.5.1	コードストロークとは	15
2.5.2	ストラミングとは	15
2.5.3	アクセント付きコードストロークとは	16
3	モーションセンサを導入したエレクトリックギターのピッキング指導法	17
3.1	腕時計型運動センサデバイスについて	17
3.2	運動パラメータの定義と関連軸	18
3.3	演奏評価を行うタイミングと学習者に伝えるタイミング	19
3.4	センサを活用した事後フィードバックによるギターレッスン	20
3.4.1	使用したデバイス	20
3.4.2	ストロークのタイミング評価アルゴリズム	21
3.4.3	シャープネスパラメータの定義	23
3.4.4	ストローク評価のためのPCアプリケーション	26
3.4.5	事後フィードバックによる演奏評価実験	29
3.4.6	事後フィードバックによる演奏評価の有効性	30
3.5	センサを活用したリアルタイムフィードバックによるギターレッスン	31
3.5.1	リアルタイムフィードバック用 腕時計型ワイヤレス運動センサデバイス	31
3.5.2	コードストロークモーションリアルタイム分析アルゴリズム	32

3.5.3	リアルタイムでユーザーに提示すべき情報の選択	35
3.5.4	リアルタイムフィードバックによる演奏評価実験	36
3.5.5	事後/リアルタイムフィードバックの有効性検証	37
3.5.6	リアルタイムフィードバックによる演奏評価の有効性	40
3.6	音楽系専門学校授業における技量獲得の状況の可視化	40
3.6.1	音楽教育における情報技術適用事例	40
3.6.2	運動センサデバイスによる教育手法の拡張	41
3.6.3	使用したデバイス	42
3.6.4	コードストローク奏法と運動評価パラメータ	42
3.6.5	ギター演奏レッスン用 PC アプリケーション	45
3.6.6	音楽系専門学校における実験授業	47
3.6.7	演奏技量獲得状況の観測	51
3.6.8	ギターレッスンクラスの考察	54
3.6.9	個々の学生の技量習得状況を低いコストにて可視化する有効性	56
3.7	コードストローク以外の多様な奏法における演奏分析の検討	57
3.7.1	弾く弦の本数をコントロールしたコードストローク奏法	58
3.7.2	ピッキングの軌道とコードストローク奏法の関係	59
3.7.3	弾く弦の本数をコントロールした コードストローク奏法のユーザーテスト	59
3.7.4	全弦カッティング奏法ブラッシング時にピックが衝突する弦の本数	60
3.7.5	ブラッシングを交えた 全弦カッティング奏法のユーザーテスト	60
3.7.6	高速単音ピッキング	61
3.7.7	単音トレモロピッキング	61
3.7.8	高速単音ピッキングによるトレモロ奏法のユーザーテスト	62
3.7.9	ブリッジ・ミュート・ピッキング	62
3.7.10	ブリッジ・ミュート・ピッキングと アクセント付きコードストローク奏法の比較	63
3.7.11	ブリッジ・ミュート・ピッキングを交えた アルペジオ奏法のユーザーテスト	64
3.7.12	ダウンピッキングによるチョーキング音の強調	65
3.7.13	チョーキング奏法時のピッキングのユーザーテスト	65
3.7.14	ユーザーテストによる演奏分析の検討	66
4	STEAM 教育にエレクトリックギターを導入した教育法	67
4.1	PBL 教育への本格的な芸術要素導入	67

4.2	ギター奏法レッスン開発クラス	67
4.2.1	授業としての位置付け	67
4.2.2	授業環境	69
4.2.3	使用した腕時計型運動センサデバイス	70
4.2.4	演奏運動データ分析用 PC アプリケーション	71
4.2.5	授業進行の概要	72
4.3	ギターレッスン実験におけるデータサイエンス	73
4.3.1	アクセント付きコードストローク奏法	73
4.3.2	利き手側手首の運動と計測される信号	74
4.3.3	データ分析用 PC アプリケーションによる検討	74
4.3.4	3次元グラフィックスによる演奏運動の可視化	75
4.3.5	フーリエ変換による平均演奏リズム推定	76
4.3.6	手首ひねり軸まわり角躍度とアクセント鋭さ推定	77
4.3.7	肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ による演奏軌道の可視化	78
4.4	アクセント付きコードストローク評価への考察	78
4.4.1	演奏リズムの評価結果	79
4.4.2	アクセント鋭さの評価結果	80
4.4.3	コードストローク演奏運動軌道の評価結果	81
4.5	STEAM 実践実習とその意義	82
4.5.1	少人数チームによる STEAM 実践実習と成果	82
4.5.2	従来の授業形式との対比	83
4.5.3	STEAM 型ギターレッスン開発授業の課題と意義	84
5	結論	87
5.1	本研究を通じて明らかになったこと	87
5.1.1	音や映像からの逆推定が困難な動作について フィードバックを提示	87
5.1.2	演奏技量を獲得した瞬間など 時間不連続な事象の認知を可視化	89
5.1.3	演奏指導を通じて新たな価値を生み出す STEAM 手法を積極的に活用した教育	90
5.1.4	まとめ	90
5.2	これからの音楽教育におけるモーションセンサ活用の 可能性の考察と今後の展望	91
5.2.1	事後フィードバックを活用する可能性	91

5.2.2 リアルタイムフィードバックを活用する可能性	91
5.2.3 技量獲得状況の可視化手法を活用する可能性	92
5.2.4 高等教育における STEAM 手法の可能性	92
5.2.5 今後の展望	93

謝辞 **95**

第1章 参考文献	96
第2章 参考文献	98
第3章 参考文献	100
第4章 参考文献	102
第5章 参考文献	103

付録 **104**

付録A. ギター演奏と主なパラメータの説明	104
付録B. エレクトリックギターの主な和音のピッキング法	106
付録C. エレクトリックギターの主な単音ピッキング法	110
付録D. ピッキングの主な指導方法	115
付録 参考文献	121

第1章

はじめに

1.1 ポピュラー音楽教育を取り巻くこれまでの状況

著者は、日本の芸術教育現場に20年以上参画し、アーティスト、プロミュージシャンを育成することを主な目的として教育業務を行ってきた。ポピュラー音楽を代表する楽器であるエレクトリックギターの実務家として長らく演奏業務を行い、培った経験によって教則本、教則DVD、ネット教則動画などの演奏分析の現場や、教員として高等教育機関である専門学校でのギターレッスンの現場に従事してきた。一般的にポピュラー音楽の楽器演奏指導教員には、資格や学歴よりも実務家としての経験が重視されることが多い。しかし、プロフェッショナルは無意識的に演奏ができていることも多いため、実務家教員として音楽教育に従事する場合は、指導の手法をリサーチするなど、教員各自の努力が必要になる。

ポピュラー音楽の楽器演奏には身体操作を必要とするため、教師の模範実演を間近で見、音を聴きながらレッスンが進行していく。藤田は、楽器を弾いている時は演奏に集中しておりリスナーとして客観的に聴くことができないことから、レコーダーで演奏を振り返ることを推奨している[1]。古川らは合奏指導における比喩表現・オノマトペについて、直観的理解が容易であり、メンバーがイメージを共有することで全員の合意を形成しやすいと述べている[2]。また、表情記号に即した直接的指示では、微妙なニュアンスが伝わりにくいと述べている[2]。

吉田は、ライブ・エンタメ市場規模の拡大と、情報技術の発展によって音楽聴取の方法が大きく様変わりしてきたことを報告している[3]。ライブ・エンタメ市場規模の拡大やオンライン技術の発展に伴い、音楽業界での演奏の評価は実技オーディションによることが多く、プロセスよりも本番での巧拙が重視されるため、音楽学校においても実技オーディション形式の個別演奏テストを行い、学生の学習効果を評価することがある。

横溝らは、大学教育における音楽実技科目の研究はまだ進んでいるとは言えないと考え、音楽や美術などの芸術分野での評価は、評価者の主観や経験が大きく影響する部分は抽象的かつ曖昧であることに注目し、実技の演奏に対する評価方法としてループリック評価を取り入れる試みを行っているが、音楽表現を言葉で記すことはある程度できるが、曖昧な表現になる場合も多く、その場合評価する側と評価される側との解釈の相違が生じる可能性があることを報告している[4]。

これまで音楽学校における楽器演奏の実技教育現場では、実務家である教師のやり方を

まねる＝まねぶ、といった指導法がベースになっていたと考えられる。そして、履修者が技量を獲得できなかった際のリカバリーが非常に難しくなることがある。

一方で、高等教育機関で音楽を学んでいる学生は、学んだことを背景にして様々な進路へと進む。高等教育機関で音楽を教える実務家教員はこれらのことを理解し、芸術表現指導を通じて将来における活動の多様性を学生に伝える必要がある。

様々な教育フィールドの中で、実務家教員の役割は社会的にも期待されているが、課題も散見される。文部科学省の制度・教育改革ワーキンググループ第14回においては、実務家教員が現場の知識を持っていることとそれをメタ化して学生を教育できることは別次元で、今は最先端の技術であっても5年後には陳腐化している可能性があり、その時にさらに新しいことを学び直せるような基礎体力を養うのが大学の意義ではないかという指摘がある[5]。富田によれば、実践経験は暗黙知だと考えていて、実務家教員はその暗黙知を言語化し、実践知・経験知へと転換する必要がある、実務家教員は理論と実践を往還・融合し、持続的に発展させていくことが期待されている。また、実務家教員が職業経験を有することはアドバンテージであるが、重要なのは大学教員として採用された後、教育者・研究者としてどのような努力を重ねているかというプロセスが重要であると主張している[6]。

よって、高等教育機関において芸術教育を実践するポピュラー音楽演奏分野の実務家教員には、演奏上の暗黙知を客観的に明らかにして、学習者にフィードバックする必要があると著者は考えている。

1.2 STEAM教育を取り巻くこれまでの状況

数学や物理学、情報科学といったサイエンスに関する学問を融合することで学習者と教師の双方にとって新たな気づきや学びをもたらす手法として、STEAMと呼ばれる教育手法についての試みがなされつつある[7][8][9]。

STEAM手法は、2010年代にアメリカ合衆国のオバマ大統領により提唱されたSTEM(Science, Technology, Engineering and Mathematics)分野における教育強化政策に対し、芸術(Art)あるいは教養(Arts)を包含させた新しい教育の形として知られており、国内においては初等教育での適用事例が報告されている[10][11]。ここでは、学習指導要領の改訂[12]により2020年度から小学校にてプログラミングの授業が必修化されたことを受け、社会生活の様々なシーンにおけるコンピュータを用いた情報活用能力習得の重要性が認知されたことも1つの要因となっている。

経済産業省「未来の教室」とEdTech研究会STEAM検討ワーキンググループでは、STEAMは、課題発見から課題解決まで、協働にも重きを置く、教科横断的な探究学習の意味で名称が使われることが多い。また、「さまざまな循環がある学びであること」、「その中心にワクワクがあること」の2点が重要なキーワードとされ、「本物」のお題から入ることが、学びの意

欲・ワクワク感へと繋がると報告されている[13].

また、大学等の高等教育の場においても、IoT 技術等により取得されるデータを用いた情報システムの構築や運用に関わるプロジェクトベースドラーニング (PBL, Project-Based Learning) の手法が導入され、従来の座学や演習の形態では達成することが困難であった学際融合型ラーニングアウトカムの重要性が顕在化しつつある。

先端 IT 人材育成を目標とした高等教育機関における STEAM 手法の検討事例としては、坂口は従来型 IT 教育の大きな問題点として、特定の IT ツールに強く依存した教育の弊害を論じており、問題を解決する手段としてヒューマンインタフェースのデザインに芸術の要素を導入することを提案している[14]. 一方、IT ツール偏重主義と同様に、収束思考に向かう傾向がある STEM 教育に対し、STEAM 教育においては芸術あるいは教養の要素が加わることによって導かれる拡散思考により、創造的な発想が生まれることが指摘されている[15].

Sousa らは STEM 教育に芸術的要素を加えることを提案し、STEM を収束思考と位置付け、明快な正解に至るように定義された問題にはよく機能するとし、それに対して Art を拡散思考とし、十分に定義されていない問題を多面的に解決するのに最もよく機能すると述べている[16][17][18].

課題解決を目的としたアクティブラーニングに STEAM 手法を導入することで、学習者が能動的に幅広い分野の知識を獲得しつつ、複数人のグループにて一定の目標達成を目指す PBL (Project-Based Learning) 型授業の効果を高めることが期待できる。このように、STEAM 手法についての認知が進み、その有効性が理解されつつある一方で、小学校から高等学校における教師に求められる資質や能力を反映させた教員養成のシステム化がなされていないとの指摘がある[19]. また、大学等の高等教育機関においての、専門分野を離れた他分野の知識や教育能力については、その獲得や実践は教員毎の自主性に任されているのが実情であると思われる。

東京工科大学コンピュータサイエンス学部では 2012 年度から 2019 年度にわたり、学部 3 年生より 10 ないし 20 名を選抜した PBL 型授業を週あたり 4 時間 30 分、年間 30 週にわたって実施してきた。この授業では、組み込み型コンピュータと小型のモーションセンサ IC チップを組み合わせた腕時計型運動センサデバイスと、ワイヤレスデータ通信にて接続されるノート PC を用いた情報サービスシステムを製作し、得られた学術的成果を学会にて発表することを行ってきた[20][21][22]. 5~7 人程度の学部 3 年生からなるグループにより、製作する情報システムの内容や有用性を示すための実験立案、論文執筆、学会でのデモ展示の一連の流れを授業の中で実施しており、8 年間にて 20 件の学会論文発表を行った。ここでは、検討対象となるアプリケーションや学術的内容の設定が学生に任されており、学生のモチベーションの維持に大きく貢献していた一方で、1 年間という限られた時間の中で、社会に還元できるような顕著な成果を得ることは困難であった。また、コンピュータにおける新たな入力デバイスの製作[20]や、ダンス[21]、楽器演奏[22]等のパフォーマンスアートの分析システムといった、Art に関する要素を包含するプロジェクトが遂行されていく中で、

結局のところは本物に触れることはできないという意識的な障壁が顕在化する局面も散見されていた。

このことは、高度 IT エンジニアの養成を主たる目標としている理系大学等の高等教育機関においては、PBL 授業におけるファシリテーター役を担う教員の専門分野の拡張が必要とされるゆえ、回避することが難しい問題である。

よって、Art/Arts 分野の探究学習を通じて、クリエイティブな発想ができる人材の育成に STEAM 教育は期待が持てるが、その実践には学習者自身にとって本物に触れているという自覚とともに深い関心が持てる題材の選定と、授業担当教員が領域を横断するファシリテーター役を担えるかということが課題であると著者は考えている。

1.3 モーションセンサを活用した事例

学習者が身体運動に関わる技量の習得を目指す教育の現場では、専門知識を持った教師による実技指導が一般的に行われている。また、カメラによる運動の動画記録等を併用することで、個々の学習者の到達度や問題点をフィードバックすることにより、学習の効果を顕著に高めることができる。しかしながら、カメラは撮影角度が変われば見えないものが出てきてしまう。また、カメラの台数を多くすればするほどカメラマンの数も必要になり、編集コストもかかり、映像を作ることは困難になる。またカメラはプライバシーを奪い、設置にも時間がかかる。電力がかかるという問題も考えられ、人間の実世界における活動を支援する実世界指向インタフェース[23]とはなりにくい。

このような背景において、身体運動を数値化するモーションキャプチャーにより、身体運動技量を推定するシステムの研究開発が Herrera-Luna らによって進められている[24]。従来大型で高価であったジャイロセンサは、水晶やセラミックスの圧電体を用いた振動ジャイロの開発により、カーナビやドローンの他、スマートフォンやゲーム機などにも利用されるようになった。さらに近年は、MEMS 技術を利用した小型で量産性に優れた振動ジャイロが開発され、民生機器や産業機器などへの応用が一段と加速している[25]。竹内は、加速度センサはエアバッグシステムの標準装備化で、数量が急激に増加したセンサであると報告している[26]。人間が判断できない微弱な地震も加速度センサは計測が可能であるため、自分自身が認知できない運動もセンサは感知できる可能性がある。

Matsushita らは加速度や角速度といった運動信号を計測するモーションセンサをギター奏者の利き手側手首に装着し、コードストローク奏法における演奏運動を評価したところ、手首における角速度信号によってギター初心者と経験者の演奏を判別できたという研究成果を報告している[27]。

暗黙知を解明するためには、実世界をできるだけ改変しないで知識や情報を自然に得に行く技術が必要である。福本らは、腕時計が長い年月をかけて培ってきた「手首なら機械を

装着してもよい」という社会通念を有効に活用しつつ、装着型情報機器の普及を進めることができる」と報告している[28].

エレクトリックギターは世界的な認知度を獲得しているが、一般的に音楽学校で行われている教育手法は、人間である教員の感覚器官または感覚器官代行をするマイクやカメラなどの機材を活用し、視聴による判断が主になっているため、まだ見えていない領域があるのではないかと著者は考えた。

もし、人間の感覚器官を超えたセンサを活用して音楽学校の教育が行われれば、視覚や聴覚のみを判断基準としている教員の能力をセンシング技術によって擬似的に増強できる。このセンシング技術により、従来の音楽教員の経験値に基づく主観的判断力を補完する客観的な判断力が増強されるとともに、まだ見ぬ新たな知見が暗黙知として解明される期待が持てる。新たな知見は、学習者に対してより緻密なフィードバックの実現と、学習者の学びの意欲やワクワク感へとつながり、探究学習を促進できる。

よって、著者は、腕時計型運動センサデバイスをこれまで見えていないものが見える確率を極限まで高める最有力の手法と考え、実世界指向インタフェース[23]の実践例として、暗黙知の解明に挑みたいと考えた。

1.4 研究の範囲

以上の背景より、本研究では以下(1)(2)(3)の課題を研究範囲とした。

また、本研究における演奏上の暗黙知の位置付けと、暗黙知解明の要件(A)(B)を定めた。

(1) 音や映像からの逆推定が困難な動作についてフィードバックを提示できていない

ギター演奏においてポピュラーな奏法であるアクセントを付けたコードストロークを指導する場合、教師による模範実演を交えながら、スパッと弾くといったようなオノマトペや比喻表現を用いて、学習者にイメージをさせるなどといった手法が考えられるが、学習者に対してフィードバックを緻密に提示できていない可能性がある。

この奏法においてどのタイミングでアクセントを付けていると、画像で示した研究は見当たらない。アクセントが付いている時とついていない時ではピッキングの軌道はどのようになっているのか、録画や録音ベースのフィードバックでは提示することは困難であると考えられる。

そこで、暗黙知解明の要件(A)を「音や映像からでは演奏の原因を逆推定できず、教師が学習者に対してフィードバックを行うことが難しい多様な奏法において、その原因を腕時計型運動センサデバイスを活用して数値観測し、結果得られた知識が暗黙知の場合は、暗黙知の解明である」と定め、原因の数値観測とフィードバックを提示する研究を行う。

(2) 演奏技量を獲得した瞬間など時間不連続な事象の認知を可視化できていない

著者が勤務をしている日本工学院八王子専門学校ミュージックアーティスト科のギターレッスンでは、音楽実務を行っているプロミュージシャンが実務家教員となり、主に現在の音楽業界が求める技能を2年間で習得させるべく授業計画を立案し、10名以上の学生を1人1人順番に見ながら個別指導し授業を行っている。一方で、個別指導では他の生徒は音を出さずに待っていなければならない場合があることから、レッスンの効率が低下してしまう場合がある。多数の学習者を同時に教育するような状況においては、教師の目が行き届かなくなることや、オンライン授業といった状況では運動の目視に制限が生じるので、学習の進捗をモニタリングする教育手法が必要であると考えた。音や映像から逆推定が難しい演奏を指導する音楽実技教育現場においては、学習者の進捗の度合を正確に指摘できる教師は(1)の考察より皆無であると考えられる。

そこで、暗黙知解明の要件(B)を「学習者が演奏技量を獲得した瞬間など時間不連続な事象の認知を暗黙知と位置付け、認知ができた場合は、暗黙知の解明である」と定め、事象の認知を可視化するための研究を行う。

(3) 演奏指導を通じて新たな価値を生み出す STEAM 手法を積極的に活用した教育の模索

高等教育機関における音楽演奏の実務家教員が暗黙知解明の要件(A)(B)を満たし、演奏上の暗黙知を客観的に明らかにして、学習者にフィードバックを行う(1),(2)を実現できれば、新たな価値を生み出す STEAM 手法を積極的に活用した教育の実践も可能になると著者は考えた。

本研究においては芸術とサイエンスのそれぞれを専門とする教育スタッフによる授業を理系大学において実施し、STEAM 手法実践の大きな障害となっていたファシリテーター不在の問題を解消することを考えた。また、芸術・サイエンス双方の教員にとって、クリエイティブな発想ができる人材の育成方法を探究するFD(Faculty Development)活動の場として、既存のPBL型授業をアップデートする形での実践を試みることにした。芸術の題材としては、エレクトリックギターによるポピュラー音楽の演奏を取り上げ、パフォーマンスアートとの親和性から腕時計型運動センサデバイスによる運動信号分析技術を組み合わせることとした。

(1)(2)(3)において、エレクトリックギターを題材にしたメリットは以下の通りである。

- ・エレクトリックギターはポピュラーな演奏芸術であり、理系大学学部であっても学生で知らない人はほぼ居ないため関心を持たせることができる。
- ・弾いているとカッコ良く見えるし楽しいと思しやすい。
- ・音響機器やモーションセンサデバイスなどを関わらせながら、身体がどう動いているかが知れる。

・エレクトリックギターの値段は下がり、1万円前後で良いギターを売ってくれる業者も出てきて社会実装されている。

このため、エレクトリックギター演奏と、腕時計型運動センサデバイスによる運動信号分析を研究範囲の中心とした。

1.5 本論文の構成

本論文では、エレクトリックギターにおける演奏の原因を腕時計型運動センサデバイスによる数値観測にて逆推定する解析手法について課題を整理し、ギター演奏の技量獲得時に発生する暗黙知の位置付けと、暗黙知解明の要件を定める。

具体的な複数の演奏評価実験を提案し、複数の奏法について解析を示すことによって、暗黙知を解明する研究を行う。

さらに、得られた知識を教育現場に適用する教育手法の研究を行う。

第1章では、「はじめに」と題し、本研究の目的および目標、研究の範囲について述べ、本論文の構成を示す。

第2章では、「エレクトリックギター演奏分析を取り巻くこれまでの状況」と題し、まず、エレクトリックギターの演奏法が音から逆推定することが困難な理由を踏まえて、非利き手の演奏分析と、利き手側の演奏分析の状況について概観する。次に、エレクトリックギターのピッキング法について現状と明らかにすべき要素を整理する。さらに関連して、アクセント付きコードストローク奏法について現状と課題を示す。

第3章では、「モーションセンサを導入したエレクトリックギターのピッキング指導法」と題し、研究対象とするアクセント付きコードストローク奏法において、モーションに基づくタイミング解析と音声に基づくタイミング解析の関係を明らかにし、演奏運動からリズムの正しさを推定する手法の精度について、プロギタリスト3名とアマチュアギタリスト13名による検証を行う。

その上で、音楽系専門学校の授業にモーションセンサを導入して各1時間計5回にわたるギターレッスンクラスへの適用実験を実施する。実践で得られた知見より、エレクトリックギターのピッキング指導法にモーションセンサを導入する有効性を考察する。

さらに、本章で提案するリアルタイムインタラクションシステムを、より現実的な環境で評価するため、アクセント付きコードストローク奏法同様に、音や映像から演奏技量を正しく評価することが困難で暗黙的な事象が含まれる奏法を複数検討し、それぞれの奏法における課題を整理する。また、プロギタリストがリアルタイムインタラクションシステムを使用してコードストローク以外の多様な奏法を演奏分析するユーザーテストを複数実施し、これによる具体的な知見を得た上での検討を行う。

第4章では、「STEAM教育にエレクトリックギターを導入した教育法」と題し、ギター演奏技法という芸術の要素と、モーションセンサ信号分析をはじめとするSTEM的な要素を組

み合わせる STEAM 手法を用いた教育コンテンツ開発を，情報科学系大学学部の PBL 授業として実践する。

週 1 回 5 時間，計 14 週にわたる授業を実践した上での成果発表会及び学生から寄せられた授業へのコメントによる検証と，従来の教育手法と STEAM 手法の比較検討を行うことにより，本手法の有効性を考察する。

最後に第 5 章では，「結論」と題し，第 4 章までの結果を総括し，本研究の成果と，これからの音楽教育におけるモーションセンサ活用の可能性の考察ならびに今後の展望について述べる。

第2章

エレクトリックギター演奏分析を取り巻くこれまでの状況

2.1 エレクトリックギターとアンプ・エフェクター・ピックアップの関係

エレクトリックギターは、撥弦時に弦振動をピックアップと呼ばれる集音デバイスによって電気信号に変換し、シールドケーブルを経由してアンプに送る。そして、アンプから音が鳴る。

エレクトリックギター本体からの生音は小さく、アンプを使わずに練習していると音が聴こえにくい。しかし、生音を聴くために強い力でのみ弦をピッキングしていると、適度な弦振動を得る目的以上に力を込めて弾く癖がついてしまう可能性がある。

アメリカのバークリー音楽大学で教鞭を執る藤田は、練習時にはアンプとエレクトリックギターをセットで使うこと、またアンプのボリュームは少し大きめに設定して練習することを推奨している[1]。

一方で、日本国内においてはマンション・アパートにおける楽器騒音の問題も多く、各々の住宅環境の問題も異なるためアンプを鳴らして練習ができる環境が十分に整備されているとは言い難い。また、エレクトリックギターはエフェクターと呼ばれる音響機器を経由すると音が変わる。アンプやエフェクター、ピックアップには多様な種類があり、それぞれに音響特性があることで知られている。音量調整をするためのマスターボリュームがないアンプも存在する。ピックアップからエフェクターを経由させ、アンプから鳴っている音からはギター本体から鳴る生音を確認できないため、演奏者がどのように弦を鳴らしたのかを推定することは困難である。したがって、エレクトリックギターはアンプやエフェクター、ピックアップの影響により、音からでは演奏法の推定が困難であることがわかる。

2.2 非利き手側の演奏分析

ギター演奏にて生じる音響信号の特性は、非利き手（概ね左手）側での押弦による音程選択と、利き手（概ね右手）側による撥弦方法に大きく左右される。

エレクトリックギターのネックにはフレットが存在しており、非利き手側の作業はこのことによってバイオリンと比較してかなり容易になる。厳密には、非利き手による押弦によって音程が決定されるのではなく、非利き手はフレットと弦を接触させる役割を担い、実質の音程決定はフレットが行うこととなる。よって、押さえ方が音に与える影響が極めて少ない。また、同音異弦という概念があり、C音でも2弦1フレットと3弦5フレットは同じ音程だが、ピッキングによって弾き分けなければならないので、音の選択の問題と音の発音の問題は本質的に異なっている。バイオリンのネックにフレットを埋め込んだフレットバイオリンはドロップアウトのリスクを減らすメリットや、バイオリンが本職ではないプロの音楽家（ギタリスト等）が、楽曲の録音のためにフレットバイオリンを購入するケースが多数あると報告がある[2]。

また、非利き手側ではギターそのものに取り付けるタイプの解析用機器を用いた評価手法が報告されている。

Shin らは、ギターのフレットボード上の触覚スイッチとギターのブリッジ近くのピエゾピックアップで構成されるセンサーベースのギターを提案した。複雑な逆推定タスクを回避するために、ピエゾピックアップの音声信号を使用して音価（音の持続時間）を決定し、触覚センサがピッチ検出器の役割を果たした。彼らはまた、信号処理の速い応答時間を利用することにより、インタラクティブなギターレッスンのためのリズムゲームを実演した[3]。

Marky らは、ギターのフレットボードに静電容量式センシングデバイスを使用した指の位置キャプチャー技術が詳細な運指情報を提供する可能性があることを示した。彼らは、初心者がコードハンドのスキルを習得するために、ギターレッスンクラスを実施し成功した[4]。

上記のシステムは、ギター演奏技術を客観的に評価する可能性があるが、彼らはエレクトリックギターに厳しい制約を導入すると考えられる。つまり、事前に決定された磁気ピックアップやカスタマイズされたギター指板など、追加のハードウェアなどの特殊な機器は、実用性の観点からコンシューマーの使用に適用されない場合がある。商用製品として、UBISOFT の Rocksmith+は、サウンドベースの分析を利用したプライベートギターレッスンのコンシューマーソリューションを示した[5]。ピッチと音価の正確さはリアルタイムで評価できるが、コードとピッキングの両方の手にとって好ましいギター演奏フォームはまだ不明である。

2.3 利き手側の演奏分析

演奏リズムや鋭さといった音楽表現において重要な役割は、利き手側によるピッキングによってコントロールされる。

利き手の演奏におけるオーディオベース解析を用いた評価手法について、Lindroos らは、エレクトリックギターが、集音装置の特性と撥弦の位置に強く影響されることを示している。彼らは、ギター弦から自然な音を得るために、典型的な磁気装置の代わりにピエゾピックアップ装置を実験に使用した。その結果、リアルな音を再現するためには、デジタル導波管方式による複雑な信号処理モデルを用いる必要があることがわかった[6]。

逆に、音信号からギターの演奏フォームを推定するのは、逆推定問題が複雑であるため困難である。

利き手の演奏における MIDI を用いた評価手法について、伊藤らは、弾弦情報を出力するギター型電子楽器インタフェースを使用することによって、ギターのコードストロークのどの弾弦までがひとかたまりの弾弦であるかについての判定法を論じている。全ての弾弦がストロークでなされることを前提として、ダウン時には弦番号が単調減少し、アップ時には弦番号は単調増加することを利用し、弦番号が 1 つ前に弾弦された弦の番号と同じか不連続、あるいは単調減少→単調増加、単調増加→単調減少への移行があった時に新規の弾弦のかたまりと判断するルールとし、弾弦情報と歌唱の音声情報をマージして MIDI データを作成するアプリケーションの研究が行われている[7]。

しかし、当研究室で MIDI データを出力するゴダン製のギターを使って MIDI 入力を DAW (Digital Audio Workstation) ソフトに対して行った実験では、実際の音と MIDI の精度が一致しないことがわかっている。プロの現場では、リアルタイム入力された MIDI データに対してはクオンタイズと呼ばれる補正作業が日常的に行われており、そのまま演奏を採用するというよりは修正や調整がしやすくなっているということに重きを置いた作りになっていると考えられる。したがって、演奏の評価に MIDI を使用することには限界がある。

利き手の演奏をセンサで計測し、取得したセンサデータを計算して演奏分析に役立てる研究も行われている。

利き手の演奏におけるリズムの正しさの解析については、Matsushita が角速度信号に基づくタイミング解析により、単音のダウンピッキング奏法に利用可能であることを示した。手首ひねり角速度のピークのタイミングから、連続するダウンピッキングの時間間隔を推定した[8]。また、角速度信号を用いてコードストロークのリズムを推定できることが報告されている[9]が、2 本以上の弦を小刻みに演奏するコードストローク奏法の場合、モーションに基づくタイミング解析と音声に基づくタイミング解析の関係は明らかではなかった。

ギターの音は、弦とピックの物理的な相互作用に影響されるため、コードストロークを行う利き手の動きに強く依存する。Yoshida らは、手首のひねり軸と肘の振り軸の角速度信号の滑らかさと異方性が、コードをかき鳴らす動作の特徴を区別する可能性があることを報告した[10]。また、経験豊富なギタリストの角加速度信号の変化から得られる、AATLw と呼

ばれるストロークの滑らかさを表すパラメータは、演奏リズムに伴ってほぼ同じ値に留まると報告した。しかし、プロのギタリストからは、ブルースのようなリズムカルな音楽では、コードストロークは滑らかさよりも鋭さを持つことが音楽表現上重要であるとの指摘がなされている。プロギタリストへのインタビューでは、コードストロークは肘を振る動作を中心に行うことで、シャープさを得ることができるとのことであった。

利き手の演奏をセンサで計測することの課題も報告されている。

ピック自体にセンサを装着することでリズムを検出する手法が Vanegas により報告されているが、自然な演奏運動を阻害してしまう[11]。

Jensenius は、音楽関連の動きを研究する際に問題なのは、研究対象の人が身体にマーカー/センサーを装着しなければならないことであり、実行されているモーションの邪魔になる可能性があることを報告している[12]。したがって、ピッキングを行う利き手の邪魔になるような器具を身体に装着した場合は、不自然な演奏をされてしまうことが予想される。

一方で、内視鏡下手術における Square knot（男結び）の結紮操作技巧にて中心的な役割を果たしている手術鉗子の回転操作について、鉗子先端と手首の回転角速度の相関係数が鉗子の軸まわりにて約 0.99 となることから[13]、腕時計型運動センサデバイスを手首に装着することによって手首の回転角速度の取得を行えば、ピックを利き手の指で持つエレクトリックギターのパッキング奏法解析に寄与することが期待される。リストバンドや手首にアクセサリを装着しながら演奏するギタリストは一定数いるため、腕時計型運動センサデバイスを装着した際でも演奏にも制約を与えないと考えられる。

肘と手首の構造を考えると、エレクトリックギターの利き手によるピッキング演奏においては並進運動よりも回転運動が占める割合が多いため、角速度信号を取得できるジャイロセンサが有利と考えられるが、ジャイロセンサの場合、一般的には静止時のセンサ出力が不安定でありゼロ点の変動が見られる。よって、定期的にキャリブレーション等によってリセットする必要があるが、エレクトリックギターの利き手による演奏技法であるオルタネイトピッキングは、肘関節を中心にダウン、アップと往復運動にて演奏されることが多く、演奏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演奏状況を推定でき、精度の良い運動特徴パラメータの導出につながることが期待される。特に最も多くのジャンルで使用される利き手によるコードストローク奏法は、センサの位置が演奏運動の往復毎に開始地点に回帰するという観点や、ピックが弦に衝突する位置がストローク演奏運動の中心点になることが予想されることと、大音量で演奏することが多いエレクトリックギター演奏は、演奏開始直前に 1 小節または 2 小節間、利き手を弦に触れたまま準静止させて弦振動を止めるミュートと呼ばれる技法を用いてノイズを防止する動作を行うことが多いため、センサとの相性は良いと思われる。

2.4 エレクトリックギターのパッキング法概略

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. 練習量であれば 2 対 1 の割合で利き手を重視すべきであると養父は主張する [14]. 初心者のうちは非利き手を見て指板を押さえ, 利き手を見てピッキングをするという 2 段階の操作を別々に行っていることを藤田は主張している [15]. 佐久間はギターやベースの場合, 利き手のピッキングと非利き手のフィンガリングを同時にイメージするより, 利き手と非利き手に分けてイメージトレーニングを行った方が効率的であると主張している [16]. このため, 非利き手による押弦とは別に, 利き手でピックを持ち, 弦にヒットさせるという点に着目する必要がある.



図 2.1 ピック

演奏者は, 図 2.1 のように利き手の親指と人差し指にてピックを持ち, 腕を動作させて弦とピックを衝突させ, 弦振動を発生させる.

林は, ピックと弦との間の摩擦振動は, 接触時間などの接触状態も影響するため, ギターの音響特性に複雑な影響を与えると報告している [17].

MIYASHITA らは, ギター演奏経験が 3 年以上の熟練者と初心者のピッキングモーションを映像比較したところ, 熟練者の手はスナップで動く傾向があり, 初心者の手は平行移動する傾向があると報告している [18].

渋谷らは, バイオリンのボーイングにおいて感性情報である音色が演奏動作に与える影響を明らかにするため, 楽譜, 音のイメージ, 生成すべき音の情報, 弓圧や弓速などの演奏パラメータ, 身体運動の順番によって音が生成される身体運動生成モデルを提案したうえで熟練者の演奏動作, および各音色表現語のイメージを分析したところ, 音色が演奏動作に与える影響は小さく, 感性は弓圧や弓速などの演奏パラメータ決定に影響を与えるものと報告している [19].

バイオリンのボーイングにあたるエレクトリックギターのパッキング法の音楽学校における一般的な教育は, 教師の説明によって, 楽譜, 音のイメージ, 生成すべき音の情報などから音を求める推定を行う. しかし, 教師の説明が十分で無い場合は, 音から身体運動, 演

の親指の付け根を素早く弦に押し当てて弦の振動を中断させるアクセント付きコードストローク奏法は、シャープな音響を作り出す重要な技法となっている一方で、エレクトリックギターの出音からピックと弦が接触した際の力、ピックが弦を通過する時間等の演奏パラメータを正しく指摘することは、電気回路および音響機器の信号伝達特性から困難である。また、特定の音符に強弱を付けるアクセント付きコードストローク奏法では利き手のピッキング動作の素早い切り替えが求められるため、アクセントを付けにしているタイミングや軌道等の演奏運動が、動画の視聴や目視ではわかりにくいという特徴を持っている。

様々な奏法がある中でも暗黙知が多く含まれている奏法と考え、アクセント付きコードストロークを主とした解析を試みた。

2.5.1 コードストロークとは

ピックを使用したギター奏法で要となる奏法は、和音を演奏するコードストロークである。なお、エレクトリックギターにおける主な和音のピッキング法を「付録 B」に示す。ポピュラー音楽の主演は歌であることが多く、コードストロークによる歌唱のサポートが最重要となる。右利き用ギターを使用した場合、非利き手で必要な指板を押弦し、音を選択・決定する。そして利き手でピックを持ち弦にヒットさせることで目的の音が発音され、コード音を得ることができる。安定したコードストロークサウンドを得るため、図 2.2 の楽譜 (A) における各ストロークは、ゆらぎがないように実行する必要がある。拍に乗ることによって、リズムに最小限の秩序が生まれる[21]。

単音フレーズを速く正確に弾くことも大切だが、コードをバランス良く均等に鳴らせるスキルを養うことも重要であると SIMONZ は主張している[22]。

藤田は、E7 のワンコードだけでグルーブさせる練習を推奨している[23]。ワンコードでグルーブしなければコード進行に乗せてもグルーブしないからである。

グルーブ感とはノリとも呼ばれ、調子良くその曲の雰囲気やリズムに乗った状態を指す[24]が、佐久間は、グルーブ感とは抽象的な表現の代表であると主張している[16]。

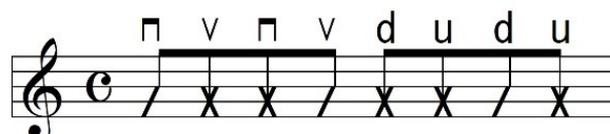
2.5.2 ストラミングとは

ピッキングには弦を 6 弦側から 1 弦側へ弾くダウンピッキングと、1 弦側から 6 弦側へ弾くアップピッキングがあるが、ピッキングという言葉は、単音ピッキングと和音を弾くピッキングの両方を指すことがあり混乱を招く原因となる。また、ピッキングの中で、多くの弦をかき鳴らすという意味をストラミングと表現している人もいる。日本国内の教則本などでは使い分けをするために和音を弾く場合はストロークという言葉で表現されることがあるが、世界的にはストラミングという言葉で表現されることが多い。つまり、和音を弾く場合は、6 弦側から 1 弦側へ弾くダウンストロークと、1 弦側から 6 弦側へ弾くアップストロークがあるが、これらを規則的に使い分けることによってギタリストは正しいリズムでス

ムーズに演奏することができる。

本論文において日本語表記のストロークを英語表記にする場合、1つのストロークという意味を表す際は strum、ストロークという奏法を表す際は strumming と表記する。

なお、図 2.3 に本論文において使用する2種類のピッキング記号を定義する。



□ or d = Down

▽ or u = Up

図 2.3 ピッキング記号

2.5.3 アクセント付きコードストロークとは

コードストロークの基本を踏まえた上での代表的な発展方法がアクセント付きコードストロークによる8ビート・ピッキングである。適切な箇所にアクセントを付けることで、ドラムス演奏のような躍動感のあるリズムを表現できる。一般的には、ダウンストロークの時、弦を弾いた直後に利き手側の親指の付け根を弦に素早く接触させることで音を止めて鋭い音響を得る[25]。この動作は、リズムに沿ってゆらぎがないように行われる必要があり、ミュージシャンはリズム感を磨きながら躍動感のあるストロークを訓練する。手首はボディ側で弦を固定するためのパーツであるブリッジから極端に浮かせず、ブリッジの近くで維持する。この状態でピッキングすると、全ての弦に対してピックが同じ距離感で当たることになる。結果的にコード・プレイに最適なピッキングが可能になる。図 2.2 の楽譜 (B) は、リズムカルな音楽を奏でるために、アクセントのあるダウンストロークを周期的に演奏している。

第3章

モーションセンサを導入したエレクトリックギターのピックアップ指導法

本章では、研究対象とするアクセント付きコードストローク奏法において、モーションに基づくタイミング解析と音声に基づくタイミング解析の関係を明らかにし、演奏運動からリズムの正しさを推定する手法の精度について検証を行う。

そして、モーションセンサの運動データを含めた結果をレッスンに加えることによって、客観的な評価やこれまでの感覚では見つけられなかった領域における指導法の発見が期待される。以下に、センサを活用した新たな指導法について論ずる。

3.1 腕時計型運動センサデバイスについて

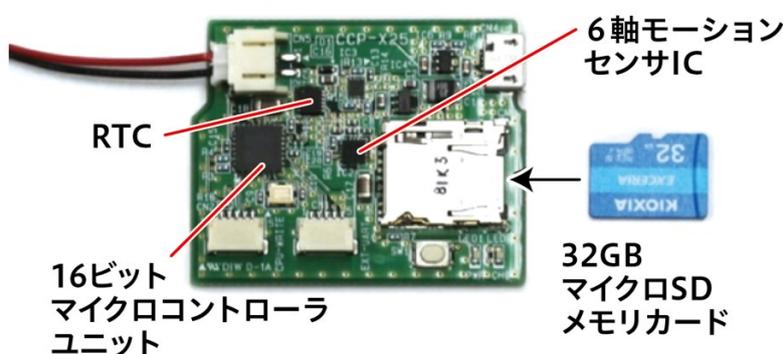


図 3.1 腕時計型運動センサデバイスの回路

図 3.1 に、3 軸加速度センサ ($\pm 16G$, $1G=9.8m/s^2$) と 3 軸角速度センサ ($\pm 2000dps$) からなる腕時計型運動センサデバイスの回路基板を示す。16 ビットマイクロコントローラユニットは、低消費電力化のため使用された。

また、RTC (Real Time Clock) モジュールは、日付や時刻を記録するカレンダークロックとしての役割を担っている。

この装置では、図 3.1 に示すように、500Hz でサンプリングした 3 軸加速度ベクトル

$$a = (a_x \ a_y \ a_z)$$

と 3 軸角速度ベクトル

$$\omega = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$$

の生の運動信号を内蔵の 32GB マイクロ SD メモリカードに記録することができる。このサンプリング周波数 500Hz は、リズムの精度を診断するのに十分な時間分解能を得るために必要であった。加速度信号と角速度信号はともに 16 ビット整数で記録した。電池を含めた総重量は約 37 グラムと軽量であるため、ほとんどのギタリストが大きな邪魔をされることなく使用することができる。3.7V 110mAh LiPo バッテリーは 11 時間以上使用でき、一般的なギター教室のレッスンには十分な長さであった。

3.2 運動パラメータの定義と関連軸

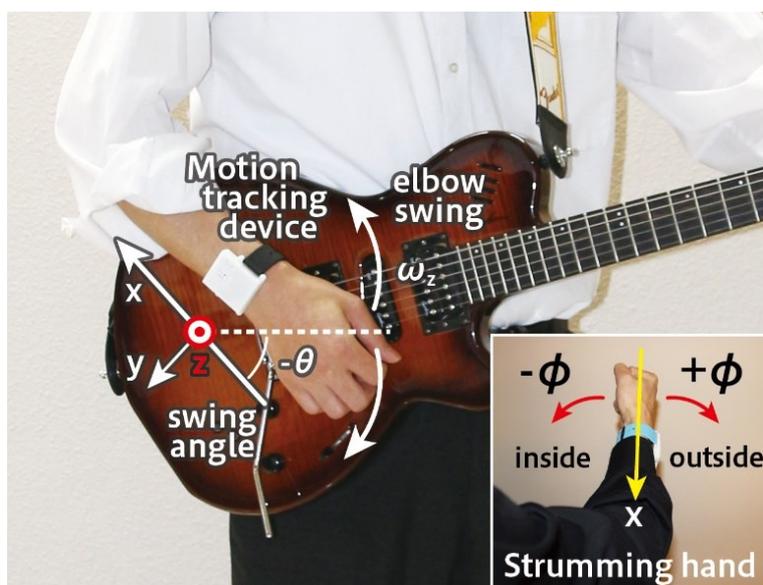


図 3.2 エレクトリックギター演奏運動の計測

図 3.2 に、エレクトリックギター奏者の利き手側手首に演奏運動を計測する腕時計型運動センサデバイスを装着した様子を示す。そして、運動パラメータの定義と関連軸を示す。なお、本論文におけるギター演奏と主なパラメータの説明を「付録 A」に示す。肘中心回転角 θ は、プレイヤーの利き手の前腕に沿った x 軸の姿勢角度を計算することで推定した。腕時計型運動センサデバイスが静止している状態では、角度 θ は

$$\theta = \sin^{-1} a_x$$

として導出される。手首ひねり角 ϕ は、静止状態で $|a_x| < 1$ であれば、

$$\phi = \sin^{-1} (a_z / (1 - a_x^2)^{0.5})$$

として算出される。ギターを弾き始める直前に腕時計型運動センサデバイスがほぼ動かない状態になると仮定すると、初期前腕姿勢角を高精度に推定することができる。また、運動信号 a , ω を用いたセンサフュージョン技術を用いることで、少なくとも1分間ギターを弾きながら、装置の肘中心回転角 θ , 手首ひねり角 ϕ を絶対誤差1度未満で算出することができる[1]。また、エレクトリックギターを様々な奏法で演奏する場合、肘の往復運動が安定する傾向があるため、上死点および下死点のタイミングを利用して、演奏時間の分割を行うことができる。

肘中心回転(姿勢)角 θ については、腕時計型運動センサデバイスの軸方向定義に従うのか、ギター演奏におけるコードストロークの上下方向に従うのかにより符号が逆になることが考えられる。本論文ではより演奏者にとって直感的である、コードストロークのアップ・ダウンを θ の正・負に対応づけることとした。

3.3 演奏評価を行うタイミングと学習者に伝えるタイミング

学習者にフィードバックを伝えることは教育において重要である。フィードバックによって、学習者は改善点や評価を得ることができて、学習効果の向上や行動変容につながる可能性があるため、教師は学習者にフィードバックをどのタイミングで伝えるべきか検討する必要がある。久保田らは、柔道競技の試合中において、選手に対し強制的にアドバイスを聞かせることは、選手にとってマイナスになる恐れを指摘している[2]。小澤らは鉄棒単元において運動画像の即時フィードバックを活用することで、自身のフォームの認識がしつかりとでき、そのため上達のスピードを上げるのに効果的な方法であるという研究結果を報告している[3]。

音楽演奏においては、学習者が曲を発表する状況下において演奏中であるタイミングと、演奏の訓練をしている練習中のタイミングでは、フィードバックを伝える状況が異なる可能性が考えられる。

森尻は、自己の演奏の録音を演奏後により意識して聴取し、思考することで、問題意識の明確化や解決方法の変移をもたらし、試行錯誤の一端を担うと同時に、演奏者自身が学習経験としての満足感を持つことが示唆されたと報告している[4]。Matsushita は、手首に装着したワイヤレスモーション診断デバイスに基づくインタラクティブモーション分析システムが、ヘヴィメタルギターの高速ダウンピッキング技術を評価するのに効果的であると報告している[5]。

演奏評価を行うタイミングと学習者に伝えるタイミングの検討を必要とする理由は、ギ

タリストは演奏フォームを修正することをとても苦手と感じるからである。音楽教室などでは、レッスンに鏡を使用し、学習者の演奏を鏡で見せるフィードバック方法を使うこともあるが、一般的に一度ついた癖を修正することは非常に難しく、どうしても音を鳴らす方に意識を取られてしまい、フォームの修正には時間を要する。

本研究では、演奏後におけるフィードバックを事後フィードバックと呼称し、演奏中の即時フィードバックをリアルタイムフィードバックと呼称する。音や映像からの逆推定が困難な動作であるアクセント付きコードストローク奏法について、事後/リアルタイムフィードバックの提示を検討し、演奏評価の有効性を検証する。

3.4 センサを活用した事後フィードバックによるギターレッスン

3.4.1 使用したデバイス

本実験では、図 3.1 で説明した腕時計型運動センサデバイスを使用した。実験環境で使用したギターは、エレКТリックギターはギター弦やピックの種類、弦の太さ、ネックやボディの材質、ナットとブリッジの形状に起因する弦間ピッチ、ピックアップ、アンプとギターを接続するシールドケーブル、ギターアンプの種類によって音が変わることが考えられるため、エレКТリックギターとギターアンプは唯一のものを使用し、参加者には同一の腕時計型運動センサデバイスとピックを配布し、1人ずつ同じ環境の演奏場所に呼び出して記録映像・音声とともに演奏データを取得した。また、エレКТリックギターとギターアンプはエフェクターを経由させずに接続し、本実験ではエフェクターを使用せずに演奏を行った。以降に実施した実験も、全てこの形に準じて行った。

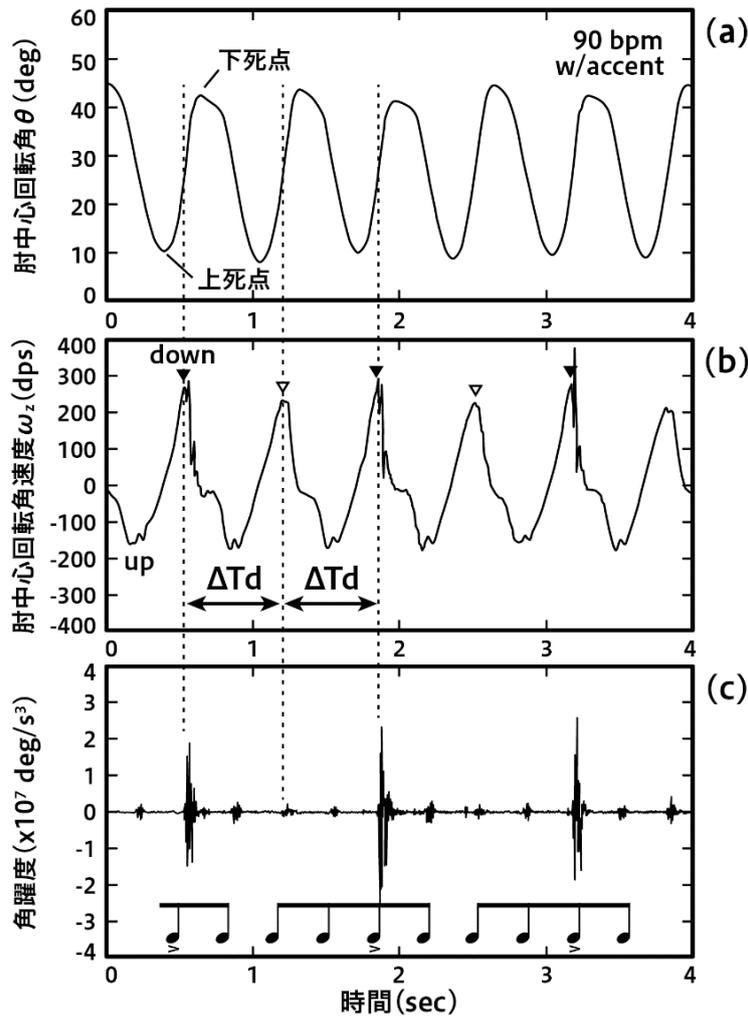


図 3.3 プロギタリストによるアクセント付きコードストロークの波形

3.4.2 ストロークのタイミング評価アルゴリズム

図 3.3 は、プロギタリストによるアクセントのあるストローク演奏の動作信号波形である。図 3.3 (a) は肘中心回転角 θ の正弦波的な波形であり、図 3.3 (b) は肘中心回転角速度 ω_z の波形である。ここではアップ方向へのコードストロークでは θ の値が減少する座標定義を用いている。

肘中心回転角速度 ω_z の正のピークタイミングは、図 3.3 (c) に示す x 軸方向の角躍度 (x 軸まわり角速度の二階時間微分) 信号の振幅が急激に増加したタイミングと一致するように思われる。これは、演奏者の指が持つギターピックとギター弦との急激な衝突により、肘中心回転角速度 ω_z が小さくても素早く減速すると説明できる。そして、演奏者の人差し指と前腕で回転軸を共有しているため、手首ひねり角速度 ω_x の小さいが急激な変化が生じる。図 3.3 (b) において、肘中心回転角速度 ω_z の連続する正のピークタイミングの時間差 ΔTd が 4 分音符 1 つ分の時間に相当すると仮定することで、ストロークのリズムと偏差を評価

することができる。

ギターをかき鳴らす音のオンセットタイミングは、スペクトログラムを用いることで推定できることが知られている[6]。Lee らは、加速度信号に基づくリズム分析法を提案した[7]。演奏者の手首でコードをかき鳴らす動作の加速度信号は、本研究の実験の角速度信号と比較して、弦やギター本体周辺での複数の衝突により複雑な構造を示していた。角速度信号に基づくオンセットタイミング分析は、アマチュアギタリストにはまだ適用が難しいが、プロギタリストによるタイミング分析では、角速度に基づく方法と音声に基づく方法の間でかなり良い一致を示した。ピエゾピックアップを搭載したエレクティックギター (Godin, xSta) の 8kHz ダウンサンプリング音信号を用いてスペクトログラムを算出した。512 ポイントの FFT スペクトルは Hann window 関数で計算された。スペクトルを計算するウィンドウの時間ステップは、運動信号のサンプリング周期と同じ 2msec に設定した。図 3.4 では 1 つのストロークは 8 分音符、2 つのストロークで 1 拍ゆえ 2 小節 (16 strums) の評価を示したが、100bpm から 200bpm の間、アクセントのある無しにかかわらず、サウンドベース (グラウンドトゥルース) とモーションベースの結果の相関係数は $R=0.45$ であった。実験では、リズムのずれは 5% 以下であればリズムカルな音楽として十分である。3 人のプロギタリストの実験では、90bpm と 110bpm のリズムでは、ギターの音を聴いてもリズムの乱れを感じることはほとんどなかった。彼らはモーションベース法で推定したリズムの狂いが 3% 未満であることを示した。

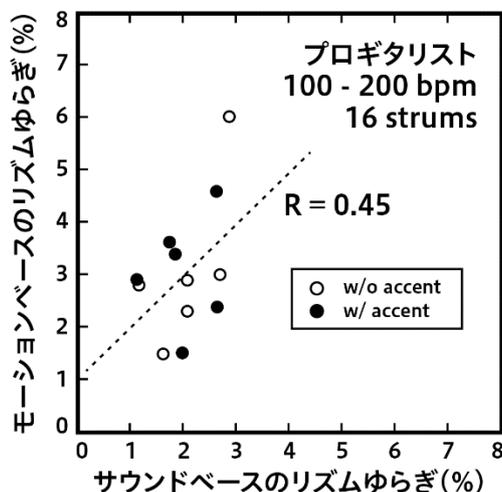


図 3.4 サウンドベースとモーションベースのリズム評価の比較

$R=0.45$ の数値について、確実性という点では不十分である可能性も残る。一方で、モーションから計算したリズムゆらぎの値は音響によるグラウンドトゥルースよりも概ね大きな値になることから、モーションベースでのリズムゆらぎが 5% 以内であれば、サウンドベースでのリズムゆらぎも 5% 以内である可能性が非常に高いことが類推される。この結果、 $R=0.45$ という値であっても演奏運動評価に対して深刻な影響は与えないこととなる。した

がって、動作に基づくリズムのずれが5%の閾値以下であれば、ストロークリズムの正しさを判断することができる。

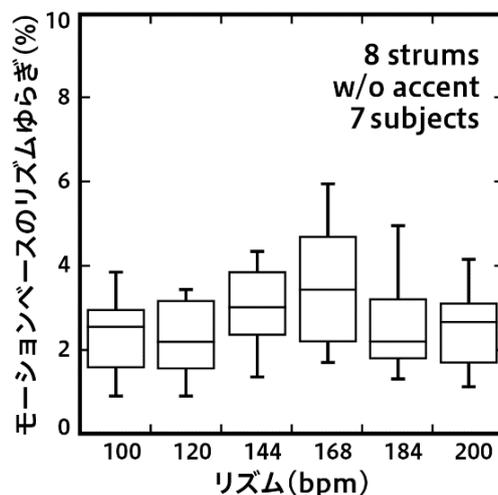


図 3.5 アマチュアギタリストのコードストロークにおけるリズムゆらぎ

図 3.5 は、7 名のアマチュアギタリストを対象に、動作分析によりリズム偏差を評価した結果である。学生は全員、Em7 コードでのオルタネイトピッキングによるストロークの経験が 6 ヶ月以上ある。各学生は、アクセント無しのコードストロークを 16～32 回交互に演奏した。1 つのストロークは 8 分音符であるため、8 つのストロークで 1 小節の長さとなる。この時、アクセント付きのコードストロークは難しかったようである。学生のリズム偏差が最も小さい 8 つのオルタネイトストロークを抽出した。100bpm から 200bpm までは、エレクトリックギターとアンプの音を聞いても、リズムの狂いに気づきにくい。Matsushita らは、エレクトリックギターの初心者でもストロークリズムを正しくすることは、それほど難しくないと報告している[8]。

3.4.3 シャープネスパラメータの定義

図 3.3 (c) に示すように、ギターピックや演奏者の親指と弦との衝突の時間や強さが角躍度信号に反映されると思われる。

角躍度 a_{j_x} は、手首ひねり角速度 ω_x の二階時間微分値

$$a_{j_x}[n] = \{\omega[n+1] - 2\omega[n] + \omega[n-1]\} / (\Delta t)^2$$

として計算される。n はサンプリングデータの番号 (整数) である。例えば、演奏者の親指と人差し指で持ったピックでギター弦を叩くと、かなり大きな a_{j_x} の値が観測される。

センサフュージョン技術によって得られたリニア加速度信号は、ピックとギター弦の衝突を検出できる可能性があるが、例えばピッキング時のボディと手の衝突を拾ってしまうなど、S/N比に問題がある。本研究では、角躍度 aj_x はストロークによる衝突に対してより敏感であることを見いだした。そこで本研究では、角躍度 aj_x がピッキングによる衝突の強さを反映していると仮定し、ストローク評価用に Sharpness (シャープネスパラメータ) というアドホックな運動パラメータを定義した。

まず、肘中心回転角 θ の上死点と下死点のタイミングからダウンストローク時間を決定し、ダウンストローク時間内での $|aj_x|$ の総和を計算した。ダウンストロークの開始から $|aj_x|$ を積算し、積算値が全体の 10% を超えてから 90% までの時間を、時間の次元を持つ「鋭さを表すパラメータ」として算出した。

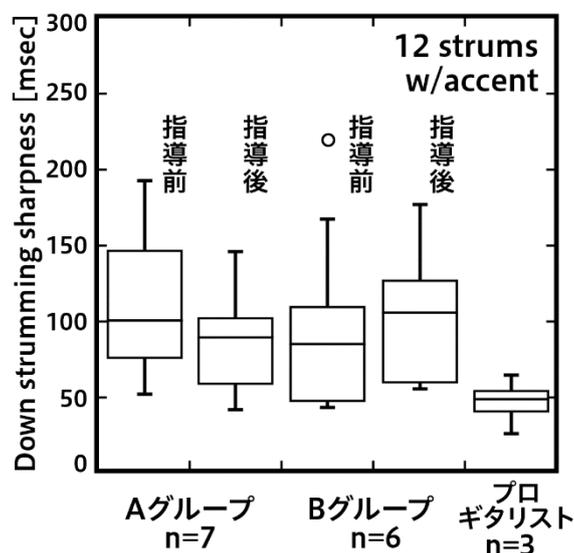


図 3.6 プロギタリストとアマチュアギタリストのコードストロークにおけるシャープネスパラメータ

図 3.6 は、90bpm と 110bpm のリズムで、プロギタリスト 3 名とアマチュアギタリスト 13 名の Sharpness (シャープネスパラメータ) を評価した結果である。実験参加者は全員、腕時計型運動センサデバイスを使用した。実験では、アクセント付きのコードストロークを 48 ~ 64 回交互に演奏して学生のリズム偏差が最も小さい 12 回のオルタネイトストロークを抽出した。ほとんどの参加者がエレクトリックギターを使用した。プロギタリストは、アクセントのある鋭いストローク音を出していた。

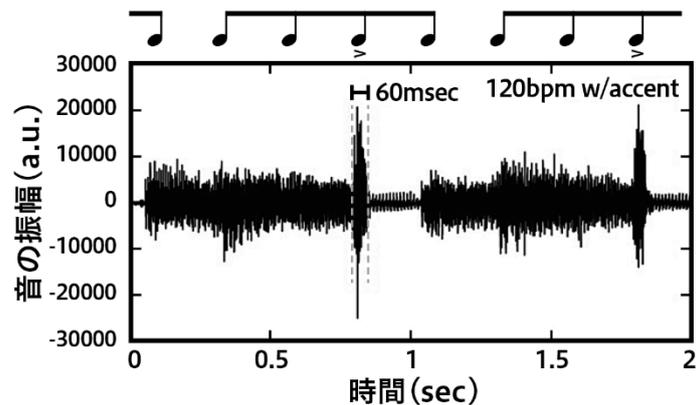


図 3.7 プロギタリストによるアクセント付きコードストロークの波形

図 3.7 は、プロギタリストの音の波形を示したものである。ダウンストロークの音のパルス幅（～60msec）は、図 3.6 に示したモーションベースの Sharpness（シャープネスパラメータ）と一致した。また、100bpm から 200bpm のリズム帯域では、ハーフハイト（-3dB）での音のパルス幅は 37.5 ± 2.1 msec であった。また、Sharpness（シャープネスパラメータ）は 59.3 ± 9.1 msec と異なる値を示したが、数値分布的にはほぼ一定であった。一方、アマチュアギタリストは 2 つのグループに分けられた。A グループ（7 名）は音楽系専門学校の学生である。プロギタリストによる簡単な指導の前では、彼らは急激なアクセントのあるストロークを行わなかった。しかし、音楽的に正しいアクセント付きコードストロークを指導したところ、Sharpness（シャープネスパラメータ）と録音された音の両方で明らかな改善が見られた。一方、B グループは理系大学生 6 名で構成されている。A グループとは異なり、指導後の明確な向上は見られなかった。B グループの学生へのインタビューによると、ほとんどの学習者が教師の指導を受けた後、正しいピッキング動作でギターをストロークすることに疑問を抱いていた。エレクトリックギターの音の鋭さは、アンプやエフェクターの電気的特性にも依存するため、音を聞いて両グループの違いを見つけることは困難であった。本研究で提案した動作に基づく評価パラメータは、様々な種類のアンプやエフェクターなどの音響機器を使用するギター演奏者に有用であると考えられる。

3.4.4 ストローク評価のための PC アプリケーション

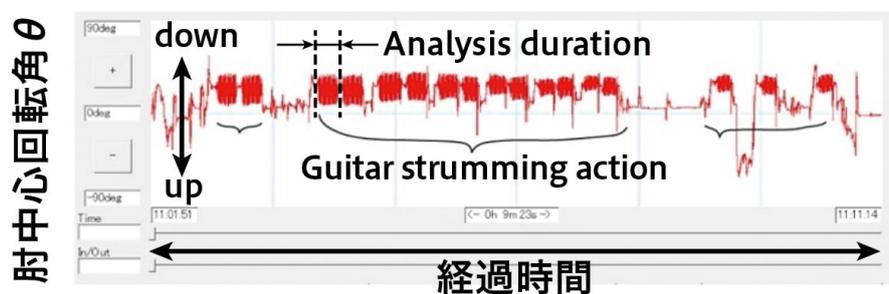


図 3.8 コードストローク・パフォーマンスファインダー

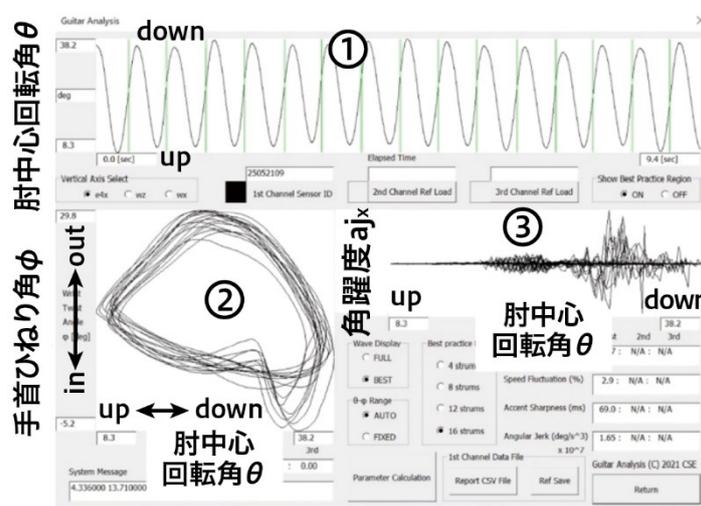


図 3.9 ストローク診断アプリケーションの画面

診断に有用なパラメータを決定した後、エレクトリックギター学習者向け PC アプリケーションソフトを検討した。図 3.8 に 10 分間のギターレッスンにおける肘中心回転角 θ の波形を示す。この場合、肘中心回転角 θ の絶対値、密度、周期的な変化に注目することで、PC アプリケーションのユーザーは、ギターのストローク動作がいつ行われたかを容易に知ることができる。次に、具体的な演奏時間帯を見つけるために、演奏回数として分析時間を決定した。図 3.9 は、プロギタリストのアクセント付きコードストロークのデータを用いたストローク診断アプリケーションの画面である。画面上部には、肘中心回転角 θ の波形が表示される (①)。また、評価対象となるオルタネイトストロークの数を選択することができる。今回は、リズムのずれを考慮したベスト 16 のオルタネイトストロークが自動的に選択された。左下の中央付近には、2 次元の軌道プロットが表示される (②)。横軸は肘中心回転角 θ 、縦軸は手首ひねり角 ϕ に対応している。この軌道を表示する小画面では、同じ軌道プロットが描かれることで図が太くなり、ユーザーはストローク動作の安定性の有無に気づく

ことができる。また、ダウンストロークの下死点付近には、アクセントによる小さな変曲点が見られることに気がつく。画面中央の右側には、肘中心回転角 θ に伴う角躍度 a_{j_x} の変化が表示されている (③)。この軌道図画面から、ギターのピックと弦の衝突がどこで起こったかを知ることができる。また、 a_{j_x} 波形の振幅から、衝突の強さを推定することができる。

表 3.1 PC 画面に表示される数値パラメータ

Parameter	Brief explanation
Averaged rhythm (bpm)	Averaged speed for specified time duration
Rhythm deviation (%)	Deviation of quarter note length
Sharpness (msec)	Sharpness of accented down strums
Peak angular jerk (m/s^3)	Averaged peak value of angular jerk a_{j_x}
Orbit coefficient	Ratio between effective values of ω_x and ω_z

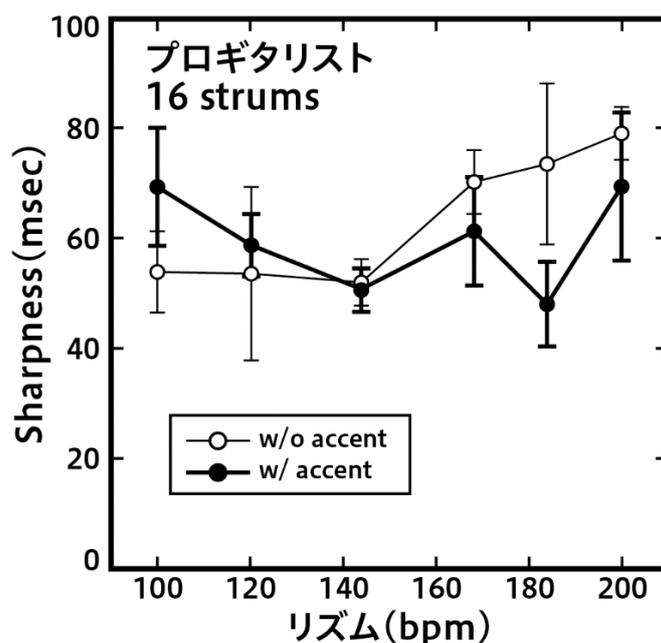


図 3.10 ストロークリズムに伴うシャープネスパラメータの変化

また、波形表示だけでなく、表 3.1 に示すような数種類の数値評価パラメータを画面上で取得することができる。図 3.10 は、プロギタリストが 100bpm から 200bpm までのリズムを刻みながら、Sharpness (シャープネスパラメータ) がどのように変化しているかを示したものである。エラーバーは、8つのアクセント付きダウンストロークを含む 16回 (4小節) のオルタネイトストロークにおける偏差に対応する。アクセントの無いダウンストロークの Sharpness (シャープネスパラメータ) は、アクセントのあるダウンストロークと同じタ

イミングにて計算された。その結果、アクセントの無いダウンストロークとアクセントのあるダウンストロークは、どちらも似たような Sharpness (シャープネスパラメータ) 値を示していることがわかる。つまり、プロギタリストにとって、アクセントの付いたストロークは、アクセントの無いストロークに比べて、速くピッキングされているということではないのである。また、Rhythm (bpm) が変わっても Sharpness (シャープネスパラメータ) がほぼ同じ値であることも注目される。表 3.1 では、 ω_x と ω_z の実効値の比として、Orbit というパラメータが算出されている。軌道係数は、肘中心回転運動が大きくなると小さくなる。図 3.11 は、プロギタリストの 8 つのアクセント付きダウンストロークを含む 16 回 (4 小節) のオルタネイトストロークの演奏リズムに伴う Orbit の変化を示したものである。ストロークのスピードが速くなるほど、Orbit は大きくなる。Em7 というコードは、1 回のストロークで 6 本の弦を全てストロークする必要がある。リズムが速くなるにつれて、6 本の弦をピッキングするために、手首ひねり角速度 ω_x が大きくなっていく。

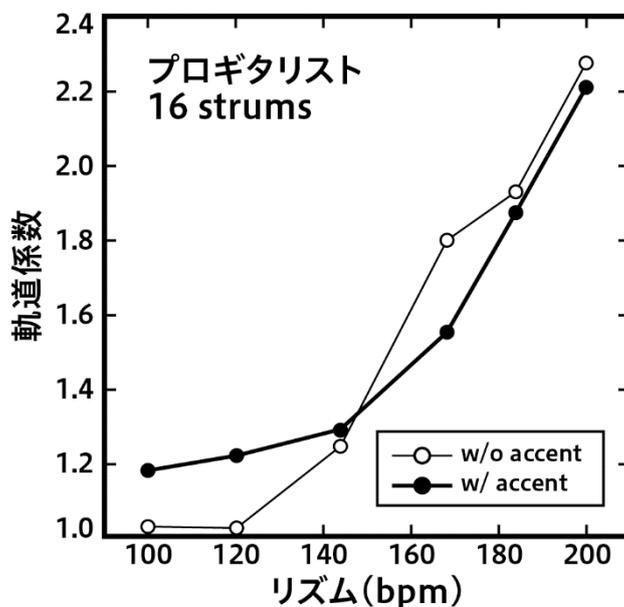


図 3.11 プロギタリストの演奏リズムに伴う Orbit の変化

3.4.5 事後フィードバックによる演奏評価実験

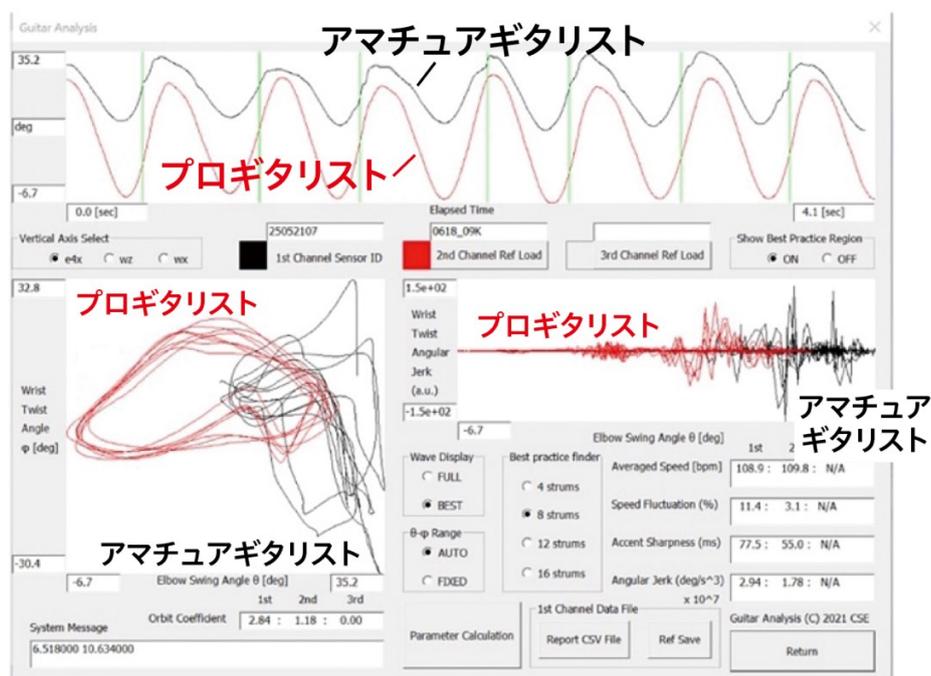


図 3.12 アマチュアギタリストとプロギタリストの比較

図 3.12 は、アマチュアギタリスト（学習者）とプロギタリスト（教師）を比較したものである。肘中心回転角信号の正弦波的な波形を参照することで、ストロークのタイミングを認識しているため、ストロークのタイミングが同期し、2 者の演奏比較が視覚的・直感的にわかるようになる。図 3.12 の画面左下では、 $\phi-\theta$ 次元軌道図 (Orbit) を表示しているが、動作の安定性に大きな差があることがわかる。Orbit は学習者が 2.84、教師が 1.18 である。また、Sharpness (シャープネスパラメータ) は学習者が 77.5msec で、教師の 55.0msec より大きくなっている。この場合、学習者は肘中心回転角 θ の振幅が小さすぎたと考えられる。また、肘中心回転角 θ と一緒に角躍度 a_{jx} の波形も見てみると、アップストロークの強さが不足しているようだと言えらる。もし、音楽の授業で教師が学習者の面倒を見ることができれば、その問題点を指摘することも可能であろう。しかし、この指導法はマンツーマンのレッスンでなければ実現できない。そうであっても、レッスン中に学習者のギター演奏フォームの変化に教師が常に気づくことは非常に困難であると考えられる。なお、ピッキングの主な指導方法を「付録 D」に示す。

図 3.13 は、コードをかき鳴らすフォームの肘中心回転角 θ の改善点を見いだすことができる学習者の自己比較の例である。肘中心回転角 θ の振幅は大きくなったが、図 3.12 のアマチュアギタリストとプロギタリストの比較から、肘中心回転角 θ の振幅はさらに大きい方が良いことが示唆された。

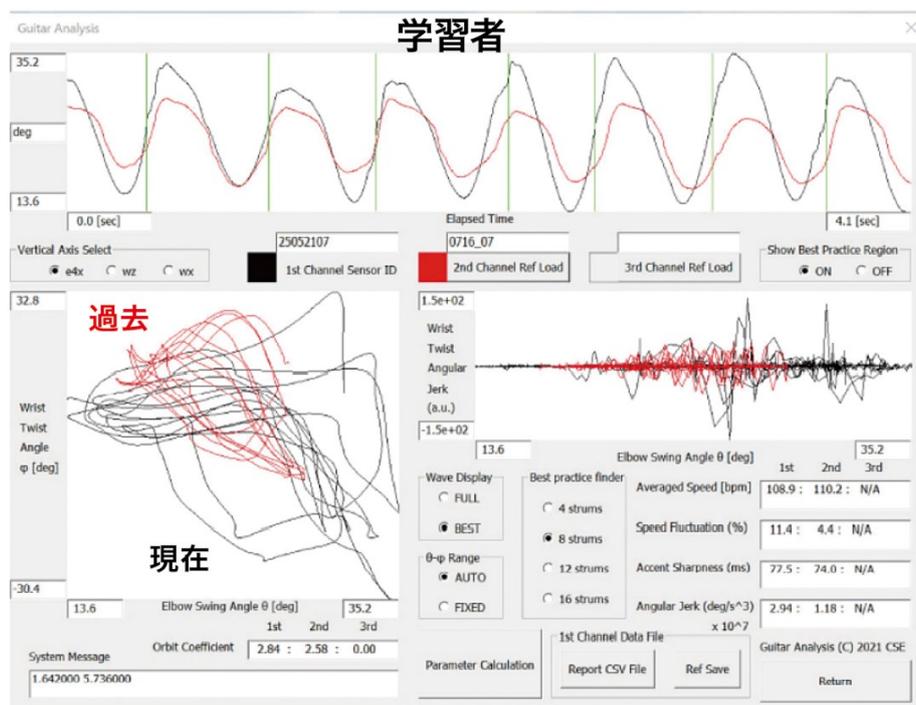


図 3.13 学習者の現在と過去におけるストロークデータの比較

3.4.6 事後フィードバックによる演奏評価の有効性

本研究では、エレクトリックギターのコードストローク動作を評価するために、低消費電力の電子回路を用いた腕時計型運動センサデバイスと PC アプリケーションソフトを検討し、鋭さや強さの変化などの音楽表現の観点から、システムの有効性を判断した。その結果、録音機やカメラを用いることなく、下記のような評価項目が有効であることがわかった。

- ・肘中心回転角速度信号による音楽的に正しいリズムのずれに対するギター演奏タイミングの推定。
- ・コードストロークの鋭さを表現するための手首ひねり角速度。
- ・肘中心回転角速度信号と手首ひねり角速度信号の実効値を用いた、ギターピッキング動作の軌道特性。

また、PCアプリケーションソフトにより、アマチュアギタリストが、プロギタリストを含む他のプレイヤーと自分とのコードストロークのフォームの違いを比較することが可能である。

3.5 センサを活用したリアルタイムフィードバックによるギターレッスン

3.5.1 リアルタイムフィードバック用腕時計型ワイヤレス運動センサデバイス

図 3.14 は、3 軸加速度センサ ($\pm 16G$, $1G=9.8m/s^2$) と 3 軸角速度センサ ($\pm 2000dps$) で構成される腕時計型ワイヤレス運動センサデバイスを示す。デバイスは、3.1 で説明した仕様をベースにしている。リズムの正確さを診断するのに十分な時間分解能には、500Hz のサンプリング周波数が必要であった。バッテリーを含めた装置の総重量は約 37 グラムと軽く、内蔵の 32GB マイクロ SD メモリカードに 500Hz でサンプリングされた生のモーション信号を記録しながら、2.4GHz ワイヤレス通信モジュールを介して 50Hz でモーションデータを送信できる変更点に加わっている。3.7V 110mAh LiPo バッテリーは 3 時間以上持続し、典型的なギターレッスンクラスには十分な長さであった。



図 3.14 腕時計型ワイヤレス運動センサデバイス

運動認識データの 50Hz の更新周波数は、上下死点間の最小遷移時間が 20msec 以上であるという事実によって決定された。この信号処理方式は、失われたデータを回復する可能性を高めることにより、ワイヤレスデータ通信の冗長性を追加することができる。次のタイムセグメントが開始するまで、同じ認識結果が 20msec 毎に送信される。

本実験では、図 3.14 で説明した腕時計型運動センサデバイスを使用した。実験環境で使ったギターやピック、弦などの条件統一は 3.4.1 と同様にした。

3.5.2 コードストロークモーションリアルタイム分析アルゴリズム

モーション信号処理のフローチャートを図 3.15 に示す。6 軸モーションセンサ IC は、3 軸加速度ベクトル $a = (a_x \ a_y \ a_z)$ と 3 軸角速度ベクトル $\omega = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$ からなるデータを、2msec 毎に 32GB マイクロ SD メモリカードとモーション分析モジュールに送信する。モーション分析モジュールでは、モーション信号はモーショントラッキングとモーションパラメータ計算プロセスに分離される。モーショントラッキングプロセスは、センサフュージョン技術を使用して肘中心回転角 θ を生成する。腕時計型運動センサデバイスは静止している間、角度 θ は、

$$\theta = \sin^{-1}a_x$$

として計算される。

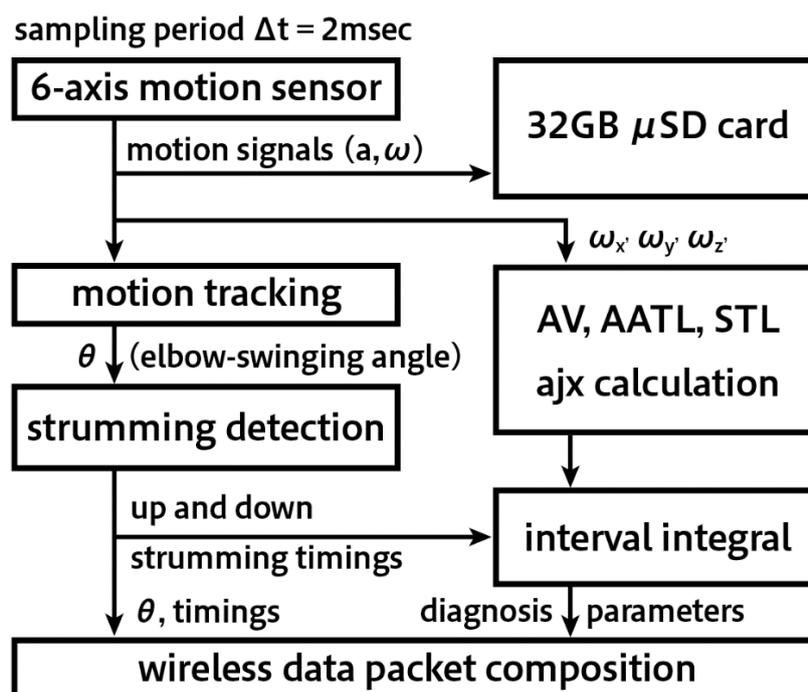


図 3.15 モーション信号処理のフローチャート

図 3.16 は、中級レベルの電気ギター奏者が本研究の楽譜（第 2 章の図 2.2）を演奏している時の動作波形を示している。

肘中心回転角速度 ω_z はアクセントのあるダウンストロークで急激な変化を示すが、肘中心回転角 θ は比較的滑らかに変化し、ストローク方向に基づく時間分割に適していることがわかった。肘振り動作の上死点、下死点ともに、大きな遅延を発生させることなく決定することができる。ここではアップ方向へのコードストロークでは θ の値が増大する座標定義を用いている。

また、初心者からプロギタリストまで、真のストロークのタイミングから 20msec 以内の遅れで、アップとダウンのストローク時間情報を得ることができた。

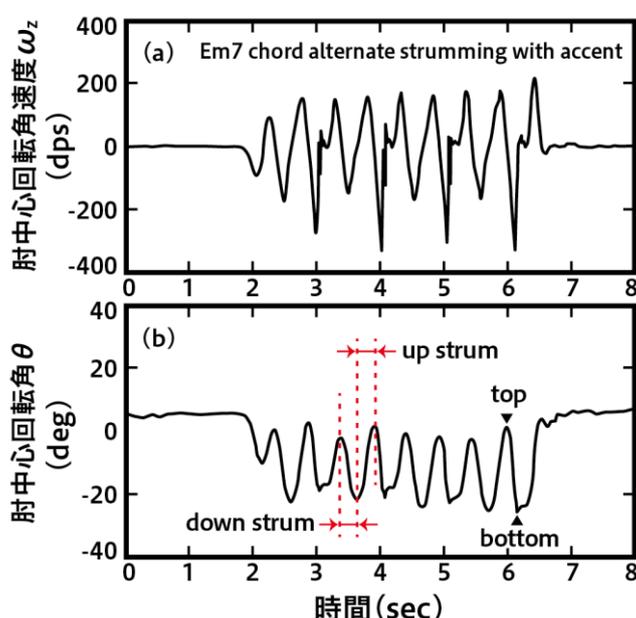


図 3.16 中級レベルの電気ギター奏者の動作波形

ストロークのタイミングを決定する際に、3 軸角速度ベクトル ω に基づく数種類の運動パラメータを算出する。角躍度 aj_x は、手首ひねり角速度 ω_x の二階時間微分値として算出される。演奏者の親指と人差し指で持ったピックでギターの弦を叩くと、角躍度 aj_x がかなり大きな値で観測されることがある。センサフュージョン技術によって得られたリニア加速度信号は、ピックとギターの弦の衝突を検出できる可能性があるが、本研究では aj_x の方がより敏感に反応することを見いだした。モーションパラメータ AATLw は、弦を弾く動作の滑らかさを示すと Yoshida らによって報告されている[1]。有効角速度 AV は、ストローク時間内における角速度 $|\omega|$ の 2 乗平均平方根として計算される。AATLw は AV で正規化した角加速度ベクトル軌跡長の略で、時間微分した角加速度ベクトルと時間平均した角速度のノルムの和で導出される。AATLw は、両パラメータとも角速度の 2 次時間差に基づいているため、角躍度 aj_x と同様の特性を示した。パラメータ STL1, STL3 は、それぞれ x 軸、z 軸に沿

った単位ベクトルの軌跡長として算出される。つまり、STL1 はプレイヤーの前腕がどれだけ大きく移動したかを方位角で表している。STL3 は、手首をひねる回転運動の移動量に相当する。STL1 と STL3 は ω_z と ω_x の時間平均値と同様の特性であるが、回転運動の振幅をより直感的に表現することができる。STL1, STL3 は、モーショントラッキング技術を用いることで、肘中心回転角 θ などの前腕姿勢角とともに算出することが可能である。しかし、これらのパラメータは、

$$STL1 = \Sigma (\omega_y^2 + \omega_z^2)^{0.5} \Delta t$$

$$STL3 = \Sigma (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{0.5} \Delta t$$

という式を用いることで、大きな誤差を生じることなく求められることがわかった。この近似は、サンプリング周期 Δt (2msec) において、前腕姿勢角の変化が 5 度以下であることに基づいている。コードストロークの最大角速度は 1000dps 以下であるため、サンプリング周波数 500Hz で近似の要件を満たすと考えられる。また、腕時計型運動センサデバイスの前腕姿勢角で計算した値に対して、STL の最大誤差は 0.1% 以下であった。また、あるダウンまたはアップのストローク時間に対する動作診断パラメータは、対応するストローク動作の終了直後に決定した。これにより、パラメータ表示までの遅延時間を無線通信間隔である 20msec 程度に短縮することができた。表 3.2 は、腕時計型運動センサデバイスから携帯型 PC への送信データである。リアルタイム表示には、時間平均値ではなく、20msec 以内の角躍度 aj_x のピーク絶対値を使用した。各ストロークのパラメータは、複数回送信できる。通常のコードストロークの持続時間は 150msec より長いため、7 つ以上の冗長送信により、ワイヤレスパケット損失に対する堅牢性が実現される場合がある。

表 3.2 腕時計型運動センサデバイスから携帯型 PC への送信データ

Parameter description	Motion parameter names
Number for detecting packet loss	Packet number N
Averaged values in 20msec	$a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$
Values at every 20msec	Elbow-swinging angle θ
Peak values in 20msec	Angular jerk aj_x
Strumming event indicator	Number for each strum
Strumming duration	Duration of each strum
Parameter calculated for each strumming duration	AV, AATL, STL1, STL3, Peak value of aj_x (aj_{x_pk})

3.5.3 リアルタイムでユーザーに提示すべき情報の選択

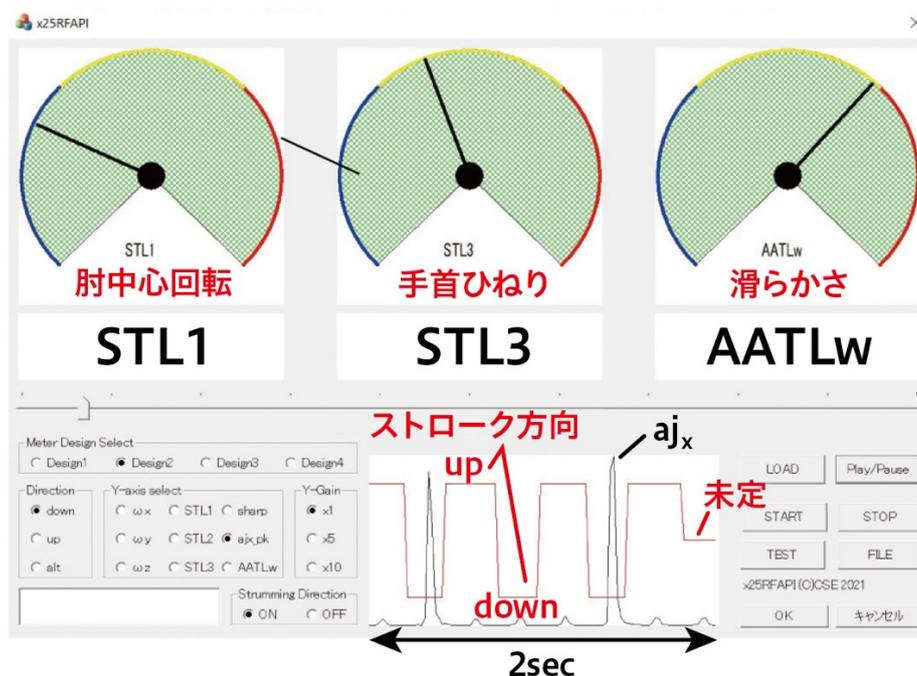


図 3.17 携帯型 PC でのモーション診断パラメータ表示の画面例

図 3.17 は、携帯型 PC でのモーション診断パラメータ表示の画面例である。画面の上半分に 3 つの丸型メーターが配置されている。丸型メーターに表示されるモーションパラメータは、AV, AATLw, STL1, STL3, a_{jx_pk} (対応するストローク時における $|a_{jx}|$ のピーク値として定義) など、複数のパラメータから選択することが可能である。

これらのパラメータは、各ストローク期間に対応している。したがって、メーターの読み取り値は、通常、次のストロークが決定されるまで 150msec より長く続く。さらに、腕時計型運動センサデバイスでの On-the-Fly 計算により、ストローク方向が認識される。ラウンドメーターの場合、有効なストローク方向は「下」、「上」、「交互」から選択できる。このストローク方向セクターは、ギターを弾いている間はダウンストロークのみに注意する必要があるため、アクセント付きコードストロークの診断パラメータを決定するのに非常に効果的であった。図 3.17 の下部に、モーションパラメータの波形が認識されたストローク方向インジケータとして表示される。ストロークモーションの有効性を判断した後、認識プロセスが終了するため、ストローク方向インジケータはしばらくの間「未定」状態のままになる。さらに、ユーザーは、グラフィカルプロットの AATLw, STL1, STL3, および a_{jx} からパラメータを選択できる。モーションパラメータは、ワイヤレス接続されたポータブル PC で記録される。ユーザーは、ギターを弾いた後、ラウンドメーターを再生し、波形を表示させることができる。ギターから録音した音とモーションパラメータ表示を組み合わせ

ることで、ギター演奏と経過時間を簡単に思い出すことができる。

しかし、特に初心者レベルのギタープレイヤーにとっては、演奏中にディスプレイを見るのは難しいと考えられる。したがって、パフォーマンス後の事後フィードバックは初心者が自分の演奏に対して自己分析をするために便利である。また、音楽教室の教師が学習者のギター演奏を後でチェックすることにも役立つ。

そのため、リアルタイムのインタラクションとパフォーマンス後のインタラクションの両方の状況で、ストロークモーション分析の視覚化システムの有効性を判断する必要があることが示唆された。

3.5.4 リアルタイムフィードバックによる演奏評価実験

まず、著者は、本研究のリアルタイムインタラクションシステムを使用して、プロギタリストによるユーザーテストを実行した。演奏に意図的にスムーズさを無くした時の AATLw の挙動が直感的にわかりやすかったことと、腕時計型運動センサデバイスの前腕姿勢角で計算した値に対して、STL の最大誤差は 0.1% 以下であり、かつ STL1 と STL3 は ω_z と ω_x の時間平均値と同様の特性であるが、回転運動の振幅がより直感的にわかりやすかったため、実験ではプロギタリストが 3 種類のラウンドメーターに STL1, STL3, AATLw を選択した。グラフプロットに関しては、 aj_x は、 ω_x , ω_z , θ などの他のモーションパラメータ候補の中から選択されていた。Yoshida らは、 ω_x と ω_z によるリサージュ図形のようなプロットが、アクセント無しコードストロークの形態を回転軸の観点から直感的に特徴付けることができると報告した [1]。STL1 と STL3 の比較は、プロギタリストに同様の情報を提供しているように見えた。本研究のリアルタイムインタラクションシステムを 1 時間使用したプロギタリストによる実験で、著者は次の結果を発見した。

- a) アクセント付きコードストロークは、目視では気づきにくいので、角躍度 aj_x とストローク方向のグラフは、技術的に非常に直感的でわかりやすい。アクセントのあるダウンストロークが成功すると、ダウンストローク期間の終了間際に aj_x の急激なピークが出現する。
- b) STL1 と STL3 は、コードストロークを行う手の使い方の違いを示している。ストロークフォームの修正に役立つと思われる。また、Orbit メーターはその違いに気づくのに有効であった。
- c) アクセント付きコードストロークで AATLw が大きくなると、滑らかさの意味が少しわかりにくくなった。AATLw メーターは、アクセント無しストロークのような変化の無いギターの演奏スタイルに有効であると考えられる。
- d) アクセント付きコードストロークに加え、アクセントのある単音ピッキングの動きも可視化することができる。オルタネイトピッキングの場合、演奏速度 168bpm 以下では、スト

ロック検出アルゴリズムが有効であった。Matsushita は、肘中心回転角 θ の代わりに手首ひねり角速度 ω_x を用いることで、400bpm の速度での連続ダウンピッキングを認識できると報告している [5]。

プロギタリストでさえ、動画や音源では演奏動作の情報では十分でないため、自分自身のギター演奏フォームを把握することは困難である。本研究の対話型モーショントラッキングは、演奏フォーム診断教師としての役割を果たすことが示唆された。

3.5.5 事後/リアルタイムフィードバックの有効性検証

プロギタリストによるアクセント付きコードストロークのリアルタイムインタラクションの有効性を判断した後、著者は適切な評価パラメータとギター演奏状況を詳細に調査した。また、リアルタイムのインタラクションとの違いを明確にするために、パフォーマンス後のインタラクションも考慮された。ギター演奏の状況は、以下のように 4 つの STEP に分解した。

STEP 1：曲を演奏する前にギターの演奏方法を学ぶ

これは、演奏者がギタープレイの方法を完全に決定していない段階である。この STEP では、演奏者の目が楽譜に集中する前に、手を動かす方法を確認する必要がある。特にギターのピッキングにはダウンピッキングとアップピッキングの 2 種類があり、各音符の演奏にどちらのピッキング・スタイルを使用するかを事前に確認しておく必要がある。一般的に、ギタリストは時々ギターのネックの運指の位置を見るが、彼らは自分自身がピッキングしているピックを持っている手を見ることはまずない。したがって、ギターを弾きながら他の場所を見ることは可能である。また、速度と画角の問題により、アクセント付きコードストロークの動作の詳細を記録映像で後から確認するのは困難である。したがって、パラメータによるリアルタイムフィードバックは STEP 1 に適している。

STEP 2：楽譜を読んで曲を学ぶ

ギターの楽譜には、音名、TAB 譜、コードネームなど情報が沢山ある。ギタリストは複数の情報に従い演奏をする必要があるが、全ての情報を楽譜上に同時に表示することは非常に困難である。そのため、楽譜を何度も繰り返し練習して音楽を学ぶ必要がある。この段階では、PC でリアルタイムのフィードバックを同時に表示しても、表示を見て演奏することは非常に困難である。したがって、パフォーマンス後のフィードバックが適していると考え

られる。この場合、時間のかかる準備が必要ないため、本研究の腕時計型運動センサデバイスは、録音またはビデオと比較して依然として利点を有する可能性がある。

STEP 3：曲を暗記して精度を上げる

3 つ目の STEP は、曲の学習とは切り離れた本格的な練習となる。大きく分けて以下の 3 つの要素がある。

STEP 3-1：フレーズをパーツに分解して練習する

この段階では、学習者にはフレーズそのものはすでに記憶されており、楽譜を確認する必要は無い。演奏フォームをインタラクティブに改善するためには、演奏後の分析よりもリアルタイムなインタラクションの方が有利な場合がある。

STEP 3-2：音色を改善する

無理に鳴らすことで問題を解決しようとした結果、ピッキングが弦を叩くような形になりやすい。その結果、音色が不自然になりがちである。ここで、音色はピッキングの動作と大きな相関がある。ブルージョと呼ばれるプロフェッショナルなギター演奏表現では、ピックが弦を通過する時間を意図的に長くすることがあり、音のリズムがバラバラになることがあるが、音楽には温かみを与える。このようなトレーニングの場合、ギタリストはピッキングの硬さを波形で確認することができるため、リアルタイムインタラクションシステムは適していると言える。

STEP 3-3 : グルーヴを良くする

音楽表現の中でも特に難しいのが「グルーヴ」である。グルーヴの定義は確立されていないが、「グルーヴィー」の反対語は「単調」と言える。一方、音を聴いてグルーヴを感じることは、それほど難しいことではない。ギターを無理に弾いてグルーヴを得ようとした結果、ダウンピッキングやアップピッキングは不自然になる。AATLw が大きくなるのは、スムーズさがいないためだと考えられる。また、不必要にピッキングに力を加えると、STL1、STL3 がともに大きくなることがわかった。グルーヴは、ピッキングする手の動きと高い相関がある。特に、同時にピッキングするギターの弦の本数によって、ピッキングする手の回転運動が変化することが考えられる。また、STL1 や STL3 は、ピッキングに適した形状を実現するために、リアルタイムにインタラクションを行うことが可能である。AATLw の意図的に制御された変動は、グルーヴの達成を反映している。図 3.18 は、アップストロークの強さを精密に制御したグルーヴにより、AATLw が徐々に変化している様子を示している。

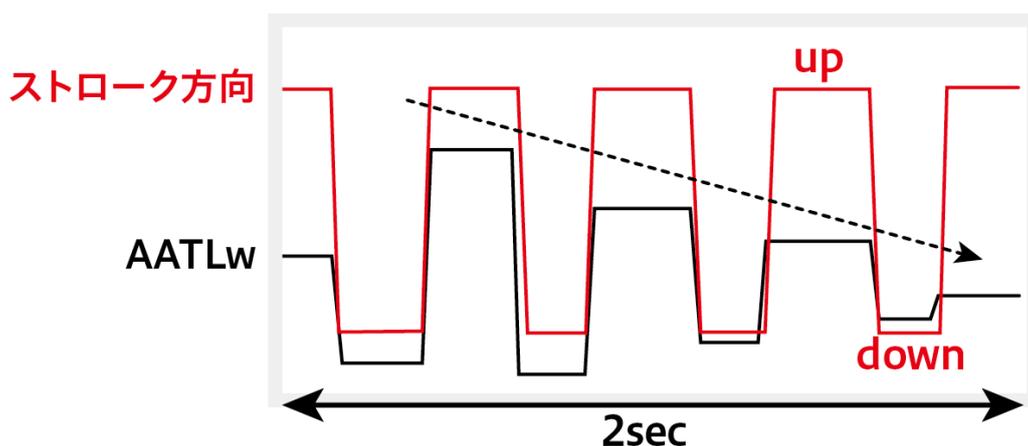


図 3.18 グルーヴテクニックの変化による AATLw の観測

STEP 4 : ライブ本番

ギタリストがミスをしたとしても、ライブ本番では忘れていなければならないという心理が働く。つまり、リアルタイムでのインタラクションは、現在の演奏に不必要な情報をギタリストに思い出させるため、現実的ではない。したがって、この STEP 4 の段階では、演奏後のフィードバックがあることが望ましい。

その結果、ほとんどの状況において、リアルタイムインタラクションは、さらに別のモダリティを使ってギター演奏のフォームを修正するのに有利であると結論付けることができる。一方、演奏後のフィードバックは、腕時計型運動センサデバイスを用いることで容易に得ることができる。以上のように、リアルタイムと演奏後のハイブリッドシステムにより、

ギター演奏者は診断情報の受け取り方を適切に選択することができる。

これらの手法に関しては、他の研究者からもほぼ同様のものが報告されている。

小山は音楽演奏における表現追求プロセスは、①楽曲の概要の把握と身体知の獲得と、②「納得する」「こうしたい」「落ち着くところ」の追求という2つの段階として捉えることができるが、2つの段階は重なりつつ移行し、時に並行し、往復するものであると主張している[9]。

五十嵐らは、楽器の演奏は発話あるいは朗読とよく似たプロセスであることがわかるとしている。楽譜を見ながらの演奏を考えると、楽譜の指示通りに手や指を動かし、楽譜が要求する音楽を生成すると報告している[10]。

本研究においてギター演奏の状況を前述のように4つのSTEPに分解したことも、これらのカテゴリに含まれることと考えられる。

3.5.6 リアルタイムフィードバックによる演奏評価の有効性

本研究では、著者は、リアルタイムとパフォーマンス後の相互作用の両方について、腕時計型ワイヤレス運動センサデバイスで検証した。

その結果、リアルタイムインタラクションは、曲を学ぶ前の段階において奏法を学習している状況や、曲の暗記を終えて演奏の精度を上げている状況において、さらに別のモダリティを使ってギター演奏のフォームを修正するのに有利であると結論付けることができた。モーション診断パラメータを表示するための短い待ち時間で、ギタープレイヤーはリアルタイムで演奏フォームに関する情報と対話することができる。

3.6 音楽系専門学校授業における技量獲得の状況の可視化

3.6.1 音楽教育における情報技術適用事例

楽器演奏といった時間芸術の教育における情報技術の適用では、演奏の録音や録画といった演奏状況の記録・再生に関わる事例が報告されている。野上は、保育者養成のためのピアノスキルの習得における実技系の音楽グループレッスンでは、学生自身がピアノに向かっている時のみ熱心で、他人が演奏している時は心ここにあらずという問題を指摘している。そして、演奏の面白さを感じて練習を継続する素地を形成するために打鍵のタイミングを楽譜制作ソフトで楽譜化することで、演奏の実態を自覚させる試みを行っている[11]。ここでは演奏の振り返りができることは効果的と言えるが、演奏データのタイミングのずれを補正するクオンタイズ機能無しでは楽譜上での演奏可視化は難しく、リズムが合ってい

るだけではなくグローブが良いと呼ばれるレベルを目指すためには、演奏情報の可視化が十分ではないと考えられる。衣は、個人レッスンにおける問題は、教員が常に見ていることから学生が緊張しすぎてしまい、普段通りには演奏できない可能性を指摘している。そして、電子ピアノを活用したグループレッスンではヘッドフォン機能を使い他人の音を気にせずに練習ができ、学生個人としての緊張感が緩和されるメリットがある一方で、電子ピアノ自体の品質が音色やタッチ感においての演奏テクニックの習得の妨害につながるデメリットを論じている[12]。小倉は大学におけるピアノのグループレッスンにおいて、実演による模範演奏の代わりに演奏の MIDI データを受講者に配布することで演奏技能の実施例を伝えたところ、譜読みやリズム/テンポ向上の教育効果が得られたことを報告している[13]。中平らは大学授業におけるピアノ弾き歌いグループレッスンにおいてビデオ録画/再生装置を導入し、学生の練習風景の映像と、模範演奏/解説/楽譜等の e ラーニング教材を併用したブレンドラーニング手法を取り入れた授業を実施し、映像のみよりも e ラーニング教材を併用する方がより良い技能向上を導けることを論じている[14]。

3.6.2 運動センサデバイスによる教育手法の拡張

前述のような楽器演奏教育における情報技術の適用事例では、音響や楽典といった従来の音楽教育コンテンツに対し、デジタル化された演奏情報である MIDI データの利用やグループレッスンにおける学習者への個別音響フィードバックといった手法が用いられている。これに対し、本研究による運動学的な手法は以下のような特徴を有している：

(1) 楽器そのものを改変する必要がない

MIDI データを出力する電子楽器を前提としていないことから、より幅広い演奏環境に適応する。

(2) 教室を改変する必要がほとんどない

学習者は利き手側の手首に小型軽量な腕時計型運動センサデバイスを装着するのみであることから、カメラや録音機材の設置といった教室設備の準備を必要としない。

(3) 原因側の状態を計測している

楽器演奏評価の中心となっている音響は演奏運動の結果であると考えられる。一方で、演奏運動からは音響変化への原因についての情報を得ることができる。

さらには、従来の楽器演奏における教育手法を拡張し、本研究による身体装着型センサデバイスによる運動学的手法を組み合わせることで、演奏技量獲得といった楽器音響の原因となる身体動作の学習をより効果的に行えることが予想される。

また、運動学的分析では体育学や医学といった人間の身体運動に関わる知識やスキルが必要となることに加え、運動信号を解釈するための物理学やデータをコンピュータ上で処

理するための情報学といった多様な学問が混ざり合う環境が形成される。

本研究では、音楽系専門学校における演奏技量教育の場において、学習者全員が腕時計型運動センサデバイスを約 1 時間の授業時間内に継続装着し、音や映像からの逆推定が困難な動作であるアクセント付きコードストローク奏法について、学習の進捗をモニタリングすることによる効果の検証を行う。

3.6.3 使用したデバイス

腕時計型運動センサデバイスによる演奏分析の基礎理論について以下に論じる。

表 3.3 は基本構成ならびに音響録音用マイクロフォンと静電式タッチセンサを追加した拡張構成による腕時計型運動センサデバイスの性能諸元であり、充電式バッテリーにより 8 時間以上の連続使用が可能となっている[15]。ここで、デバイスに搭載されている加速度センサおよび角速度センサでは、プロギタリストにおいて計測される最大の信号値をカバーするダイナミックレンジとしている。また、運動信号のサンプリング周波数は、コードストローク奏法におけるピック (plectrum) とギター弦 (6 本中の各弦) の衝突時間間隔 (約 6 ないし 8msec) を明瞭に観測できる値として 500Hz 以上に設定している。

表 3.3 腕時計型運動センサデバイスの性能諸元

Configuration	Base device	Extended
Size	43.0 ^v × 35.0 ^d × 10.5 ^t mm (w/o watchband)	
Total weight	37grams	39grams
Battery	3.7V 110mAh	3.7V 150mAh
Battery Life	> 11 hours (w/o RF)	> 8 hours (w/o RF)
Sensing Range	±16G (1G = 9.8m/s ²), ±2000dps	
Sampling Freq.	500Hz	500 / 512 / 1024Hz
Remarks	2.4GHz Wireless	2.4GHz Wireless Microphone, Touch sensor

本実験では、表 3.3 で説明した腕時計型運動センサデバイスを使用した。実験環境で使ったギターやピック、弦などの条件統一は 3.4.1 と同様にした。

3.6.4 コードストローク奏法と運動評価パラメータ

第 2 章の図 2.2 で示したコードストローク奏法の楽譜で実験を行った。コードストロー

ク奏法はポピュラー音楽を中心にギター演奏にて広く用いられている基本演奏技法の 1 つであり、正確なリズムの維持とともに、ギター弦を弾く鋭さが大きく音響に影響を与えることが知られている。

表 3.4 に運動信号より計算されるコードストローク演奏技量の評価パラメータを示す。ここで、演奏リズムについては、ギター弦を上方から下方へと弾き下ろすダウンストロークに対し、肘中心回転角速度 ω_z がピーク値をとる時刻の間隔 Td (sec) にて見積もることができる。そして、一定期間の演奏データから Td の平均値と標準偏差を計算することで、1 分間あたりの 4 分音符の演奏回数 Rhythm (bpm) ならびに Td (sec) のゆらぎとしてのリズムゆらぎ Rdev (%) が求められる。一方、下方から上方へと弾き上げるアップストロークについてはプロギタリストであっても肘中心回転角速度 ω_z のピーク時刻に完全な対称性が認められないことから、本研究では考慮しないこととした。河瀬は様々な合奏形態における演奏タイミングのずれについて実験し考察しているが、数十 msec 程度であれば同期がとれていると見て良いとしている[16]。本研究においては主観的な演奏音響と演奏運動データとを比較したところ、Rdev が 5% (90bpm にて約 33msec のずれ) 以下であれば聴感上問題が感じられなかった。また、プロギタリストでは Rdev の値は 90bpm から 200bpm の範囲において概ね 3% 以下であった。手首ひねり角速度 ω_x を二階時間微分した角躍度 (angular jerk) では、ピックがギター弦に衝突する際に生じる微小な回転トルクの変化を検出することができる。そして、角躍度の遷移時間 Sharpness (シャープネスパラメータ, msec) により、コードストロークの鋭さを評価できる。ここで、Sharpness (シャープネスパラメータ) の値はプロギタリストではアクセントの有無ならびに演奏リズムによらず 50 ないし 80msec 程度で一定であった。一方、手首ひねり角速度 ω_x の周波数スペクトルでは 200Hz を超える成分が検出されることから、運動信号のサンプリング周波数は少なくとも 400Hz 以上とすべきである。

表 3.4 運動信号より計算されるコードストローク演奏技量の評価パラメータ

Parameter	Description	Unit
Td	Time duration between the consecutive down strums	sec
Rhythm	Musical tempo (quarter notes per minute) Rhythm = 60 / average (Td)	bpm
Rdev	Rhythm deviation in the specified strums Rdev = stdev (Td) / average (Td)	%
Sharpness	Time duration for 10–90% of cumulative wrist-twisting angular jerk in down strums	msec

図 3.19 は 110bpm での Em7 アクセント付きコードストローク演奏における Sharpness (シャープネスパラメータ) のサンプリング周波数に対する変化を, 12 人のアマチュアギタリストについてプロットしたものである. エラーバーは, 16 のアクセント付きダウンストロークを含む 32 回 (8 小節) のオルタネイトストロークにおける偏差に対応する. ここでは 1024Hz における Sharpness (シャープネスパラメータ) の値 (76.5 ± 26.7 msec) に対する正規化を行っているが, 500Hz のサンプリング周波数では最大 10%以内程度の偏差に収まっていることがわかる. 一方, Rhythm および Rdev については 100Hz 以上のサンプリング周波数にてほぼ一定値であった. これらのことから本研究ではサンプリング周波数の下限値を 500Hz とした.

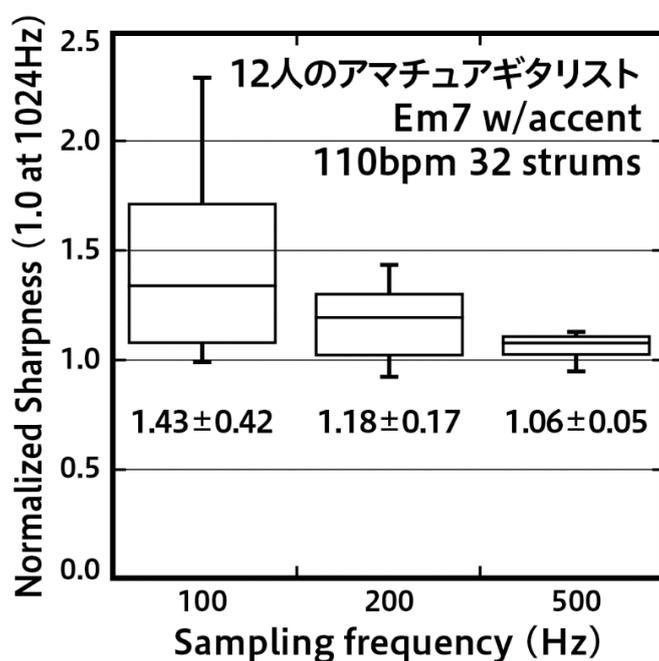


図 3.19 サンプリング周波数に対する Sharpness (シャープネスパラメータ) の変化

3.6.5 ギター演奏レッスン用 PC アプリケーション

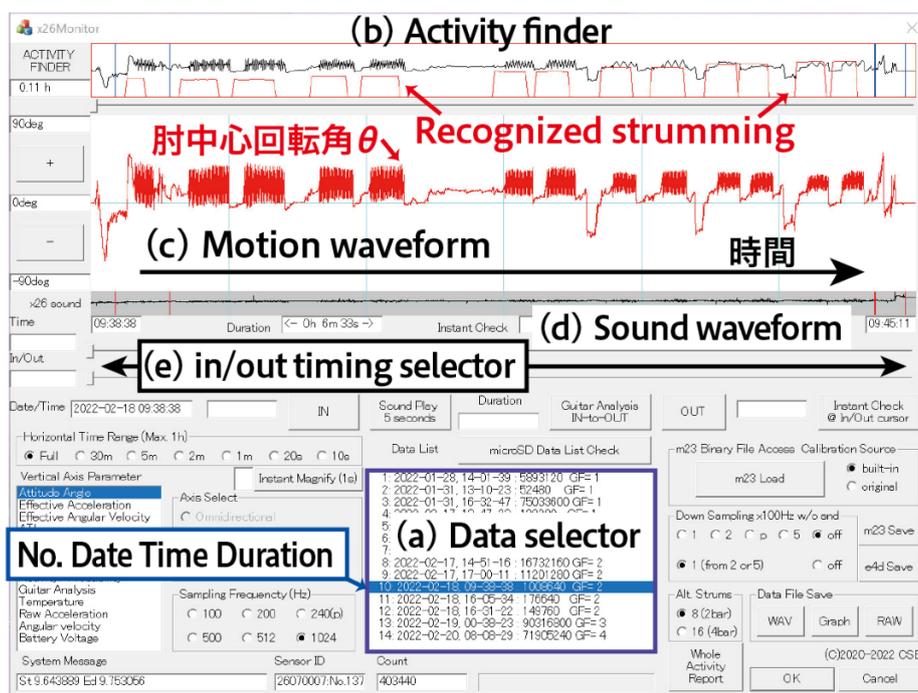


図 3.20 コードストローク演奏分析アプリケーション画面

腕時計型運動センサデバイスを実際の授業にて運用する際には、教師ならびに学習者の双方にとって容易に理解することができる情報システムが不可欠である。そこで本研究では腕時計型運動センサデバイスにおける操作は電源スイッチのみとし、デバイスに搭載されたマイクロ SD メモリカード (32GB) をノート PC 等にて読み取るシステム構成とした。図 3.20 はメモリカードに記録した日時情報 (a) をもとに、演奏運動の確認を行う PC アプリケーション画面を示している [15]。ここでは、

- (1) コードストローク演奏の特徴である手首の上下往復運動が検出された時間帯を特定する (b)。
- (2) 肘中心回転角 θ の推移から演奏運動の大きさや持続時間の概略を表示する (c)。
- (3) 同時録音された音響信号から評価対象となる時間帯であることを確認する (d)。
- (4) 詳細分析の時間区間 (in/out) を指定する (e)。

といった手順により評価対象とする演奏運動を特定することができる。また、ギターレッスン全体からコードストローク演奏を実施していた時間帯を全て抽出し、演奏リズム Rhythm, リズムゆらぎ Rdev, ダウンストロークの鋭さ Sharpness (シャープネスパラメータ) をテキスト形式にて一括出力する。このことで、運動データを見直すことなくレッスン

内での演奏状況や学習の進捗度を教師と学習者の双方において容易に確認することができる。

図 3.21 は指定された時間範囲について詳細な演奏運動分析を行うアプリケーションの画面である。ここでは、

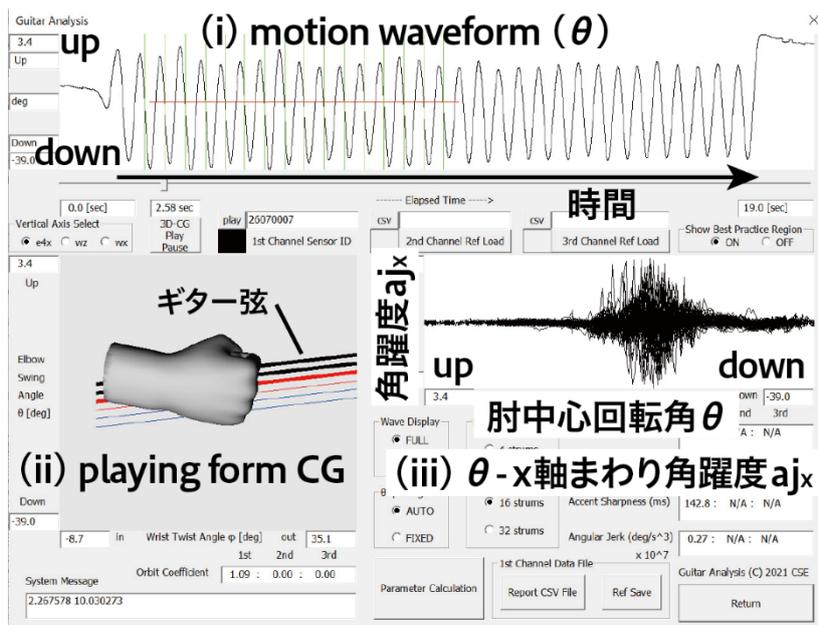


図 3.21 コードストローク演奏の詳細分析画面

(1) 肘中心回転角 θ の波形から演奏運動の大きさと時間推移を詳細に表示する。ここではアップ方向へのコードストロークでは θ の値が増大する座標定義を用いている (i)。

(2) モーショントラッキングによって得られた演奏者の前腕姿勢角から生成した 3 次元 CG を表示する。また、CG に代えて手首ひねり角 ϕ - 肘中心回転角 θ の 2 次元軌跡図を表示することもできる (ii)。

(3) ギター弦を弾く際に生じる大きな x 軸 (手首ひねり軸) まわり角躍度 aj_x の波形を表示する (iii)。

といった視覚的な情報を提示している。また、図 3.21 の画面の生成に使用したデータを別途保存し、必要に応じて新たな演奏データと重畳表示することで、目視や動画では困難な細部での演奏運動の違いを可視化することができる。

図 3.22 はプロギタリスト（赤色）とアマチュアギタリスト（黒色）による 100bpm でのアクセント付きコードストローク演奏運動を 4 小節（オルタネイトコードストロークにて 16 往復）にて比較した際の PC 画面である。3 次元 CG に代えて表示した手首ひねり角 ϕ - 肘中心回転角 θ の 2 次元軌跡図では、アマチュアギタリストは肘中心回転角 θ の数値範囲が大きく、ギターから離れていく側への手首ひねりを行っていたことが見て取れる。

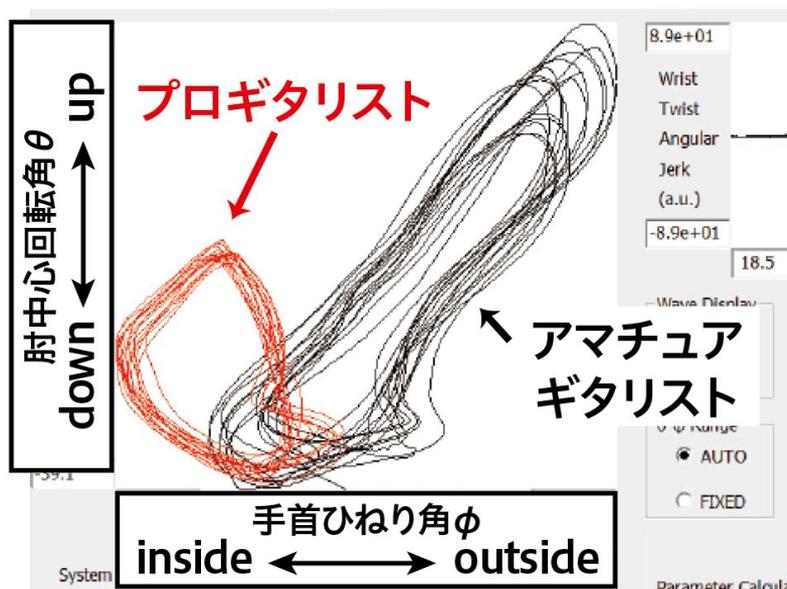


図 3.22 コードストローク演奏における前腕姿勢角の 2 次元軌跡図

3.6.6 音楽系専門学校における実験授業

本研究では、日本工学院八王子専門学校ミュージックアーティスト科において 17 名の学生を対象とするエレクトリックギター演奏の授業を 2021 年 10 月から同年 12 月に計 5 回行った。同一曜日の午後 1 時より午後 3 時にかけて実施した授業では、学生を前半 9 名 (A 群)・後半 8 名 (B 群) の 2 つのグループに分け、それぞれ約 1 時間のレッスン時間とした。また、前半・後半の各グループはエレクトリックギター演奏経歴の分布が同様となるような編成としている。授業ではプロギタリストである教員 1 名が内容設計・授業実施・データ処理を行っているが、授業内での実演に差が生じることを防ぐため、演奏例の提示は事前に収録したビデオ教材にて実施した。演奏タスクとしては第 2 章の図 2.2 に示した Em7 コードによるアクセント付きコードストローク奏法を設定し、教室内の投影スクリーンへのビデオ上映による奏法解説を行った。この授業における到達目標は、プロギタリストとしての実践にて頻出する演奏リズムである 110bpm を正しく維持しつつ、アクセントによる音楽表現力を習得することであり、リズムゆらぎ Rdev が 5% 以内、Sharpness (シャープネスパラメータ) が 50msec 付近となることを目指した。ここで、アマチュアギタリストにおける

Sharpness (シャープネスパラメータ) の値は特にアクセントを付けない場合は演奏リズムが遅くなるほど大きくなる傾向にあり, 110bpm にて Sharpness (シャープネスパラメータ) を 50msec 程度にすることは比較的困難である. これは, 遅いリズムでは利き手側の回転運動が遅くなることに加え, 6 本の弦全てが弾かれることで大きな角躍度 a_{j_x} が生じている時間が長くなることが原因であると考えられる. 各授業では表 3.3 に示した基本構成による腕時計型運動センサデバイスを電源を入れた状態にして各学生に授業開始時に手渡し, 正しく装着していることを確認した. また, 授業終了時にデバイスを回収し, 内蔵されているマイクロ SD メモリカードからノート型 PC にて運動データを収集した.



図 3.23 音楽系専門学校学生の様子と演奏環境

表 3.5 音楽系専門学校ギターLESSNクラスの実施内容

Week(s)	Content(s) of the first half of 60-minute class
1 (Oct. 21)	Lecture with educational video, Practice, Recording
2 (Oct. 28)	Feedback comments, Practice, Recording
3 (Nov. 4)	Feedback comments, Practice, Recording
4 (Nov. 11)	Feedback comments, Practice, Recording and evaluation
5 (Dec. 2)	Composition test (15 min.), Recording test (10 min.)

図 3.23 は授業における学生の様子を撮影したものであるが、エレクトリックギターからの音響信号と電子メトロノームによるクリック音をヘッドフォンにて確認しつつ、授業内にて任意に演奏練習を行うことができる。表 3.5 は 5 回の各授業の前半 30 分間における実施内容を示したものであるが、コードストローク演奏についての説明や演奏の練習・記録を実施している。一方、授業後半では作曲等の音楽制作に関する演習が並行して行われている。また、授業ではプロギタリストによる教材ビデオならびに前回授業にて録画を行った各々のビデオを参照しつつ、奏法の講評や改善点の指摘を伝えているが、A 群の学生に対してのみ図 3.21 ならびに図 3.22 に示したコードストローク奏法の分析結果を紙媒体にて配布した上で授業を実施した。そして、最終回である第 5 回授業では個々の学生にエレクトリックギターとギターアンプは唯一のものを使用してもらい、同一の腕時計型運動センサデバイスとピックを配布し、1 人ずつ同じ環境の演奏場所である教卓付近に呼び出して記録映像・

音声とともに演奏データを取得した。また、エレクトリックギターとギターアンプはエフェクターを経由させずに接続し、本実験ではエフェクターを使用せずに約 8 小節分のアクセント付きコードストローク演奏を行うテストを実施している。授業冒頭の約 15 分間にわたる作曲理論に関するペーパーテストの直後より演奏テストを 10 分間程度行っており、演奏のウォーミングアップが無かったことも相まって学生の緊張感が高まるような実施構成となっていた。

表 3.6 運動データによるギター演奏実施抽出条件

Motion parameter	Condition in 10 seconds
Alternate forearm swings	≥ 8 strums (2 bars)
Rdev	$\leq 10\%$
Sharpness	$\leq 200\text{msec}$
Wrist-twisting angular jerk	$\geq 1.0 \times 10^6 \text{ deg/s}^3$

17 名全員分のデータを授業後にチェックする際に、3.5.3 にて示した PC アプリケーションを使用した。表 3.6 は本実験における演奏実施抽出条件を示す。ここで、演奏抽出は表 3.4 に示したコードストローク演奏技量の評価パラメータを時間幅 10 秒にて 1 秒おきに計算することで実施しているが、市販のノート PC では 1 人 1 回分の授業あたり数秒程度の計算時間であった。

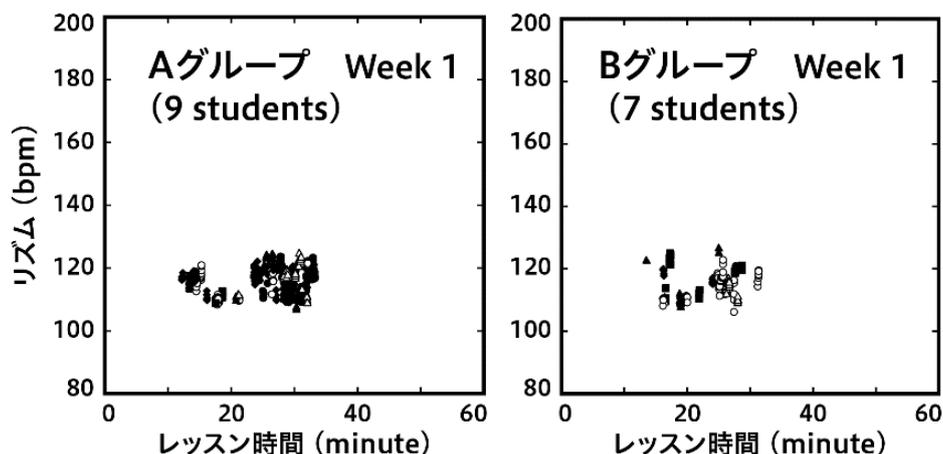


図 3.24 コードストローク演奏のリズム分布

図 3.24 は第 1 回授業に出席をした 16 名の演奏概要抽出結果のうち、演奏リズム (Rhythm) の時間推移を示した図であるが、A 群・B 群ともに約 110bpm を中心としたリズムにおいて演奏を実施していたことがわかる。この図では 1 秒毎に演奏評価を行った結果を個々の学生を表す記号 (○△等) にて表記しており、クラス全体での傾向を知る上で有効である。一

方、個別に学生を選択することで、授業時間内での技量習得の様子を可視化することができる。また、各学生の演奏内容は音楽学校において広く使用されている DAW (Digital Audio Workstation) ツールによる録音がなされており、授業後に音響を再生することで演奏内容の良し悪しを判定することができる。しかしながら、授業では各学生は自身が所有するエレクトリックギターを使用しており、機材の特性により音響に影響が生じている可能性がある。この一方で、利き手側手首位置での運動計測では、演奏運動そのものに大きな違いがなければエレクトリックギターの違いによって計測結果に大きな差異が生じないことがこれまでの被験者実験から経験的にわかっている [15]。そこで、運動信号からの演奏概要抽出を用いることで、授業における演奏技量習得の状況を短時間にて可視化し、個々の学生への指導内容や次回授業の内容決定を効率的に行えることが期待される。続いて図 3.25 は 2 小節分の演奏におけるダウンストローク時間を用いたリズムゆらぎの分布を示したものである。第 1 回授業では両群にエレクトリックギター演奏における顕著な技量差はなく、聴感上リズムに乱れが感じられる約 5% のリズムゆらぎ R_{dev} を超える領域にて大部分の演奏がなされていたことがわかる。

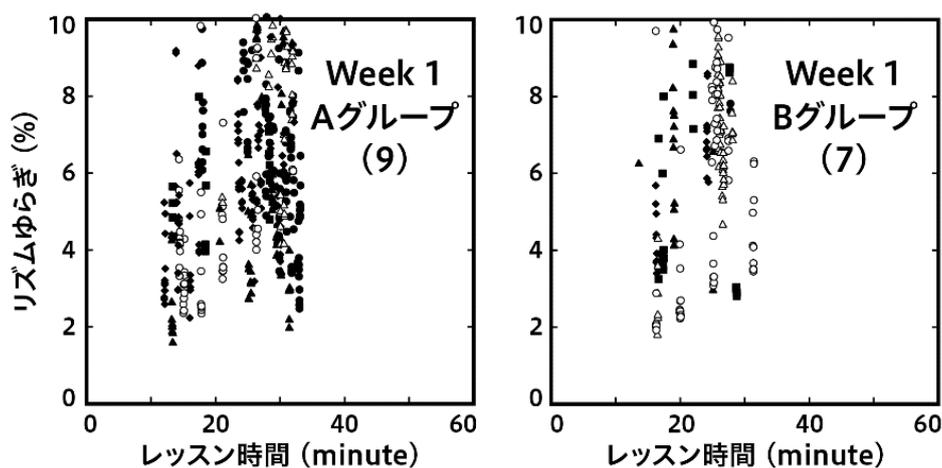


図 3.25 コードストローク演奏のリズムゆらぎ分布

3.6.7 演奏技量獲得状況の観測

楽器演奏レッスンに関する授業を多人数を対象として行う場合、個々の学習者の演奏技量獲得状況を各授業回にて詳細に計測することは、その実施ならびに評価に要する時間という観点から困難となる。また、テストという形にて個別に演奏をしてもらうことで主観的な評価をその場にて行うといった方法が考えられるが、レッスンの中で演奏技量を獲得した瞬間や、どの時点から間違った演奏方法に変化してしまったのかといった、時間不連続な事象を認知することは非常に困難である。

一方、本研究による腕時計型運動センサデバイスを用いた演奏運動モニタリングでは、

個々の学生の演奏運動に生じた変化を随時捉えることができる。ここで、エレクトリックギターのコードストローク奏法では、演奏歴 1 年以内の初心者であっても正しいリズムによる演奏を達成することはそれほど難しくないことが知られている [15]。

本研究においても、第 2 回以降の授業ではリズムゆらぎの数値は顕著に改善されていた。この一方で、特定の音符に強弱を付けるアクセント付きコードストローク奏法では、音響や演奏動画の視聴だけでは正しい演奏運動を習得することは難しい。そこで本実験では A 群の学生には図 3. 21 に示した演奏運動診断結果を第 2 回以降の各授業回冒頭にて個々に提示し、B 群の学生に対しては授業期間内には提示を行わないことで、授業内フィードバックによる演奏技量獲得への効果観測を試みた。

図 3. 26 は各授業回における演奏運動記録データより算出したアクセント鋭さの分布を示したものであるが、第 2 回においては B 群の学生の方が Sharpness (シャープネスパラメータ) の値が全体として小さくなっており、演奏運動診断結果の提示がアクセント付きコードストローク奏法習得の効率化には寄与していないことが示唆された。一方、実質的なアクセント付きコードストローク奏法練習の最終回であった第 4 回では、Sharpness (シャープネスパラメータ) の数値がプロギタリストによる数値である 50~80msec に漸近しており、両群の学生ともに演奏技量の習得が進んでいたことがわかった。

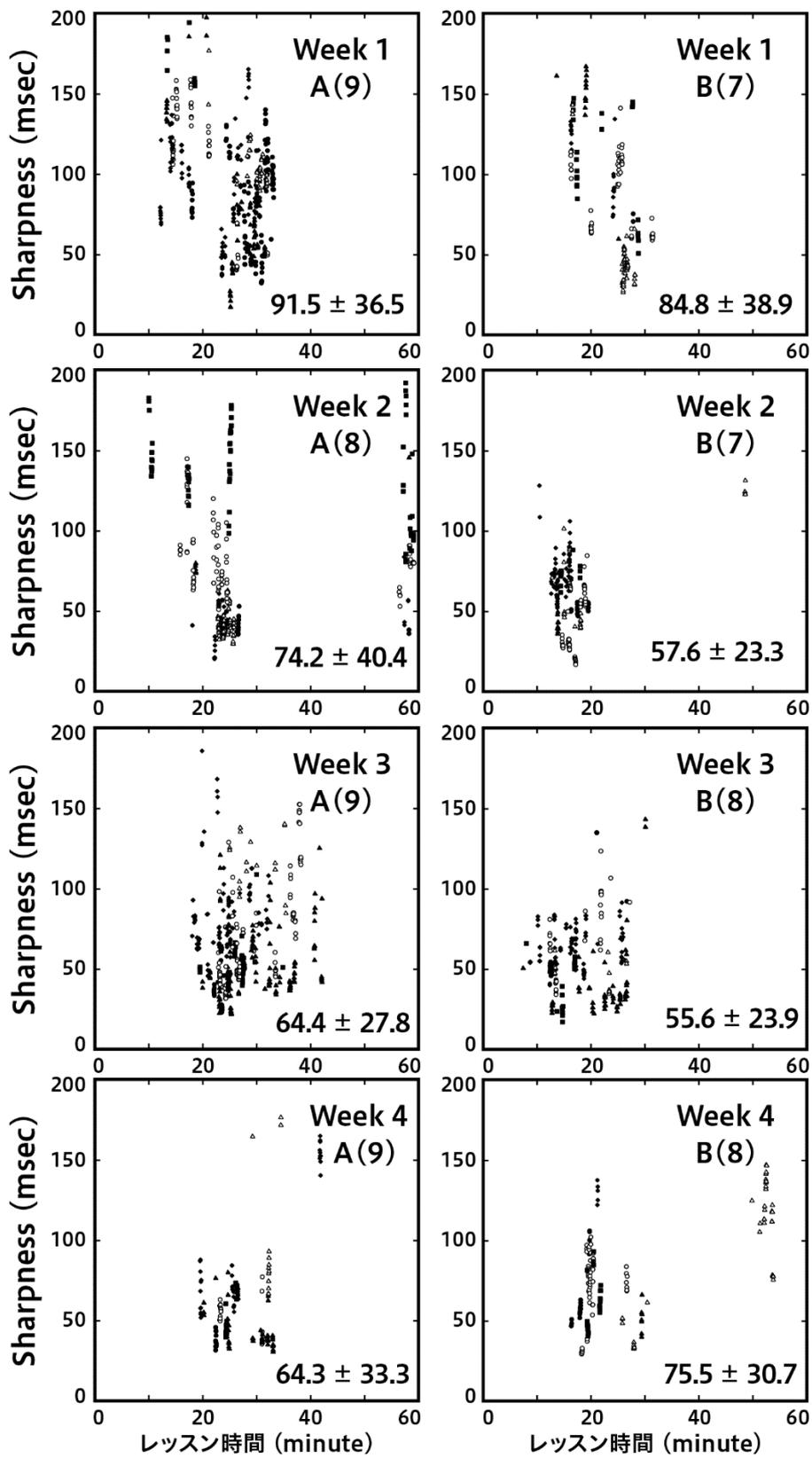


図 3.26 コードストロークにおけるアクセント鋭さの推移

図 3.27 は第 5 回授業にて実施した 110bpm にて 8 小節を演奏する個別演奏テストの結果を示したものであるが、17 人中 12 人が当初目標として設定した Rdev は 5%以内・Sharpness (シャープネスパラメータ) が 50~80msec の値を達成しており、授業実施の成果を客観的に確認することができた。この一方で、特に A 群において Sharpness (シャープネスパラメータ) の数値がテスト前の約 50msec から約 80msec へと顕著に悪化している学生が散見され、テストのみでは学習効果を正しく評価することは難しいと考えられる。

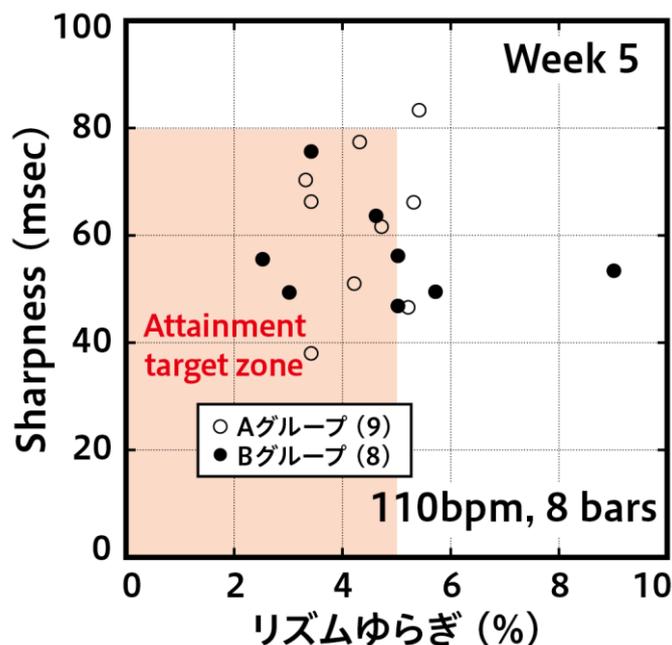


図 3.27 第 5 回授業における演奏テストの評価結果

3.6.8 ギターレッスンクラスの考察

腕時計型運動センサデバイスを用いることで、授業における演奏がどのように変化しているのかを客観的に捉えることができている一方で、この手法がエレクトリックギター奏法の習得に有効であるかどうかについては依然疑問が残る。また本研究では分析結果を学生に示した場合 (A 群) と、従来の音楽教育手法に近い学習環境による場合 (B 群) の公平な比較を試みているが、5 回の授業における学習の最終到達点という視点からは両者の間に明確な差異は認められなかった。そこで、各授業回にて学生に対し行った奏法習得に関するアンケートや授業を実施したプロギタリストによる実施レポートから、このような結果となった原因を考察した。その結果、腕時計型運動センサデバイスによるデータを用いたことの影響として、以下のようなことが挙げられた：

(1) 想定の外にある演奏運動にてアクセント付きコードストロークを行おうとする学生が現れた

今回の演奏運動評価では、エレクトリックギター表面に平行な面上での分析が主体であったが、ギター表面に利き手側の手指を押し付ける形でのアクセント付きコードストローク奏法を試みた学生がA群にて散見された。図 3.22 に示した前腕姿勢角 2 次元軌跡図ではこのような運動を表現することはできず、結果としてプロギタリストとの運動の差異が正しく伝わらなくなった。

(2) リズムゆらぎ Rdev への意識が強くなりすぎる傾向が見られた

A 群では前回授業の振り返りにて各学生にリズムゆらぎの分析結果が示されていたが、この結果、正しいリズムで演奏することへの意識付けが B 群よりも強まっていた可能性がある。第 5 回授業における演奏テストのように、精神的な緊張が生じる場面ではリズムをキープするためにシャープさが疎かになっているケースが A 群にて散見されており、このことが B 群との差につながった可能性がある。

(3) センサデバイスから得られた運動データ分析結果の理解に少なからず時間が費やされた

A 群の学生には授業にて分析結果が紙媒体にて配布されており、次回授業までの間に自身の演奏について考える時間が生じている。この際に、プロギタリストとの演奏の違いを解釈することに時間が費やされ、エレクトリックギター演奏練習の時間が実質的に減少していた可能性がある。

Matsushita らは、アマチュア演奏者のコードストローク軌道がプロギタリストの軌道とどのように異なるかについてプロのデータをリファレンスとして、学習者のデータとのテンプレートマッチング計算によるコードストロークフォーム類似度を算出する試みもしている[17]ものの、現段階では謎を解明するには至っていない。

以上のようなことから、運動センサデバイスによるエレクトリックギター奏法習得状況の客観的な評価では、その結果の解釈ならびに授業における学生へのフィードバック方法を十分に考察する必要があることがわかった。

時計型運動センサデバイスによるエレクトリックギター奏法習得状況の客観的な評価では、その結果の解釈ならびに授業における学生へのフィードバック方法を十分に考察しギター演奏フォーム評価法の有効性を確認する必要があることがわかった。一方で、従来の授業クラスではコストの視点から十分な実施が困難であった詳細な個別指導をシンプルな機材と数値処理にてサポートできる可能性が認められたことから、授業設計と効果測定を繰り返し実施していくことで、より良いギターレッスンプラスの実現につながるものと思われる。

3.6.9 個々の学生の技量習得状況を低いコストにて可視化する有効性

本研究においては、学生の利き手側手首に装着する小型軽量な腕時計型運動センサデバイスにより、音楽系専門学校の教室におけるエレクトリックギターのアクセント付きコードストローク奏法の技量習得状況の評価を試みた。従来の教育手法において主眼が置かれていた演奏結果としての音響に加え、その演奏の原因となっている身体運動を客観的な数値により分析することで、多人数での音楽教室における個々の学生の技量習得状況を低いコストにて可視化することができた。

また、数値データによる振り返りにより教師と学生が演奏技量に関する情報を共有することにつながった。さらには、学生への評価のフィードバック手法を検討することで、効果的な個別学習指導へとつなげられることが期待される。

3.7 コードストローク以外の多様な奏法における演奏分析の検討

本節では、3.5で提案したリアルタイムインタラクションシステムをより現実的な環境で評価するため、様々な種類のアンプやエフェクターなどの音響機器を使用するエレクトリックギターにおいて、アクセント付きコードストローク奏法同様に、音や映像から演奏技量を正しく評価することが困難で暗黙的な事象が含まれる奏法を複数提案し、それぞれの奏法における課題を整理する。

また、プロギタリストがリアルタイムインタラクションシステムを使用してアクセント付きコードストローク以外の多様な奏法を演奏分析するユーザーテストを実施し、これによる具体的な知見を得た上での検討を行う。

3.7.1 弾く弦の本数をコントロールしたコードストローク奏法

エレクトリックギターにおいて和音をピッキングする際に、全ての弦をピッキングしない状況が考えられる。図 3.28 に登場する D/A や D/F# のようなコードを分数コードと呼ぶ。図 3.28 のコードは、1 弦から 4 弦までは同じ音を演奏するが、5 弦や 6 弦を演奏するかどうかは響きの違いになる。D コードをコードストローク奏法で演奏する場合、分数コードと区別するためには、非利き手では 5 弦の A 音の弦振動を止められない場合があるため、5 弦の A 音を強く鳴らさないようにストロークを行う必要がある。しかし、A 音や F# 音は D コードの構成音に含まれるため、演奏者が自分自身の演奏音を聴いただけで 5 弦や 6 弦にピックが当たっているかどうかを判断することや、演奏者自身が全ての弦にピックを当てて、全ての弦を鳴らすことができているのかをリアルタイムで判断しながら演奏することが困難な場合がある。また、ストロークを行っているモーションの正面の映像からでは何本の弦にピックが当たっているか判断することは困難である。ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

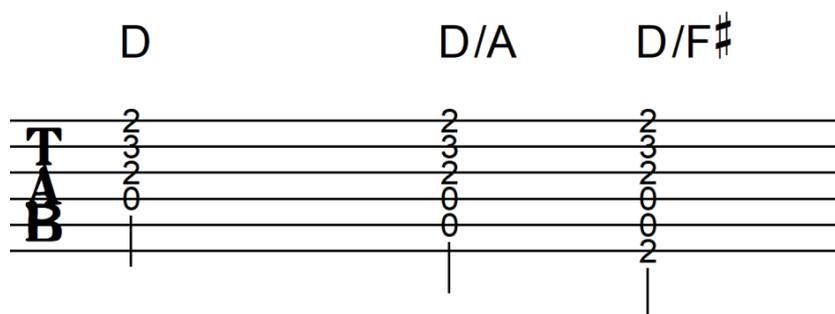


図 3.28 分数コードの例

3.7.2 ピッキングの軌道とコードストローク奏法の関係

ギター演奏における利き手側の使い方という視点からは、肘中心回転を利用することで図 3.29 のようにピックが弦に対して平行運動的な軌道を描く直線軌道と、手首のひねりを利用してピックが弦に対して弧を描く回転軌道による演奏法が示されているが、コードストローク奏法でギターの複数の弦を同時に全て均等に弾くという視点からは、直線軌道が好ましく、回転軌道はコードで全弦を弾くのには不向きとされている[18].

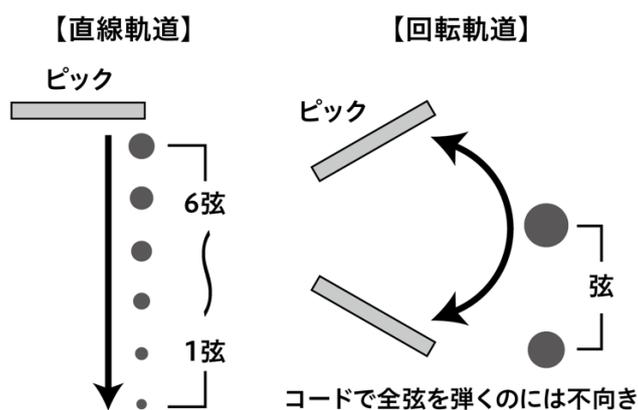


図 3.29 ピッキングの軌道

3.7.3 弾く弦の本数をコントロールしたコードストローク奏法のユーザーテスト

3.5 で提案したリアルタイムインタラクションシステムを使用したプロギタリストによるユーザーテストでは、6本全ての弦を弾くFコードと4本の弦を中心に弾くDコードをプロギタリストが交互に演奏すると、Dコードを演奏している際に STL3 の値が上昇することが確認された。STL3 の意図的に制御された変動は、ピッキングの演奏動作において直線軌道より回転軌道の方が強くなった運動を反映している。

3.7.4 全弦カッティング奏法のブラッシング時にピックが衝突する弦の本数

図 3.30 は、カッティング奏法と呼ばれている。この奏法は、非利き手の指を弦にわずかに触れさせることで、ピッキングした際の弦振動を抑制することと、弦を押さえることを繰り返しながら、利き手はストロークを行っていく。押さえた弦はコードの音程が鳴り、弦振動が抑制された弦はピックが衝突することで打突音が鳴り、これらの組み合わせによってカッティング奏法は演奏される。打突音を鳴らす技法はブラッシングとも呼ばれている。

6 本全ての弦を鳴らすコードフォームによる全弦カッティング奏法を演奏するためには、ギター複数の弦を同時に全て均等に弾くという視点からは、直線軌道によるピッキングが好ましいと考えられる[18]。しかし、ブラッシング時の打突音には音程感が無くピックが衝突する弦の本数の判定は困難である。したがって、音から利き手の軌道を正しく指摘することは困難である。

また、正面からの映像ではストロークの演奏軌道を判断することは難しく、ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

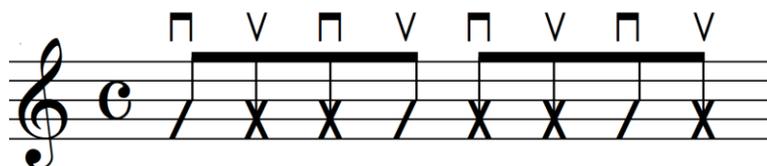


図 3.30 カッティング奏法の例

3.7.5 ブラッシングを交えた全弦カッティング奏法のユーザーテスト

3.5 で提案したリアルタイムインタラクションシステムを使用したプロギタリストによるユーザーテストでは、6 本全ての弦を弾く全弦カッティング奏法をプロギタリストが演奏すると、STL3 に比べて STL1 の値が上昇することが確認された。STL1 の意図的に制御された変動は、ピッキングの演奏動作において回転軌道より直線軌道の方が強くなった運動を反映している。

3.7.6 高速単音ピッキング

エレクトリックギターが音楽上の主役となるギターソロを演奏するための単音の演奏方法も、コードストローク同様に重要である。なお、エレクトリックギターにおける主な単音ピッキング法を「付録 C」に示す。ギターソロにおいては、コードストロークよりも利き手の演奏動作が速くなることが多い。

Matsushita は、肘中心回転角 θ の代わりに手首ひねり角速度 ω_x を用いることで、400bpm の速度での連続ダウンピッキングを認識できると報告している [5]。また、典型的なヘヴィメタル楽曲では 1 分間に 400 回（秒速約 6.7 回、間隔 0.15 秒）を超えるスピードでのダウンピッキングを必要とすることが多く、力みが入りがちなエレクトリックギター演奏初心者にとって大きな障害の 1 つとなっていると報告がある [19]。

本研究では、125bpm において 1 拍で 3 回連続ダウンピッキング（間隔 0.16 秒）を演奏する程度の単音ピッキングを高速単音ピッキングと呼称する。高速単音ピッキングは多くの音楽ジャンルで使用される一方で、難易度が高いテクニックとして知られている。

3.7.7 単音トレモロピッキング

リズムに即した規則的なピッキングをオルタネイトピッキングと呼ぶ [20]。高速単音ピッキングを行うための演奏の基本はオルタネイトピッキングであり、同音を反復させるトレモロ奏法にもオルタネイトピッキングが使用される。

ピッキングは腕や手首の動作によって行われるが、加茂は、ピッキング動作をより高速化する際は図 3.29 における回転軌道によるピッキング動作を推奨し、特にアップピッキング時はドアノブを回すように動かすことが重要になると主張している [21]。小林は、肘を張った状態にせず手首から先を振るというよりは手首自体を横に振る感じで弾くこと、手首には力を入れず腕を振ったら自然にピックが触れたという感覚を持つピッキング法を推奨している [22]。また、ハミングバード・ピッキングと呼ばれている単音トレモロ奏法があり、小林は手首を 90 度近く曲げ、1 弦よりも下の位置に手首を置き、横からピッキングを行うことを推奨している [22]。SIMONZ は、手首をボディから完全に浮かせる弾き方は特に難しいので、利き手の薬指や小指をボディに軽くつけて、円を描くように手首を回すことを推奨している [23]。

ハミングバード・ピッキングはその性質上動作が高速になることが多く、無意識のうちに手首に力が入ってしまいがちで、円を描くように手首をひねる動作を制御しながら実行することは非常に困難である。

また、正面からの映像では高速単音ピッキングによるトレモロ奏法の演奏軌道を判断することは難しく、ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

3.7.8 高速単音ピッキングによるトレモロ奏法のユーザーテスト

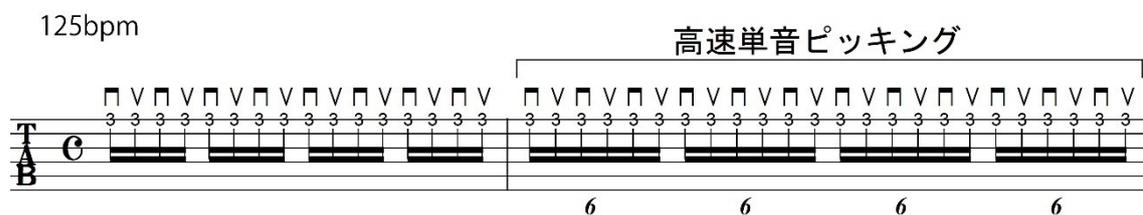


図 3.31 高速単音ピッキングを交えたトレモロ奏法の例

3.5 で提案したリアルタイムインタラクションシステムを使用したプロギタリストによるユーザーテストでは、図 3.31 のように、おおよそ 125bpm における 16 分音符と 6 連符を、プロギタリストが交互に演奏すると、6 連符を演奏している際に STL3 の値が上昇することが確認された。STL3 の意図的に制御された変動は、ピッキングの演奏動作において直線軌道より回転軌道の方が強くなった運動を反映している。

3.7.9 ブリッジ・ミュート・ピッキング

ブリッジとは、チューニングの安定やノイズの発生、弾き心地や音色にも影響を与えるパーツであり、オクターブ調整作業を行う時に扱う部分である。「弦アース」としての役割も果たしており、共振などが起こらないように強靱な設計が求められるギターパーツである [24]。



図 3.32 ブリッジ

利き手の手のひらの小指側の側面部分で、図 3.32 のブリッジ付近に軽く触れて弦をミュートする。ミュートした弦をそのままピッキングすると、音程感のあるスタッカート気味の音が出る。これがブリッジ・ミュート・ピッキングである[25]。スタッカート気味の音になることによって滑らかさを打ち消した表現ができる可能性がある。

Reboursiere らはナイロン弦のギターを使用してピッキングの録音データよりブリッジ・ミュート音と実音の識別実験を行い、ブリッジ・ミュート音は高い精度で識別できることを報告している[26]。

一方で、エレクトリックギターにおいて様々なエフェクターを使用する場合は、ミュートの加減をギターアンプの音から判断することが困難な場合が考えられる。

また、ブリッジ・ミュート・ピッキングでは、ブリッジ付近に軽く触れたまま弦をピッキングするため、触れていない時と比較して抵抗感が発生し、利き手の動作にぎこちなさが発生する可能性があるが、ぎこちなさの度合を映像で伝えることは困難である。

3.7.10 ブリッジ・ミュート・ピッキングとアクセント付きコードストローク奏法の比較

ブリッジ・ミュート・ピッキングは、コードストロークにおけるダウンストロークの時、動きと同時に利き手の親指の付け根を使って弦に触れて音を鋭く止めてアクセントを付けるアクセント付きコードストローク奏法[27]と混同しやすい。コードストロークから単音のブリッジ・ミュートにもスムーズに切り替えができるようにするため、アクセント付きコードストロークでは手首を上げずにブリッジ付近に位置させておくことが推奨される。このため、演奏者を正面から撮影した動画でブリッジ・ミュート・ピッキングとアクセント付きコードストローク奏法を比較すると、それぞれにおける手の正しい使い方がわかりにくいという特徴につながっている。

3.7.11 ブリッジ・ミュート・ピッキングを交えたアルペジオ奏法のユーザーテスト

図 3.33 のように弾く弦を移動させながら順番に単音をつなげていくアルペジオ奏法は、3本から6本の弦の使用範囲で多く用いられている。3.7.9で説明したブリッジ・ミュート・ピッキングを使用せずにアルペジオ奏法で演奏すれば、音に柔らかさやスムーズさを与えることができる。また、図 3.33 の2小節目のようにブリッジ・ミュート・ピッキングを使用してアルペジオ奏法を弾くことで音程感のあるスタッカート気味の音が出せるが、ブリッジ付近に軽く触れて弦をミュートしたままピッキングする時と触れていない時の演奏動作の差異をエレクトリックギターの出音から指摘することは、電気回路および音響機器の信号伝達特性から困難である。

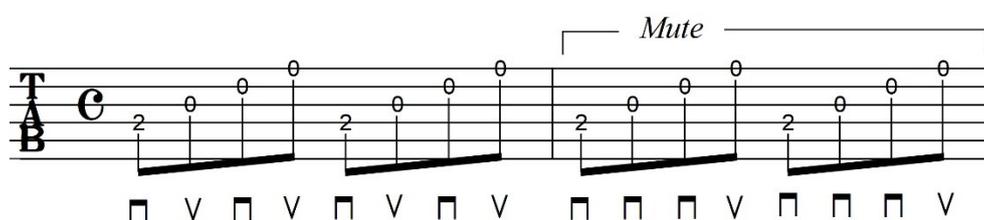


図 3.33 ブリッジ・ミュート・ピッキングを交えたアルペジオ奏法の例

3.5 で提案したリアルタイムインタラクションシステムを使用したプロギタリストによるユーザーテストでは、図 3.33 のように、ブリッジ・ミュート・ピッキングを使わないアルペジオ奏法とブリッジ・ミュート・ピッキングを使うアルペジオ奏法を、プロギタリストが交互に演奏すると、ブリッジ・ミュート・ピッキングを使うアルペジオ奏法を演奏している際に AATL_w の値が上昇することが確認された。AATL_w の意図的に制御された変動は、ブリッジ付近に軽く触れて弦をミュートしたままピッキングすることにより、演奏動作においてぎこちなさが強くなった運動を反映している。

3.7.12 ダウンピッキングによるチョーキング音の強調

図 3.34 の楽譜は変則的なピッキングの一例である. オルタネイトピッキングでは, 通常はリズムの最小単位でダウンとアップを行う. 図 3.34 のように 16 分音符でオルタネイトピッキングを行う場合は, 16 分音符を最小単位として考え, 図 3.34 の括弧内のようなピッキングの規則で交互に演奏していく. この際, 強い音色を得るために本来オルタネイトピッキングの規則ではアップピッキングになる箇所を, ダウンピッキングに変更して弾く場合がある.

チョーキングと呼ばれる非利き手で弦を持ち上げる奏法の際は, 下から持ち上げた弦を上からダウンピッキングすることによって強いピッキングが可能になり, チョーキング音を強調する強弱表現が可能となる [28]. しかし, エフェクターを使用して, さらにアンプを大音量にした状況での演奏では音色が変わってしまうため, 強弱の加減を音から判断することは困難である場合がある. また, ピックが弦に対してどのくらいの強さで接触しているのかを正面からの映像から判断することは難しく, ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが, 複雑な設備を必要とするため, 広く導入することが難しくなる.

図 3.34 チョーキング音を強調する変則的なピッキングの例

3.7.13 チョーキング奏法時のピッキングのユーザーテスト

3.5 で提案したリアルタイムインタラクションシステムを使用したプロギタリストによるユーザーテストでは, チョーキング奏法時のピッキングをプロギタリストが演奏すると, ピッキングが行われている際に角躍度 aj_x の値が上昇することが確認された. 角躍度 aj_x の意図的に制御された変動は, アンプの音量に左右されずにピッキングによる衝突の強さの加減を反映している.

3.7.14 ユーザーテストによる演奏分析の検討

表 3.7 は、プロギタリストを対象としたユーザーテストの結果をまとめたものである。それぞれの奏法において以下のようなパラメータ変化を確認することができた。

表 3.7 プロギタリストを対象としたユーザーテストの結果

Guitar playing style	Points of interest
Accented chord strumming	The aj_x expresses the strength and sharpness of the accents.
Chord strumming on a small number of strings (<i>e.g.</i> 4 strings for the D chord)	The STL3 should become much larger as compared with the case of the F chord with all 6-string strumming.
Chord cutting	The STL1 becomes larger as compared with the STL3 in the sharp cutting.
Tremoro picking on a single string	Both the STL1 and the STL3 show the stability of picking form. The STL3 becomes much larger as compared with the STL1.
3 to 6 strings arpeggio	The AATLw reflects the smoothness of arpeggio picking.
Single note bending with accented down picking in bluesy phrase	The aj_x reflects the sharpness and strength of each note.

したがって、本研究のリアルタイムインタラクションシステムを活用することによって、アクセント付きコードストローク奏法以外の多様な奏法でも、音や映像からの逆推定が困難な動作についてフィードバックを提示できることがわかった。

第 4 章

STEAM 教育にエレクトリックギターを導入した教育法

本章では第 1 章で課題とした

- (1) 音や映像からの逆推定が困難な動作についてフィードバックの提示
- (2) 演奏技量を獲得した瞬間など時間不連続な事象の認知の可視化

を第 3 章にて実現したことを踏まえ、演奏指導を通じて、新たな価値を生み出す STEAM 手法を積極的に活用した教育の実践を行う。

4.1 PBL 教育への本格的な芸術要素導入

芸術要素の事例としてのギター演奏技法教育においては、モーションセンサ信号分析をはじめとする STEM 的な要素を組み合わせることによる学習効果の向上が大いに期待できることが示唆されている。そこで本研究ではサイエンス、芸術、双方の教育機関における展開を考え、ギターレッスンによる演奏技巧向上という共通目標のもとで、サイエンスの視点から「どうすればもっと上手くなるのか?」という自然な問いに答えていく方法を考察する教育メソッド開発を理系大学の PBL 授業にて実践することとした。

4.2 ギター奏法レッスン開発クラス

4.2.1 授業としての位置付け

本研究では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）における 3 年次通年での PBL 型授業であるプロジェクト実習 I（選抜クラス：2021 年 4 月 16 日～同年 7 月 30 日）を STEAM 手法実践の場として選択した。クラスの学生は、ギター楽曲を含めた音

楽全般に対する関心と経験に関する応募書類にて15名を選抜している。学生のうちエレクトリックギター演奏の経験者（1年以上）は3名であり、大多数が初学者となっていた。一方で、学生は学部2年次までにプログラミングの基礎を習得しており、オンライン教育プラットフォームの1つであるMoodleによるファイル提出等の情報共有が容易に行える状況であった。毎週1回、通算5時間にわたる授業では、センサ工学を専門とするコンピュータサイエンス学部教員1名に加え、ギター演奏を含めた音楽全般に関わる日本工学院八王子専門学校ミュージックアーティスト科の教員が参画をしており、サイエンスと芸術の両面から学ぶことができる体制としている。

4.2.2 授業環境



図 4.1 STEAM 手法による授業風景



図 4.2 個別での演奏記録実験風景

ギター演奏未経験者が多数を占めるクラスであったことから、エレクトリックギター等の機材の貸し出しを行うことで、全員に同時に演奏レッスンを実施できるようにした。図 4.1 は大学の実験教室（定員 60 名）における授業風景の例であり、学生 1 人あたり実験用の座席 4 名分のスペースを確保することで、ギター演奏とノート PC による作業を安全に進めることができた。また、図 4.2 は実験教室前方にギター用アンプや録音/録画用機材を設置し、演奏データの記録を行っている様子を示したものであるが、一般的な音楽スタジオにおける音響収録を模した構成となっている。

4.2.3 使用した腕時計型運動センサデバイス

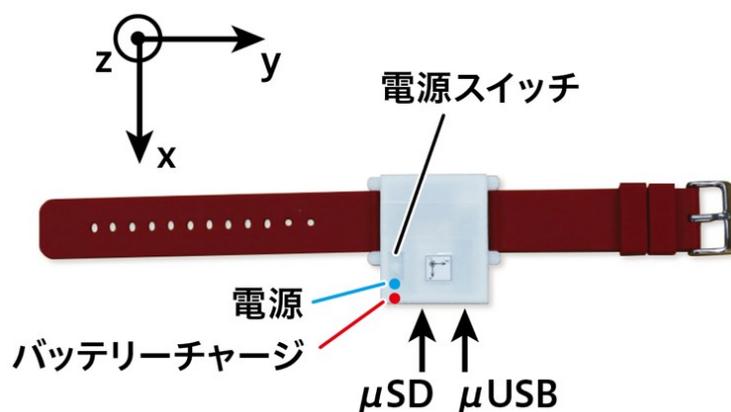


図 4.3 腕時計型運動センサデバイス

図 4.3 に、本研究にて使用した腕時計型運動センサデバイスを示す[1]。本章では低消費電力であることを必要とするため、CPU の動作条件を下げてワイヤレスなどの機能を外したことで、毎秒 500 回のデータ記録（サンプリング）速度にて連続約 11 時間以上の動作が可能であり、通算で 5 時間超に及ぶ授業内での実験を全てカバーできる仕様とした。実験環境で使用したギターやピック、弦などの条件統一は第 3 章の 3.4.1 と同様にした。

4.2.4 演奏運動データ分析用 PC アプリケーション



- ①マイクロSDメモ리카ードの記録データ選択 ②グラフ描画パラメータ選択
③前腕姿勢角度のグラフ ④データ時間区間選択 ⑤分析用データ書き出し

図 4.4 演奏運動データ分析用 PC アプリケーション画面

図 4.4 に本研究にて使用した演奏運動データ分析用の PC アプリケーション画面を示す。腕時計型運動センサデバイスから取り外したマイクロ SD メモ리카ードをノート PC にて読み出すことで、データ記録を開始した日時が画面中央付近にリストとして表示される (①)。続いて適切なデータを選択した上で、観測したい運動パラメータをリストから選択する (②) と、画面上部にグラフが現れる (③)。ここで、ギター演奏時の利き手側前腕の対重力姿勢角等から分析対象とする時間区間を探して選択する (④) ことで、当該時間区間の運動データを一般的な表計算ソフト用の形式等でファイルに書き出すことができる (⑤)。ここで、出力されるデータのファイル名には腕時計型運動センサデバイスに固有な番号が日時とともに記載されており、演奏者の匿名化と特定を容易に行うことができる。また、休憩時間を含めて 5 時間 30 分程度となる授業時間全体を記録した運動データファイルの容量は約 200MB であるが、ネットワークを経由したサーバへのアップロードが難しい場合であっても、マイクロ SD メモ리카ードを用いることで実験データの受け渡しや保管・管理を容易に行うことができた。

4.2.5 授業進行の概要

表 4.1 に計 14 週にわたって実施した PBL 型授業クラスの概要を示す。ギター演奏技法という芸術の部分と、演奏運動データ分析に基づくギターレッスン手法の検討といったサイエンスの部分融合させる視点から、学生の既習スキルを考慮したボトムアップ的な授業進行構成としている。

表 4.1 ギター奏法レッスン開発クラスの進行スケジュール

授業週	実施した内容
1, 2	ギター演奏法の基礎, センサデータの扱い
3, 4, 5, 6	ギター演奏レッスン, データ分析手法
7	ギター関連論文と演奏運動理論の解説
8	5人×3チームでの目標設定と役割分担検討
9	演奏スキル計測実験①とディスカッション
10, 11, 12	チームでのギター奏法レッスン開発実験
13	演奏スキル計測実験②とディスカッション
14	成果発表会 (発表, 質疑応答)

この授業では、エレクトリックギター演奏スキルについては学生の大半が初学者であるという事情から、各週にて1時間程度の時間をスキル紹介と奏法レッスンに充てている。そして、個々の演奏スキルと身体運動との関係性をサイエンスの視点から考えつつ、腕時計型運動センサデバイスと演奏運動データ分析用PCアプリケーションを組み合わせたシステムによる分析結果と関連付けていくという形態をとっている。また、演奏運動データの分析では表計算ソフトによる手動での数値計算に加え、Microsoft社のVisual Studio (MFC, C++言語)による分析用アプリケーションのプログラミングを併せて導入しており、STEAM手法における様々な参画形態に向けた意識付けを図っている。

表 4.2 ギター奏法レッスン開発授業への参画意識調査の結果

参画形態	希望人数
実験実施（演奏被験者）およびサポート	13 人
PC アプリケーションデザイン	9 人
ギターレッスン内容デザイン	9 人
プロジェクトマネージメント	8 人
プログラマー	5 人
主観的な音楽評論	4 人
数学と物理学による理論検討	2 人

授業履修者 15 名中，複数回答可

表 4.2 は授業の第 8 週の時点にて実施した STEAM 型ギター奏法レッスン開発授業への参画形態に対する意識調査の結果を示したものであるが，履修者の所属学部であるコンピュータサイエンス学部の学術内容とともに，レッスン自体のデザインといった芸術的な視点からの参画を考える学生が初期段階にて少なからず現れていることがわかった。

4.3 ギターレッスン実験におけるデータサイエンス

芸術としてのエレクトリックギター演奏技法レッスンと，演奏者の身体運動データから演奏状況を客観的に可視化するサイエンス視点の融合にあたり，本研究では音楽性の発現において大きな役割を果たす演奏技法の 1 つであるアクセント付きコードストローク奏法をモチーフとした検討を行った。

4.3.1 アクセント付きコードストローク奏法

第 2 章の図 2.2 で説明したアクセント付きコードストローク奏法は，演奏者を正面から撮影した動画では手の正しい使い方がわかりにくいという特徴を有しており，利き手の親指の付け根ではなく，手首の付け根を使ったブリッジ・ミュート奏法が誤用されることにつながっている。一方で，エレクトリックギターの出音から手の使い方の誤りや技法の達成度を正しく指摘することは，電気回路および音響機器の信号伝達特性から困難である。そこで本研究では腕時計型運動センサデバイスによる客観的な分析手法について検討を行っていくこととした。

4.3.2 利き手側手首の運動と計測される信号

第3章の図3.2で説明した腕時計型運動センサデバイスの表面は手首表面とは概ね平行となっており、演奏者の親指と人差し指によって保持されるピックの持ち方が大きく変化しない限り、ギター弦を弾く運動を反映する信号が加速度、角速度ともに検出されることが期待される。Yoshidaらはアクセントが付いていないコードストローク奏法について、リズムの正しさや前腕姿勢角の推移といった演奏状況を客観的に反映した情報が得られることを報告している[1]。

アクセント付きコードストローク奏法における演奏運動の評価では、発生する音響との関係性から次のような項目が重要となる：

- (1) 演奏リズムの正確さ
- (2) アクセントを付ける部分の運動の鋭さ
- (3) 肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ の関係性

これらのうち、演奏リズムについては手首における角速度信号により推定できることが報告されている[1][2]。また、演奏が比較的単調な周期運動を伴うことから、演奏時間中における角速度信号をフーリエ分析することで、演奏の平均スピードを見積もることができる。手首ひねり回転角速度 (ω_x) 信号を二階時間微分した角躍度 (角加加速度) はアクセントの強さや鋭さを反映することが報告されている。一方、ギター演奏における利き手側の使い方という視点からは、肘中心回転角 θ を利用することでピックが弦に対して平行運動的な軌道を描く直線軌道と、手首ひねり角 ϕ を利用することでピックが弦に対して弧を描く回転軌道による演奏法が示されているが、コードストローク奏法ではギターの複数の弦を同時に全て均等に弾くという視点からは、直線軌道が好ましいとされている[3]。

4.3.3 データ分析用 PC アプリケーションによる検討

芸術とサイエンスを結びつける STEAM 手法では、表現に対する主観的な評価と、サイエンスに基づく客観的な評価との対比を行っていくことが重要である。そこで本研究ではアクセント付きコードストローク奏法の実験を定期的実施しつつ、注目する運動パラメータの挙動との対応関係を検討していくこととした。そして、リズムの正確さ、アクセントの鋭さ、演奏における前腕回転運動の様態について、分析用 PC アプリケーションを学生に配布することで理解度の向上や新たな発想へとつなげることを目指した。

4.3.4 3次元グラフィックスによる演奏運動の可視化

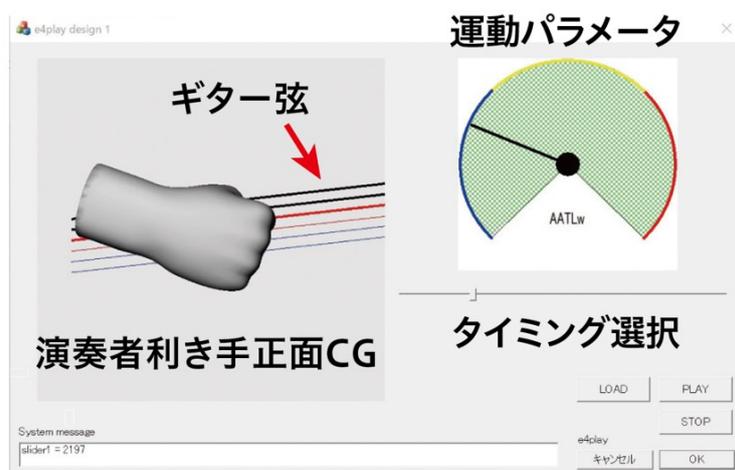


図 4.5 3D-CG による演奏運動の可視化アプリケーション

演奏運動データ分析では、センサにて計測された運動信号が評価対象となる演奏運動によって生じていることを確認することが重要である。そこで本研究では授業第2週の時点にて図4.5に示す3D-CGによるPC用運動可視化アプリケーション[1]を配布することとした。この結果、腕時計型運動センサデバイスによって演奏運動が数値データとして捉えられていることへの理解が深まるとともに、動画撮影ではわからない細かな動きを分析できる可能性への気づきが学生に対してもたらされた。

4.3.5 フーリエ変換による平均演奏リズム推定

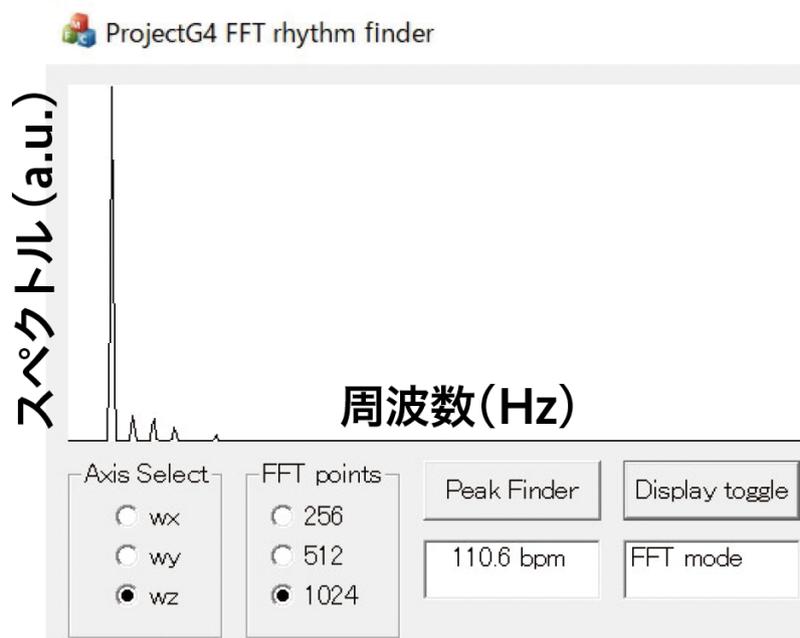


図 4.6 高速フーリエ変換を用いた演奏リズム推定

図 4.6 は高速フーリエ変換を用いた演奏リズム分析用 PC アプリケーションの画面である。ここでは、フーリエ変換の性質から運動信号の分析時間区間により演奏リズム推定の精度が大きく変化することから、変換における分析点数を可変としている。そして、実際の演奏運動データを分析した結果、演奏実験をデザインする際には、学生は演奏継続時間や安定性を考慮する必要があることを認識することができた。

4.3.6 手首ひねり軸まわり角躍度とアクセント鋭さ推定

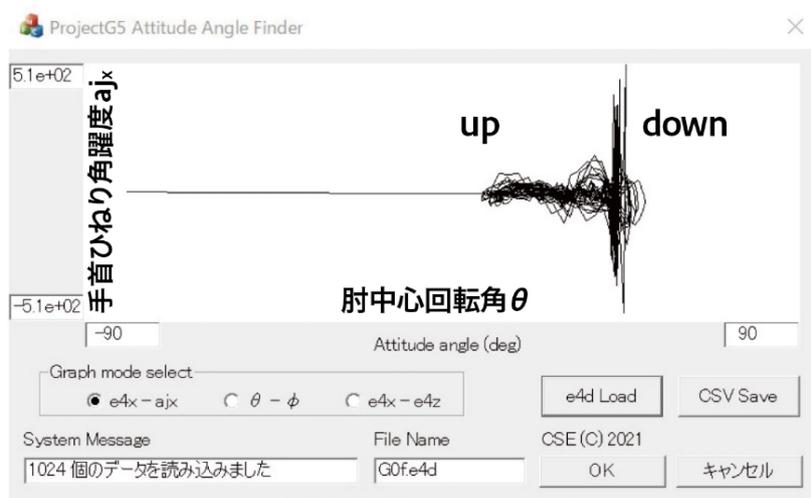


図 4.7 角躍度を用いたアクセント鋭さの評価

アクセント付きコードストローク奏法が行われる際には、ピックを保持している利き手側人差し指を中心とした回転角速度が時間とともに急変する。この時、人差し指とほぼ同じ回転軸を共有している前腕にて角速度の急変を計測することを考えた。図 4.7 は手首ひねり角速度 ω_x の二階時間微分値（角躍度 aj_x ）を計算して縦軸にプロットし、肘中心回転角 θ を横軸としてプロットした例であり、画面右側のダウンストロークの終端（下死点）付近にて大きな振幅の角躍度 aj_x が観測されていることが見て取れる。

4.3.7 肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ による演奏軌道の可視化

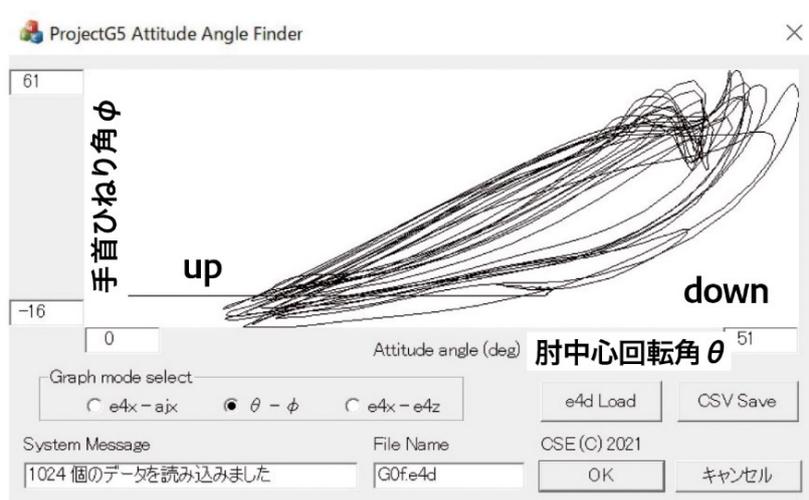


図 4.8 肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ による演奏軌道の可視化

多くの弦を一度に弾くコードストローク奏法では、手首ひねりをできるだけ抑止しつつ、ギター弦に対して直線的にピックを当てるのが望ましい[3]。図 4.8 は、肘中心の回転による肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ との関係のプロットしたものであるが、 ϕ の範囲が約 80 度と広く、コードストローク奏法には適さない運動であったことが読み取れる。

4.4 アクセント付きコードストローク評価への考察

本研究におけるギター奏法レッスン開発クラスでは、授業の第 9 週と第 13 週において、アクセント付きコードストローク奏法の達成度を計測する実験を行った。実験では図 4.2 に示したように教室前方に設置した録音/録画用機材を併用しつつ、腕時計型運動センサデバイスによる演奏運動データ計測を実施した。ここで、第 1 回の計測実験ではプロギタリストによるスキル紹介と奏法レッスンを約 1 時間行っている。また、第 2 回の実験では約 1 時間の自主練習時間の後に計測を実施しており、第 1 回から 4 週間の間に第 3 章にて示した演奏運動可視化ツールについての理解を進めつつ奏法練習を行った成果をチェックすることが目的となっていた。また、4.3 にて述べた分析手法により、計測実験後に個々の学生は自身の演奏状況を数値として知ることができた。

4.4.1 演奏リズムの評価結果

図 4.9 は、第 2 章の図 2.2 に示した楽譜にてアクセント付きコードストローク奏法による演奏を 4 小節分以上実施し、その中で最も演奏リズムの変動が小さくなっていた 3 小節におけるリズムゆらぎの分布を示したものである。基準となるリズムは分速 110 回(110bpm)にて電子音が出力されるメトロノームにより演奏者へと伝えられている。15 名の学生により授業内にて提出されたデータについて分析を行った結果、2 回目の実験の方がリズムゆらぎ量のばらつきがやや小さくなっていた。一方、図 4.10 は 3 小節の演奏時間合計がメトロノームによる基準値からどの位外れていたのかの割合を示す数値(リズムエラー)の分布を示したものである。この結果、2 回目の実験では大半の学生が 1 ないし 2%以内のリズムエラーの値に留まっており、メトロノームの音を聴きつつギターを演奏しながら、リズムを正しくキープしていく技能が形成されつつあることが示唆された。

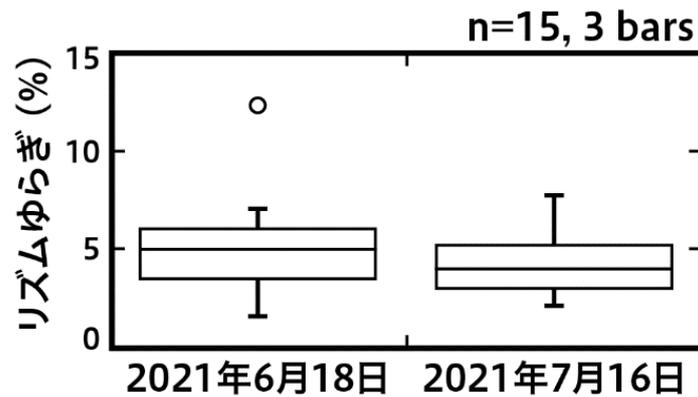


図 4.9 演奏のリズムゆらぎ分布の変化

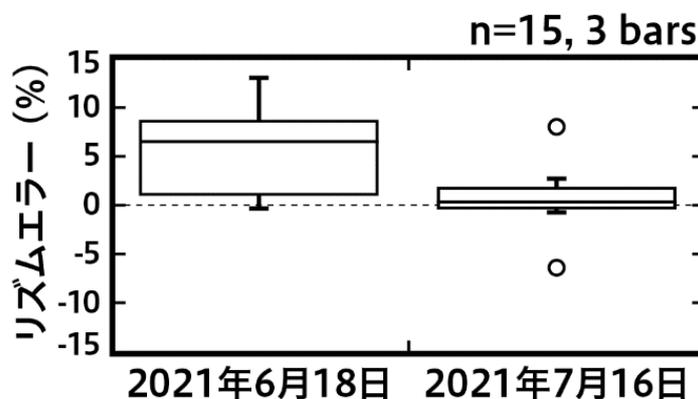


図 4.10 基準リズムからの偏差の変化

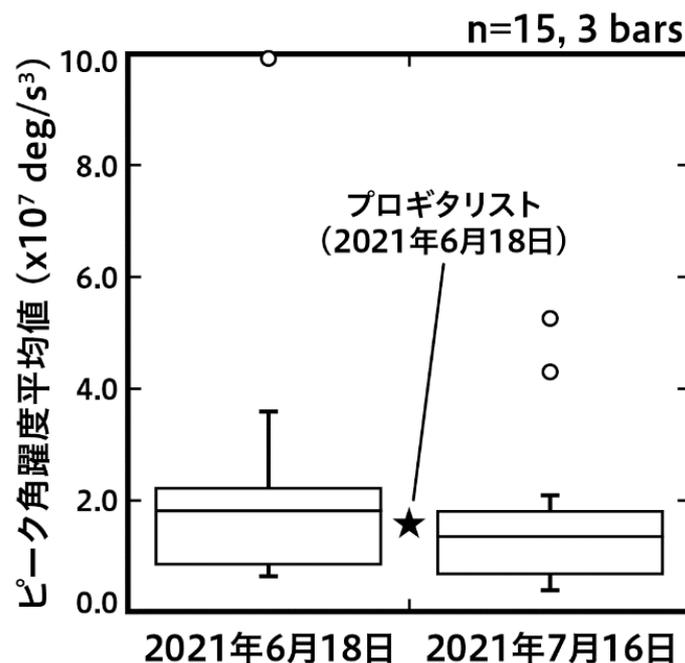


図 4.11 手首ひねり角躍度によるアクセント強度の評価

4.4.2 アクセント鋭さの評価結果

演奏リズムの正確さについての評価に引き続き、音楽表現における重要な技法の 1 つであるアクセント付きコードストローク奏法の達成状況についての評価を試みた。図 4.11 は、3 小節の演奏時間内に含まれる計 6 回のアクセント付きコードストローク（弾き下ろし方向）において計測された手首ひねり軸まわりのピーク角躍度平均値の分布をプロットしたものであり、1 回目に対して 2 回目ではアクセントがやや鈍くなっていたことが示唆された。この時、録音データからもアクセントの鋭さがやや失われており、演奏運動データの分析結果と傾向が一致していた。このことは、1 回目の計測では直前に正しいアクセント付きコードストローク奏法の指導がなされていたことに対し、2 回目では指導が行われていないことに起因するものと考えられる。学生へのアンケート結果からは、2 回目においてはメトロノームのリズムに合わせることに注力したとの回答が散見されており、同時並行的な知覚情報処理の増加が、アクセントの鋭さが失われることにつながったものと推察される。

4.4.3 コードストローク演奏運動軌道の評価結果

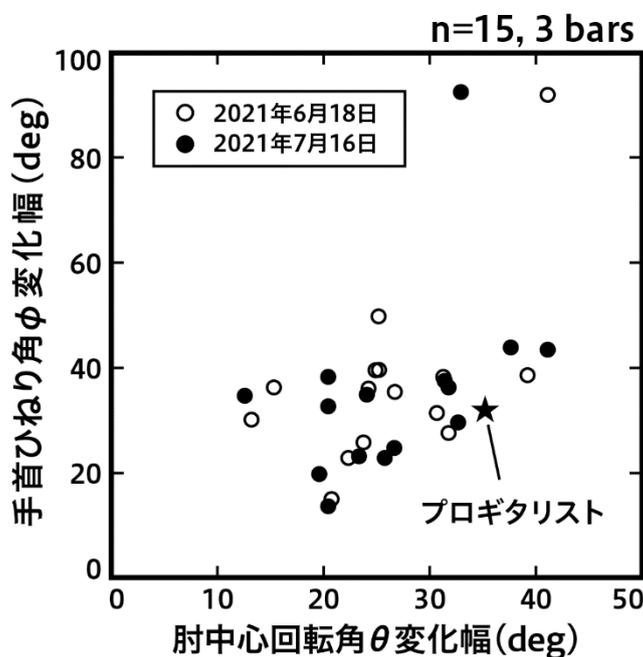


図 4.12 演奏姿勢角度の変化範囲

数値による表現が比較的容易であるリズムや運動強度とは異なり、ギター演奏における身体運動の軌道を1つの数値として表現することは困難である。一方で、図 4.8 に示した2次元図形としての表現を用いることで、学生が演奏運動軌道の特徴に気づくことは可能であると考えられる[1]。また、演奏時における重力に対する肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ の変化範囲を計算し、演奏運動軌道の特徴を数値化することができる。図 4.12 は計2回の3小節計測実験における15名の学生の演奏姿勢角度の変化範囲の分布を示したものであるが、肘中心回転角 θ の変化幅が 26.5 ± 7.7 度であったのに対し、プロギタリストでは35.6度と大きくなっていた。また、手首ひねり角 ϕ の変化幅に対して肘中心回転角 θ の変化幅が大きく、演奏運動軌道が手首ひねり回転的となっている学生が散見されることが見て取れ、個々の学生における演奏フォーム修正の手がかりになるものと考えられる。

以上のような実験結果により、STEAM手法によるレッスンクラスでは腕時計型運動センサデバイスによる客観的な演奏運動分析が加わることで、自身に起きた変化や他の演奏者との比較を通してより深い考察へとつながることが示唆された。

4.5 STEAM 実践実習とその意義

4.5.1 少人数チームによる STEAM 実践実習と成果

表 4.3 少人数チームによる STEAM 実践演習の設定目標

チーム	ギター演奏レッスン開発の目標
1	センサシステムのアルペジオ奏法への適用
2	ピックの違いが演奏に与える影響の解明
3	精神的な緊張と演奏との関係性調査

表 4.4 チームによる成果発表会の概要と STEAM 要素

STEAM 授業における気づきや提案	主な要素
メトロノームの音質で演奏音量が変わる	A
音符数を演奏中に数えることは難しい	A, T
上達があった時の身体の変化を知りたい	S, T, A, M
ギターやピックの種類で演奏運動が変わる	S, T, A, M
評価アプリの使い勝手を良くしたい	E
評価アプリはアルペジオ奏法でも有効	E, A
緊張が演奏に与える影響を調べてみたい	S, A
プロギタリストの運動波形と比較したい	S, T, E, A, M

本研究ではアクセント付きコードストローク奏法の習得といったギター演奏レッスンと並行して、授業の第 8 週より 5 人×3 チームに分かれての STEAM 手法の適用実習を行った。それぞれのチームでは、腕時計型運動センサデバイスを用いた演奏運動データ分析の手法を適用しつつ、サイエンス的な視点から設定した問題の解明を試み、授業最終週である第 14 週に成果発表会を行った。表 4.3 は各チームが設定した検討課題であり、追加にて必要となる機材や音楽上の知識等を授業担当教員が適宜補完していく形にて進行した。また、成果発表会を含め、教室内での情報共有とディスカッションを通して STEAM 手法の視点からの様々な気づきや、これに基づく提案がなされている。表 4.4 は成果発表会における発表内容を抜粋したものであるが、STEM の要素が芸術の領域と結びつくことにより、学生の自主性に基づく多様な学びが実現されていることが示唆されている。すなわち、経験とこれに基づく主

観的な評価と指導が主体となっていた従来の芸術教育の場に STEM の手法を持ち込むことで、学術の垣根を超えた多様な学びと発想につながる事がわかった。

4.5.2 従来の授業形式との対比

本研究における STEAM 手法によるギター奏法レッスンプラスの実践を通じ、コンピュータサイエンスを含めたいわゆる理系教育の場と、音楽や楽器演奏を対象とする芸術教育の場に対し、どのような違いが生じるのかについて考察を行った。この結果、STEAM 手法を用いることで、以下のような効果が生じることが期待される：

(1) 幅広い技量や経験を持つ学習者が参画できる

数学やプログラミング、楽器演奏スキルといった固定的な評価視点のもとでの学習とは異なり、学習者が個々の到達度や目標の違いを超えて活動していくことが期待される。すなわち、ある一定の項目を理解することや、技量の上達だけがクラスに参加する目標とはならないことから、個々の学習者の可能性を広げていく学びの場としての意義が生じる。

(2) 過去の自分との比較を自主的に行うことができる

ギター演奏といった時間芸術では、同じパフォーマンスを行うことは、プロフェッショナルなギタリストを含め、ほとんど不可能である。このような状況において、腕時計型運動センサーデバイスからの信号を分析することによる客観的な演奏運動評価システムを用いることで、学習者に生じた変化を音響や動画といった従来の方法とは別の視点にて観測する機会が STEAM 手法において拡張されている。また、音楽教育の場では、1対1にて教師と学習者が向かい合っている場面であったとしても、その場で伝えられる情報は限定されている。このため、学習者が自主的に自身の状況を客観的に知ることができる情報システムには大きな意義がある。さらには、オンライン教育といった環境においても、空間を共有できないことによる不利をカバーできる可能性がある。

(3) 個々の学習者にとっての利益を考えることにつながる

音楽を含めた芸術教育の場では、レッスンにおいては教師の経験や知識がクラスにて得られる学習成果に大きな影響を与えている。しかしながら、楽器演奏を含めたパフォーマンスアートにおいては、身体的な運動特性やサイズといった個人差の存在が大きな影響力を有しており、必ずしも教師のパフォーマンスを模倣することが良い成果につながらないことがある。このような状況において、STEAM 手法とその成果が芸術教育の場に広がることで、経験論や精神論によらない客観的な視点により、個々の学習者に適応した学びをもたらすことができるようになる。

以上のような STEAM 手法の特性に起因する効果は、学習者の将来的な進路やその後の人生についても有効に作用することが期待できる。すなわち、多様な価値観やモチベーション

を有する学習者の参画が可能となることから、世代や立場を超えた知的コミュニケーションの場を創造することへとつながっていく。このような中で、人の心を豊かにするエンターテインメントにおける重要なコンテンツの 1 つである音楽は、人間が外界へと干渉する際の唯一に近い手段である身体運動を科学的に考えることと組み合わせられることで、STEAM 手法による新しい学びの可能性を大きく広げることができるアクティビティーとなっているものと思われる。

4.5.3 STEAM 型ギターレッスン開発授業の課題と意義

学習者の発想や想像力を発展的に広げていく STEAM 手法によるクラスを実現する上では、腕時計型運動センサデバイスを使用することを含め、様々な障壁があることが予想される。STEAM 型クラスをどのような形で実施するのかについては、学習者の特性や授業担当者、必要となる施設といった教育機関を設置・運営する際に考えるべき項目への影響を考える必要がある。本研究では、理系学部における一般的な実験教室にギターと小規模な音響機材を持ち込むことでクラス実施の場を形成したが、クラスの実現にあたっては履修希望者への認知や授業シラバスの構築にて懸案事項が生じていた。すなわち、コンピュータサイエンス学部という理系大学学部にて大半の学生がギター演奏初学者という状況では、クラス自体が成立しなくなる可能性があった。また、教員の学問的背景や楽器演奏技量についても、実践的な音楽教育クラスを成立させるためには大きな課題となっていた。

このような状況において、本研究では PBL 手法によるアクティブラーニングを実践する授業を部分的に改編することでの対処を試みた。そして PBL は Project-Based Learning に加え、Problem-Based Learning という性格を併せ持つものへと変化した。すなわち、従来の知識やスキルを伝授する教授方法を離れ、クラスの運営を教員と学生が共創的に考えていく場とすることに新たに効果を見いだすこととなった。また、サイエンスという学問が指向している「不思議と思う心と、その解明を目指す行動」をベースとしたことで、長期間にわたり継続可能な学びの実現へとつながっていった。

表 4.5 は授業最終回（第 14 回）の終了時に学生から寄せられた授業へのコメントを抜粋したものであるが、能動的な学びへの姿勢が授業の回数を追う毎に広がっていった様子が見て取れる。とりわけ、理系大学の学部 3 年次という時点までに一度は諦めていたような知識やスキルの新たな獲得への可能性に気づくことを通じて、生涯学習のような長期での学びの有効性を感じさせることができたものと考えている。また、STEAM 手法を構成する学術的な要素が相互に関係し合うことで、幅広い視点からの発想と実践が高密度で交錯するギターレッスン開発授業は、教員と学生双方のモチベーションの維持に大きく貢献する学びへの好奇心の掘り起こしにおいて有効に作用していることがわかった。

表 4.5 授業最終回における学生からのコメント

奏法や楽理だけでなく物理やシステムの知識が得られた
苦手であったプログラムを少し組んでみたくなった
一度諦めたギターを弾けるようになったことに驚いた
独習の時よりも奏法習得のスピードが非常に速かった
毎週のように新しい知識の獲得や発見があった
グループワークの能力も併せて上達した気がする
ギター自体の構造や歴史に興味を湧いた
これまでの人生とは違う方向で音楽と向き合えた
自分の考え方の信頼性について深く考えさせられた
グループワークでの発想の拡がりが大変楽しかった
ドラムスやベース等のポピュラー音楽楽器に関心を持った

普遍性を持つ哲学の中で、今回は音楽とエレクトリックギターを選び STEAM 教育を実践した。本研究で取得するデータは、Excel などの標準的なソフトで開いても何が起きているかが見え、自分のクラスの隣の人が何をしているのかがわかる。このような考察は音響と映像だけの評価ではわからないことであった。この点で、エレクトリックギターとヴォーカルは人工知能化しにくいと考えられ、パッションを表現できるものとして残る。エレクトリックギターとピアノとの違いは、楽譜が読めなくてもできるので広い範囲の人に楽しんでもらえる。生涯学習につながっていて、どの年齢からスタートしても成立する。どの年齢の人が集まっても会話が成立する学問であった。

また、教師は、自分の専門分野だけで生きているわけではない。クラスの学生の特性も違う。STEAM 教育は、専門性がないからできないと諦めていた人が入ってこられる余地を作る

ことができる。その場で起きていることがわかるクラスというのは活性化する。楽器演奏はその場で起きていることがすぐわかるし、良いモチーフであった。

第 5 章

結論

本章では第 1 章で定義した本研究の課題の達成度についてまとめ、これからの音楽教育におけるモーションセンサ活用の可能性を論じる。

5.1 本研究を通じて明らかになったこと

5.1.1 音や映像からの逆推定が困難な動作についてフィードバックを提示

著者は、暗黙知解明の要件(A)を「音や映像からでは演奏の原因を逆推定できず、教師が学習者に対してフィードバックを行うことが難しい多様な奏法において、その原因を腕時計型運動センサデバイスを活用して数値観測し、結果得られた知識が暗黙知の場合は、暗黙知の解明である」と定め、原因の数値観測とフィードバックを提示する研究を行った。

音楽を構成する重要な基本要素である演奏リズムの分析では、サウンドをベースとしたリズムゆらぎの値 (Ground Truth) は、本研究によるモーションをベースとした値をワーストケース (上限) の値として実用的に評価することができた。肘中心回転角 θ でダウンストロークかアップストロークの評価をして、さらに、肘中心回転角速度 ω_z によってタイミングを評価することで、リアルタイムフィードバックの中でもアクセント付きコードストロークの各パラメータを正しく評価することが可能になった。

本研究では音楽的に正しいリズムでストロークフォームを評価することと、Sharpness (シャープネスパラメータ) という新しいパラメータの有用性が確認された。

上記の基礎理論が構築されたことによって、これまで不明であった以下の事項について実験が可能になった。

- ・アクセント付きコードストロークについて、どのタイミングでアクセントを付けにいつていると画像で示すことは困難
- ・アクセント付きコードストロークが、弦衝突のほんの直前までどのような同じ軌道をたどっていたのか、目の前で手本を示されても明確に見えない
- ・音響機器を使用することを前提とすると、音から技法を逆推定することが難しい

アクセント付きコードストロークのように高速でピックが弦を通過するような奏法を指導する場合、比喻表現・オノマトペの使用は学習者にとって直観的理解が容易である一方で、実際の数値がわからない問題があった。

数値による表現が比較的容易であるリズムや運動強度とは異なり、ギター演奏における身体運動の軌道を1つの数値として表現することは困難である。一方で、第4章の図4.8に示した2次元図形としての表現を用いることで、学生が演奏運動軌道の特徴に気づくことは可能である。また、演奏時における重力に対する肘中心回転角 θ と手首ひねり角 ϕ の変化範囲を計算し、演奏運動軌道の特徴を数値化することができる。

第3章の3.4.4でアクセント付きコードストローク奏法の演奏運動軌道の特徴を数値化した結果、プロギタリストの軌道図では同じ軌道プロットが描かれることで図が太くなり、さらにダウンストロークの下死点付近において、アクセントによる小さな変曲点が見られることから、プロギタリストはストロークにアクセントを付ける時は最初からアクセント用のフォームになっているのではなく、弦に当たる直前までアクセント無しのフォームで、ほとんど同じ軌道で演奏動作を行っており、弦に当たった直後に親指の付け根を素早く弦に接触させているという無意識的で、これまで暗黙であった事象を実際に数値として観測して明らかにすることができた。

本研究ではアクセント付きコードストロークのような高速の演奏においても画像にて軌道を示すことができるとわかった。

エレクトリックギターの場合、ピックアップの音響特性により、出音と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が、本研究で提案した運動動作に基づく評価パラメータ Sharpness (シャープネスパラメータ) は、プロギタリストにおけるアクセント付きコードストローク奏法では演奏テンポによらず数値分布的に $59.3 \pm 9.1 \text{ msec}$ とほぼ一定であることがわかった。このため、様々な種類のアンプやエフェクターなどの音響機器を使用するギター演奏者に有用であると考えられる。

また、本研究では様々な種類のアンプやエフェクターなどの音響機器を使用するエレクトリックギターにおいて、アクセント付きコードストローク奏法同様に、音や映像から演奏技量を正しく評価することが困難で暗黙的な事象が含まれる奏法を複数提案し、演奏分析の検討を行った。

腕時計型ワイヤレス運動センサデバイスにてプロギタリストを対象としたユーザーテストを行った結果、アクセント付きコードストローク奏法以外においても、本研究で提案した運動動作に基づく評価パラメータの意図的に制御された変動によって、以下の多様な奏法を観測することができた。

- ・弾く弦の本数をコントロールしたコードストローク奏法を、評価パラメータ STL3 の変動にて観測
- ・ブラッシングを交えた全弦カッティング奏法を、評価パラメータ STL1 の変動にて観測

- ・高速単音ピッキングによるトレモロ奏法を，評価パラメータ STL3 の変動にて観測
- ・ブリッジ・ミュート・ピッキングを交えたアルペジオ奏法を，評価パラメータ AATLw の変動にて観測
- ・チョーキング奏法時のピッキングを，評価パラメータ aj_x の変動にて観測

したがって，本研究のリアルタイムインタラクティブシステムを活用することによって，アクセント付きコードストローク奏法をはじめとした多様な奏法において，音や映像からの逆推定が困難な動作についてフィードバックを提示できることがわかった。

著者は，下記を明らかにして，暗黙知解明の要件(A)を示した。

- ・3.4.3 で，評価パラメータ Sharpness の値はプロギタリストにおけるアクセント付きコードストローク奏法では演奏リズムによらず 50 ないし 80msec 程度で一定であることがわかった。
- ・3.4.4 で，アクセント付きコードストロークについて，プロギタリストがどのタイミングでアクセントを付けにいつているのか画像で明確に示した
- ・3.4.4 で，アクセント付きコードストロークについて，プロギタリストが弦衝突のほんの直前までどのような同じ軌道をたどっていたのか画像で明確に示した
- ・3.7.14 で，評価パラメータ STL1, STL3, AATLw, aj_x の意図的に制御された変動によって音や映像から技法を逆推定することが難しい多様な奏法の演奏運動を示した。

5.1.2 演奏技量を獲得した瞬間など時間不連続な事象の認知を可視化

著者は，暗黙知解明の要件(B)を「学習者が演奏技量を獲得した瞬間など時間不連続な事象の認知を暗黙知と位置付け，認知ができた場合は，暗黙知の解明である」と定め，事象の認知を可視化するための研究を行った。

音や映像から逆推定が難しい演奏を指導する音楽実技教育現場においては，学習者の進歩の度合を正確に指摘できる教師は1.4における(1)の考察より皆無であると考えられる。

演奏上の身体運動は出音という結果に対する因果律の中にあり，演奏の原因側だけをシンプルなデバイスで手軽にわかることの有用性は，既存研究では明らかにされていない。

著者は，3.6.7で以下を明らかにして，暗黙知解明の要件(B)を示した。

音楽系専門学校における実験授業では，ギターレッスン全体からコードストローク演奏を実施していた時間帯を全て抽出し，演奏リズム Rhythm, リズムゆらぎ Rdev, ダウンスト

ロックの鋭さ Sharpness (シャープネスパラメータ) をテキスト形式にて一括出力したことで、運動データを見直すことなくレッスン内での演奏状況や学習の進捗度を教師と学習者の双方において容易に確認することができ、実質的なアクセント付きコードストローク奏法練習の最終回であった第4回では、Sharpness (シャープネスパラメータ) の数値がプロギタリストによる数値である 50~80msec に漸近しており、両群の学生ともに演奏技量の習得が進んでいたことがわかった。

第5回授業にて実施した個別演奏テストの結果では、17人中12人が当初目標として設定した Rdev は5%以内、Sharpness (シャープネスパラメータ) が 50~80msec の値を達成しており、授業実施の成果を客観的に確認することができた。

5.1.3 演奏指導を通じて新たな価値を生み出す STEAM 手法を積極的に活用した教育

5.1.1 と 5.1.2 が実現できたことによって、演奏指導を通じて新たな価値を生み出す STEAM 手法を積極的に活用した教育の実践も可能になった。

本研究における STEAM 型ギターレッスン開発授業では、PBL やアクティブラーニングの形式において、「ギターを上手く弾けるようになりたい」という共通の目標を設定することで、学習者の意識を収斂させたことにより、学びへの参画についての考え方を高いレベルで維持していくことができた。

第4章の表 4.4 は成果発表会における発表内容を抜粋したものであるが、STEM の要素が芸術の領域と結びつくことにより、学生の自主性に基づく多様な学びが実現されていることが示唆されている。

第4章の表 4.5 は授業最終回 (第14回) の終了時に学生から寄せられた授業へのコメントを抜粋したものであるが、能動的な学びへの姿勢が授業の回数を追う毎に広がっていった様子が見て取れる。とりわけ、理系大学の学部3年次という時点までに一度は諦めていたような知識やスキルの新たな獲得への可能性に気づくことを通じて、生涯学習のような長期での学びの有効性を感じさせることができたものと考えている。

本研究では、小型軽量な腕時計型運動センサデバイスを楽器演奏という芸術の場に持ち込み、ギターレッスン開発授業という形態において大学教育における STEAM 手法の有効性を検証した。そして、ファシリテーターとしてサイエンス、芸術双方の専門家が授業に参画したことで、STEM と芸術の境界領域にて学習者の取り組みや発想が発展的に広がっていくことがわかった。

5.1.4 まとめ

以上のように、エレクトリックギターにおける演奏の原因を腕時計型運動センサデバイ

スによる数値観測にて逆推定する解析手法について、演奏運動からリズムの正しさを推定する手法の精度を検証し、プロとアマチュアを明確に分ける新規性のある評価指標の開発を行い、その有効性を検証した。

ギター演奏の技量獲得時に発生する暗黙知の位置付けと、暗黙知解明の要件を定めるとともに、腕時計型運動センサデバイスと演奏運動解析アプリケーションを組み合わせた新規性のあるシステムによって複数の奏法を数値観測し、暗黙知の解明を行った。

さらに、得られた知識を音楽系専門学校での演奏教育と理系大学での STEAM 教育において具体的に適用し、その教育手法の有効性を示した。

5.2 これからの音楽教育におけるモーションセンサ活用の可能性の考察と今後の展望

5.2.1 事後フィードバックを活用する可能性

本研究で紹介したソフトウェアをギターレッスンで活用することで、音楽演奏において3つの事後フィードバックが可能になった。

- (1) 自分自身のベストパフォーマンスがどこだったのかを評価すること
- (2) 自分自身が過去のパフォーマンスからどのように変化しているのかが比較できること
- (3) 自分自身をプロフェッショナルと比較して検証できること

本研究の事後フィードバックシステムは、楽譜を読んで曲を学ぶ段階やライブなどの本番で、仮にミスをしたとしても忘れていなければならないという心理が働いている学習者の状況において有効であり、この場合は時間のかかる準備が必要ないため、録音またはビデオと比較して利点を有する可能性がある。

5.2.2 リアルタイムフィードバックを活用する可能性

リアルタイムフィードバックが有効であるシチュエーションをプロギタリストが検証し、その有用性を確認した。その結果、リアルタイムインタラクションは、ギターを弾きながらPCのモニタ画面を見ることができる学習者に有効であり、曲を学ぶ前の段階において奏法を学習している状況や、曲の暗記を終えて演奏の精度を上げている状況において、さらに別のモダリティを使ってギター演奏のフォームを修正するのに有利であると結論付けることができた。現段階では、本研究のリアルタイムインタラクションシステムは、アンプやエフェクターの特性によらず、ギターの音色を改善できる可能性がある。

5.2.3 技量獲得状況の可視化手法を活用する可能性

本研究では、多人数の音楽教室における個々の学習者の技量習得状況を低いコストにて可視化することによって、今後の教育現場への応用に関して以下の知見を得た。

- ・楽器そのものを改変する必要がない
- ・教室を改変する必要がほとんどない
- ・音響は演奏運動の結果だが、原因側の状態を計測している
- ・レッスンの中で演奏技量を獲得した瞬間や、どの時点から間違った演奏方法に変化してしまったのかといった、時間不連続な事象を認知することは非常に困難であるが解決できる

運動センサデバイスによるエレクトリックギター奏法習得状況の客観的な評価では、その結果の解釈ならびに授業における学生へのフィードバック方法を十分に考察する必要があることがわかった。また、演奏テストのみでは学習効果を正しく評価することは難しいと考えられる。

一方で、従来の授業クラスではコストの視点から十分な実施が困難であった詳細な個別指導をシンプルな機材と数値処理にてサポートできる可能性が認められることから、授業設計と効果測定を繰り返し実施していくことで、より良いギターレッスンクラスの実現につながるものと思われる。

技量獲得状況は学習者と教師の両方に可視化が可能であるため、今後はデータ駆動による探究型教育手法の開発が期待される。

5.2.4 高等教育における STEAM 手法の可能性

本研究に参画をした芸術とサイエンスのそれぞれを専門とする教師には、今後の高等教育における新たな可能性に関する多くの気づきをもたらされている。

東京工科大学コンピュータサイエンス学部においては、習得を目指す IT 技術の中で、プログラミングの占める割合が高くなっている。卒業者の大半が情報通信技術をベースとするシステムエンジニアリングに関する職種へ就業しているが、プログラムのコーディングとは異なる業務に従事しているケースが多々ある。このことは、座学による知識伝授と課題演習によるプログラミング技法の習得に限界があったことを示唆しており、2021 年度からは学部 3 年生全員が実践的な題材を扱う PBL 授業を履修するカリキュラムが編成されている。また、大量のデータをコンピュータにて分析するデータサイエンスの手法や、深層学習に代表される人工知能的な手法により、社会における実際の問題に向き合うことのリアリティが高められつつある。このような状況の中で、学習者自らが関心を持つ題材に対し、現時点では未知であるデータ分析手法による問題解決を試みるという性質において、本研究による実践事例は特徴付けられるものと考えられる。すなわち、学びの対象となるコンテンツが目の前にあるという状況を作り出したことで、誰も見たことのない新しいサイエンスに直

接参画できたことが、高等教育の最終段階へとさしかかっている学習者の学習意欲向上ならびに維持へとつながったものと思われる。

音楽系専門学校授業において個々の学生の技量習得状況を低いコストにて可視化することができたことを踏まえると、本研究の STEAM 手法による教育をプロミュージシャンやアーティストを目指す芸術教育の場でも適用することで、第 4 章の表 4.5 にて示した理系大学学部におけるギターレッスン開発 STEAM 型授業履修者のコメントと同様な思考が育まれ、次のような効果が得られることが期待される：

- (1) 客観的な数値等の指標にてパフォーマンスアートを考えるきっかけを与えることで、将来の技量伝承方法を変革していく思考へと至る可能性が生まれる。
- (2) IT 技術やデータサイエンスといった知識を芸術の学習と並行して得られることにより、今後の音楽活動においてこれらの技術を活用するアーティストの育成につながる。
- (3) 自身の身体の動きを望ましい方向へと変化させていくという視点から、楽器演奏の範疇を超えた身体運動技巧獲得を考える人材が育成される。

5.2.5 今後の展望

本研究では腕時計型運動センサデバイスによって得られたデータで演奏解析を行い、得られたデータを音楽教育に活用する考察を進めてきたが、現状の教育手法よりデータ駆動型教育が全方位的に優れているとは考えていない。

出音を個性として考え、ピックアップ、ギターアンプ、エフェクターで現状の音色に色付けをして完成させる指導法もある。また、実務家が教師として自らの模範演奏で学習者を鼓舞したり、比喩表現・オノマトペで声掛けをしてイメージさせながら実施する指導は高揚感が期待され、ライブが迫った直前の指導など短期間で成果を出さなければならない場合や、緊張する学習者に良いイメージだけを持たせながら舞台に送り出していくような指導などには有効であると考えている。スピードや合理性を求めるといった練習だけでは1つの弾き方しかできなくなってしまう可能性も考えられ、同一の機材を使用した場合は他の人と同じ音色にしかならない可能性も懸念される。

しかし、長期的に自分を向上させていくためにはフィードバックが必要になる。ここにサイエンスが効いてくると著者は考えている。腕時計型運動センサデバイスを活用したグループレッスンでは、演奏運動データを見直すことなくレッスン内での演奏状況や学習の進捗度を教師と学習者の双方において容易に確認することができる。

世界には個性的なフォームで演奏しているギタリストもいるが、ピックで弦を撥弦するという物理現象や、ピッキング奏法を行うための主な身体運動はギターの構造上変わらない。本研究で提案するシステムを使用すれば、各々にとって無意識的で暗黙である事象をパラメータとして、フィードバックを提示できる。必要に応じて過去の演奏データと新たな演奏データとを重畳表示することで、目視や動画では困難な細部での演奏運動の違いを可視

化できる。アクセサリのように抵抗なく使えて、しかも長時間動き、軽量であるため学習者への負荷もほとんど無い。

本研究で提案するシステムを使用する教師や学習者の数が今後増えてきた時に、教師は自分の指導が正しかったのか振り返り、学習者に応じた指導法を考案できる可能性がある。知識やスキルを得ることの範疇を超えた新たな教育の可能性を見いだすことができる。

曆本は実世界指向インタフェースの課題にプライバシーの保護を挙げているが[1]、本研究の腕時計型運動センサデバイスはモーションデータだけを取得することが可能であるため、プライバシー保護の観点からも心理負荷が低い。外のネットワークと接続しての処理もしないためパーソナルな世界で活用できる。

本研究の知見は他の楽器にも応用が可能である。弦間ピッチが広いギター単音奏法よりも大きな振幅でピッキングすることが多いエレクトリックベースにおけるオルタネイトピッキング奏法への応用が期待される。また、電子ピアノの鍵盤タッチの強さにおいて角速度やリニア加速度に関連するパラメータがMIDIベロシティと強い相関があることがわかっているため[2]、弦楽器や鍵盤楽器、打楽器といった身体運動が音響と密接に関わるような他楽器の演奏技量教育への応用も進めていきたい。

単音ピッキングにおいて重要なアップピッキングに関する知見は今後の課題である。単音ピッキングがどの弦を弾いたかという検証についても、今後の課題としていきたい。ピックを持つ強さや弦に当たる角度の変更によってアタック感に変更され、角躍度 aj_x の値が変わる可能性はあるが、この検証も今後の課題である。

このような検証を見分けられるテクノロジーを持ったということが重要である。まだまだ未知のことがある。ルーティンの練習方法が間違っている可能性もある。運動は必ず原因側にあることを忘れずに研究を行っていきたい。診断ソフトウェアにおいては、ギターの演奏運動と音楽表現との関係性を幅広いジャンルの楽曲や演奏方法とともに探究していくことに加え、腕時計型運動センサデバイスにワイヤレスデータ通信の機能を加えることで、演奏をしながら演奏運動診断結果をリアルタイムに知ることのできるインタラクティブなレッスンシステムの開発を行っていくことを考えている。結果として、無形文化財的な側面が強い楽器演奏を科学的に継承する学問分野の基礎を確立することが、これからの音楽教育におけるモーションセンサ活用のあり方と考える。演奏の継承には、かつては楽譜が使われたが、遺せる情報には限りがある。録音、MIDI、録画と進化してきているが、演奏法自体を保存することは困難である。ネットワークの時代では、パラメータ化された演奏法は共有することができる。人間以外の存在に演奏法を指示できる可能性もある。また、ロックギターの音色はエフェクターの登場と関連があるなど、音楽と工学には関連性がある。演奏法のパラメータ共有とは、ピックアップやアンプ、エフェクターに続く工学的アプローチが寄与する演奏の未来像に他ならない。著者は実務と学術を架橋し、本研究を演奏工学と命名する。

本研究の知見を利用し社会実装を行う場合は、下記の課題がある。本研究においてはサイエンス、芸術のそれぞれの専門家が同時に立ち会う形でのクラス運営を行っていたが、どちらか一方、あるいはオンライン、オンデマンドでのSTEAM手法によるデータ駆動型授業の効

果的な実現に向けて検討を進め、コンテンツ制作に関わる仕事に携わる人のみならず、クリエイティブな視点からの能動的な学びを支える手法の研究開発が必要である。また、ユーザーインターフェースのデザインの種類を増やした評価実験を行った上で、ノートPCに加えてスマートフォン等の携帯情報端末への対応を進めることで、より幅広い利用環境の実現が必要である。

謝辞

自分はこれまでの音楽活動において常に完全を追い求めていたが、間違いであった。完全とは存在せず、イメージの中だけであった。常に自分はイメージと現実がずれており、そこにコンプレックスとストレスがあった。この博士論文の中で初めて真理にたどり着けた。ロック・ポップスを背景としたギター演奏研究で博士号を目指すにあたり指導して下さった松下宗一郎教授と、家族、支えてくれた恩人・友人に深く感謝を述べたい。私がギターを始めるきっかけであり、またギタリストであり、かつ博士号を取得した QUEEN のブライアン・メイ氏に近づきたいという気持ちが博士課程在籍中における私の大きなモチベーションであった。敬愛する偉大なギタリスト、ブライアン・メイ氏に深く感謝の意を表したい。

エレクトリックギターを気持ち良く弾けると大変楽しいが、自分と対峙することは疲れてしまう。本研究のシステムがその疲れを軽減してくれる存在になって欲しいと願っている。私はプロとしてギターを弾くだけでなく、教師としてギターを教えるだけでなく、研究者としての活動だけでなく、実務と学術の境界線に挑戦して、博士論文に挑戦し新しいフィールドを作ろうとしたのだという動機を執筆中の苦しい時に思い出すことができた。CD、本、DVD、動画と様々なメディアの中でギタープレイを表現してきて、その次を見つけないと考える大学院に進学したが、この博士論文の中にその次を見つけることができ、大変嬉しく思っている。私が Largest Online Guitar Lesson のギネス世界記録を樹立することができた時代は、実務家としての自分の存在に確信を持つことができたが、世界には素晴らしいギタリスト、ギター教育者は沢山いる。博士号を取れた後に自分自身がギター演奏、ギター教育の実務家としてどこまで活路を見いだせるかはわからないが、ピックが持てる限りはこれからも未来に向かって実務家としてギターを弾き続けていこうと考えている。

2022年現在、コロナウイルスの影響で音楽業界、音楽教育業界にも大きな変動が起きて、演奏者や演奏教育者にはまだまだ苦しい状況が続いているが、デジタルと音楽演奏のあり方に対する考え方については、これまでのことができなくなったから仕方なくデジタルを使うということではなく、新しい世界の創出としてデジタルを使うという変革が世界に起るべきで、この研究の後に続く者が増えてくれることが重要であると考えている。自分の研究をさらに深めてくれる後続の登場に期待したい。

<第1章 参考文献>

- [1] トモ藤田, 耳と感性でギターが弾ける本, リットーミュージック, pp.31-35, 2010.
- [2] 古川康一, 升田俊樹, 西山武繁, 合奏指導における比喩表現の役割, 身体知研究会, <http://www.sigskl.org/activity/papers/sig-skl-20140314-1.pdf> (参照日 2020.12.01)
- [3] 吉田優治, 消費される音楽エンタテインメントを超えて: いかに関心圏外で評価される音楽聴衆状況を創造するか, 国府台経済研究, Vol.29, No.1, pp.5-31, 2019.
- [4] 横溝聡子, 磯部哲夫, 南川肇, 深谷登喜子, 音楽科実技科目におけるループリック評価の導入, 郡山女子大学紀要, No.54, pp.179-194, 2018.
- [5] 文部科学省, 実務家教員の登用促進について, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo4/043/siryo/_icsFiles/afieldfile/2018/05/28/1405040_3.pdf (参照日 2022.04.01)
- [6] 富田福代, 「実務家教員」を区分する意義とは? 問われる教育能力と質保証, <https://www.sentankyo.jp/articles/884955ea-3ba7-486d-b955-e88980dfcf3d> (参照日 2022.04.01)
- [7] 齊藤智樹, STEM/STEAM 教育の構成概念, 日本教育工学会論文誌, Vol.44, No.3, pp.281-296, 2021.
- [8] 山崎貞登, STEM, STEAM, エンジニアリング教育概念の比較教育からの論点整理, 日本産業技術教育学会誌, Vol.62, No.3, pp.197-207, 2020.
- [9] 大谷忠, STEM/STEAM 教育をどう考えればよいか —— 諸外国の動向と日本の現状を通して ——, 科学教育研究, Vol.45, No.2, pp.93-102, 2021.
- [10] 遠山紗矢香, 竹内勇剛, STEAM 教育としての協調的な音楽創作活動とその評価の提案 —— 児童の自尊感情の変化に着目して ——, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.20, No.4, pp.397-412, 2018.
- [11] 山本朋弘, 城井順一, 堀田龍也, IoT 教材を活用した小学校プログラミング教育における学習課題を段階的に設定した授業実践, 科学教育研究, Vol.44, No.2, pp.86-92, 2020.
- [12] 文部科学省, 小学校プログラミング教育の手引き (第三版), https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyouhou/detail/1403162.htm (参照日 2021.07.15)
- [13] 経済産業省, 「未来の教室」と EdTech 研究会 STEAM 検討ワーキンググループ 中間報告, <https://www.learning-innovation.go.jp/existing/doc202008/steam2020-midreport.pdf> (参照日 2022.04.01)

- [14] 坂口憲一, 先端 IT 人材の育成を目指す「STEAM ベースの IT 教育」の提案, 日本教育工学会論文誌, Vol.44, No.3, pp.357-363, 2021.
- [15] D. A. Sousa and T. J. Pilecki, From STEM to STEAM: Using Brain-Compatible Strategies and Lessons that integrate the Arts, Corwin, 2013.
- [16] D. A. Sousa, T. J. Pilecki, 胸組虎胤 訳, AI 時代を生きる子どものための STEAM 教育, メディアルネッサンス, 2017.
- [17] D. A. Sousa, T. J. Pilecki, From STEM to STEAM: Using Brain-Compatible Strategies and Lessons That Integrate the Arts (2nd Edition), Corwin, 2018.
- [18] 辻合華子, 長谷川春生, STEAM 教育における“A”の概念について, 科学教育研究, Vol.44, No.2, pp.93-103, 2020.
- [19] 北澤武, 赤堀侃司, 教員養成における STEM/STEAM 教育の展望, 日本教育工学会論文誌, Vol.44, No.3, pp.297-304, 2020.
- [20] 木村智之, 岩瀬大祐, 長岡大地, 森山智洋, 引地正太郎, 高柳友哉, 飯島照之, 中村雅男, 野村亮介, 堅田金太郎, 太田伸男, 市川晃, 木田純平, 出畠創士, 細井祐太郎, 松下宗一郎, スモールアクションコントローラ, 情報処理学会シンポジウムシリーズ・インタラクション 2013・インタラクティブデモセッション, 2013.
- [21] 野原拓実, 岩倉真伍, 古賀佑輔, 中嶋一喜, 琴野絢香, 吉井貴映, 田辺晃弘, 山口凌雅, 松下宗一郎, 動作の同一性を計測する腕時計型コンピュータ〜ダンスにおける演技者間の比較〜, 情報処理学会シンポジウムシリーズ・インタラクション 2015・インタラクティブデモセッション, 2015.
- [22] 志水一斗, 奥村ヒョービ, 福田虎太郎, 肥後瑠一, 吉田海, 松下宗一郎, ギターのコードストローク演奏運動分析システム〜演奏様態を擬音化するインタラクションに向けて〜, 情報処理学会シンポジウムシリーズ・インタラクション 2020・インタラクティブデモセッション, 2020.
- [23] 暦本純一, 実世界指向インタフェースの研究動向, コンピュータソフトウェア, Vol.13, No.3, pp.196-210, 1996.
- [24] I. Herrera-Luna, E. J. Rechy-Ramirez, H. V. Rios-Figueroa and A. Marin-Hernandez, Sensor Fusion Used in Applications for Hand Rehabilitation: A Systematic Review, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol.19, No.10, pp.3581-3592, 2019.
- [25] TDK Corporation, MEMS モーションセンサと「パッケージング技術」, <https://www.tdk.com/ja/tech-mag/core-technologies/13> (参照日 2022.12.01)
- [26] 竹内幸裕, MEMS センサの自動車への応用, 精密工学会誌, Vol.76, No.5, pp.506-509, 2010.

- [27] S. Matsushita and D. Iwase, Detecting Strumming Action While Playing Guitar, Proc. of the 17th Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC '13), pp.145-146, 2013.
- [28] 福本雅朗, 外村佳伸, “指釦” : 手首装着型コマンド入力機構, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 389-398, 1999.

<第2章 参考文献>

- [1] トモ藤田, 耳と感性でギターが弾ける本, リットーミュージック, pp.27-31, 2010.
- [2] Erde Musical Instruments, フレットバイオリンとは, <https://fret-violin.com/?mode=f4> (参照日 2022.04.01)
- [3] Y. Shin, J. Hwang, J. Park and S. Seol, 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), pp. 435-442, 2018.
- [4] K. Marky, A. Weiß, A. Matviienko, F. Brandherm, S. Wolf, M. Schmitz, F. Krell, F Müller, M. Mühlhäuser and T. Kosch, , Let's Frets! Assisting Guitar Students During Practice via Capacitive Sensing, Proc. of the 2021 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI'21), Article No.746, pp.1-12, 2021.
- [5] Rocksmith+, <https://www.ubisoft.com/en-us/game/rocksmith/plus>, UBISOFT. (参照日 2021.11.30)
- [6] N. Lindroos, H. Penttinen, and V. Välimäki, Parametric Electric Guitar Synthesis, Computer Music Journal, Vol.35, No.3, pp.18-27, 2011.
- [7] 伊藤直樹, 西本一志, 吟たあ : ギター型インタフェイスによる弾弦併用型 Voice-to-MIDI システム, 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.127(MUS-78), pp.53-58, 2008.
- [8] S. Matsushita, A Wrist-worn Motion Evaluation System for Fast and Powerful Down Picking of Heavy Metal Guitar, Proc. of the 23rd ACM Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'19), pp.145-149, 2019.
- [9] S. Matsushita and D. Iwase, Detecting Strumming Action While Playing Guitar, Proc. of 17th Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC '13), pp.145-146, 2013.
- [10] K. Yoshida and S. Matsushita, Visualizing Strumming Action of Electric Guitar with Wrist-worn Inertial Motion Sensors, Proc. of 2020 IEEE 9th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2020), pp.505-508, 2020.

- [11] R. Vanegas, The MIDI Pick: Trigger Serial Data, Samples, and MIDI from a Guitar Pick, Proc. of the 2007 Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME07), pp.330-333, 2007.
- [12] Alexander Refsum Jensenius, Methods for studying music-related body motion, Springer Handbook of Systematic Musicology, pp.805-818, 2018.
- [13] 菅野谷知佳, 松下宗一郎, 手首装着型運動センサによる内視鏡下鉗子操作評価～初学者のトレーニング過程観測による技量評価パラメータの検討～, J JSCAS Vol.19, No.4, pp.286-287, 2017.
- [14] 養父貴, ギタリストのための全知識, リットーミュージック, p.54, 1996.
- [15] トモ藤田, 耳と感性でギターが弾ける本, リットーミュージック, p.45, 2010.
- [16] 佐久間正英, 直伝指導! 実力派プレイヤーへの指標, リットーミュージック, pp.24-57, 2013.
- [17] 林洋次, ギターの摩擦振動と音響振動, 日本機械学会関東支部第7期総会講演会講演論文集, Vol.2001, No.7, pp.163-164, 2001.
- [18] Yudai MIYASHITA, Hirokatsu KATAOKA, Akio NAKAMURA, Analyzing Fine Motion Considering Individual Habit for Appearance-Based Proficiency Evaluation, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E100-D, No.1, pp.166-174, 2017.
- [19] 渋谷恒司, 深津紘志, 小松重紀, バイオリン・ボーイング動作における音色表現語の右腕動作に与える影響, バイオメカニズム学会誌, Vol.28, No.3, pp.146-154, 2004.
- [20] 坂牛和里, 植村あい子, 村岡眞伍, 甲藤二郎, Webカメラを利用したギターの練習支援システムの検討, ITE Technical Report, Vol.40, No.26, pp.67-71, 2016.
- [21] 石桁真礼生, 末吉保雄, 丸田昭三, 飯田隆, 金光威和雄, 飯沼信義, 楽典——理論と実習, 音楽之友社, p.40, 1965.
- [22] Kelly SIMONZ, 超絶ギタリスト養成ギプス 天下無双の教速 DVD 編, リットーミュージック, p.13, 2010.
- [23] トモ藤田, 生きたグローヴでギターが弾ける本, リットーミュージック, pp.73-77, 2010.
- [24] 新井純, 池田寛, 江尻憲和, 他, 最新音楽用語辞典, リットーミュージック, p.183, 1998.
- [25] ドレミ楽譜出版社, ジャズ&フュージョン/ギター・マスター, ドレミ楽譜出版社, pp.21-22, 1998.

<第3章 参考文献>

- [1] K. Yoshida and S. Matsushita, Visualizing Strumming Action of Electric Guitar with Wrist-worn Inertial Motion Sensors, Proc. of 2020 IEEE 9th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2020), pp.505-508, 2020.
- [2] 久保田豪, 長澤靖夫, 柔道競技における試合中のアドバイスの有効性について, 仙台大学大学院スポーツ科学研究科修士論文集, Vol.9, pp.59-65, 2008.
- [3] 小澤治夫, 石田譲, 岡崎勝博, 西嶋尚彦, 鉄棒单元におけるスポーツミラーによる運動画像の即時フィードバックの効果, 北海道教育大学釧路校研究紀要 釧路論集, Vol.35, pp.1-6, 2003.
- [4] 森尻有貴, ピアノ演奏学習者における自己評価活動の影響—演奏後の録音聴取によるフィードバックを通して, お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科紀要 人間文化創成科学論叢, Vol.12, pp.111-119, 2010.
- [5] S. Matsushita, A Wrist-worn Motion Evaluation System for Fast and Powerful Down Picking of Heavy Metal Guitar, Proc. of the 23rd Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC '19), pp.145-149, 2019.
- [6] M. Mounir, P. Karsmakers, and T. van Waterschoot, Guitar note onset detection based on a spectral sparsity measure, 24th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO' 16), pp.978-982, 2016.
- [7] E. Lee, U. Enke, J. Borchers and L. de Jong, Towards Rhythmic Analysis of Human Motion using Acceleration-Onset Times, Proc. of the 2007 Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME07), pp.136-141, 2007.
- [8] S. Matsushita and D. Iwase, Detecting Strumming Action While Playing Guitar, Proc. of 17th Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC '13), pp.145-146, 2013.
- [9] 小山英恵, 音楽演奏における表現追求プロセスについての研究, 鳴門教育大学研究紀要, Vol.33, pp.410-425, 2018.
- [10] 五十嵐創, 植野研, 尾崎知伸, 森田想平, 古川康一, ベイジアンネットワークによるチェロ演奏スキルモデリング, 情報処理学会研究報告 知能と複雑系, Vol.2003, No.30, pp.1-6, 2003.
- [11] 野上俊之, 保育者養成におけるピアノスキルの習得 ～タッチの実態～, 比治山大学短期大学部紀要, Vol.49, pp.73-84, 2014.
- [12] 衣梨, 中国の教員養成大学・課程における電子ピアノを活用したグループ・レッスンの開発, 東京学芸大学博士論文, 2008.

- [13] 小倉隆一郎, 音楽授業における MIDI 演奏データの活用: ネットワークとフロッピーディスクを利用する, 文教大学教育学部紀要, Vol. 40, pp. 43-53, 2006.
- [14] 中平勝子, 赤羽美希, 深見友紀子, ブレンデッドラーニングを取り入れたピアノ弾き歌い指導の改善, 日本教育工学会論文誌, 34(Suppl.), pp. 45-48, 2010.
- [15] 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~, 情報処理学会研究報告, Vol. 2022-DPS-190, No. 20, pp. 1-8, 2022.
- [16] 河瀬諭, 合奏における演奏者間コミュニケーション —— タイミング調整とその手がかかり ——, 心理学評論, Vol. 57, No. 4, pp. 495-510, 2014.
- [17] Soichiro Matsushita, Fumiyoshi Kamo, Interactive Training System for Electric Guitar Strumming Form by Using Inertial Motion Sensors, Proc. of IEEE 11th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2022), pp. 95-98, 2022.
- [18] 加茂フミヨシ, R. A. S. 式ピッキング 速弾き攻略のための究極メソッド, リットーミュージック, pp. 28-29, 2013.
- [19] 松下宗一郎, 幸田有里, 近藤百佳, 溝上大輝, 甲斐美月, メタルギタリストのための高速ダウンピッキングトレーニングシステム, 情報処理学会シンポジウムシリーズ・インタラクティブ 2018, pp. 312-313, 2018.
- [20] 成瀬正樹, はじめてのエレキ・ギター, リットーミュージック, p. 27, 2011.
- [21] 加茂フミヨシ, R. A. S. 式ピッキング 速弾き攻略のための究極メソッド, リットーミュージック, p. 48, 2013.
- [22] 小林信一, 地獄のメカニカル・ギター・ドリル 狂気の技術鍛練編, リットーミュージック, p. 50, 2018.
- [23] Kelly SIMONZ, 超絶ギタリスト養成ギプス, リットーミュージック, p. 18, 2009.
- [24] エレキギター博士, ギターブリッジの種類・交換について, <https://guitar-hakase.com/3768/> (参照日 2022. 04. 01)
- [25] 野村大輔, ギター奏法大図鑑, リットーミュージック, p. 68, 2007.
- [26] Loïc Rebourtsiere, Otso Tapio Lähdeoja, Thomas Drugman, Stéphane Dupont, Cécil Picard-Limpens, Nicolas Riche, Left and right-hand guitar playing techniques detection, Proc. of the Int. Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME), 2012.
- [27] ドレミ楽譜出版社, ジャズ&フュージョン/ギター・マスター, ドレミ楽譜出版社, pp. 21-22, 1998.
- [28] 加茂フミヨシ, 速弾きがうまくなる理由 ヘタな理由, リットーミュージック, p. 118, 2007.

<第4章 参考文献>

- [1] K. Yoshida and S. Matsushita, Visualizing Strumming Action of Electric Guitar with Wrist-worn Inertial Motion Sensors, Proc. of 2020 IEEE 9th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2020), pp.505-508, 2020.
- [2] S. Matsushita and D. Iwase, Detecting Strumming Action While Playing Guitar, Proc. of the 2013 Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC '13), pp.145-146, 2013.
- [3] 加茂フミヨシ, R.A.S.式ピッキング 速弾き攻略のための究極メソッド, リットーミュージック, 2013.

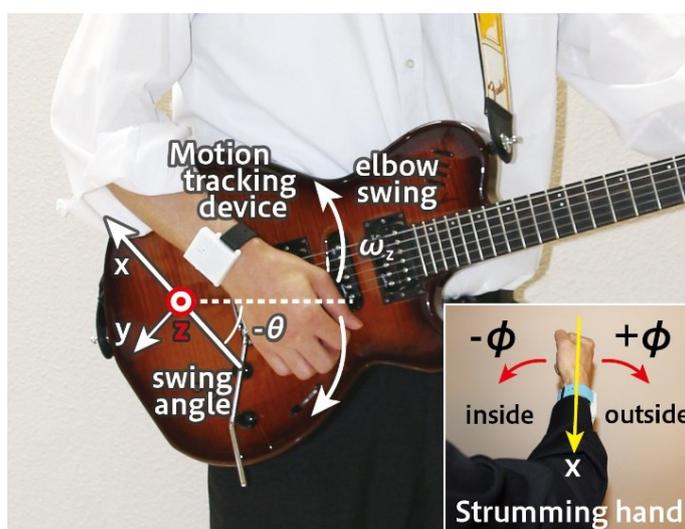
<第5章 参考文献>

- [1] 暦本純一, 実世界指向インタフェースの研究動向, コンピュータソフトウェア, Vol.13, No.3, pp.196-210, 1996.
- [2] Kaname Komatsu, Fumiyoshi Kamo, Soichiro Matsushita, Evaluating Strength of Piano Key Touch by Using a Wrist-Worn Inertial Motion Sensor, Proc. of IEEE 11th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2022), pp.89-92, 2022.

付録

以下，将来の発展を見越して知見をまとめたものを付録として付す。

付録 A. ギター演奏と主なパラメータの説明



Parameter	Description	Unit
$a = (a_x \ a_y \ a_z)$	3軸加速度ベクトル	G (1G=9.8m/s ²)
$\omega = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$	3軸角速度ベクトル	dps (deg/s)
ω_z	主たる観測軸が肘中心回転角速度	dps (deg/s)
ω_x	主たる観測軸が手首ひねり角速度	dps (deg/s)
$\theta = \sin^{-1}a_x$	x軸の姿勢角度 肘中心回転角 (腕時計型運動センサデバイスが 静止している状態)	degree
$\phi = \sin^{-1}(a_z / (1-a_x^2)^{0.5})$	x軸の手首ひねり角 (静止状態で $ a_x < 1$ であれば)	degree
a_{j_x} $a_{j_x}[n] = \{\omega[n+1] - 2\omega[n] + \omega[n-1]\} / (\Delta t)^2$ nはサンプリングデータの番号 (整数)	手首ひねり角速度 ω_x の 二階時間微分値である 角躍度 a_{j_x} は，ピッキングによる 衝突の強さを反映している	deg/s ³

$STL1 = \Sigma (\omega_y^2 + \omega_z^2)^{0.5} \Delta t$	STL1 はプレイヤーの 前腕がどれだけ大きく移動したかを 方位角で表している	rad
$STL3 = \Sigma (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{0.5} \Delta t$	手首をひねる回転運動の移動量に 相当する	rad
AV	有効角速度. ストローク時間内における 角速度 $ \omega $ の 2 乗平均平方根 として計算される	dps (deg/s)
aj_{x-pk}	対応するストローク時における $ aj_x $ のピーク値として定義	deg/s ³
AATL	$\Sigma\{\omega[n+1] - 2\omega[n] + \omega[n-1]\}/(\Delta t)$ サンプリング間隔 Δt にて 計測される角速度の値を $\omega(t + n\Delta t)$ (n は整数) として, 時刻 t での 3 軸角躍度の絶対値の時間積算値	deg/s
AATLw	AATL を AV で除したもの	無名数
Td	肘中心回転角速度 ω_z が ピーク値をとる時刻の間隔	sec
Rhythm	1 分間あたりの 4 分音符の演奏回数	bpm
Rdev	Td (sec) のゆらぎとしての リズムゆらぎ	%
Sharpness	時間の次元を持ち, 鋭さを表すアドホックなパラメータ. 肘中心回転角 θ の上死点と下死点の タイミングからダウンストローク時間を 決定し, ダウンストローク時間内での $ aj_x $ の総和を計算. ダウンストローク の開始から $ aj_x $ を積算し, 積算値が全体の 10%を超えてから 90%までの時間	msec

付録B. エレクトリックギターの主な和音のピッキング法

付録B-1 コードストローク

ピックを使用したギター奏法で要となる奏法は、和音を演奏するコードストロークである。ポピュラー音楽の主役は歌であることが多く、コード演奏による歌唱のサポートが最重要となる。右利き用ギターを使用した場合、非利き手で必要な指板を押弦し、音を選択・決定する。そして利き手でピックを持ち弦にヒットさせることで目的の音が発音され、コード音を得ることができる。安定したコードストロークサウンドを得るため、第2章の図2.2の楽譜(A)における各ストロークは、ゆらぎがなく実行する必要がある。拍に乗ることによって、リズムに最小限の秩序が生まれる[1]。

単音フレーズを速く正確に弾くことも大切だが、コードをバランス良く均等に鳴らせるスキルを養うことも重要であるとSIMONZは主張している[2]。

藤田は、E7のワンコードだけでグルーブさせる練習を推奨している[3]。ワンコードでグルーブしなければコード進行に乗せてもグルーブしないからである。

グルーブ感とはノリとも呼ばれ、調子良くその曲の雰囲気やリズムに乗った状態を指す[4]が、佐久間は、グルーブ感とは抽象的な表現の代表であると主張している[5]。

付録B-2 アクセント付きコードストローク

コードストロークの基本を踏まえた上での代表的な発展方法がアクセント付きコードストロークによる8ビート・ピッキングである。適切な箇所にアクセントを付けることで、ドラムス演奏のような躍動感のあるリズムを表現できる。一般的には、ダウンストロークの時、弦を弾いた直後に利き手側の親指の付け根を弦に素早く接触させることで音を止めて鋭い音響を得る[6]。この動作は、リズムに沿ってゆらぎがなく行われる必要があり、ミュージシャンはリズム感を磨きながら躍動感のあるストロークを訓練する。手首はボディ側で弦を固定するためのパーツであるブリッジから極端に浮かせず、ブリッジの近くで維持する。この状態でピッキングすると、全ての弦に対してピックが同じ距離感で当たることになる。結果的にコード・プレイに最適なピッキングが可能になる。これを、直線軌道のピッキングと呼ぶ[7]。第2章の図2.2の楽譜(B)は、リズムカルな音楽を奏するため、アクセントのあるダウンストロークを周期的に演奏している。

付録 B-3 弾く弦の本数をコントロールしたコードストローク奏法

エレクトリックギターにおいて和音をピッキングする際に、全ての弦をピッキングしない状況が考えられる。図 B. 1 に登場する D/A や D/F# のようなコードを分数コードと呼ぶ。図 B. 1 のコードは、1 弦から 4 弦までは同じ音を演奏するが、5 弦や 6 弦を演奏するかどうかは響きの違いになる。D コードをコードストローク奏法で演奏する場合、分数コードと区別するためには、非利き手では 5 弦の A 音の弦振動を止められない場合があるため、5 弦の A 音を強く鳴らさないようにストロークを行う必要がある。しかし、A 音や F# 音は D コードの構成音に含まれるため、演奏者が自分自身の演奏音を聴いただけで 5 弦や 6 弦にピックが当たっているかどうかを判断することや、演奏者自身が全ての弦にピックを当てて、全ての弦を鳴らすことができているのかをリアルタイムで判断しながら演奏することが困難な場合がある。また、ストロークを行っているモーションの正面の映像からでは何本の弦にピックが当たっているか判断することは困難である。ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

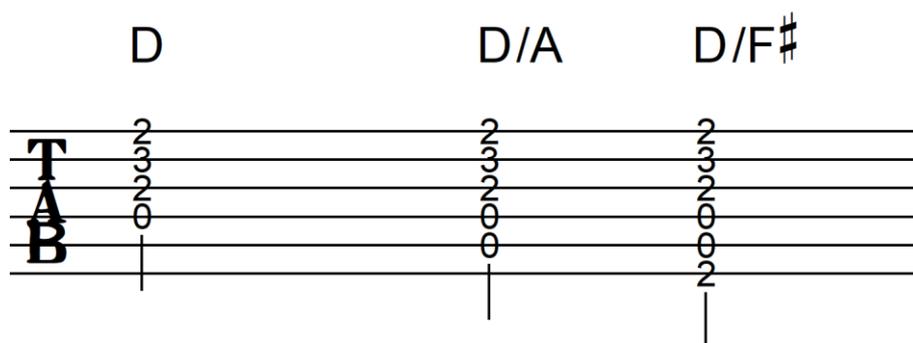


図 B. 1 分数コードの例

ギター演奏における利き手側の使い方という視点からは、肘中心回転を利用することで図 B.2 のようにピックが弦に対して平行運動的な軌道を描く直線軌道と、手首のひねりを利用してピックが弦に対して弧を描く回転軌道による演奏法が示されているが、コードストローク奏法でギターの複数の弦を同時に全て均等に弾くという視点からは、直線軌道が好ましく、回転軌道はコードで全弦を弾くのには不向きとされている[7].

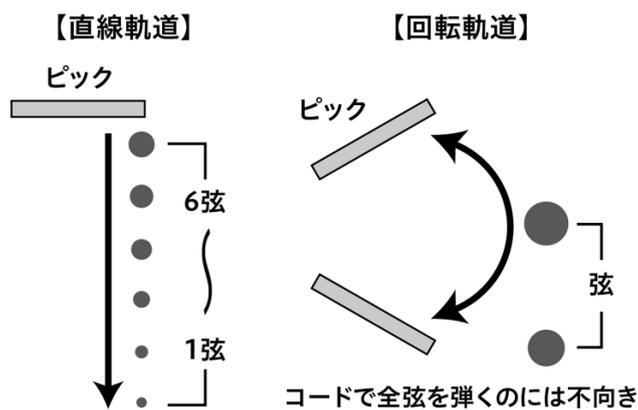


図 B.2 ピッキングの軌道

付録 B-4 ブラッシング時にピックが衝突する弦の本数

図 B.3 は、カッティング奏法と呼ばれている。この奏法は、非利き手の指を弦にわずかに触れさせることで、ピッキングした際の弦振動を抑制することと、弦を押弦することを繰り返しながら、利き手はストロークを行っていく。押弦された音はコードの音程が鳴り、弦振動が抑制された弦はピックが衝突することで打突音が鳴り、これらの組み合わせによってカッティング奏法は演奏される。打突音を鳴らす技法はブラッシングとも呼ばれている。

6 本全ての弦を鳴らすコードフォームによる全弦カッティング奏法を演奏するためには、ギター複数の弦を同時に全て均等に弾くという視点からは、直線軌道によるピッキングが好ましいと考えられる[7]。しかし、ブラッシング時の打突音には音程感が無くピックが衝突する弦の本数の把握は困難である。したがって、音から利き手の軌道を正しく指摘することは困難である。

また、正面からの映像ではストロークの演奏軌道を判断することは難しく、ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

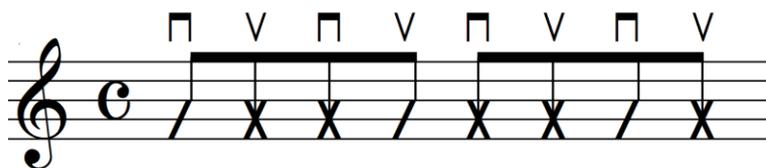
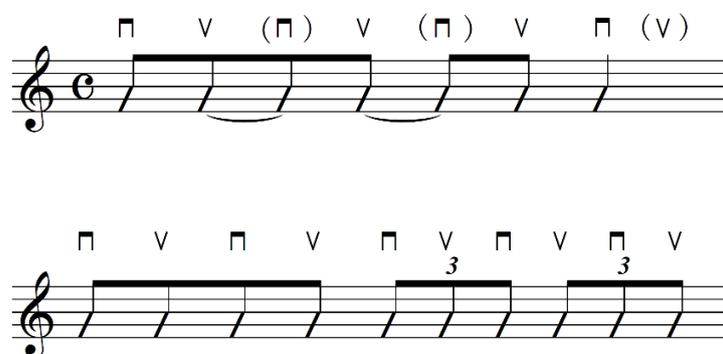


図 B.3 カッティング奏法の例

付録C. エレクトリックギターの主な単音ピッキング法

付録C-1 エレクトリックギターの単音オルタネイトピッキング

リズムに即した規則的なピッキングをオルタネイトピッキングと呼ぶ[8]. 図C.1は, エレクトリックギターにおいてオルタネイトピッキングを行った場合の楽譜である. オルタネイトとは, ダウンとアップのピッキングを交互に行う方法である. 仮に演奏しない音であっても手の動作を交互に継続させ空振りでのピッキング動作をすることによって, リズムを安定させる.



図C.1 オルタネイトピッキングの楽譜の例

よって, 図C.1の楽譜ではリズムの最小単位でオルタネイトピッキングすることを考える. 8分音符でオルタネイトする場合は, 4分音符を演奏する際はダウンで発音し, アップは空振りするということになる. 音符がタイでつながる場合は, タイで接続された音符は長さが付加されるのみで発音はしない規則となるが, この場合はタイの前の音符をピッキングして, タイの後の音符は空振りする規則となる. オルタネイトピッキングで注意する点が3連符リズムの演奏になる. 3連符は3つに割る性質上, ダウン→アップ→ダウンという弾き方と, アップ→ダウン→アップという弾き方に分かれる. 一般的にアップピッキングから始める弾き方は難しいとされており, 注意が必要となる. 拍に乗ることによって, リズムに最小限の秩序が生まれる[1]. 単音オルタネイトピッキングは, エレクトリックギターが音楽上の主役となるギターソロを弾く場合や, ギターリフと呼ばれる, 楽曲のイントロなどで曲の顔になるようなフレーズを弾く場合に用いられることが多いが, 発展的な演奏をするためには, 弦移動を行いながらオルタネイトピッキングが実行できることが望ましい. いきなりフレーズで練習すると, コードとリズムなど要素が複数あるために困難になる.

付録 C-2 弦移動とピッキング

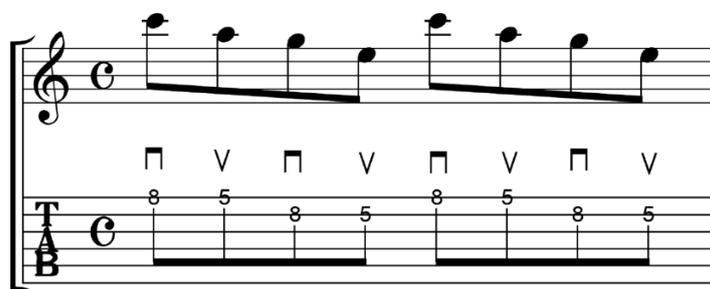


図 C.2 1本弦につき偶数回ピッキングをする例



図 C.3 1本弦につき奇数回ピッキングをする例

弦移動を伴うオルタネイトピッキングについては、図 C.2 のように 1 本弦につき 2 回などの偶数回ピッキングを行う場合と、図 C.3 のように 1 音だけ弦移動してすぐ戻るなどの奇数回ピッキングを行う場合で、若干弾き方が異なる。小林は、偶数回ピッキングを行う場合には、ピックがボディに向かうように直線的な動きを行い、ダウンピッキングを連打している感覚で、オルタネイトピッキングを行うことを推奨している[9]。弦を弾いた後にピックがボディから離れていくようなピッキングは動きに無駄が多く、1 本弦の偶数回ピッキングは、弦移動した際に必ずダウンから弾き始めることになるので、しっかりと弦の下に埋め込む感覚でダウンピッキングを行えば、次のダウンに移る瞬間に自然とアップピッキングが実行できるからである。

小林は、1 音だけ弦移動してすぐ戻るピッキングを行う場合には、アウトサイドピッキングとインサイドピッキングについて、1 音だけ隣弦を弾き、すぐに元の弦に戻って来る時の繰り返しポイントが膨らみ過ぎないことと、その際のピッキング軌道について、ピッキングの軌道が弦に対して高くなってしまうと無駄な動きが多くなるので、繰り返しポイントでスナップを利かせた無駄のないピッキングを行うことを推奨している[10]。

付録 C-3 高速単音ピッキング

エレクトリックギターが音楽上の主役となるギターソロを演奏するための単音の演奏方法も、コードストローク同様に重要である。ギターソロにおいては、コードストロークよりも利き手の演奏動作が速くなることが多い。

Matsushita は、肘中心回転角 θ の代わりに手首ひねり角速度 ω_x を用いることで、400bpm の速度での連続ダウンピッキングを認識できると報告している [11]。また、典型的なヘビーメタル楽曲では 1 分間に 400 回（秒速約 6.7 回、間隔 0.15 秒）を超えるスピードでのダウンピッキングを必要とすることが多く、力みが入りがちなエレクトリックギター演奏初心者にとって大きな障害の 1 つとなっていると報告がある [12]。

本研究では、125bpm において 1 拍で 3 回連続ダウンピッキング（間隔 0.16 秒）を演奏する程度の単音ピッキングを高速単音ピッキングと呼称する。高速単音ピッキングは多くの音楽ジャンルで使用される一方で、難易度が高いテクニックとして知られている。

付録 C-4 高速単音ピッキングによるトレモロ奏法

高速単音ピッキングを行うための演奏の基本はオルタネイトピッキングであり、同音を反復させるトレモロ奏法にもオルタネイトピッキングが使用される。

ピッキングは腕や手首の動作によって行われるが、加茂は、ピッキング動作をより高速化する際は図 2.2 における回転軌道によるピッキング動作を推奨し、特にアップピッキング時はドアノブを回すように動かすことが重要になると主張している [13]。小林は、肘を張った状態にせず手首から先を振るというよりは手首自体を横に振る感じで弾くこと、手首には力を入れず腕を振ったら自然にピックが触れたという感覚を持つピッキング法を推奨している [14]。また、ハミングバード・ピッキングと呼ばれている単音トレモロ奏法があり、小林は手首を 90 度近く曲げ、1 弦よりも下の位置に手首を置き、横からピッキングを行うことを推奨している [14]。SIMONZ は、手首をボディから完全に浮かせる弾き方は特に難しいので、利き手の薬指や小指をボディに軽くつけて、円を描くように手首を回すことを推奨している [15]。

ハミングバード・ピッキングはその性質上動作が高速になることが多く、無意識のうちに手首に力が入ってしまいがちで、円を描くように手首をひねる動作を制御しながら実行することは非常に困難である。

また、正面からの映像では高速単音ピッキングによるトレモロ奏法の演奏軌道を判断することは難しく、ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

付録 C-5 ダウンピッキングによるチョーキング音の強調

図 C.4 の楽譜は変則的なピッキングの一例である。オルタネイトピッキングでは、通常はリズムの最小単位でダウンとアップを行う。図 C.4 のように 16 分音符でオルタネイトピッキングを行う場合は、16 分音符を最小単位として考え、図 C.4 の括弧内のようなピッキングの規則で交互に演奏していく。この際、強い音色を得るために本来オルタネイトピッキングの規則ではアップピッキングになる箇所を、ダウンピッキングに変更して弾く場合がある。

チョーキングと呼ばれる非利き手で弦を持ち上げる奏法の際は、下から持ち上げた弦を上からダウンピッキングすることによって強いピッキングが可能になり、チョーキング音を強調する強弱表現が可能となる[16]。しかし、エフェクターを使用して、さらにアンプを大音量にした状況での演奏では音色が変わってしまうため、強弱の加減を音から判断することは困難である場合がある。また、ピックが弦に対してどのくらいの強さで接触しているのかを正面からの映像から判断することは難しく、ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、複雑な設備を必要とするため、広く導入することが難しくなる。

図 C.4 チョーキング音を強調する変則的なピッキングの例

付録 C-6 ブリッジ・ミュート・ピッキング

ブリッジとは、チューニングの安定やノイズの発生、弾き心地や音色にも影響を与えるパーツであり、オクターブ調整作業を行う時に扱う部分である。「弦アース」としての役割も果たしており、共振などが起こらないように強靱な設計が求められるギターパーツである[17]。



図 C.5 ブリッジ

利き手の手のひらの小指側の側面部分で、図 C.5 のブリッジ付近に軽く触れて弦をミュートする。ミュートした弦をそのままピッキングすると、音程感のあるスタッカート気味の音が出る。これがブリッジ・ミュート・ピッキングである[18]。スタッカート気味の音になることによって滑らかさを打ち消した表現ができる可能性がある。

Reboursiere らはナイロン弦のギターを使用してピッキングの録音データよりブリッジ・ミュート音と実音の識別実験を行い、ブリッジ・ミュート音は高い精度で識別できることを報告している[19]

一方で、エレクトリックギターにおいて様々なエフェクターを使用する場合は、ミュートの加減をギターアンプの音から判断することが困難な場合が考えられる。

また、ブリッジ・ミュート・ピッキングでは、ブリッジ付近に軽く触れたまま弦をピッキングするため、触れていない時と比較して抵抗感が発生し、利き手の動作にぎこちなさが発生する可能性があるが、ぎこちなさの度合を映像で伝えることは困難である。

ブリッジ・ミュート・ピッキングは、コードストロークにおけるダウンストロークの時、動きと同時に利き手の親指の付け根を使って弦に触れて音を鋭く止めてアクセントを付けるアクセント付きコードストローク奏法[6]と混同しやすい。コードストロークから単音のブリッジ・ミュートにもスムーズに切り替えができるようにするため、アクセント付きコードストロークでは手首を上げずにブリッジ付近に位置させておくことが推奨される。このため、演奏者を正面から撮影した動画でブリッジ・ミュート・ピッキングとアクセント付きコードストローク奏法を比較すると、それぞれにおける手の正しい使い方がわかりにくいという特徴につながっている。

付録D. ピッキングの主な指導方法

これまでの教育方法を取りまとめた文章を付録として付した。

付録D-1 ピッキング学習における問題

エレクトリックギターにおいて、利き手によるピッキング奏法は音の表現を決定する要の技術である。エレクトリックギター本体からの生音は小さく、アンプを使わずに練習していると音が聴こえにくいのでピッキングを強い音でのみ演奏するようになり、いざアンプを使って演奏するとピックと弦の弦抵抗により発生する打突音が大きくなりすぎてしまう問題が発生するため、アメリカのバークリー音楽大学で教鞭を執る藤田は、練習時にはアンプとエレクトリックギターをセットで使うこと、またアンプのボリュームは少し大きめに練習することを推奨している[20]。一方で、日本国内においてはマンション・アパートにおける楽器騒音の問題も多く、アンプを鳴らして練習ができる環境が十分に整備されているとは言い難い。ロックの王道であるマーシャルのアンプにはマスターボリュームがついていない型番もあり、歪んだ音で演奏するためには相当な音量でアンプを鳴らさないと良い音が得られない機種も存在する。また、ピックが弦に衝突する際の弦抵抗をギターレッスンで教えることは非常に難しく、教師が学習者に接近した状態でピッキングの感覚を指導したとしても、実際の弦抵抗とアンプが鳴った音を同時に指導するという事はギターレッスンの教育現場においても難しい。

ギターやベースの場合、利き手のピッキングと非利き手のフィンガリングを同時にイメージするより、利き手と非利き手に分けてイメージトレーニングを行った方が効率的である。実際に弦をはじくと弦の抵抗があるので思い通りに弾けないことがある。しかし、素振りピッキングなら弦の抵抗がないので理想的なピッキング動作になり、実際のプレイでは弾けないようなスピードで利き手を動かすことも可能であると佐久間は主張している[21]。

ピッキング学習に限定した場合、3つの問題が挙げられる。

スピード：弦が突っかかって速く弾けない

トラップ：いつもの動きの癖につられて本来の動きができない

ニュアンス：微妙なリズムのニュアンスの違いが表現できない

これらを身につけるにあたり、一般的には自分の好きな曲を弾きながらピッキング練習をすることになるが、曲を覚えるためにはコードやフレーズをまず覚えなければならず時間がかかってしまう。曲の中でどのポイントがピッキング練習に適しているかを判断することも、学習者には困難であると考えられる。教師がオリジナルの練習課題曲を作るという

可能性もあるが、学習者には曲の好みもそれぞれあるので、教師が全ての学習者の好みを満たすための練習課題曲を設計するということは困難で、人件費や制作時間も考慮すると、学習者の数に応じた分の練習課題曲を個別に展開するということは考えにくい。

現在、以下のようなギターレッスンがピッキングの指導方法として主に用いられている。

付録 D-2 課題フレーズ・課題曲再現型

教則という言葉が当てはまりやすい分野である。ギター教則本や教則 DVD を利用した指導法である。教師は、教則本の楽譜を学習者に配布し、再現させるように指導を行っていく。この場合、教師には Teacher としての能力よりも、Facilitator としての能力が必要になる。つまり、その学習者に対して、どのような課題を推奨することが最も有効なのか判断することが重要なポイントとなる。指導法については教則本や DVD に記載されているメソッドに沿って進行していくことが通常となる。教則本の著者が教師を兼務している場合は特に有効となる方法である。

付録 D-3 レコーディング型レッスン

スタジオなどで教えるギターレッスンにおいては、DAW (Digital Audio Workstation) によるレコーディング設備を所有している場合、学習者に録音をさせながら目標とする演奏について指導していく事例がある。実際の音楽制作に近い環境で教えられるメリットがあることと、設備を教師と学習者それぞれが所有している場合は遠隔指導にも発展しやすい可能性があるレッスン手法だが、プロの演奏においてもパンチインというフレーズを一回で弾かず、弾き切れないところは分けて録音していくという手法が使われる場合があるため、その録音手順が学習者自身の能力向上に適切なのか判断が難しい場合がある。また、音質を重視するためにその原因に戻ることが難しく、録音という緊張した状態で演奏するために、演奏フォームなどは考慮されにくい状況が発生しやすい。

付録 D-4 教師とのセッション型レッスン

教師が生演奏で伴奏をしながら、学習者が演奏するという方式である。メトロノームやドラムマシンなどが併用されることもあるが、教師の生演奏で気分が盛り上がるので合奏感覚で演奏をすることができて、メンタル的にも高揚感を感じながら演奏ができるので良いイメージを掴みやすいメリットがある。また、DAW の録音方式によっては、このセッション自体を教師と学習者、それぞれの演奏を個別にレコーディングしておいて後から振り返るということも可能である。生演奏をバックに一回で弾き切れているかどうか？というチェックができるのが利点であるが、教師自身が演奏をしているために学習者の演奏を聞き逃

してしまう可能性がある。レコーディングまたは録画映像で後から振り返ったとしても、音や映像で捉えきれない要因については確認できない可能性がある。

付録 D-5 フォームチェック型レッスン

映像録画を使用して、演奏フォームを確認していく方式である。原因を探っていく探究型レッスンのため、曲を弾き切れない初心者に対しても、また曲がすでに弾けている上級者に対しても指導可能な方式である。多くの音楽教室や音楽学校には、レッスン教室に鏡が設置されており、自分の演奏を鏡で見ることでフォームを確認させることが多い。Webカメラなどを教師と学習者の端末それぞれにつければ遠隔での指導も可能になるメリットがあるが、映像で確認することができない領域の演奏に関しては指導することが難しくなる。ビデオカメラの数を増やしてマルチアングルでチェックしていくという可能性が考えられるが、設備が複雑になっていき広く導入することが難しくなる。

付録 D-6 カウンセリング型レッスン

学習者が抱えている個別の悩みに対して教師が回答していく指導法になる。オーダーメイド的レッスンや、クリニック型のレッスンが可能になる一方で、教師の経験値を伝えていく指導法になるので、経験値が不足している教師には難しくなることと、教師と学習者の相性によって質問がしにくくなるケースもある。また、学習者側が何を質問したら良いかわからないというケースの場合、教師側の指導がマンネリズムに陥る可能性がある。

付録 D-7 学習者同士による合奏型レッスン

グループレッスンを行っている場合、学習者同士で片方が伴奏、片方がソロといった形で役割を決めて演奏するなど、各人に役割を持たせながらレッスンを進行する場合がある。この場合は、発表会などイベントを行いやすいので、学習者側が高揚感を持ってレッスンに参加することができる。また、全員が同じフレーズを弾く場合もある。この場合は、1人で演奏すると弾けないのだが、全員で演奏すると他の人の演奏につられて弾くことによって、弾いている実感が持てるようになるという、ゴスペル歌唱やダンス指導に近いような形のレッスンになる。デメリットとしては、他の学習者に影響を受けすぎてしまうので、他と自分を比較してしまうことで思い悩んでしまう場合があることや、本当に自分自身の演奏は弾けているのか弾けていないのかが明らかでない場合が考えられることである。

付録D-8 著名人アナライズ型レッスン

有名アーティストの弾き方を分析しながら自分に取り入れていく方式のレッスンである。インターネット上の動画コンテンツを駆使して学べる状況が増えてきているため、研究はしやすくなってきている一方で、例えば外国人の場合など、本人に直接インタビューできない環境の場合は、音や映像から類推する域を出ないことと、アーティスト本人が直接の指導者であったとしても、指導者自身でもどうやって演奏しているかを理解できていないまま演奏している場合もあり、そのような状況の中、アーティスト本人の真似をした結果、誰も指導ができないので意図した結果と違う方向の演奏に陥ってしまう場合も考えられる。また、指や身体の大きさ、使用楽器が異なっているため、無理をしてアーティスト本人に近づけた結果、自分自身には合わないフォームになってしまう危険性がある。

付録D-9 練習用ピック開発による弦抵抗緩和型レッスン

ピックを持ち、弦に対して上から下に振り下ろすダウンピッキング、下から上に振り上げるアップピッキング動作をすることによって、ギターやベースは音を鳴らすことができるが、実際にギターを弾くとピックが弦に引っかかってしまい弦の抵抗感を感じて演奏できなくなる事例があると加茂は主張する[22]。そこで、まずはピックを持った状態を作り、空中でダウン・アップの動作をしながら機械のメトロノーム音に素振りピッキング動作を合わせていく。この場合は、弦抵抗が存在しないので動作のみに集中することができる。慣れてきたら、ビニール袋のような薄く抵抗がほとんど無い素材でピックを自作し、弦に当てていく。音は鳴らないが、ピックと触れる感覚を得ることができる。R. A. S. 式ピックと呼ばれる抵抗感を極めて無くしたピックで練習する方法[23]や、R. A. S. 式ピックテープと呼ばれる、ピックに両面テープを貼ることでピックをずれにくくする練習方法[24]も加茂によって提案されている。

付録D-10 フレーズ創作型レッスン

ポピュラー音楽の場合、オリジナル曲に向かう指導が考えられ、フレーズを創作しながら必要なテクニックを学んでいく場合がある。弾きたいフレーズは決まっているのだがピッキングをどのように実行したら良いかわからない場合、教師と一緒にフレーズを考えながら同時にピッキングの練習をしていく可能性が考えられる。創作意欲を向上させることができる半面、フレーズを考えながら弾いているために、ピッキングが不安定になり、結果、現状の学習者の技量に合っていないフレーズを無理やり練習するという状況に陥ってしまう可能性がある。今弾けるフレーズと、これから弾きたいフレーズの差別化がしにくくなるレッスンであるとも言える。

付録 D-11 3次元触覚/力覚インターフェースデバイスを活用したレッスン

図 D.1 のように、3次元触覚/力覚インターフェースデバイスを用いたエレクトリックギターピッキング奏法練習ツールによって、ギター教師が指導不可能であったピックが弦に衝突した時の体感を、バーチャルリアリティ技術を活用して伝達する試みが行われている。ピッキング時の弦抵抗についてレクチャーを行った上で、ツールを使い弦抵抗の感覚を伝達、ツールを使う前と後での感覚の変化について主観評価とともに、利き手側手首に演奏運動を計測する運動センサデバイスを装着し運動データでの分析も行ったところ、

- ・ツール使用後は、ピックが弦に引っかかる回数や強さが有意に減少している
- ・ツール使用後に、分析パラメータとして手首ひねり回転軸まわりの角躍度が一定値へと接近している

の2点の可能性を見いだすことができたと報告がある[25].



図 D.1 3次元触覚/力覚インターフェースデバイスを用いたピッキング奏法練習ツール

付録D-12 スマートフォンアプリの画面を素振り動作するピッキングレッスン

ギター初心者にはピッキング奏法でリズムを指導する場合、実際にギターを演奏させようとするときピックが弦に衝突する弦抵抗が要因で、音を鳴らすことが目的となりピッキング奏法を安定化させることが困難になる。図 D.2 のように楽曲やメトロノームに合わせてエアギターの動作を行いながら動作を可視化し、ピッキング練習ができるアプリケーションが考案されている。授業の中で使い、アップピッキング側に対して回外回旋運動における角速度が上昇している評価結果や学生からの主観評価、著名ミュージシャンへの調査から、提案されたアプリケーションによって演奏者に無意識についている癖を取り払い、ピッキング動作に人差し指を使ったアクセント奏法を取り入れられる有用性が報告されている [26].



図 D.2 スマートフォンアプリの画面を素振り動作するピッキング練習ツール

<付録 参考文献>

- [1] 石桁真礼生, 末吉保雄, 丸田昭三, 飯田隆, 金光威和雄, 飯沼信義, 楽典 —— 理論と実習, 音楽之友社, p. 40, 1965.
- [2] Kelly SIMONZ, 超絶ギタリスト養成ギプス 天下無双の教速 DVD 編, リットーミュージック, p. 13, 2010.
- [3] トモ藤田, 生きたグルーブでギターが弾ける本, リットーミュージック, pp. 73-77, 2010.
- [4] 新井純, 池田寛, 江尻憲和, 他, 最新音楽用語辞典, リットーミュージック, p. 183, 1998.
- [5] 佐久間正英, 直伝指導! 実力派プレイヤーへの指標, リットーミュージック, pp. 24-57, 2013.
- [6] ドレミ楽譜出版社, ジャズ&フュージョン/ギター・マスター, ドレミ楽譜出版社, pp. 21-22, 1998.
- [7] 加茂フミヨシ, R. A. S. 式ピッキング 速弾き攻略のための究極メソッド, リットーミュージック, pp. 19-29, 2013.
- [8] 成瀬正樹, はじめてのエレキ・ギター, リットーミュージック, p. 27, 2011.
- [9] 小林信一, 地獄のメカニカル・ギター・ドリル 狂気の技術鍛練編, リットーミュージック, p. 40, 2018.
- [10] 小林信一, 地獄のメカニカル・ギター・ドリル 狂気の技術鍛練編, リットーミュージック, p. 48, 2018.
- [11] S. Matsushita, A Wrist-worn Motion Evaluation System for Fast and Powerful Down Picking of Heavy Metal Guitar, Proc. of the 23rd Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC '19), pp. 145-149, 2019.
- [12] 松下宗一郎, 幸田有里, 近藤百佳, 溝上大輝, 甲斐美月, メタルギタリストのための高速ダウンピッキングトレーニングシステム, 情報処理学会シンポジウムシリーズ・インタラクシオン 2018, pp. 312-313, 2018.
- [13] 加茂フミヨシ, R. A. S. 式ピッキング 速弾き攻略のための究極メソッド, リットーミュージック, p. 48, 2013.
- [14] 小林信一, 地獄のメカニカル・ギター・ドリル 狂気の技術鍛練編, リットーミュージック, p. 50, 2018.
- [15] Kelly SIMONZ, 超絶ギタリスト養成ギプス, リットーミュージック, p. 18, 2009.
- [16] 加茂フミヨシ, 速弾きがうまくなる理由 ヘタな理由, リットーミュージック, p. 118, 2007.

- [17] エレキギター博士, ギターブリッジの種類・交換について, <https://guitar-hakase.com/3768/> (参照日 2022.04.01)
- [18] 野村大輔, ギター奏法大図鑑, リットーミュージック, p.68, 2007.
- [19] Loïc Reboursiere, Otso Tapio Lähdeoja, Thomas Drugman, Stéphane Dupont, Cécil Picard-Limpens, Nicolas Riche, Left and right-hand guitar playing techniques detection, Proc. of the Int. Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME), 2012.
- [20] トモ藤田, 耳と感性でギターが弾ける本, リットーミュージック, pp.27-31, 2010.
- [21] 佐久間正英, 直伝指導! 実力派プレイヤーへの指標, リットーミュージック, p.57, 2013.
- [22] 加茂フミヨシ, R.A.S. 式ピッキング 速弾き攻略のための究極メソッド, リットーミュージック, pp.111-125, 2013.
- [23] 加茂フミヨシ, How to improve Your Picking on a low budget, <https://www.youtube.com/watch?v=7wvEu0C07oo> (参照日 2022.04.01)
- [24] 加茂フミヨシ, R.A.S. 式ピックテープ「POWER CONTROL」を活用して脱力をマスター!, <https://www.youtube.com/watch?v=LUZGMkEeYtc> (参照日 2022.04.01)
- [25] 加茂文吉, 3次元触覚/力覚インターフェースデバイスを用いたエレキギターピッキング奏法練習ツールの開発, 第29回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ(DPSWS2021) 論文集, pp.195-196, 2021.
- [26] 加茂文吉, ギターピッキング動作を可視化しリズム練習ができるメトロノーム, DHU JOURNAL, Vol.08, pp.31-39, 2021.