



# 打楽器演奏のための情報提示技術に関する研究

菅家, 浩之

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2017-09-25

(Date of Publication)

2018-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7004号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007004>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

打楽器演奏のための  
情報提示技術に関する研究

平成 29 年 7 月

神戸大学大学院工学研究科

菅家 浩之



## 内容梗概

打楽器は全ての楽器の中で最も古い歴史をもち、祭事、舞踊、他者とのコミュニケーションなどにおいて用いられる道具として扱われ、様々な種類の打楽器が誕生してきた。打楽器の発展に伴い、様々な音楽ジャンルで打楽器が利用されるようになり、様々な奏法やリズムが生まれてきた。近年では、コンピュータの処理能力や記憶装置の発展に伴い、打楽器演奏に情報技術を取り入れた電子打楽器やアプリケーションが開発されている。また、打楽器演奏の学習においては音楽に同期して複数の情報刺激を演奏者に提示するシステムを用いて打楽器演奏の学習を支援する方法などが提案されている。演奏内容を記録したりそれらのデータを再利用する環境においては、電子打楽器を用いて演奏内容をリアルタイムに記録するアプリケーションや記録した打楽器の音楽ファイルを音響解析技術を用いて電子譜面を採譜するシステムなどが登場している。

しかし、これらの情報技術を利用したシステムには多くの問題点がある。例えば、近年の電子打楽器においては演奏者が従来培ってきた演奏技術を活かせないシステム設計が行われていることや、学習支援において最適な情報提示が行われていないといった問題や、記録した演奏情報がリアルタイムに行えないといった点、採譜において付加される演奏情報が十分でないといった問題があげられる。

本研究では、打楽器演奏における「演奏・学習・記録」という3つの要素に関する支援技術の問題点を挙げ、それらを解決するためのシステムを提案する。

本論文は5章から構成され、その内容は次の通りである。まず、第1章で序論として研究の背景と目的について述べる。第2章では、打楽器演奏における演奏支援を目的とし、演奏技術を考慮した叩打識別を行うドラムについて述べる。一般的な演奏で用いられるドラムセットは持ち運びが不便であったり、設置に広いスペースを必要とする。また、近年ではモーションセンサやカメラを用いて空間上の仮想打面を叩打することで擬似的にドラム演奏を行う仮想ドラムが開発されており、これらは高い可搬性をもつが、実際に打面が存在しないため、繰り返し叩打することや複雑な奏法や音色が再現できず、仮想ドラム単体では満足いく演奏をすることが難しい。そこで本テーマでは両者の利点を活かすために、実ドラムと仮想ドラムを統合し演奏可能なシステムを提案する。システムは加速度・角速度センサを搭載したドラムスティックを用いて、演奏者が仮想ドラムと実ドラムのどちらを叩打したか識別する。提案システ

ムは演奏において仮想ドラムの叩打と識別したときのみ、仮想ドラムに割り当てた音色の音を出力することで、演奏者は従来培ってきた演奏動作と同じ奏法で演奏が行える。また、叩打動作を早期的に識別する手法を適用することで仮想叩打における電子音が遅延することなく出力される。提案システムを用いてドラム演奏者による実運用を行い、システムの有用性を検証する。

第3章では、打楽器演奏における学習支援を目的とし、打楽器の演奏フレーズを演奏者に内在化させるための打楽器学習支援手法について述べる。従来の打楽器演奏の学習においては電子譜面や音楽ゲームなどを用いた方法や叩打するタイミングに合わせて振動刺激を与えるシステムなどが提案されてきた。これらの学習方法においては学習者は実際に打楽器を叩く動作をしながら音声や譜面、振動といった情報提示を受けて訓練する方法が採用されている。しかし、複雑な演奏動作を行う打楽器演奏においては、叩打動作をすることでシステムから提示される情報の知覚を妨げている可能性がある。そこで、本テーマでは学習者に打楽器のフレーズの演奏情報を正しく取り込ませる(内在化させる)ために、学習過程において情報提示を受けるフェーズと実際に叩打動作を行うフェーズを分離する学習方法を提案する。提案手法を実現するために視覚、聴覚および触覚による情報提示を行うシステムを構築し、プロトタイプシステムを用いて提案手法による学習方法の有用性の検証をする。

第4章では、打楽器演奏における学習および記録の支援を目的とし、選手情報を付加したドラム譜面作成システムについて述べる。ドラム習熟者はアクセントの位置や負担の少ない演奏動作を考慮して、それぞれの打楽器を選手(左右どちらの手で叩打するのか)を意識しながら演奏を行う場合がある。しかし、一般的なドラム譜面では、拍ごとに左右どちらの手で叩打するかという情報は付加されていない。また、リアルタイムで演奏した選手情報を付加した譜面を自動的に採譜するシステムはない。したがって、本章ではドラム演奏において選手情報を付加した譜面を採譜するシステムを提案する。提案システムは電子ドラムのMIDI情報および第2章で開発したドラムスティックを用いて叩打時の角速度の情報を用いて選手を識別する。提案システムを利用することで、ユーザは演奏をしながら選手情報を採譜し、演奏後の確認や選手に関するデータを他のユーザと共有することができる。また、提案システムのプロトタイプを用いて、ドラム習熟者によるシステムの有用性を検証する。

第5章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

# 目次

<b>1</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	研究目的	3
1.3	本論文の構成	5
<b>2</b>	<b>実ドラムと仮想ドラムを統合するための演奏システム</b>	<b>8</b>
2.1	まえがき	8
2.2	関連研究	9
2.3	システムの設計	11
2.3.1	仮想ドラムの構成	14
2.3.2	叩打動作の識別手法	15
2.3.3	閾値の選定	17
2.3.4	仮想叩打の拡張機能	19
2.3.5	誤認識における出力音の切断	21
2.4	実装	21
2.5	評価	23
2.5.1	叩打識別における精度評価	23
2.5.2	仮想叩打の拡張機能における精度評価	26
2.6	実運用	29
2.7	むすび	32
<b>3</b>	<b>フレーズ内在化のための打楽器学習支援手法</b>	<b>35</b>
3.1	まえがき	35
3.2	関連研究	36
3.3	設計	38
3.3.1	学習支援手法の方針	38
3.3.2	演奏情報の提示	40
3.4	実装	41
3.5	評価	42

3.5.1	実験 1: 触覚提示の影響の評価 . . . . .	43
3.5.2	実験 2: 提案手法の影響の評価 . . . . .	48
3.6	むすび . . . . .	52
<b>4</b>	<b>選手情報を付加したドラム譜面作成システム</b>	<b>55</b>
4.1	まえがき . . . . .	55
4.2	関連研究 . . . . .	56
4.3	提案システム . . . . .	58
4.3.1	システム構成 . . . . .	59
4.3.2	選手の識別手法 . . . . .	60
4.3.3	選手情報の記録 . . . . .	66
4.4	実装 . . . . .	68
4.5	評価 . . . . .	69
4.5.1	実験 1: 認識精度の検証 . . . . .	69
4.5.2	実験 2: システムを使った学習による演奏の影響 . . . . .	72
4.6	むすび . . . . .	75
<b>5</b>	<b>結論</b>	<b>78</b>
5.1	本論文のまとめ . . . . .	78
5.2	検討課題 . . . . .	79
	謝辞	82
	参考文献	84



# 1 序章

## 1.1 研究の背景

打楽器はあらゆる楽器の中で最も古く誕生したといわれ、古くから祭事、舞踊、他者とのコミュニケーションなどにおいて用いられる道具として扱われてきた。音楽の発達にともない、様々な種類の打楽器が誕生してきた。その中で、様々な音楽ジャンルで打楽器が利用されるようになり、演奏において多くの奏法やリズムが生まれてきた。近年の打楽器演奏では、オーケストラのように個々の打楽器を演奏者がそれぞれ担当し、演奏するものや、バンド演奏で用いられるドラムセットのように複数の打楽器を1人で演奏するようなものがある。これらの打楽器演奏では様々な奏法やリズムを学習し、譜面を作成し、様々な音色の打楽器を用いて演奏表現を行う。

近年、コンピュータの発展にともない、打楽器演奏に情報技術を取り入れた電子打楽器やアプリケーションが開発されてきた。また、MIDI(Musical Instrument Digital Interface)[1]といった電子楽器の演奏データをデジタル転送するための共通規格が開発され、電子楽器の演奏や照明のコントロールなど多くの場面で利用されている。さらに、打楽器の演奏の学習を目的とした、学習支援を行うアプリケーションや演奏動作の解析を行うシステムが生まれている。加えて、電子打楽器の登場にともない、演奏内容をリアルタイムに記録するアプリケーションが生まれるなど、演奏の記録支援を行えるようになった。また、記録した演奏データをインターネット上で共有できる環境が登場している。以下に、打楽器演奏における「演奏・学習・記録」という要素に関する支援技術の例と、その問題点について述べる。

- 演奏支援

コンピュータの演算装置や記憶装置の発展にともない、さまざまな電子打楽器が登場した。電子打楽器によって演奏者の音色を拡張や可搬性の問題を防ぐシステムが提案されてきた。例えば、電子ドラム TD-50K[2] や電子パーカッション SPD-SX[3] などでは内蔵された様々な電子音源やユーザがサンプリングした音源を用いて演奏が行える。このように、これまでのアコースティックドラムでの演奏では行えなかった、電子音源と組み合わせた演奏が行えるなど演奏表現の拡張が行えるようになった。また、持ち運びやセッティングといった可搬性の低下を

防ぐために、実際に打面を必要とせず空間上でドラムスティックを振ることでドラム演奏が行える仮想ドラムがこれまでに開発されてきた。AeroDrum[4]は演奏者の動作をカメラにより解析し、ユーザは実際に打面を必要とせず擬似的にドラム演奏が行える。

しかし、アコースティックドラムや電子ドラムのように実際に打面を叩打して演奏する実ドラムでは、持ち運びやセッティングが不便な上に、演奏中に数回しか使用されない打楽器が存在するシチュエーションがある。また、仮想ドラムにおいては電子音源による音色の拡張が行える一方で、実際に打面が存在せず物理的な叩打のフィードバックがないため、繰り返し叩打することや複雑な奏法が利用できない。したがって、仮想ドラム単体での演奏は難しい。

- 学習支援

近年、スマートホンやタブレット端末の普及にともない、楽器演奏において学習支援を行うアプリケーションが開発されている。例えば、V-Drums Friend Jam[5]はドラム演奏の学習支援アプリケーションであり、楽曲の音声に同期した電子譜面をユーザに提示して演奏内容を学習させる機能や演奏の採点を行う機能などを持つ。また、視覚提示や聴覚提示だけでなく課題フレーズに合わせて触覚提示を行うことで、ドラム演奏の学習支援を行うシステムも提案されている。このように打楽器演奏における学習支援では複数の情報提示を用いた手法が提案されてきた。これらの学習支援システムでは学習者は実際に打楽器を叩きながら、電子譜面や振動刺激といった情報提示を受けている。従来の学習方法ではこのように「身体を動かしながら学ぶ」ことがよいという前提の元で学習システムが一般的に構築されている。

しかし、打楽器演奏は両手を異なるタイミングで動作させ、強弱をつけるなど複数の演奏動作を必要とするため、叩打動作を行いながら情報提示を受けて学習する場合、どちらかのタスクに注力し、2つのタスクを効率的に学習できない可能性がある。このとき、学習者は受けている情報提示を正しく知覚できていないという問題がある。

- 記録支援

電子楽器の登場やコンピュータの発展にともない、楽曲の制作や演奏内容の記録の支援を行うアプリケーションやコントローラが開発されてきた。打楽器の楽曲

制作においては、電子ドラムや電子パーカッションなどを用いて演奏中の MIDI 情報を DAW ソフトに送ることで演奏内容の記録が自動的にできるようになった。また、音声データを MIDI 情報に変換することで採譜を行うアプリケーションが提案されている。

しかし、これらのシステムでは演奏した楽器の種類、音高や強弱は記録できるが、どちらの手で叩打したか (選手) といった演奏動作に関する情報は記録していない。打楽器演奏の学習において演奏者はアクセントをつけた演奏や負担の少ない動作を行うために、選手を記録したり、他人の選手を学習する場合がある。選手情報を記録する場合は演奏者が手作業で譜面に書き込む場合やアプリケーションを利用して入力する場合があるが、これらの採譜方法は演奏後に行う必要がある上、時間を要する。一方で、選手情報をリアルタイムに採譜するシステムはこれまでに存在していない。

## 1.2 研究目的

本研究では、これらの問題を解決するために、打楽器演奏における「演奏支援・学習支援・記録支援」の3つの要素に着目し、打楽器演奏のための支援技術の構築を目的とする。

### ● 演奏支援

打楽器演奏において、音色の拡張や可搬性の向上を行うために空間上を叩打することでドラム演奏が行える仮想ドラムが提案されてきた。しかし、仮想ドラムでは物理的な打面が存在せず、空中で叩打動作を行うため、アコースティックドラムのようにドラムスティックが跳ね返る現象が存在しない。このため、演奏者はドラムロールなどのように早いテンポで繰り返し仮想の打面を叩打することや、リムショットなど複雑な奏法を再現することが難しい。したがって、仮想ドラム単体での利用では演奏者が従来培ってきた演奏技術を活かすことが難しい。

そこで、本研究ではこれらの問題を解決するために、実ドラムと仮想ドラムを統合するためのシステムの構築を目的とする。両者がもつ可搬性と演奏性を実現するために、実ドラムおよび仮想ドラムの叩打における演奏動作の識別をめざす。

- 学習支援

打楽器演奏の学習手法として、映像や音声、振動といった複数の情報刺激によって演奏内容を提示するシステムが提案されてきた。一般的に、これらのシステムの利用方法は実際に演奏動作を行いながら情報提示を受け取るものであった。しかし、この学習方法では、学習者は実際に叩打動作を行うタスクと情報提示を受け取るタスクのどちらかに注力してしまい、システムから提示されている正しい演奏内容を知覚できていない可能性がある。

したがって、打楽器演奏においては外部から与えられるフレーズの演奏情報を学習者の内部に取り込む(以降、内在化と呼ぶ)には、情報提示を受けるフェーズと叩打動作を行うフェーズを分離して学習することが、効果的であると考えた。本研究ではフレーズ内在化のための打楽器学習支援手法を提案し、情報提示を行うシステムを構築することを目的とする。

- 記録支援

打楽器演奏者にとって演奏内容を記録し、それらの演奏情報をトレーニングに再利用することや、他人が記録した演奏情報を共有することは技術向上のための学習方法の一つである。ピアノ演奏やギター演奏においても、技術向上のために指導者がフレーズに対する正しい運指を訓練させる場合がある。ドラム演奏においても同様に、演奏で記録する情報の一つとして、ドラム演奏者はさまざまなフレーズにおいて効率的な演奏を行うために、それぞれの打楽器を左右どちらの手で叩打するか(運手)という情報を学ぶ場合がある。運手情報を譜面に付加するには、演奏者が手作業で譜面に情報を書き込むことや楽曲制作ソフトなどを用いてそれらを手入力する必要がある。このため、運手を記録する場合、時間を要するといった問題や誤った入力をするといった問題がある。しかし、これまでにドラム演奏においてリアルタイムで運手情報を記録し、それらを付加した譜面を自動的に採譜するシステムはなかった。

したがって、本研究ではドラム演奏における演奏情報の記録を目的とし、ドラム演奏においてリアルタイムに運手情報を付加した譜面を採譜するシステムを構築することめざす。

### 1.3 本論文の構成

本論文は5章から構成され、その内容は下記の通りである。

まず、第2章では、打楽器演奏における演奏支援を目的とし、演奏技術を考慮した演奏者の叩打識別を行うドラムについて述べる。ドラムセットは持ち運びが不便であったり、設置に広いスペースを必要とする。また、モーションセンサやカメラを用いて空間上の仮想打面を叩打することで擬似的にドラム演奏を行う仮想ドラムは、高い可搬性をもつが、実際に打面が存在しないため、繰り返し叩打することや複雑な奏法や音色が再現できず、仮想ドラム単体では満足いく演奏をすることは難しい。提案するシステムは実ドラムと仮想ドラムを統合することで、仮想ドラムの叩打と識別したときのみ、仮想ドラムに割り当てた音色の音を出力することで、仮想ドラムと実ドラムの利点を併せもつドラムを実現する。提案システムを用いてドラム演奏者による実運用を行い、システムの有用性を検証した。

第3章では、打楽器演奏における学習支援を目的とし、演奏フレーズを内在化させるための打楽器学習支援手法について述べる。従来の電子譜面や音楽ゲームなどを用いた学習方法では学習者は実際に打楽器を叩く動作をしながらシステムの情報提示を受けるため、複雑な演奏動作を行う打楽器演奏においては、その動作がシステムが提示する正しい演奏情報を知覚することを妨げている可能性がある。本章では学習者が演奏情報を正しく取り込むために、学習過程において情報提示を受けフレーズを内在化させるフェーズと叩打動作を実際に行うフェーズを分離する学習方法を提案する。また、提案手法を実現するために視覚、聴覚および触覚による情報提示を行うシステムを構築し、プロトタイプシステムを用いて提案手法の有用性の検証を行った。

第4章では、打楽器演奏における学習および記録の支援を目的とし、選手情報を付加したドラム譜面の作成システムについて述べる。ドラム習熟者はアクセントの位置や演奏動作の負担を考慮して、それぞれの打楽器を左右どちらの手で叩打するのか意識しながら演奏を行う。しかし、一般的なドラム譜面では、拍ごとに左右どちらの手で叩打するかという情報は付加されていない。一方で、リアルタイムで演奏した選手情報を付加した譜面を自動的に採譜するシステムはない。したがって、本章では叩打における選手情報を付加した譜面を採譜するシステムを提案する。提案システムのプロトタイプを開発し、ドラム演奏者によるシステムの有用性を検証した。

第5章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

なお、第2章は、文献 [78, 79, 80, 81, 82, 83, 84] で公表した結果に基づき論述する。  
第3章は、文献 [85, 86, 87, 88] で公表した結果に基づき論述する。  
第4章は、文献 [89, 90, 91, 92] で公表した結果に基づき論述する。



## 2 実ドラムと仮想ドラムを統合するための演奏システム

### 2.1 まえがき

ドラムセットはスネアドラム，バスドラム，シンバルなどさまざまな打楽器の組合せから構成される．ドラム演奏者は楽曲に合わせてそれらを自由に組み替え演奏を行う．また，コンピュータの発展に伴い，叩打の振動を電気信号に変換して音を出力するエレクトリックドラムが開発されてきた．しかし，個々の打楽器は大きく重いため持ち運びが不便であったり，設置に広いスペースを必要とする．SPD-SXは複数の電子パッドを平面上に並べ，各パッドに固有の音色が割り当てられている省スペースな電子ドラムであり，これまでもドラムセットと電子パッドを組み合わせた演奏が実践されてきた．しかし，既存のドラムと異なるデザインであることからドラム演奏で培った演奏技術を活かすことが難しいといったことや，演奏者が好む位置に電子パッドが配置できないという問題がある．例えば，実ドラムのスネアドラムの上に電子パッドを配置して演奏することは難しい．また，演奏者の周囲に電子パッドを並べることによって，視覚が遮られ他の演奏者との連携が取りづらいという問題も挙げられる．

一方で，物理的に打面のあるドラム楽器(以降，実ドラムと呼ぶ)だけではなく，近年ではAeroDrumsやFreedrum[6]，V-beat Air Drum[7]，Wii Music[8]，WorldBeat[9]，Virtual Xylophone[10]，Lightning[11]などといった空間上の仮想打面を叩打することで擬似的にドラム演奏を行う仮想ドラムが提案されている．仮想ドラムは実打面を必要としないため設置場所の制限が少なく，出力音には電子音源が用いられているため，ユーザは豊富な音色を選択できる．しかし，空間上の仮想打面を叩打する仮想ドラムでは実打面を叩打したときのような物理的なフィードバックがないため，演奏者はスティックを振った後に自力でスティックを止める必要があり，正確なリズムでの演奏は難しい．また，ドラムロールやリムショットといった実ドラム特有の演奏法が再現できないため，演奏における表現力が低下する．したがって，実ドラムに慣れているドラム演奏者が仮想ドラムを使う場合，演奏性や表現力が著しく低下するため満足のいく演奏をすることは難しい．このように，仮想ドラムおよび実ドラムともにそれぞれ利点欠点があるが，ドラムセットの各打楽器は使用頻度に偏りがあるため，使用頻度の

少ない打楽器に対して仮想ドラムを適用すれば性能の低下を最小限に抑えた上で可搬性を高められ、仮想ドラムと実ドラムの両者の利点を併せもつことができる。

そこで、本研究では実ドラムおよび仮想ドラムの叩打動作を識別することで実ドラムと仮想ドラムを統合するシステム「Airstic Drum」を構築する。

Airstic Drum はドラムスティックにモーションセンサを搭載し、加速度および角速度の変化の違いから実ドラムの叩打および仮想ドラムの叩打をリアルタイムに識別する。また、仮想ドラムの叩打と識別したときのみ、仮想ドラムに割り当てた音色の音を出力することで、仮想ドラムと実ドラムの併用を実現している。

以下、2.2節で関連研究について説明し、2.3節で設計について述べる。2.4節で実装について説明し、2.5節で評価実験とその考察について述べる。2.6節で実運用とその考察について説明し、最後に2.7節でまとめを述べる。

## 2.2 関連研究

本研究のようにモーションを認識しアプリケーションを操作するデバイスやシステムが製品化されている。例えば、Microsoft 社の Xbox360 の周辺機器である Kinect[12] はユーザのジェスチャをカメラで認識することによって手にコントローラを持たずにテレビゲームを楽しめる。また、任天堂社の Wii Music や SONY 社の PlayStation Move[13] ではコントローラにモーションセンサを搭載し、従来のボタン操作に加え、ユーザの動きを認識することでユーザはより直観的にゲームを楽しむことができる。これらはいずれもコンピュータとの直観的なインタラクションを目指しており、打楽器演奏を目的としたものではない。

ユーザのジェスチャを利用したシステムはテルミン [14] をはじめとして音楽分野にも応用されている。3次元動画像処理による仮想楽器システムの提案 [15] では、拡張現実と画像処理の技術を組み合わせて、HMD (HMD: Head Mounted Display) 上に提示された鍵盤でピアノ演奏する試みを行っている。また、ギターを演奏しているように手を動かすことによってギター演奏ができるモバイル楽器 AIR GUITAR PRO[16] や、ユーザの肩、肘および手首に装着したバンドセンサで、身体の動きを認識し、音楽やリズムをコントロールする電子楽器 MIBURI[17]、カメラを用いた画像解析によって楽器演奏を行う KAGURA[18] などがジェスチャを用いて演奏する機器の例として挙げられる。装着型センサを用いたウェアラブル DJ システム [19] では、加速度センサとジェスチャ認識技術を活用することで、場所を問わずに直観的な操作で DJ パフォーマンス

を行える。藤本らの開発したダンシング楽器システム [20] は加速度センサを両足のつま先に装着し、マッチングを用いて加速度の値で動作認識を行い、演奏を行う。また、赤外線 LED を搭載したタクトを振ることによって曲のテンポを制御し、ユーザが指揮者を疑似体験できるシステムや Wii コントローラを用いて指揮者の疑似体験を行うシステム [21] も開発されている。これらの電子楽器はユーザのジェスチャで音楽を制御する点では、本研究と類似しているが、いずれも単体での動作を前提としており、既存の楽器との併用を考慮していない。

また、実楽器と仮想楽器と組み合わせて演奏を行うという点においては、Roland 社のキーボード A-49[22] などに搭載されている機能である D-BEAM がある。D-BEAM はテルミンのように演奏者が赤外線 LED 上部に手をかざすことで音高やエフェクトを制御できる非接触型のコントローラであり、実際のキーボードを弾きながら、仮想楽器である D-BEAM を使用する。このように実楽器と仮想楽器を合わせて演奏する方法は新たな奏法として考えられるが、片手がキーボードの演奏に使えず、通常の演奏を異なる演奏を行う必要があるなどこれまで培ってきたパフォーマンスを軽減させるといった問題がある。

また、仮想空間上で叩打することで疑似的にドラム演奏ができるさまざまな仮想ドラムが開発されている。1990年に Buchla & Associates 社が開発した Lightning はスティックに搭載した赤外線 LED を用いて叩打の動作を検出する仮想ドラムである。近年の仮想ドラムの事例としては AeroDrums や任天堂社の Wii Music などがある。AeroDrums はカメラを用いて演奏者の叩打動作を解析し、スティックを振る大きさや場所に対応して、アプリケーション上の電子音源を出力する。ユーザはスティックを振る角度を変化させることで音色をコントロールできる。Wii Music はモーションセンサを搭載した専用のコントローラを用いた仮想ドラムである。視覚的なフィードバックを用いて仮想ドラムにおける疑似的な演奏をより直観的に体験する研究 [23] も行われている。これらの仮想ドラムは打面を配置する必要がないため、場所の制約を気にすることなく演奏を楽しめる。音声出力には電子音源を用いているためユーザは豊富な音色を選択できる。しかし、これらの仮想ドラムは叩打における物理的なフィードバックがないため、複雑な演奏を行うことが難しい。一方、岩谷ら [24] の研究ではピアノやギター演奏を仮想空間上で演奏できるシステムを提案している。このシステムでは演奏動作に対して疑似的な触覚提示を与える機能をもつが、実際の打鍵などで生じる反作用を力覚としてフィードバックしているものではないため、上記の仮想ドラムと同様に高速で

打鍵するなど複雑な演奏することは難しい。仮想打楽器である HaCHIStick[25] では触振動呈示用アクチュエータが内蔵されたスティックを仮想叩打することにより演奏者に振動フィードバックを提示し、実打楽器の叩打感の再現が可能であるが、本研究のように実打楽器と併用することを想定していない。

仮想ドラムを利用した場合における演奏性の低下も指摘されている。Maki Patola ら [26] は実打面と空間中の仮想打面を叩打した場合における演奏性を評価しており、実打面を叩打した場合と比べて仮想打面を叩打した場合の方が正確なリズムで叩くことが難しいと報告している。Mike Collicutt ら [27] は実ドラムと仮想ドラムを演奏した時の演奏者の動作変化量を調査した。演奏者はアコースティックドラムや Lightning など 4 種類の異なる打楽器を用いて、シングルストロークとダブルストロークを行った。結果、手の高さの変化は実ドラムおよび仮想ドラムとも同じような動きで、シングルストロークでは仮想ドラムも実ドラムと同じ演奏性であるが、ダブルストロークは仮想ドラムでは打面の跳ね返りが存在しないため演奏が低下したと述べている。このように、仮想ドラムは空間を叩打するという特性上、演奏性の低下は免れない。本研究では、使用頻度の少ない打楽器に対して仮想ドラムを適用することで、演奏性の低下を最小限に抑える。

## 2.3 システムの設計

2.1 節で述べた持ち運びの不便さや設置スペースを必要とするといった実ドラムの問題および仮想ドラムを利用したときの演奏性の低下を解決するために、以下の方針をもとに提案システムを設計した。

(1) 実ドラムの補助としての位置づけ: 本研究で提案する Airstic Drum はあくまで実ドラムを構成する一部の打楽器を補完するためのものとして使うことを想定する。これまでにさまざまな仮想打楽器が提案されてきたが、いずれも実ドラムと併用できなかったため、ライブやコンサートでの演奏においては、仮想打楽器の可搬性よりも、実ドラムの高い演奏性、特に、アコースティックな打楽器がもつ豊かな音色が選ばれてきた。一方、実ドラムを構成する打楽器は使用頻度が異なる。図1に示すドラムセットの基本構成を例に説明すると、ハイハットシンバル、スネアドラム、バスドラムが使用頻度の高い打楽器である一方、図2に示すシンバルやカウベルといった楽器のように数回しか使われない打楽器も存在する。このような使用頻度の低い打楽器を仮想的な打楽器に置き換えることによって、演奏性の低下や音色の劣化を上回る可搬性の利点



図 1: ドラムセットの基本例



図 2: パーカッション

### 仮想ドラムの使用



図 3: 仮想ドラムの使用例

が生まれると思われる。また、叩打のフィードバックという点においては、仮想ドラムは電子パッドに比べ性能は劣るが、本研究では、仮想ドラムは単打で使用し、使用頻度の少ない楽器に対してのみ用いることを想定し、ダブルストロークを必要とする楽器など使用頻度の少ない楽器に対してのみ用いることを想定し、ダブルストロークなど、複雑な奏法を必要とする楽器においては実ドラムを使用する。したがって、本研究では、このような連続した叩打は行わず使用頻度の低い打楽器の仮想化を対象とし、実ドラムと併用可能な仮想ドラムの構築をめざす。



図 4: 電子パッドが利用できないセッティング例

(2) 演奏技術の転用: 既存の複数の電子パッドを搭載した電子楽器は省スペースであり持ち運びも手軽であるが、電子パッドを導入することでドラム構成が変わるため、実ドラムの演奏に慣れた演奏者は新たなドラム構成のために訓練し直す必要がある。また、電子パッドを用いた場合、配置という観点においては演奏者が好む位置に電子パッドが配置できないという問題があるが、仮想ドラムでは実打面を必要としないため、演奏者の意図する箇所において叩打を行うことができ、電子パッドのように配置の制約がない。事例として実ドラムの上部に仮想ドラムを配置できるという点がある。電子パッドを用いた場合、図4のように物理的に打面が存在するためアコースティックドラムと電子パッドを上下に並べることは難しいが、仮想ドラムを用いた場合、打面が存在しないことから打点を実ドラムの上部に配置できる。使用例としては実ドラムのスネアドラムの上部に仮想ドラムを配置し、タンバリンなどのスネアドラムと異なる音を出力し、叩打ごとに音色を使い分けて演奏できる。電子パッドを使う演奏と異なり、平面でスティックを移動させて音色を使い分ける必要がないため、よりスムーズな演奏が行える。また、電子パッドを用いることで物理的な打面が存在し、演奏者の周囲の視覚が遮られるという問題があるが、仮想ドラムでは打面が存在しないためこの問題を防げる。そこで、提案システムでは実ドラムで培った演奏技術をそのまま活かせるような設計をめざす。例えば、図3に示すようにドラムセットにおいてクラッシュシン

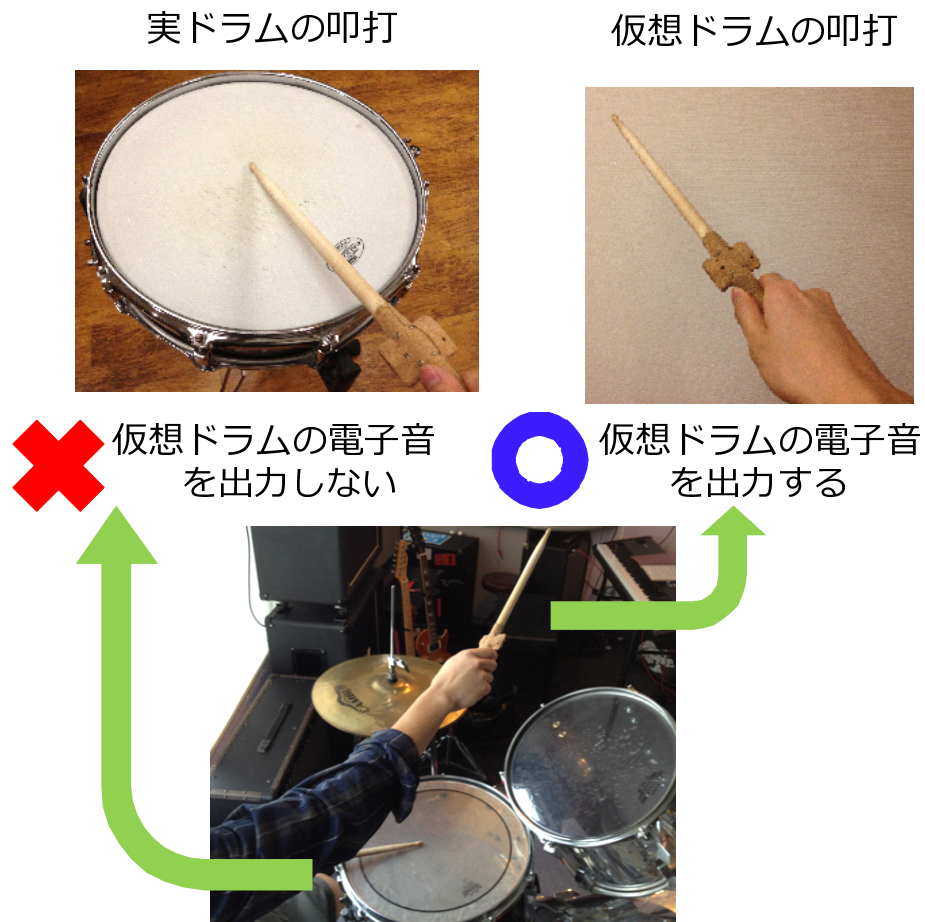


図 5: 出力の制御

バルが存在しない場合，仮想的にクラッシュシンバルがあると想定して仮想打面を叩打するとクラッシュシンバルの電子音出力される．また，図5に示すように実ドラムと仮想ドラムの叩打動作をそれぞれ識別しており，実ドラムを叩いた場合，仮想ドラムの電子音は出力されない．このようにすることで，ドラム演奏者は提案する仮想ドラムを使うための特別な訓練を必要とせず，既存の演奏技術を最大限活かせる．

### 2.3.1 仮想ドラムの構成

図6に提案システムの構成を示す．提案システムでは，無線通信機能をもつ加速度，角速度，地磁気およびフォトセンサを搭載したドラムスティック，PCおよびMIDI音源から構成される．演奏中のセンサデータは無線通信を用いてPCに送信される．PCは，受信したセンサデータから叩打動作を認識し，仮想ドラムを叩く動作と認識した場合のみMIDI音源へメッセージを送信し音声出力する．

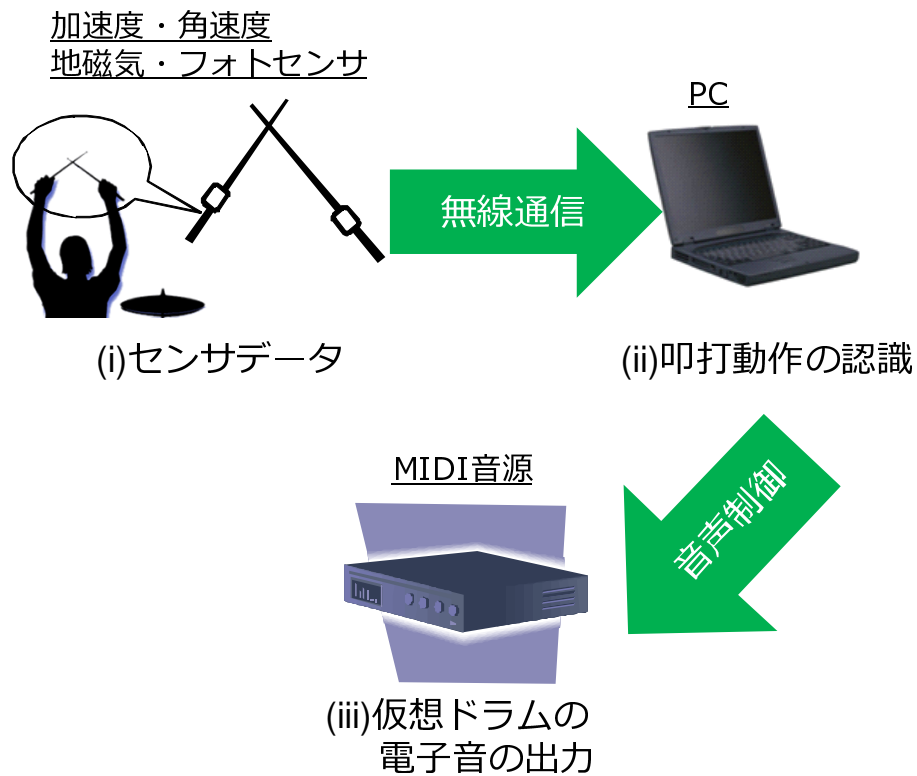


図 6: システム構成

### 2.3.2 叩打動作の識別手法

提案する仮想ドラムは実ドラムとの併用を実現するために実打面の叩打と仮想打面の叩打を識別する必要がある。また、楽器演奏という特性上、叩打後に認識を行い電子音を発音すると、発音までにタイムラグが生じるためリズムに合わせた正確な演奏が行えないことからできるだけ早い段階で叩打を識別する必要がある。叩打の認識にはカメラを用いた手法が考えられるが、処理における遅延や、ライブ会場など画像を取得しにくいといった点から、本研究ではカメラではなく、加速度および角速度データを用いた。

実ドラムの叩打において仮想ドラムの誤認識を防ぐために、実際に実ドラムのハイハット、フロアタムおよびライドシンバルを叩打したときの加速度および角速度データの解析を行った。図7は実ドラムの各打楽器および仮想ドラムを叩打したときにおける加速度および角速度の波形を示している。

ハイハットを叩打した場合の加速度の波形に着目すると、仮想打面と実打面を叩打した場合で加速度データのふるまいが大きく異なることが分かる。ハイハット叩打後

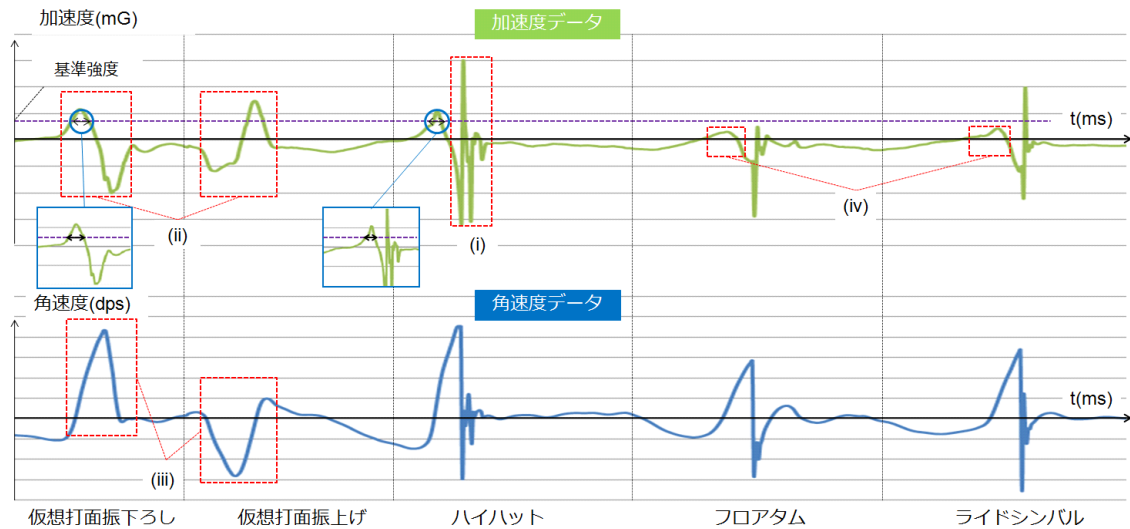


図 7: 叩打時の加速度および角速度データ

のスティックの振動 (図 7 上の枠線 (i)) は実打面を叩打した場合に見られる特有の現象であるため識別に有効であるが、叩打後に生じる現象のため、この変動を用いて識別を行う場合には電子音の出力までにタイムラグが生じる。本研究ではドラム演奏という特性上、叩打した瞬間に音声出力する必要があるためスティックの振動だけを利用した識別は行わない。実ドラムの叩打における振動以外の部分に着目すると、実ドラムを叩いた場合はドラムスティックの跳ね返りを利用できることから振る動作を止める必要がないため、叩打する瞬間まで加速度は減速しないことがわかる。また、叩打した後はスティックの跳ね返りにより加速度が急に変化する。一方で、仮想ドラムの場合、打面が存在しないことから自力でスティックの動きを止めるため叩打する直前に加速度が減速する。このため、加速度があらかじめ定めた閾値 (以降、これを基準強度と呼ぶ) を越え、再度、基準強度を下回るまでの時間 (以降、これを通過時間と呼ぶ) は両者で異なる。例えば、基準強度を 4000mG とした時、実打面を叩打した場合の通過時間は 5ms~15ms であるのに対し、仮想打面を叩いた場合は 25ms~40ms である。

したがって、基準強度の通過時間の違いを利用し、仮想ドラムと実ドラムのハイハットの叩打動作を識別する。また、仮想ドラムの叩打においてスティックを振り下ろす動作と振り上げる動作で加速度の波形の位相が反転 (図 7 上の枠線 (ii)) するため、通過時間だけで実叩打か仮想叩打かを判断する場合、スティックを振り上げた場合においても仮想ドラムの叩打と識別される。この問題を解決するために本研究では角速度データも同様に用いた。図 7 の枠線 (iii) で示すようにスティックを振り上げた場合における

表 1: 発音に関わる応答性

	60bpm	90bpm	120bpm
応答性 (ms)	36.2	25.8	15.3

角速度データは振り下ろした場合と異なる。

フロアタムおよびライドシンバルの叩打に着目すると、図7の枠線 (iv) で示すようにスティックが実打面を叩打する直前の加速度データは仮想叩打した場合よりも変動が小さいことが分かる。これらの実叩打において、叩打する直前の加速度は基準強度に到達しないため、動作の認識に影響しない。叩打した後に加速度の振動が生じるが、実ドラムの叩打における基準強度の通過時間は仮想叩打の場合に比べ短いため、この特性は識別に影響しない。

また、仮想叩打において演奏者が意図するタイミングとシステムが実際に電子音を出力するタイミングにおける時間差を調査した。調査では60bpm, 90bpm, 120bpmのテンポでメトロノームのクリック音に合わせて、仮想ドラムの叩打を繰り返し行った。クリック音が出力されるタイミングを演奏者が意図するタイミングとみなし、クリック音の発音タイミングとMIDI音源にメッセージが送信されるタイミングの時間差を計測した。仮想叩打はドラム演奏歴10年の著者が行った。表1に仮想叩打を50回行った場合のそれぞれのテンポにおける時間差の平均値 (ms) を示す。結果より、テンポに関わらず、MIDIメッセージが送信されるタイミングからクリック音の発音タイミングまでの時間は15ms~40msであった。仮想ドラムの電子音を出力すべきタイミングより前の段階で認識を行い、演奏者が意図するタイミングと差が生じるが、これまでの実験や実運用において、演奏者が発音のタイミングに違和感を持たなかったため、システムでは意図的な遅延を用いずに使用している。意図的に遅延を起こす場合は、認識後の音声の出力タイミングを調整するための遅延を発生する機能も使用する。メトロノームの周期に5msから10ms程度の誤差があることや、演奏自体にずれが生じていたこと、認識後からMIDI音源から音声までに出力される時間を考慮すると、演奏者が意図するタイミングに近い時間で音声出力されていると考えられる。

### 2.3.3 閾値の選定

ドラム演奏において叩打動作は演奏者によって異なりと同時に演奏はやり直しが利かないためできるだけ正確な識別が求められる。したがって、演奏者ごとに最適な基

### 仮想ドラムの叩打

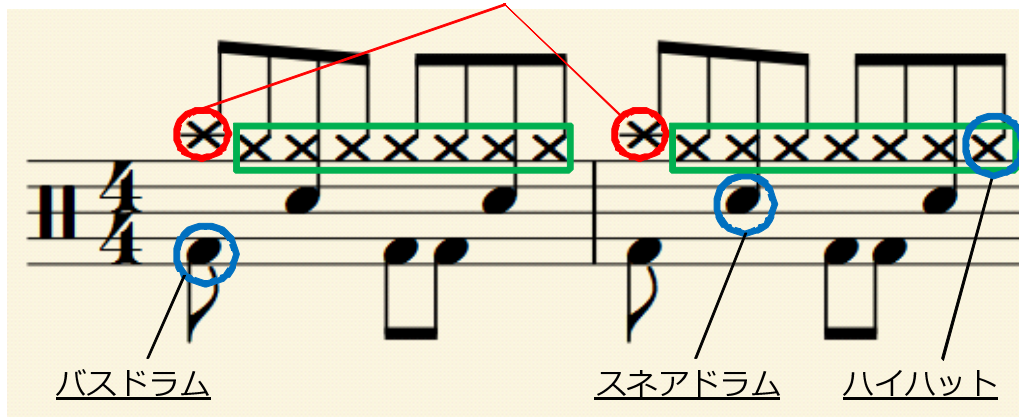


図 8: ハイハットを実叩打する場合の 8 ビート

表 2: 基準強度および通過時間を変化させたときの識別率

基準強度(mG)	通過時間(ms)						
	10	15	20	25	30	35	40
2000	90.0-54.3*	90.0-55.0	90.0-56.4	90.0-57.9	90.0-58.6	90.0-63.6	90.0-69.3
2500	95.0-60.0	95.0-61.4	95.0-64.3	95.0-69.3	95.0-75.0	95.0-81.4	95.0-87.1
3000	95.0-71.4	95.0-73.6	95.0-77.1	95.0-82.9	95.0-87.9	95.0-95.0	90.0-97.9
3500	100-80.0	100-87.1	100-91.4	100-95.0	100-97.1	95.0-100	65.0-100
4000	100-95.0	100-95.0	100-100	100-100	90.0-100	70.0-100	45.0-100
4500	100-98.6	100-100	100-100	95.0-100	75.0-100	60.0-100	15.0-100
5000	100-100	100-100	100-100	85.0-100	65.0-100	35.0-100	5.0-100
5500	100-100	100-100	90.0-100	75.0-100	55.0-100	20.0-100	0-100
6000	100-100	95.0-100	85.0-100	60.0-100	25.0-100	5.0-100	0-100
6500	90.0-100	80.0-100	65.0-100	45.0-100	15.0-100	0-100	0-100
7000	85.0-100	80.0-100	50.0-100	20.0-100	5.0-100	0-100	0-100

\* 仮想叩打の認識率-実叩打の認識率

準強度と通過時間を設定する。適切な閾値を決定するために提案システムではあらかじめ演奏者の叩打時における加速度データを計測し、正しく識別されたときの基準強度と通過時間を閾値として設定する機能をもつ。例えば、図 8 に示すように 8 ビートの先頭の拍にクラッシュシンバルを想定して仮想叩打を挿入するフレーズを 10 回行った場合における識別結果を表 2 に示す。基準強度および通過時間の組合せごとに、仮想ドラムの認識率 (左の値, 仮想叩打した場合に正しく電子音が出力された割合) および実ドラムの認識率 (右の値, 実叩打した場合に電子音が出力されなかった割合) を表 2 にそれぞれ示す。識別率が 100% になる閾値を見ると基準強度は 4000mG~6000mG,



図 9: 叩打位置の検出による音色拡張の例

通過時間は 10ms～25ms の範囲となった。なお、提案手法では、基準強度と通過時間において識別率が 100%となる範囲の中間値を閾値として用いるようにした。この場合では基準強度を 5000mG、通過時間を 15ms と設定する。

### 2.3.4 仮想叩打の拡張機能

#### 仮想叩打の音色拡張

図 9 に示すように演奏者は仮想叩打において叩打する方向を変化させることで、出力音を制御できる。提案システムは演奏中にスティックがどの方角にいるのかを算出する。スティックの向いている方角は水平方向の角速度データを用いて、単位時間の角速度データを積算することで算出される。センサデータの取得を行う間隔をサンプリング間隔 (s) とし、システムの起動から  $n$  回目のデータ取得を行った場合におけるスティック方角を  $d_n(\text{degree})$ 、角速度データを  $g_n(\text{degree/s})$  とすると方角は以下の式 (1) で定義する。図 10 に式 (1) を表す図を示す。

$$d_n = \sum_{k=1}^n (\text{サンプリング間隔}) * \frac{g_k + g_{k-1}}{2} \quad (1)$$

また、角速度の積算だけでは演奏中に値のずれが生じる。このため地磁気データを併用し、スティックが実ドラムのハイハットの位置に置かれた場合に値を補正する。叩打

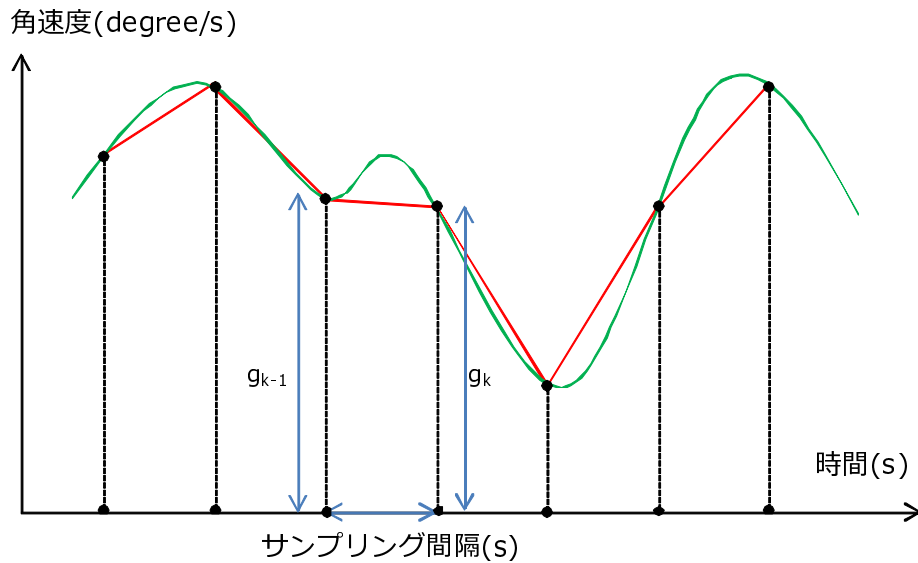


図 10: 方角算出の公式の図

位置の検出によって実ドラムの位置を計算できるため、識別率の向上を図れると同時に音色のバリエーションを増やせる。例えば、図9に示すように、仮想ドラムとしてチャイナシンバルが配置されるエリアでは実ドラムのハイハットが配置されることはないため、誤認識を防げる。

#### 仮想叩打におけるチョーク奏法

Airstic Drum は実ドラムにおけるチョーク奏法 (シンバルを叩打した後に手で掴みミュートする奏法) を仮想ドラムで再現する機能をもつ。図11に示すように、演奏者は仮想叩打した後に、実ドラムのシンバルを掴むようにスティックに搭載されたフォトセンサの上部を指で掴む動作を行うことで出力音をミュートできる。ミュートの誤認識を防ぐために、フォトセンサ上部に指が置かれている状態で仮想叩打した場合はチョーク奏法と認識をせず、叩打後にフォトセンサ上部から指が離れてから掴む動作をした場合のみチョーク奏法と認識する。

#### 音量の制御

仮想ドラムの表現力を高めるために、提案システムでは仮想叩打による出力音量を制御する。一般的に大きい音を出したいときは、ドラムスティックを速く振り下げる。

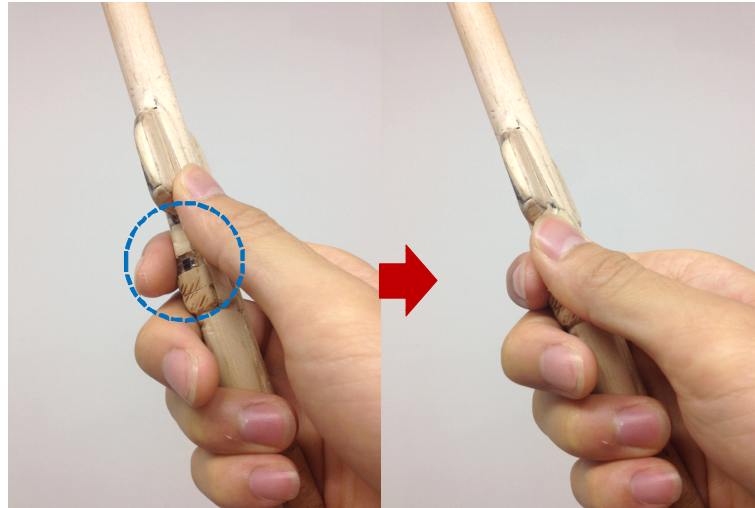


図 11: 仮想叩打におけるチョーク奏法

これは仮想叩打においても共通して見られる傾向で、振り下ろす速度の違いは、加速度のピーク値に反映される。そこで、加速度のピーク値をもとに出力音量を決定する。

### 2.3.5 誤認識における出力音の切断

提案システムはスティックを振り下ろす直前までの動作の変化に基づき、出力の認識を行う。この認識において、実ドラムの叩打において仮想ドラムの出力音が誤って出力された場合、演奏を妨げる可能性がある。したがって、提案システムは実ドラムの叩打において誤って出力された仮想ドラムの出力音を瞬時に切断する機能をもつ。2.3.2項に示すように、実ドラムを叩打した後に現れる加速度データの振動は特徴的な現象である。提案システムはこの特性を用いて誤って出力された出力音を切断する。この機能によって、仮想叩打における誤認識の影響を最小限に抑えられる。

## 2.4 実装

著者らは図 12 の左側に示すように Airstic Drum のプロトタイプを実装した。図 12 の右側はプロトタイプのドラムスティックの内部を示している。プロトタイプでは、ドラム演奏で一般的に使われる木製のドラムスティックを用い、演奏者がドラムスティックを握ったときに指に接触しない位置にワイヤレステクノロジー社の加速度センサ、角速度センサおよび地磁気センサを内蔵する WAA-010[28] をスティックに搭載した。バッテリーはリチウムポリマバッテリーを使用し、スティックの叩打の速度に影響しないように

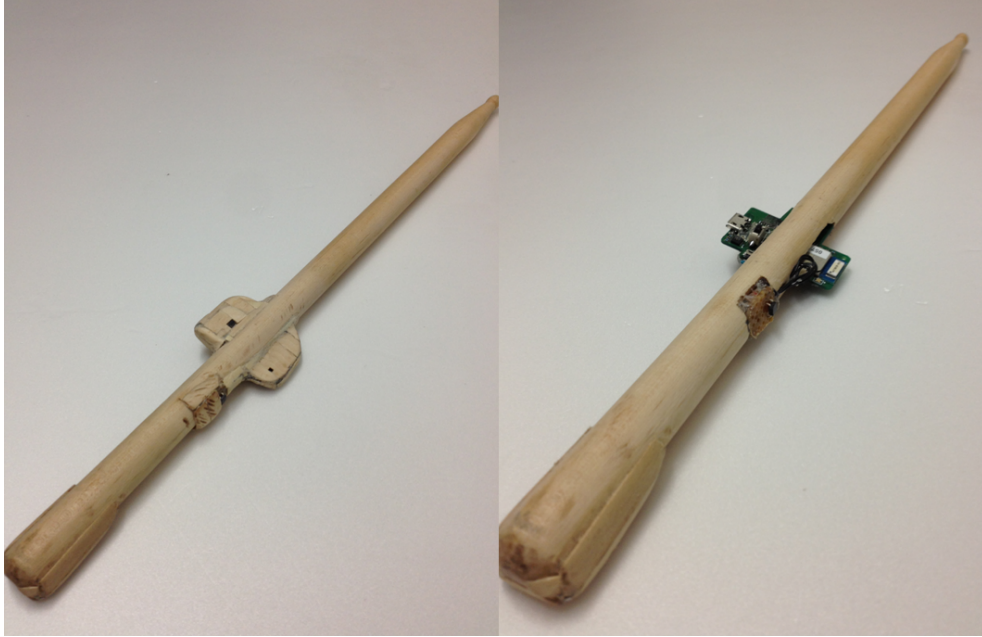


図 12: Airstic Drum のプロトタイプ

表 3: WAA-010 およびバッテリーのスペック

通信規格	Bluetooth Ver 2.0 + EDR Class 2
通信速度	2.1Mbps
通信距離	Up to 10m
サイズ	39(W)×44(H)×12(D)mm
重さ	20g
電源	230mAh Lithium polymer battery

下端に固定した。表 3 は WAA-010 のスペックを示す。また、フォトセンサはオムロン社の EE-SY110[29] を使用した。フォトセンサは WAA-010 の無線通信を利用して PC と送受信できるように WAA-010 の外部コネクタを用いて接続した。データのサンプリング間隔は 5ms である。出力音源は Roland 社の MIDI 音源モジュール SD-20[30] を使用した。PC 上のソフトウェアの開発は OS X v10.10 上で Xcode 8.0[31] を使用した。図 13 はプロトタイプのアプリケーションのスクリーンショットを示す。演奏者はアプリケーション上で基準強度および通過時間の値を設定や、仮想ドラムの電子音の選択、叩打におけるドラムスティックの方向と加速度・角速度データの波形の確認、仮想ドラムの機能の切り替えなどが行える。

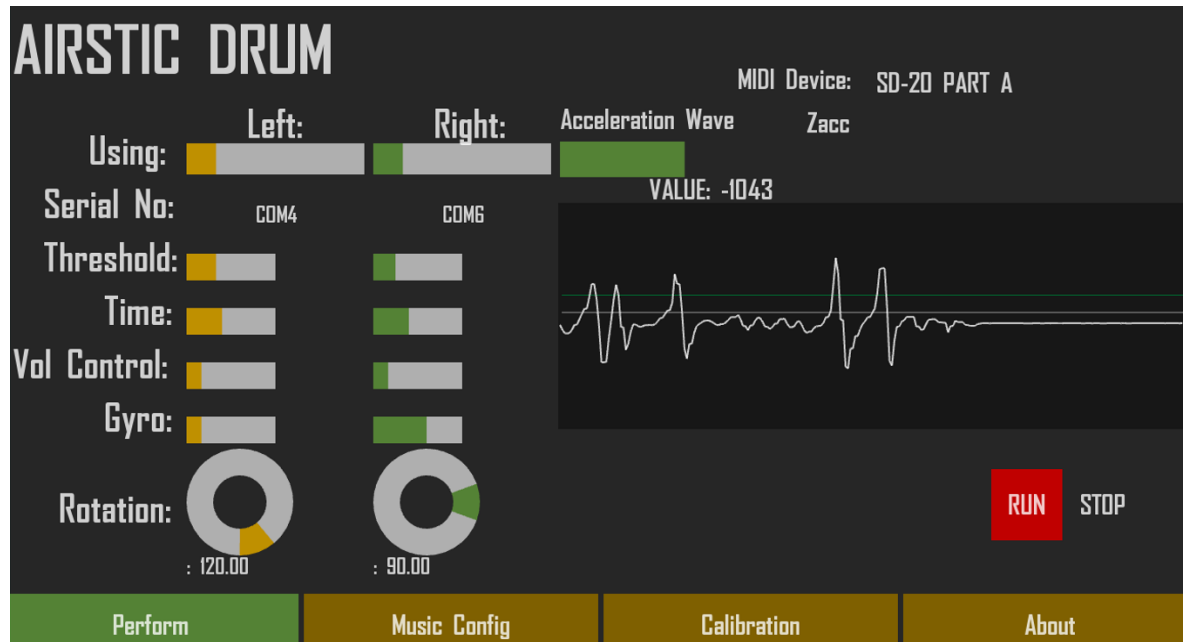


図 13: アプリケーションのスクリーンショット

## 2.5 評価

### 2.5.1 叩打識別における精度評価

#### 実験方法

実装したプロトタイプの有効性を示すために識別正答率を調査した。評価実験では、ドラム演奏においてよく用いられるリズムパターンの8ビートを演奏した場合における識別率を調査した。8ビートの演奏は先頭の拍にクラッシュシンバルを想定して仮想叩打を行い、それ以外の箇所はハイハット、フロアタム、ライドシンバルを実叩打する3種類の演奏データを調査した。図14はハイハットを実叩打して8ビートを演奏するフレーズの楽譜を示している。フロアタム、ライドシンバルの実叩打においても図14の緑色の枠線が示す箇所をフロアタム、ライドシンバルに置き換えて演奏する。図中の赤色で囲む箇所は実ドラムのクラッシュシンバルを想定して仮想叩打する。フレーズ中のスネアドラムおよびバスドラムは実叩打する。実験では、図14のフレーズを10回繰り返し、演奏テンポは100bpm(beat per minute)で行った。被験者は2年から10年のドラム演奏歴をもつ大学院生および大学生の5名である。被験者は提案システムを使用したことのない、ドラム演奏者が対象であり、被験者には、仮想ドラムの叩打を行い電子音が出力されるようになるまで仮想ドラムの練習時間を設けた。練習時間

仮想ドラムの叩打

バスドラム

スネアドラム

実ドラムの叩打  
(ハイハット, ライドシンバル, フロアタム)

図 14: 課題フレーズの譜面

表 4: 被験者および各打楽器における閾値

	被験者 A			被験者 B			被験者 C			被験者 D			被験者 E		
	HH	FT	RD	HH	FT	RD	HH	FT	RD	HH	FT	RD	HH	FT	RD
基準強度	5000	4500	4500	4500	3500	3500	3000	3000	2500	2500	2500	2500	2000	2500	2000
通過時間	25	25	25	20	20	15	30	30	25	25	25	25	20	20	20

は各被験者で5分程であった。また、実験中、被験者は仮想ドラムの音声を聞きながら演奏を行った。被験者は右手で仮想叩打を行った。

## 結果と考察

各被験者が図 14 のフレーズにおいて各打楽器 (ハイハット, ライドシンバル, フロアタム) を実叩打した場合の識別率が 100% となる最適な閾値を表 4 に示す。この表 4 で示す被験者ごとの閾値を用いて各被験者および各打楽器を実叩打した場合における識別率を表 5 の左に示す。また、異なる被験者の閾値を用いた場合の認識率を比較するために、基準強度が最も低かった被験者 E の閾値を用いて実叩打した場合における識別率を表 5 の右に示す。

表 5 の各値は、仮想ドラムの認識率 (左の値, 仮想叩打した場合に正しく電子音が出力された割合) および実ドラムの認識率 (右の値, 実叩打した場合に電子音が出力され

表 5: 各被験者の閾値を使用した場合における識別率 [%]

		被験者ごとの閾値			被験者 E の閾値		
		HH	FT	RD	HH	FT	RD
被験者 A	HH	100-100*	100-100	100-100	100-57.3	100-65.0	100-57.3
	FT	100-100	100-100	100-65.0	100-82.9	100-65.0	95.0-100
	RD	100-100	100-100	100-100	100-95.7	100-98.6	100-95.7
被験者 B	HH	85.0-100	70.0-100	70.0-100	100-70.7	100-75.0	100-70.7
	FT	95.0-100	90.0-100	90.0-100	100-97.9	100-100	100-97.9
	RD	95.0-100	90.0-100	90.0-100	100-93.6	100-100	100-93.6
被験者 C	HH	100-100	100-100	100-100	100-99.3	100-99.3	100-99.3
	FT	100-100	100-100	100-100	100-100	100-100	100-100
	RD	95.0-100	100-100	100-100	100-100	100-100	100-100
被験者 D	HH	85.0-99.3	85.0-99.3	85.0-99.3	85.0-98.6	85.0-99.3	85.0-98.6
	FT	95.0-100	95.0-100	95.0-100	95-100	95.0-100	95.0-100
	RD	95.0-100	95.0-100	95.0-100	95.0-99.3	95.0-99.3	95.0-99.3
被験者 E	HH	95.0-99.3	80.0-100	95.0-99.3	-	-	-
	FT	90.0-100	90.0-100	90.0-100	-	-	-
	RD	90.0-100	80.0-100	90.0-100	-	-	-

\* 仮想叩打の認識率-実叩打の認識率

HH:ハイハット, FT:フロアタム, RD:ライドシンバル

なかった割合)を示している。

表5で示すように、被験者 A の閾値を用いて被験者 A が演奏した場合、全ての打楽器において識別率が100%であることが分かった。また、演奏者 E の閾値を用いて演奏した場合、被験者 A や被験者 B では実叩打の誤認識がみられた。これは被験者 A や被験者 B の閾値において総じて基準強度が被験者 E に比べ高いことと、被験者 E の閾値において通過時間が短いことが要因として挙げられる。被験者 E における演奏データを検証したところ、被験者 E は仮想叩打においてスティックの振りが小さいことが分かった。演奏者間における叩打動作の特性の違いから、演奏者ごとに最適な閾値が存在することが分かる。

また、被験者 B, C, D, E ではハイハットを実叩打したときの閾値を使用した場合に実叩打の誤認識がみられた。フロアタムおよびライドシンバルを実叩打する場合に比べ、8ビートのように連続してハイハットを叩打する場合、1回のストロークでハイハットのエッジとトップを叩打する奏法（アップダウンストローク）がよく用いられる。この演奏法より叩打動作が変化しやすいフレーズにおいては閾値に偏りが生じる。

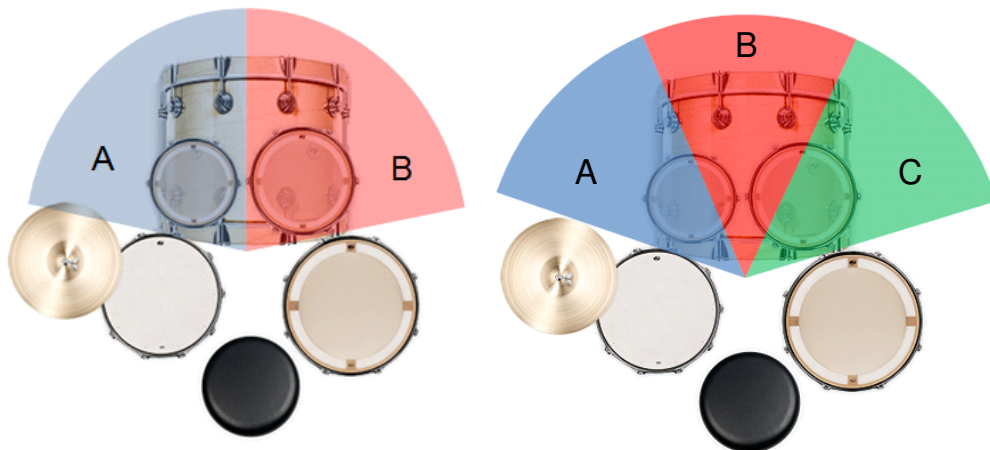


図 15: 叩打位置の検出による音色拡張の評価

したがって、さまざまな演奏フレーズに対するデータの解析が求められる。被験者 B や被験者 D では仮想叩打における未認識がみられた。これは仮想叩打した時のスティックの振りが小さく加速度が基準強度を越えなかったことが要因であり、叩打ごとにおける閾値の設定を変更することで未認識を防げる。

### 2.5.2 仮想叩打の拡張機能における精度評価

本実験では、仮想ドラムにおける拡張機能のそれぞれの認識精度を調査するための検証を行なった。

#### 音色拡張

仮想ドラムの音色拡張の有効性を示すために認識正答率を調査した。

**実験方法:** 評価実験では、仮想ドラムの叩打において叩打位置における音色制御の認識率を調査した。実験では、演奏者に図 15 のように 2 箇所分割された叩打位置 (図中左) および 3 箇所分割された叩打位置 (図中右) を仮想叩打してもらい、それぞれの認識率を調査した。被験者は叩打識別における精度評価と同様に、図 14 に示す 8 ビートの先頭の拍を仮想叩打する。仮想叩打は 2 分割の範囲では A, B の順でそれぞれ 10 回叩打し、3 分割の範囲では A, B, C の順でそれぞれ 10 回叩打する。演奏テンポは

表 6: 仮想ドラムの音色制御における識別率 [%]

	被験者 A	被験者 B	被験者 C
2 分割	100	90	95
3 分割	65	65	70

100bpm(beats per minute)で行った。被験者は2年から10年のドラム演奏歴をもつ大学院生および大学生の3名である。被験者は右手で仮想叩打を行った。

**結果と考察:** 被験者ごとの認識率を表6に示す。表6の各値は、仮想叩打位置を2箇所分割した場合の認識率および仮想叩打位置を3箇所に分割した場合の認識率を示している。実験結果より仮想叩打位置を2箇所に分割した場合は約9割以上の精度で正しく認識が行えることが分かった。しかし、叩打位置を3箇所に分割した場合は2箇所に分割した場合に比べ認識率が低く、正しい叩打箇所でも正しい音色が出力されないといった誤認識がみられた。これは、仮想叩打における水平方向の角速度の変化が影響し、叩打位置の検出にずれが出たことが要因であると考えられる。したがって、演奏中における仮想ドラムの音色制御は叩打位置を2箇所に分割した場合においては有用であることが分かる。また、仮想叩打における角速度の変化を補正することでより複数の叩打位置を増やせると考えられる。

### チョーク奏法

仮想ドラムのチョーク奏法機能の有効性を示すために認識正答率を調査した。

**実験方法:** 評価実験では、仮想ドラムの叩打におけるチョーク奏法の認識率を調査した。実験では、被験者に実ドラムのクラッシュシンバルを想定し仮想叩打においてチョーク奏法の動作を行ってもらったときの認識精度を計測する。被験者は8ビートを演奏し、先頭の拍を右手で仮想叩打した後に左手でシンバルを止める動作を行う。実験では、仮想叩打を20回繰り返し、演奏テンポは100bpm(beats per minute)で行った。被験者は2年から10年のドラム演奏歴をもつ大学院生および大学生の3名である。被験者は右手で仮想叩打を行った。

**結果と考察:** 被験者ごとの認識率を表7に示す。実験結果より85%以上の精度で正しく認識が行えることが分かった。しかし、被験者によっては正しく音声がミュートされないといった未認識がみられた。これは指でシンバルを摘む動作を行った位置がフォトセンサから離れていたため、未認識が生じたと考えられる。この問題を解決するた

表 7: 仮想ドラムのチョーク奏法を用いた場合における識別率 [%]

	被験者 A	被験者 B	被験者 C
認識率	95	85	90

表 8: 仮想ドラムの音量制御を行った場合における識別率 [%]

	被験者 A	被験者 B	被験者 C
2 段階	95	85	90
3 段階	70	65	65

めに、フォトセンサの検出距離を変えることや加速度データと併用して認識を行うことが挙げられる。

### 音量制御

仮想ドラムの音量制御機能の有効性を示すために認識正答率を調査した。

**実験方法:** 評価実験では、仮想ドラムの叩打における音量制御機能の認識率を調査した。実験では、被験者に仮想叩打の音量を 2 段階および 3 段階で制御をするように叩打を行ってもらい、それぞれの認識率を調査する。被験者は叩打識別における精度評価と同様に、図 14 に示す 8 ビートの先頭の拍を仮想叩打する。仮想叩打は 2 段階の音量制御では大小の順にそれぞれ 10 回叩打を行い、3 段階の音量制御では大中小の順にそれぞれ 10 回叩打を行う。演奏テンポは 100bpm( beats per minute) で行った。被験者は 2 年から 10 年のドラム演奏歴をもつ大学院生および大学生の 3 名である。被験者は右手で仮想叩打を行った。

**結果と考察:** 被験者ごとの認識率を表 8 に示す。表 8 の各値は、2 段階で音量制御した場合の認識率および 3 段階で音量制御した場合の認識率を示している。実験結果より 2 段階で音量制御した場合は 85% 以上の精度で正しく認識が行えることが分かった。しかし、3 段階で音量制御した場合は 2 段階で音量制御した場合に比べ認識率が低く、正しい音量が出力されないといった誤認識がみられた。これは、被験者によって叩打におけるスティックを振る動作や加速度が異なっていたことが要因であると考えられる。この問題を解決するために、演奏者に合わせた叩打動作の特徴量と音量制御のマッピングを行うことなどが挙げられる。

また、腕の振りが小さい場合における仮想叩打では、基準強度を上回らなかったため、電子音出力されなかった。このような小さな叩打においても音量制御を行うた



図 16: イルミネ神戸 2010 における実運用

めには、叩打識別を行う閾値の調整が必要である。

## 2.6 実運用

### イルミネ神戸 2010 イベントステージ

図 16 に示すように 2010 年 12 月に行われたイルミネ神戸 2010[32] のイベントステージにてプロトタイプを実運用した。ステージでは、プロトタイプを用いて、エレキベースとのセッションによるパフォーマンスを行った。パフォーマンスではセンサを固定した 2 本のスティックを用い、仮想叩打においてシンバルの音やドラム音以外の特殊音を用いるなどスティックごとに異なる電子音を出力した。実ドラムと仮想ドラムを併用することで、打楽器の補完や音色の拡張といった新たなパフォーマンスを行えた。一方で、仮想ドラムを叩打した場合において、仮想ドラムの音出力されないという未認識が生じた。この原因としては、本番での演奏は、緊張や興奮から叩打動作が平常

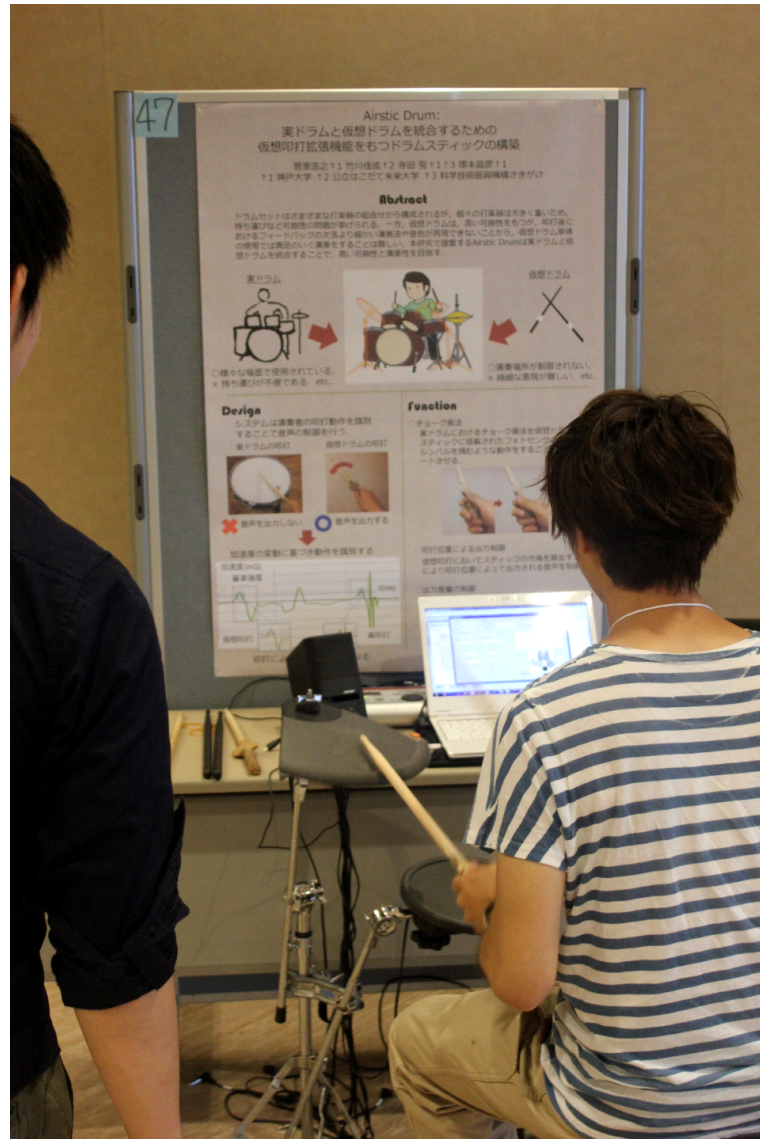


図 17: エンタテインメントコンピューティング 2012 の様子

時と異なることが考えられる。本番演奏におけるセンサデータを解析し、平常時との共通点や相違点を明らかにし、汎用性の高い認識アルゴリズムの提案が必要である。

## エンタテインメントコンピューティング 2012

2012年9月に行われたエンタテインメントコンピューティング 2012(EC2012)[33]では Airstic Drum のデモ展示を行った。図 17 に実運用の様子を示す。展示では、ドラム演奏の未経験者から熟達者までさまざまなレベルの人が Airstic Drum を実際に体験した。展示において、閾値は演奏者ごとに手動で変更させた。ドラム演奏の熟達者にとって



図 18: いしかわ夢未来博 2012 の様子

は叩打の識別において誤認識が生じる割合は非常に低く、Airstic Drum を使用した経験のない演奏者でも適用できることがわかった。一方で、未経験者においては仮想ドラムの未認識が多くみられた。これは仮想叩打した場合において加速度が基準強度に達しなかったことが要因で、未経験者の多くに見られる手首の動きを使わず腕の力だけでスティックを振ろうとする動作が加速度の値が低くなることに影響を与えている。また、演奏者の意見より仮想叩打において叩打後からの電子音の出力までの遅延に関する違和感ないことが分かった。したがって、提案システムはドラム演奏習熟者の演奏において適していることが分かる。

## いしかわ夢未来博 2012

2012 年 11 月に行われたいしかわ夢未来博 2012[34] において Airstic Drum の実演と展示を行った。図 18 に実運用の様子を示す。展示では、主に子供の来場が多く、Airstic Drum を実際に体験してもらった。子供の演奏においては仮想ドラムの未認識が多くみられた。加速度が基準強度に達しなかったことが要因であるが、腕の力だけでスティックを振ろうとする動作だけでなく、成人に比べスティックを振る速度が低いことも要因であると考えられる。また、スティックを掴む力が弱い場合、ドラムスティックが回転し、識別に用いるセンサの軸がずれ、正しく解析が行えなかったことも要因として考えられる。したがって、様々な演奏者に合わせた閾値の設定やスティックの軽量化、ド

ラムスティックが回転した場合におけるセンサ軸の補正などが必要と考えられる。

## 2.7 むすび

本章では、実ドラムと仮想ドラムの叩打識別手法を提案し、両者を統合した演奏が可能なシステムを構築した。提案システムは従来の単体でしか演奏できない仮想ドラムに対し、実ドラムと仮想ドラムの叩打動作を加速度および角速度の特徴量から識別することにより両者の統合を可能にした。これにより、実ドラムの叩打において仮想ドラムの電子音を出力させないため、演奏者は通常のドラム演奏と異なる特殊な動作を行うことなく実ドラム演奏で培った技術を活かせる。叩打の識別においては、仮想ドラムの電子音の出力のレイテンシを防ぐため、演奏者の叩打動作を早期的に認識する手法を提案した。提案システムは仮想叩打の音色拡張のための叩打位置の検出を行った。また、演奏者は叩打動作を変化させることで仮想ドラムの音量を制御できる。提案システムの評価結果では、演奏者間において最適な閾値を用いることで実ドラムと仮想ドラムを併用できることが明らかになった。同様に仮想ドラムの拡張機能における評価結果では、実際の演奏において有用可能な精度で拡張機能を使用できることが分かった。

また、プロトタイプを実装し、さまざまなイベントステージやデモ展示などで実運用を重ね、実際の利用に耐えうるようシステムの改良を行った。ステージパフォーマンスでは実ドラムと併用してシンバルを仮想ドラムに割り当てることや、ドラム音以外の特殊音を出力するなど実ドラムと仮想ドラムを併用する新たなパフォーマンスも行った。また、デモ展示ではさまざまなユーザにシステムを利用してもらうことで、システムで求められる改善点を調査できた。

今後の課題としては、デバイスの改良や多くのドラム演奏者および演奏パターンを対象とした評価実験を行い、叩打動作の認識精度の向上が挙げられる。また、叩打動作の認識精度の向上に伴い、仮想叩打における演奏支援を行うために、仮想ドラムの視覚提示や擬似的に実ドラムと叩打感覚を再現する力覚提示などを行なっていきたい。さらに、本研究で提案したデバイスでは、ユーザのジェスチャを解析、記録できることから、演奏における利用だけではなく、演奏動作のスコアリングなど打楽器の学習支援システムへの応用が考えられる。

本研究で提案した叩打識別において用いた身体動作を早期に認識する技術はドラム演奏だけでなく、他分野においても応用できると考えられる。例えば、スポーツやダ

ンスなどにおける遠隔レッスンにおいてはネットワークの問題によりデータ送信の遅延が問題として挙げられるが、提案手法を用いて早期で動作認識を行うことでネットワーク間における遅延を解消したアプリケーションの設計が行えると考えられる。



## 3 フレーズ内在化のための打楽器学習支援手法

### 3.1 まえがき

打楽器演奏では、正しい叩打順序および叩打強弱で演奏することが重要とされている。図 19 は異なる 2 つのフレーズであり、音符上部にある記号は強く叩打する位置を示している。叩打する左右の腕を動作させるタイミングが同じであっても、それぞれのフレーズのアクセントの位置によってリズムパターンは異なる。このように、打楽器演奏では単純に演奏フレーズの叩打タイミングを暗譜するだけでは様々なフレーズの演奏には対応できず、抑揚をつけた演奏技術を身につけることが求められている。一方、打楽器初学者は正しい叩打順序や叩打強弱で演奏を行うことに慣れていない。

打楽器演奏の学習方法としては、習熟者の演奏動画を見ながら、繰り返しフレーズを訓練する方法や音楽ゲーム [35, 36] のようにフレーズに同期した電子譜面を用いて練習する方法などがある。また、学習者に実際に演奏している感覚を与えるために、振動刺激による触覚提示を用いて直接学習者の身体に手本となるフレーズの叩打の順序や強弱といった演奏情報を伝える打楽器学習支援システム [37] も提案されてきた。これらの学習支援システムでは学習者は実際に打楽器を叩きながら、電子譜面や振動刺激といった情報提示を受けている。従来の学習方法ではこのように「身体を動かしながら学ぶ」ことがよいという前提の元で学習システムが一般的に構築されている。七澤ら [38] は、小学生がリズム提示を受けながらスキップのリズムによる歩行跳躍動作、片手を使ったボールのドリブルといった運動の学習を行うと、リズムを提示しない場合に比べて能力が向上したと述べている。しかし、七澤らの行った実験において、スキップしながらボールを投げ、キャッチするなど複数の動作を組み合わせた運動においてはリズム提示を用いた学習が有効でなかったと述べており、学習する動作によっては身体を動かしながら情報提示を受ける学習が最適でない場合があると考えられる。同様に、打楽器演奏は両手を異なるタイミングで別々に動作させ、叩打の強さを変えるなど複数の動作を行うため、動作を習得するために時間を要する場合、情報提示と身体運動を同時に学習する方法においては、それぞれのタスクを効率的に学習できないのではないかと本研究は仮説として提案する。

したがって、打楽器演奏においては外部から与えられるフレーズの演奏情報を学習者の内部に取り込む (以降、内在化と呼ぶ) には、情報提示を受けるフェーズと叩打動



図 19: 打楽器演奏フレーズ

作を行うフェーズを分離して学習することが、効果的であると考えた。本研究で提案する学習支援では、実際に叩打動作を伴った学習を始める前に、電子譜面による視覚提示、フレーズの楽音提示および叩打順序、強弱に同期した触覚提示を受ける学習だけを行い、最初に学習者自身が正しく演奏している感覚を知覚させる。情報提示によって正しく演奏する感覚を身に付けた後に、叩打動作を行う学習に移ることで、身体を動かしながら情報提示を受ける場合に比べ、効率的に練習が行えると考えられる。

本章ではフレーズ内在化のための打楽器学習支援手法を提案し、情報提示を行うシステムを構築する。システムでは、アプリケーション上でユーザは自力で演奏することを目標とするフレーズに対し、叩打順序や強弱に関する情報を設定する。ユーザは設定したフレーズの演奏情報に同期した視覚、聴覚および触覚による情報提示を受ける。また、プロトタイプシステムを用いて提案手法の有用性を検証する。

以下、3.2節で関連研究について説明し、3.3節で提案手法について述べる。3.4節で実装について説明し、3.5節で評価実験とその考察について述べる。最後に3.6節でまとめを述べる。

## 3.2 関連研究

打楽器演奏において、これまでにさまざまな演奏情報の提示による学習支援システムが提案されてきた。音楽ゲームやRoland社のドラム練習アプリケーションV-drums FriendJamやYAMAHA社のSongBeats[39]では、学習者は電子譜面を見ながらフレーズを学習する。こうしたシステムは正しい演奏情報を提示するという点で有用であるが、齋藤ら[40]は音楽ゲームのプレイヤーの脳活動を計測したところ、自ら思考しよ

うとする脳の活動量はカーレースやマージャンといった他のジャンルのゲームのプレイ中に比べて低かったと述べており、楽器演奏において新しいフレーズを学習するという点において、フレーズを内在化させる行為には至らず同じフレーズを再現するために注力する作業が行えていないのではないかと考えられる。

直接身体に振動刺激を与える触覚提示を用いた学習方法もこれまでに提案されてきた。Chafe[41]は触覚提示を用いた学習支援は楽器演奏において有効であると述べており、本研究では視覚提示や聴覚提示に合わせ、触覚提示を用いたシステムの利用を想定している。打楽器学習支援として Holland ら [37] は Haptic Drum Kit を提案している。Haptic Drum Kit では学習者は両手両足それぞれに振動モータを内蔵したバンドを装着し、課題フレーズに同期して動作する振動デバイスの情報を利用することでドラム学習の効率化を図っている。しかし、このシステムは学習者が振動デバイスの動作するタイミングに合わせて演奏することを想定しているため、受動的な学習となり演奏情報を知覚しにくい。Grindlay[42]は HAGUS と呼ばれるアクチュエータデバイスを用いて、叩打タイミングを提示するシステムを開発しているが、叩打タイミングに合わせて演奏者の腕を強制的に動作させるため、自発的に叩打動作を行うことを支援していない。同様に、触覚提示を用いた楽器演奏支援システム [43, 44, 45, 46, 47] が開発されているが、これらのシステムは演奏情報の提示を受けながら演奏動作の練習を行うことを想定しているため、学習者がフレーズを内在化することを目的としていない。このように情報提示を受けるフェーズと楽器を演奏する動作を行うフェーズを別々に行う学習方法はこれまでに行われていない。また、楽器演奏の指導の現場においては最初に演奏フレーズを聞いてイメージトレーニングを行った後で演奏動作に移す学習方法も行われているが、振動刺激など直接身体に与えながらイメージトレーニングをする手法は行われていない。

近年では、リズムを用いた身体運動の学習システムが多く提案されてきた。YAMAHA 社の BODiBEAT[48] や SONY 社の Smart B-Trainer[49] はランナーの心拍数や走行ピッチに合わせて楽曲や一定のリズムを提示することで、ランニングペースを維持させることを目的としている。このシステムはランニングのように一定のリズムで左右の脚を同じ間隔で動作させるトレーニングを示しているが、打楽器演奏のように異なるタイミングで動作させることや強弱をコントロールすることを目的としていない。

Phillips-Silver ら [50] は身体を動かすことや刺激を受けることとリズム知覚の相関性について調査した。この研究における検証実験では生後7ヶ月の乳幼児に最初にアク

セントのないリズムを聞かせながら，そのリズムテンポに合わせて乳幼児を一定のアクセントをもつリズムで身体を支えた状態で上下に揺らした．その後，身体を揺らした場合と同じアクセントをもつリズムとアクセントが異なるリズムの2種類のリズムを聴かせた場合，乳幼児は身体を揺らした場合と同じアクセントをもつリズムの方を長く聴く傾向にあったと述べている．同様に成人でも相関性があることを述べている [51]．このように音声による情報提示だけでなく，直接身体でリズムを知覚することは与えられた情報を理解する上で有用であると考えられる．本研究では，最初に情報提示のみを受けるフェーズを設定することが，提示される情報の知覚を増加させ，情報提示を用いた学習支援にも適用できるのではないかと考えた．

また，これまでの脳科学分野において人間の脊髄には歩行リズムを生成する神経回路である Central Pattern Generator(CPG) が存在すると研究されてきた [52, 53]．CPG は脳からのリズム的な刺激に関係なく，脊髄レベルで歩行リズムを形成するといわれている．Yang ら [54] の研究では，まだ歩行のできない生後5ヶ月から11ヶ月の幼児を大人が腰を支えて，脚をトレッドミルに乗せたところ，幼児はトレッドミルのスピードに合わせて，歩いているように脚を動かしていたことを述べている．このように，人間は先天的に左右の脚を制御する歩行リズムを持っていると述べている．人間が歩行リズムを形成する上でこのCPGは不可欠な神経回路ではあるが，本研究で提案する学習は外部からの刺激に対して反射的にリズムを出力することが目的ではなく，絶対音感などのように後天的に情報を身体に取り入れることを目的としている．

### 3.3 設計

#### 3.3.1 学習支援手法の方針

本研究は打楽器演奏初学者が正しい叩打順序および叩打強弱を習得するために提案手法を利用して学習することを想定している．提案手法は木琴やスチールパンなどメロディを演奏する打楽器ではなく，ボンゴやコンガといったアクセントによってリズムを生成する打楽器における利用を想定する．また，ドラムセットの演奏では複数の打面を四肢を用いて叩打を行うなど，ボンゴなどよりも複数の動作を行うため，演奏が複雑であるが，ドラム教則本 [55] で述べられるように手足のコンビネーションを学習する前に，手だけの演奏で基礎的なアクセントを持つフレーズを学習する方法を行っている場合があり，提案手法はそういったドラム学習の初歩段階において必要とされるアクセントの習得支援としても適用を想定している．本研究では打楽器演奏に

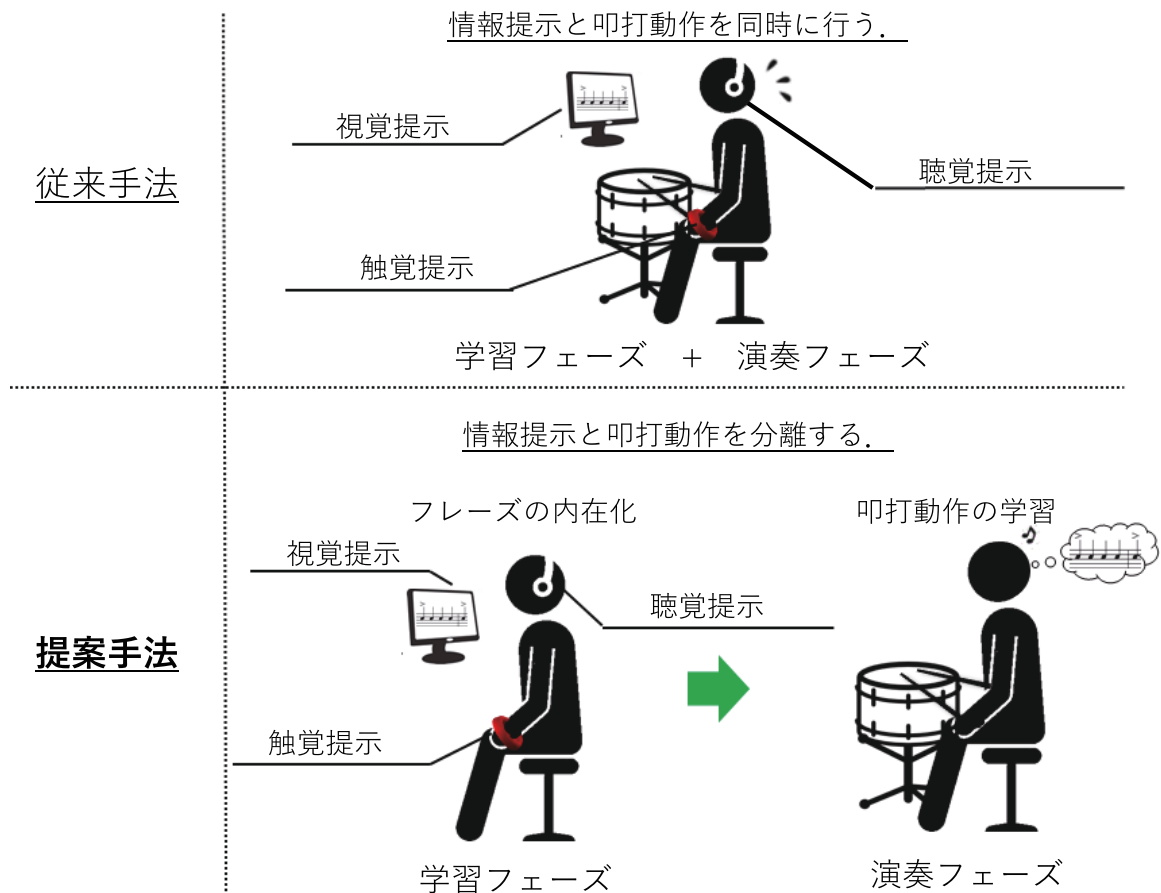


図 20: 学習支援手法の概要

において基本となるシングルストローク (1 回の腕の振りでの打面を 1 度叩く動作) での演奏技術を向上させる学習支援を提案する。提案する学習支援では視覚、聴覚および触覚による情報提示を用いて叩打順序および強弱の演奏情報を学習者に提示する。提案手法の概要を図 20 の下側に示す。打楽器演奏において学習の効率化を行うために、以下の 2 つの方針をもとに提案手法を設計した。

1. フレーズの内在化
2. 学習フェーズと演奏フェーズの分離

はじめにフレーズの内在化について述べる。これまでに楽器演奏において電子譜面や振動刺激などによる演奏情報の提示を用いた学習支援が提案されてきた。このように外部から演奏情報を与え、学習者が内部に取り込むことは演奏学習において有用で

あると考えられる。本研究では、このように学習者が本来備えていないフレーズを正しく演奏する感覚を身に付けるプロセスをフレーズの内在化と定義する。内在化されている状態を表す例として、絶対音感があげられる。絶対音感は先天的にもつ能力ではなく、外部から与えられる音とその音高情報を繰り返し知覚することで習得できるといわれている [56]。絶対音感の場合、正しい音高情報を学習者が内部に取り込んでいることが内在化されている状態といえる。本稿で述べるフレーズの内在化とは与えられるフレーズとその演奏動作を繰り返し知覚し、フレーズごとの演奏方法を習得している状態を表す。特に、実際の打楽器演奏においては短い小節単位のフレーズを繰り返し演奏する機会が多く、短いフレーズを正確に演奏する技術が重要である。また、打楽器演奏の場合、叩打するタイミングだけでなく正しい叩打順序と叩打強弱で演奏する感覚を内在化する必要がある。

次に学習フェーズと演奏フェーズの分離について説明する。図 20 の上側で示すようにこれまで演奏情報の提示を用いた学習方法では、視覚、聴覚および触覚による情報提示の知覚と叩打動作による学習を同時に行ってきた。この学習では、学習者は提示される演奏情報に動作を合わせることに注力したり、叩打動作を行うことで演奏情報を知覚することを忘れるため、正しく演奏する感覚を取り入れにくく、フレーズの内在化を行うことが難しいのではないかと考えた。一方で、提案する学習手法では図 20 の下側で示すように、視覚、聴覚および触覚の提示を受けている間は叩打動作は行わず、システムによる視覚、聴覚および触覚による情報提示だけを受けて課題フレーズの学習を最初に行う。情報提示によって正しく演奏する感覚を身に付けた後に、叩打動作を行う学習に移る。このように本研究では、学習過程において演奏情報の提示を受けるフェーズ(学習フェーズ)と叩打動作を行うフェーズ(演奏フェーズ)を分離する。学習フェーズを予め行うことで、学習者は提示情報を知覚することに注力できるため、正しく演奏する感覚を身体に内在化させられると考えた。また、学習者が演奏フェーズで演奏動作の誤りを認識できるように、この学習過程(学習フェーズ→演奏フェーズ)を繰り返すことを想定している。

### 3.3.2 演奏情報の提示

提案システムは学習者が正しい叩打順序および強弱でフレーズを演奏するための支援を行う。3.1 節で述べたように打楽器演奏において初学者は単純なフレーズに対しては叩打タイミングは理解しやすいが、叩打強弱を付けた演奏動作を行うことには慣れ

ていない。本研究では、学習者が打楽器学習を行う上で身に付けておくべき技術として、正しい叩打順序および叩打強弱を習得する学習支援手法を提案する。

学習者が正しい演奏を行う感覚を身に付けるために、本研究では視覚、聴覚および触覚提示を用いて演奏情報の提示を行う。学習者はフレーズに同期した電子譜面による視覚提示およびフレーズの楽音が再生される聴覚提示を受ける。また、学習者は直接身体でフレーズの演奏情報を知覚するために、両手の人差し指の先に振動デバイスを装着し触覚提示を受ける。人差し指の先に振動デバイスを装着する理由は、打楽器演奏において叩打後の振動フィードバックを最初に知覚する身体の部位が指先であるためである。また、Weinsteinら [57] によって述べられているように、手首に比べ指先は振動刺激の知覚が強く、デバイスの振動刺激を強く与えるために装着位置を選定した。触覚提示では叩打の強弱の違いを知覚させるため、2段階の強さで振動刺激の提示を行う。視覚、聴覚および触覚による全ての演奏情報は同期して提示される。

### 3.4 実装

提案する学習支援を行うためにプロトタイプシステムを実装した。図 21 に示すようにプロトタイプシステムは振動刺激を行う触覚提示デバイスと振動刺激の制御、電子譜面の表示、フレーズの設定を行うアプリケーションおよび楽音出力を行う MIDI 音源モジュールで構成される。触覚提示デバイスはマイコンボードを含むメインモジュールと脱着可能な 2 個の振動バンドで構成されている。メインモジュールのマイコンボードは Arduino Nano 3.1 [58] を使用し、メイン PC と接続され、アプリケーションで設定した課題フレーズに同期して振動バンドの駆動制御を行っている。図 21 の右上部は振動子が内蔵された指装着型の振動バンドを示し、ユーザは両方の人差し指に 1 つずつ装着する。触覚提示デバイスの振動子は日本電産コパル社のリニアバイブレータ (LRA) LD14-002 を採用した。採用した LRA の遅延は 20ms 以下である [59]。振動子が 1 回の振動刺激で駆動する時間は 40ms に設定した。BPM が 240 (アプリケーションの BPM 設定の最大値) のフレーズで 16 分音符を連続で叩打する時間間隔は 62.5ms である。ユーザに 1 回の振動刺激を正しく知覚させるため、この駆動時間に設定した。

PC 上のアプリケーションの開発は OS X v10.10 上で Xcode 8.0 を使用して行った。図 22 はアプリケーションのスクリーンショットを示す。ユーザはアプリケーション上でフレーズの設定、保存および読み出しや演奏テンポの制御が行える。また、画面上部は課題フレーズの譜面を示し、赤色のセルは演奏タイミングを示すインジケータで

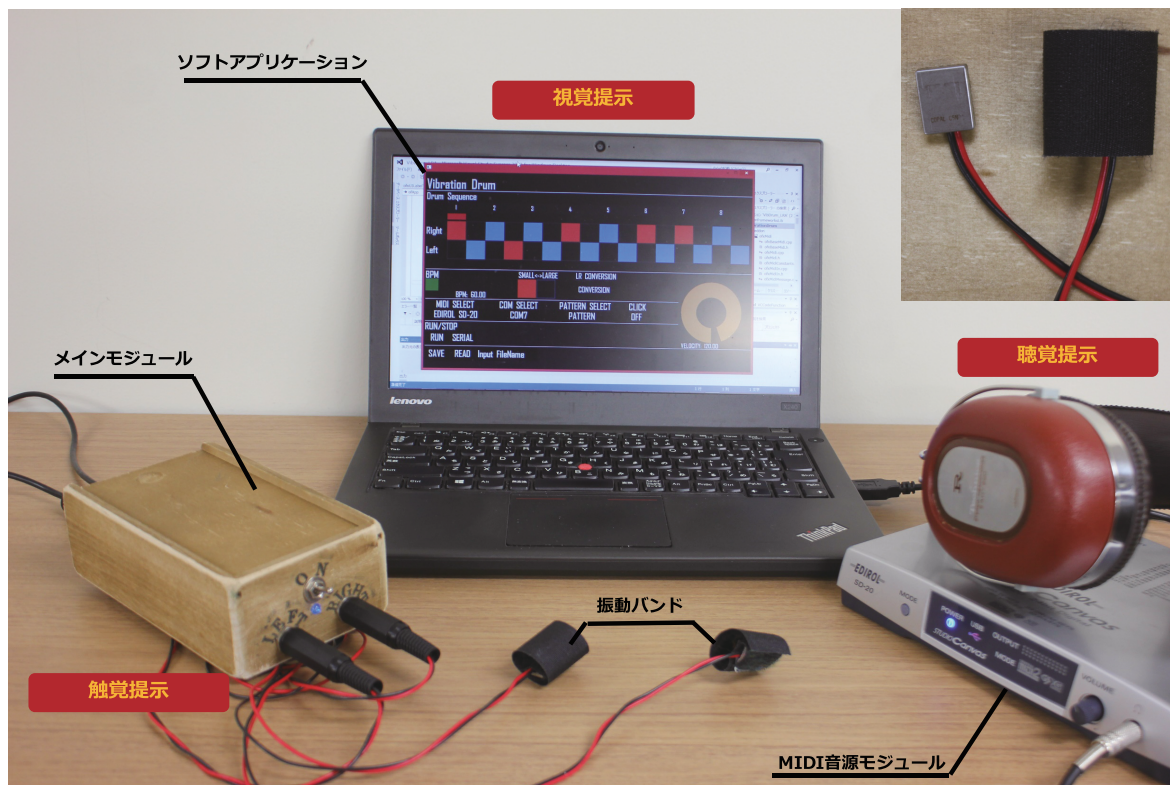


図 21: プロトタイプシステム

あり、テンポに同期して譜面上を移動する。オレンジ色のセルは強く叩打する箇所、青色のセルは弱く叩打する箇所であり、ユーザは手動で課題フレーズを設定できる。譜面上部のセル列は右手の叩打情報を示し、下部は左手の叩打情報を示している。聴覚提示で用いる出力音源は Roland 社の MIDI 音源モジュール SD-20 を使用した。

### 3.5 評価

提案手法の有用性を検証するためにプロトタイプシステムを用いて評価実験を行った。評価実験では2つの実験を行い、課題フレーズに対して各条件における打楽器演奏の学習時間を調査した。本実験ではまず情報提示を用いた学習において必要となる提示情報を調査する必要がある。特に、本研究では情報提示において振動刺激を行う独自のハードウェアを使用している。したがって、最初に実験1では触覚提示を含む情報提示が打楽器学習において有用であるか従来手法と提案手法を用いた場合のそれぞれの条件で調査した。次に、実験2では実際に触覚提示を用いた場合に、提案手法による学習方法が従来手法に比べ有用であるか被験者数を増やし、手法の適用順序の影響も含め詳細な評価を行った。

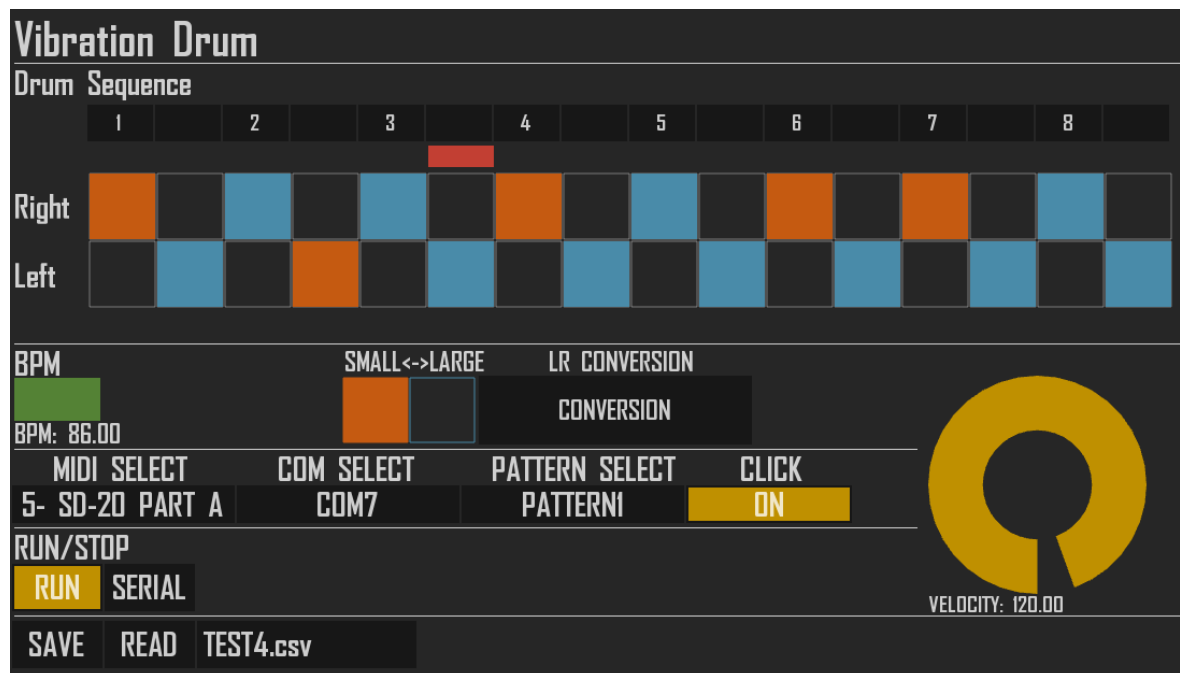


図 22: アプリケーション画面

### 3.5.1 実験 1: 触覚提示の影響の評価

#### 評価内容

本実験では触覚提示の利用有無による課題フレーズの学習時間の比較を行った。実験において被験者は下記の2つの条件で情報提示を受ける。

触覚提示なし 聴覚 (楽音) + 視覚 (譜面)

触覚提示あり 聴覚 (楽音) + 視覚 (譜面) + 触覚 (振動)

評価実験では、被験者が課題フレーズに対して従来手法および提案手法を用いて打楽器演奏の学習を行い、各手法を適用した場合における触覚提示の有用性を検証した。各手法において被験者が行う学習方法は下記の通りである。

従来手法 情報提示を受けながら叩打動作を行って学習する。

提案手法 情報提示を受ける学習と叩打動作を行う学習を別々に行う。



図 23: 学習ステップの様子

評価実験は「学習ステップ」と「テストステップ」の2つの実験ステップで構成されている。学習ステップでは各手法で課題フレーズを5分間学習する。5分間の学習後、テストステップに移り確認テストを行う。確認テストにおいて被験者が正しく演奏できていれば実験は終了し、正しく演奏できていなければ再度学習ステップに戻り、正しく演奏できるまで2つの実験ステップを繰り返し行う。学習ステップおよびテストステップの詳細を以下に示す。

**学習ステップ** 図 23 に被験者が学習ステップにおいて各条件で課題フレーズを学習している様子を示す。被験者はヘッドフォンをして、周囲の音声が聞こえないようにする。学習中は課題フレーズがループ再生され、被験者はシステムを停止することができず、常に演奏情報の提示を受ける。従来手法を用いた学習では、情報提示を受けながら叩打動作の学習を行う。提案手法では正しい演奏情報を内在化



図 24: テストステップの様子

することに集中させるため、被験者が実際に打面を叩打した場合、打面からの振動フィードバックによってシステムの振動刺激による情報提示に対しての知覚が小さくなると考えられ、被験者は机や自分の太ももなどをタップしながら演奏するといった叩打動作を行ったり、フレーズを口ずさむことは行わず、情報提示のみを受ける学習を行う。学習ステップにおいて評価者はこれらの動作を行っていないか確認する。提案手法の学習ではこの情報提示を受ける学習を行った後に、次のテストステップで叩打動作を行う。また、学習ステップにおいてシステムの情報提示の知覚に注力するためにリズムゲームのように被験者が叩打した結果を判定し、フィードバックすることは行っていない。

**テストステップ** テストステップでは学習ステップで訓練した課題フレーズの演奏の確認テストを行う。確認テスト中、図 24 に示すように被験者はシステムの電子譜面の利用ができるが、聴覚および触覚による情報提示は受けられず、自力で演奏しなければならない。確認テストにおいて被験者は課題フレーズを電子パッドを用いて演奏し、DAW(デジタルオーディオワークステーション) ソフトウェアによる MIDI 情報の記録とカメラによる演奏動作の記録を行い、正しく演奏できて

いるかを確認する。被験者は課題フレーズに BPM のクリックに合わせて演奏し、正しい叩打順序と叩打強弱で演奏ができているか演奏内容を確認する。また、アンケート調査より、手による電子パッドの叩打が実際の打楽器の演奏と同様に、電子音の発音のレイテンシに対して違和感がなく演奏できることを被験者の主観的評価より確認している。

確認テストは3分間実施し、課題フレーズを繰り返し4回連続で演奏できた場合、学習終了とする。テスト開始から3分以内であれば、演奏途中で失敗した場合でも、再度演奏をやり直すことができる。確認テストでは最初に打楽器演奏歴15年の評価者 A が被験者の演奏内容を判定した。また、DAW ソフトウェアで記録した演奏内容より、叩打した場合の MIDI 情報のベロシティが課題フレーズと同じように相対的に変化しているか確認を行う。さらに判定の信頼性を確保するために、打楽器演奏歴10年の異なる評価者 B が評価者 A の判定を被験者の演奏データを用いて確認し、最終的に評価者2名の合意により演奏内容の判定を行った。

本実験では学習ステップおよびテストステップで要した時間の合計を学習時間とする。例えば、学習ステップを3回行い、3回目のテストステップの1分30秒後にフレーズを正しく演奏できた場合、学習ステップの総時間は15分(5分×3回)、テストステップの総時間は7分30秒(3分×2回+1分30秒)であるため、学習時間は22分30秒となる。

評価実験において被験者は図25に示す4つの異なる課題フレーズを学習する。従来手法を用いた学習ではフレーズ A およびフレーズ B を学習し、提案手法ではフレーズ C およびフレーズ D を学習する。課題フレーズは1小節で構成され、16分音符のタイミングで左右交互にアクセントに従って叩打するリズムパターンである。図25の譜面で示す通り、フレーズごとにアクセントの位置が異なる。実験中に被験者が使用する譜面は図25の右側に示す提案システムのソフトウェアの電子譜面である。また、課題フレーズの提示テンポとして BPM は60に設定した。

被験者は楽器演奏が未経験である大学生および大学院生の8名である。被験者は全員右利きであった。被験者8名を2名ずつ4つの実験条件のグループに分けた。全ての被験者は最初に従来手法を用いて学習を行い、次に提案手法を用いて学習を行った。学習回数による演奏の慣れの影響を軽減するために提案手法を用いた学習は1週間後に行った。各手法におけるグループごとの学習順を表9に示す。例えば、グループ III

音楽譜面

システム譜面

A

B

C

D

図 25: 課題フレーズ

表 9: 学習順 (従来手法/提案手法)

グループ	1 回目		2 回目	
	フレーズ	触覚提示	フレーズ	触覚提示
I	B/D	あり	A/C	なし
II	A/C	あり	B/D	なし
III	B/D	なし	A/C	あり
IV	A/C	なし	B/D	あり

は最初に従来手法を用いてフレーズ B(触覚提示なし)→フレーズ A(触覚提示あり)を学習し、次に提案手法を用いてフレーズ D(触覚提示なし)→フレーズ C(触覚提示あり)の順で学習を行った。被験者は本実験を行う前に、予備学習を 30 分間行った。予備学習では打楽器演奏やシステムの利用に慣れてもらうため、提案システムを用いて実際に電子パッドを叩く練習を行ってもらった。予備学習を行った後、被験者は学習順に従って学習を行った。

## 結果と考察

触覚提示の利用における学習時間の分析を行う。図 26 は各条件の被験者の学習時間の平均値と標準偏差を分単位で示している。図 26 で示すように、触覚提示を用いた場合、触覚提示を利用しない場合に比べ、従来手法では約 7 分早く、提案手法においては約 1 分 30 秒早く学習できた。分散分析の結果より、触覚提示の利用条件における主効

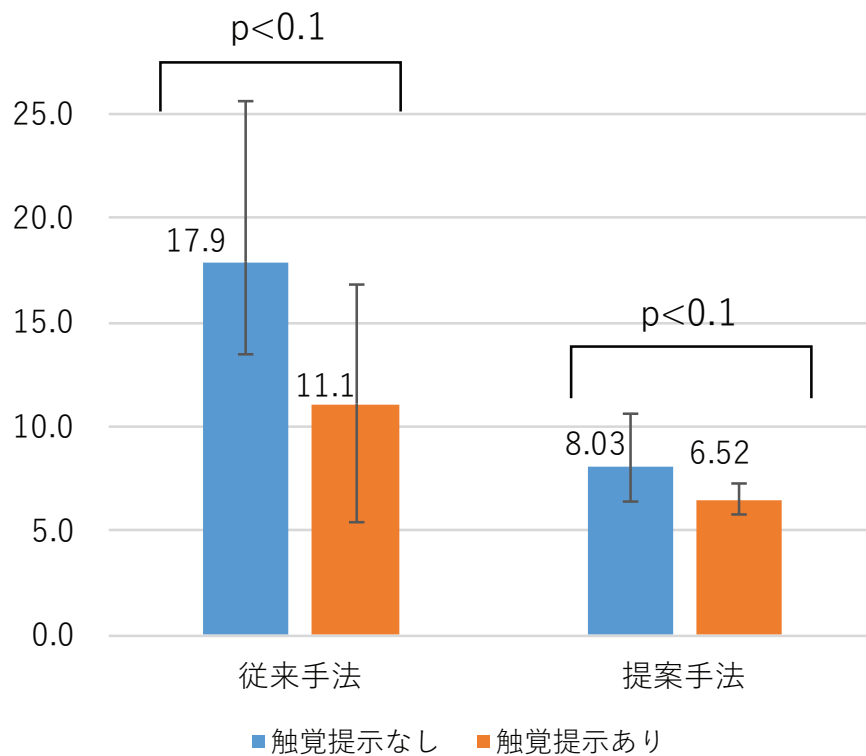


図 26: 触覚提示の利用条件における学習時間 [分]

果 (従来手法:  $F_{(1,8)} = 5.27$ ,  $p < .1$ , 提案手法:  $F_{(1,8)} = 3.65$ ,  $p < .1$ ) に有意差がみられた。これらの結果より、どちらの適用手法の場合においても触覚提示を用いた学習は触覚提示を利用しない場合に比べ有用であることを確認した。また、実験後のヒアリングより触覚提示において遅延を感じた被験者はおらず、本実験の演奏テンポにおいて提案システムの振動刺激を利用できることを確認した。本実験の結果を踏まえて、次に提案手法の有用性の検証を行う。

### 3.5.2 実験 2: 提案手法の影響の評価

#### 評価内容

本実験では触覚提示を用いて従来手法および提案手法によって学習した場合の学習時間の比較を行った。実験 2 は実験 1 と同様の実験構成である。実験 1 と実験 2 を別々に行う理由は被験者の試行回数を減らすためである。実験 1 のみで触覚提示の有用性および提案手法の有用性の 2 つを検証する場合、学習順や課題フレーズを適用して学習する条件の組合せによって、さらに試行回数を増やす必要がある。被験者の試行回

表 10: 学習順

グループ	1回目		2回目	
	フレーズ	適用手法	フレーズ	適用手法
I	A	従来手法	B	提案手法
II	B	従来手法	A	提案手法
III	A	提案手法	B	従来手法
IV	B	提案手法	A	従来手法

数を増やす場合、試行ごとで演奏の慣れや学習における集中度の差が生じ、学習時間に影響する可能性がある。実験2では適用手法を利用する順番および課題フレーズによる学習時間の影響を考慮した検証を行う。したがって、実験1ではまず触覚提示の利用有無による有用性を検証し、触覚提示の有用性が確認されたため、実験2においては触覚提示ありの条件で提案手法の有用性を検証する。

実験手順および学習時間は実験1と同様の方法であり、被験者は実験において「学習ステップ」および「テストステップ」を繰り返し行い、学習時間の計測を行う。

本実験では被験者は実験1で使用した図25に示す2つの課題フレーズAおよびBを学習する。

本実験の被験者は実験1とは異なる楽器演奏が未経験である大学生および大学院生の16名である。被験者16名を4名ずつ4つの実験条件のグループに分けた。各手法におけるグループごとの学習順を表10に示す。例えば、グループIIIは最初に従来手法でフレーズAを学習し、次に提案手法でフレーズBを学習した。また、実験1と同様に予備学習を行った。実験終了後に被験者のアンケート調査を行った。アンケート調査では被験者が主観的に難しいと感じたフレーズおよび評価実験の感想を自由記述欄に回答してもらった。

## 結果と考察

表11は各被験者の各実験条件の学習時間の平均値と標準偏差を分単位で示している。分散分析の結果によると、適用手法間の主効果 ( $F_{(1,24)} = 3.50, p < .1$ ) に有意差がみられた。

はじめに学習順が学習時間に影響を与えなかったか分析する。表11で示すように、各学習順における学習時間の平均値は約1分異なった。しかし、学習順における主効果および学習順と関連する全ての交互作用で有意差がみられなかった。したがって、本

表 11: 学習時間 [分]

学習順	1回目				2回目			
適用手法	従来手法		提案手法		従来手法		提案手法	
フレーズ (グループ)	A (I)	B (II)	A (III)	B (IV)	A (IV)	B (III)	A (II)	B (I)
平均値	14.9	15.9	10.5	12.4	12.2	18.2	8.38	10.5
標準偏差	5.75	13.2	4.96	7.27	7.02	8.20	4.51	6.46
平均値	15.5		11.4		15.2		9.44	
標準偏差	9.42		5.89		7.76		4.31	
平均値	13.5				12.3			
標準偏差	7.86				6.76			

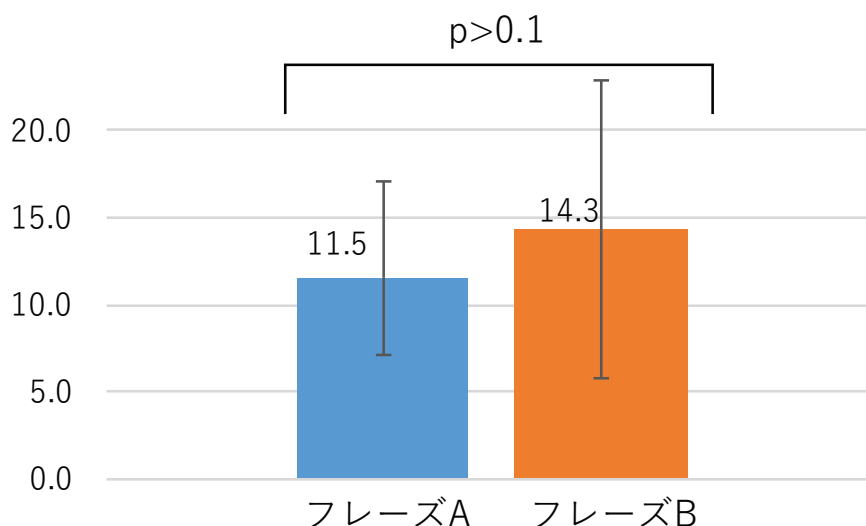


図 27: 各フレーズにおける学習時間 [分]

実験においては学習順が学習時間に与える影響はないといえる。

また、フレーズによる学習時間の影響を分析する。図 27 はフレーズごとの学習時間の平均値と標準偏差を示す。フレーズ B の学習時間はフレーズ A に比べ 2.8 分長かった。また、実験後のアンケート調査において被験者の主観的に難しいと感じたフレーズは 4 名の被験者がフレーズ A と回答し、8 名はフレーズ B と回答し、4 名は各フレーズにレベル差を感じなかったと回答した。しかし、フレーズにおける主効果およびフレーズと関連する全ての交互作用で有意差がみられなかったため、設定した 2 つの課題フレーズにおいて難易度に大きな差がなかったことが確認された。

次に、適用手法と学習時間における相関性について分析する。図 28 は適用手法ごと

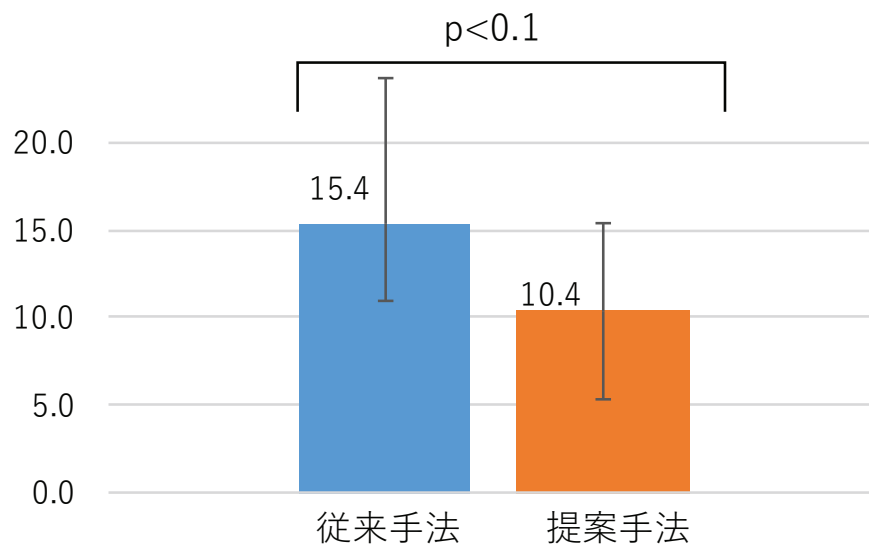


図 28: 各適用手法における学習時間 [分]

の学習時間の平均値と標準偏差を示す。提案手法を用いた場合、従来手法を用いた場合に比べ、5分早く学習できた。したがって、分散分析の結果より、適用手法における主効果に有意差がみられたことから、本実験において学習順および課題フレーズに関わらず、提案手法による学習が従来手法に対して有用であることを確認した。

表 11 よりグループごとの各条件の学習時間をみると、グループ IV においては従来手法に比べ提案手法による学習時間が長かった。分散分析の結果より、グループ IV の適用手法間における有意差がみられなかったため、適用手法による影響は低かったと考えられる。また、グループ IV で 2 名の被験者は 1 回目の学習に比べ 2 回目の学習の方が打楽器演奏に慣れていたとアンケート調査で回答しているため、提案手法を最初に用いた場合において学習時間が長くなったと考えられる。

さらに、アンケート調査では情報提示がループ再生で行われる場合、フレーズの小節の頭が分からなくなる事が多かったという回答がみられた。したがって、打楽器演奏学習のようにフレーズを繰り返し学習するシステムでは小節の頭をフレーズと異なる楽音で提示することや、異なる強さの振動刺激で触覚提示する必要がある。また、提案手法での学習ステップでは自分がどれくらい演奏できているのか確認しづらかったというコメントが得られた。これは学習ステップの時間を短くし、学習ステップを行う回数を増やすことで自分の演奏を確認できる回数を増やすという方法が改善点としてあげられる。今後の検証として、学習ステップの時間を調整することによる学習時

間の影響を調査した場合、学習ステップの設定時間と学習時間に相関性が確認できるのではないかと予測される。また、触覚提示に用いる振動が弱かったと回答した被験者がいたことから、さらに強い振動刺激を提示するためにプロトタイプシステムの改良が必要である。

以上より、提案手法では打楽器演奏において課題フレーズの学習時間を短縮できる傾向があるという結果が得られた。さらに、評価結果の客観性を高めるためにシステムの改良を行い、より複雑なフレーズの学習および、被験者を増やした実験を行う。今後、長期的な学習を行った場合における演奏技術の検証など、情報提示を受ける時間の調整によって学習時間が変化するか調査する必要がある。また、本実験では学習において叩打の判定を被験者にフィードバックしない条件において有用性の検証を行ったが、フィードバックを利用した場合における調査を行う必要がある。

### 3.6 むすび

本章では、視覚、聴覚および触覚の情報提示を用いたフレーズ内在化を行うための打楽器学習支援手法を提案し、プロトタイプシステムを構築した。プロトタイプシステムでは、学習者は電子譜面による視覚提示、楽音による聴覚提示に加え、指に装着した触覚デバイスを用いて叩打順序や強弱といった演奏情報に同期した振動による触覚提示を受けながら学習を行った。本研究ではプロトタイプシステムを用いて演奏情報の提示を受ける学習フェーズと演奏動作を行う演奏フェーズを分離した学習過程を行い、学習者がフレーズを内在化することで学習の効率化を支援する学習方法を提案した。評価実験では、触覚提示を用いた情報提示による打楽器演奏の学習の効果を検証するために、課題フレーズを用いて学習時間の評価を行った。評価結果より、触覚提示を利用する学習の方が触覚提示を利用しない場合に比べ、学習時間を短縮できることが確認できた。次に提案手法を用いて課題フレーズを学習した場合における効果の検証を行い、課題フレーズを用いて学習時間の評価を行った。実験結果より従来手法に比べ学習時間が平均5分短縮できることが分かった。本実験では学習ステップの時間を5分に固定した場合における評価を行なったが、今後は学習ステップの時間の調整による学習時間の影響を調査する必要がある。得られた結果より最適な情報提示を受ける時間と叩打動作の学習時間の配分を調査する。また、より複雑なフレーズや異なる演奏テンポでの学習における提案システムの有用性の検証および、被験者を増やした実験の実施が必要である。さらに叩打判定のフィードバックの有無における

有用性の比較評価や情報提示を行うタイミングのずれおよび提示時間を制御することでより効果的な学習支援が行えないか検討する。また、打楽器学習支援としての有用性を高めるためにダブルストロークや他のルーディメンツなど様々な奏法への適用や打楽器ごとの演奏動作を考慮した提示方法の解明を行う。

さらに、本研究で提案する情報提示と身体動作を分離する学習方法は楽器演奏以外の分野においても応用できると考えている。今後はスポーツ分野など複雑な身体動作における学習に対し、提案手法の有用性を検証していきたい。



## 4 選手情報を付加したドラム譜面作成システム

### 4.1 まえがき

ドラム演奏では、演奏技術の向上のために正しい叩打順序を習得することが求められる。習熟者は演奏するフレーズやテンポに対して、スムーズな叩打動作や適切な叩打強弱をつけて演奏が行えるように、ドラム演奏者がそれぞれの打楽器を左右どちらの手で叩打するか(以降、選手と呼ぶ)といったように叩打順番を考慮して叩打を行う。演奏するフレーズが同じ場合においても、演奏者ごとの演奏特性や演奏ジャンル、身体の違いなどによって、選手は異なる。例えば、図 29 に示すようなドラム譜面のフレーズを演奏するとき、赤枠内ではスネアドラムおよびフロアタムを連続して右手を用いて叩打する場合がある。これは、赤枠内で 2 番目に叩打するフロアタムを左手で叩いてしまうと両手が交差するため、次の叩打において右手のドラムスティックを大きく振り上げることができず、アクセントを制御できないといったことがこの叩打順序を行う理由としてあげられる。このように、さまざまなフレーズにおいて効率的な演奏を行うための叩打順序が存在する。したがって、ドラム演奏者が他者の選手情報を学ぶことや自身の演奏を振り返るために、演奏者の選手情報を記録できれば、より効率的な演奏動作や抑揚をつけた演奏が実現できる可能性がある。

選手情報を学ぶための一般的な学習方法としては、ドラム習熟者の演奏映像を繰り返し見て学習する方法があるが、高速に叩打動作を行うドラム演奏においては、両手それぞれの動きを理解することは難しく、正しく演奏できるまでに時間を要する。また、ドラム指導者などによって選手情報が書き足された譜面を用いて、学習する場合がある。別の手法としては、DAW(Digital Audio Workstation)といった譜面作成アプリケーションを用いて、選手情報を手入力する場合がある。これらの方法の場合、演奏後に譜面作成を行うため、演奏しながら選手情報を記録するのではなく、演奏後に演奏内容を振り返りながら作成を行う必要がある。このように、演奏者の選手情報を譜面として記録する場合、記録内容の漏れや譜面作成に時間を要するといった問題がある。一方で、ドラム演奏者のリアルタイムの演奏で選手情報をデータとして記録し、選手情報を付加した譜面を自動的に採譜するシステムはない。このため、ドラム演奏者間において「このフレーズはこのような選手で演奏する」といったように、演奏者ごとの選手情報をデータとして共有することが難しい。

図 29: ドラム譜面の例

したがって、本研究ではドラム演奏においてリアルタイムに選手情報を記録し、それらを付加した譜面を採譜するシステムを構築する。提案システムはドラムスティックに搭載した角速度センサのデータから両手それぞれの叩打したタイミングの認識を行い、電子ドラムによる MIDI メッセージを用いて、どの楽器をどちらでの手で叩打したか識別する。システムは識別結果に基づいて選手情報を付加した譜面を作成し、演奏者に正しい叩打順序を提示する。また、これらの情報を MIDI メッセージの内部に記録することで DAW ソフトなど汎用的にデータを再利用することができる。

以下、4.2 節で関連研究について説明し、4.3 節で設計について述べる。4.4 節で実装について説明し、4.5 節で評価実験とその考察について述べる。最後に 4.6 節でまとめを述べる。

## 4.2 関連研究

ドラム演奏の叩打順序の習得を行うために、さまざまな学習方法が提案されてきた。Roland 社の V-drums Friend Jam や YAMAHA 社の Song Beats はドラム演奏のための学習アプリケーションである。ユーザは音声に同期した電子譜面やアニメーションによるガイダンスを利用して、演奏学習を行う。しかし、これらのアプリケーションで

は選手情報は記録できていない。また、叩打動作を高速に行うフレーズでは、正しい叩打順序を理解しにくい。このように、ドラム演奏において自動的に選手情報を記録し、楽譜に付加するシステムはない。

また、演奏動作を解析して、楽譜上にユーザの演奏動作に関する情報を記録するシステムがこれまでに提案されている。Antoniadisら [60] はカメラと加速度センサを用いてピアノ演奏における運指や手の位置に関する情報を譜面に付加するシステムを開発した。しかし、譜面に付加された情報が複雑であるため、演奏者は正しい演奏情報を理解することが難しい。Weydeら [61] は同様に、バイオリン演奏においてカメラを用いて弓の演奏動作や胴体の傾きといった演奏情報をアニメーションや波形表示によって視覚提示するシステム [62] を用いた学習を提案している。しかし、アニメーションを見て習熟者と初学者の演奏動作の比較を行うなどは行えるが、演奏情報の付加した譜面の作成は想定していない。

さらに、林田ら [63] の研究では演奏のジェスチャの解析ではなく、演奏する楽曲の構造に基づいた演奏ルールを用いて、ピアノの運指を決定しているが、演奏者が実際に演奏中に行った運手を記録することを目的している本研究とは異なる。また、ドラム演奏では同じ楽曲やフレーズであってもフィルインなど即興的な箇所においては演奏者によって運手は異なる場合が多く、楽曲構造を用いた手法での運手識別は難しい。

澤ら [64] はカメラと指に装着したカラーマーカを用いてウッドベースの演奏における運指情報を楽譜に付加するシステムを開発している。竹川ら [65] も同様に、ピアノ演奏において運指を認識し、譜面に運指情報を付加するシステムを提案している。このシステムはドラム演奏への適用は想定しないが、演奏ルールを用いて演奏動作に関する情報を楽譜に付加する手法がドラム演奏にも適用できるのではないかと考えた。本研究ではドラム演奏において演奏動作を認識することでリアルタイムに選手情報を付加した譜面を作成するシステムの構築をめざす。

また、ドラム演奏において演奏者の動作を解析する手法がこれまでに提案されている。AeroDrums はドラム演奏における叩打動作に基づいてリアルタイムに採譜を行う機能をもつ。このシステムはカメラを用いて叩打動作を認識し、どのような楽器をどのような強さで叩打したかという演奏情報を MIDI データに変換し、採譜を行う。しかし、このシステムは選手情報を認識し、譜面にそれらを付加することは想定していない。また、Bouenardら [66] はモーションキャプチャを用いて打楽器の演奏動作を解析している。村松ら [67] はアコースティックドラムの演奏において、音響情報と動画像情

報を用いて演奏者がどのタイミングでどの打楽器を叩いたか認識し、採譜を行うシステムを提案している。このようにカメラやモーションキャプチャを用いた手法は演奏動作の解析に適しているが、解析を実現するために大掛かりなセッティングと認識を安定させるためにキャリブレーションを行う手間がある。さらに、実際のライブパフォーマンスなどの運用においてはステージの照明によってカメラによる認識が正しく行えないといった問題や、演奏する環境によってシステムを設置できないといった問題がある。一方、Logic Pro X[68]やCubase[69]のように近年の譜面作成アプリケーションでは、音楽データを音響解析技術を用いてMIDI情報に変換し譜面を作成することができるが、この手法で作成された譜面では選手情報を記録することができない。Van Rooyenら[70]はドラムの叩打における打撃音を解析して叩打した位置を特定している。叩打における音声データは打面を叩いたタイミングを認識する上では有効であるが、ライブ演奏など他の楽音などが存在する環境においては利用が難しい。

また、近年では演奏者間において演奏情報を共有することで、技術向上を支援する環境が構築されている。YAMAHA社のRemoteLive[71]ではMIDI信号による演奏情報をインターネットを介して相手に送ることができる。MuseScore[72]では演奏者自身が作成、または演奏中に記録した譜面をインターネット上に公開ことができ、他者と演奏情報を共有することができる。例えば、ユーザはピアノの運指を理解したり、他の演奏者が作成したギター演奏におけるタブ譜などを閲覧することで、同じ楽曲であっても演奏者自身と異なる演奏動作や特性を知ることができ、演奏の多様性を持たせる機会を支援している。森ら[73]の研究においても、譜面上に演奏で気を付ける点などをコメントとして記録し、他者とインターネット上で共有できるシステムを提案している。このように、演奏情報を記録し、データを他者と共有することは演奏技術の向上に対する学習方法の一つとして考えられ、本研究でも同様に演奏者間において選手情報を共有するために、ドラム演奏における選手情報を記録するためのシステムの構築をめざす。

### 4.3 提案システム

提案システムは以下の方針によって設計を行う。

(1) 実環境での利用: 提案システムはトレーニングによる演奏や実際のライブパフォーマンスにおける利用をめざす。一般的に、演奏者の動作を解析するためにカメラを用いた手法が想定されるが、この手法では実際のライブ環境におけるステージ上の照明

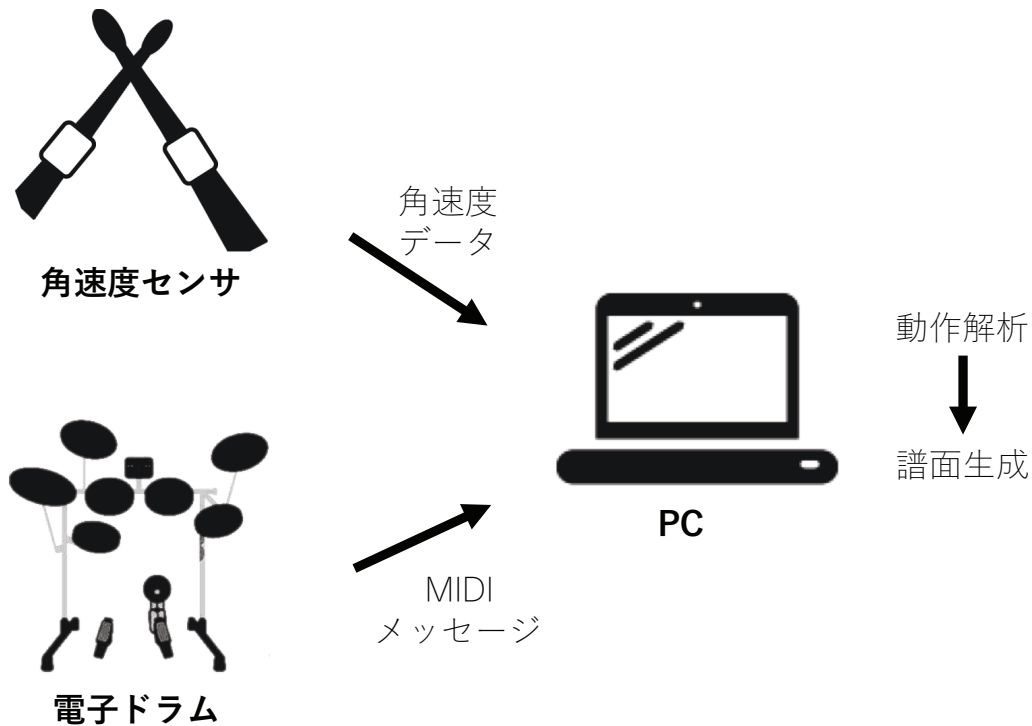


図 30: システム構成

によって演奏動作を正しく認識できない場合がある。また、カメラによる演奏動作の認識においては、認識に遅延が生じる可能性があるため、楽器演奏という特性上、本システムでは利用しない。提案システムでは、そのような環境において正しく認識を行うために角速度センサを用いた演奏動作の認識を行う。

(2) リアルタイムでの演奏情報の記録: 提案システムは練習や本番環境における演奏情報をリアルタイムに記録し、演奏後にそれらの情報を確認できるシステムをめざす。ユーザが演奏後に運手の特性を確認したり、間違った箇所を確認するために提案システムを利用することを想定する。本システムでは、リアルタイムに譜面を作成を行うため、叩打タイミングおよび叩打位置を解析するよう電子ドラムを用いて実際の演奏情報を取得する。

#### 4.3.1 システム構成

図 30 に提案システムの構成を示す。提案システムは角速度センサが搭載された2本のドラムスティック、電子ドラム、PCおよびMIDI音源から構成される。演奏中の角速度センサのデータは無線通信を用いてPCに送信される。ドラム演奏者は提案する

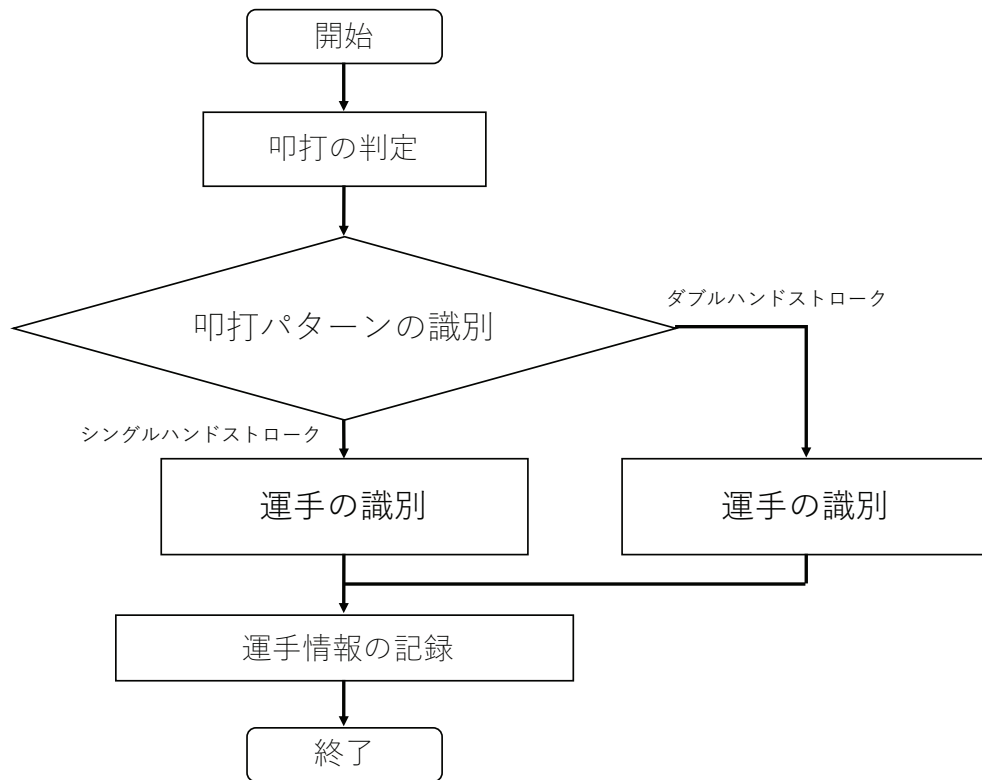


図 31: 選手識別処理のフローチャート

ドラムスティックを用いて電子ドラムを演奏し、システムは選手情報が付加された楽譜を生成する。提案システムは角速度センサのデータを用いて叩打したタイミングを認識し、電子ドラムによる MIDI メッセージから叩打した楽器を特定する。システムはこれらの情報に基づいてドラム演奏者がどの楽器を左右どちらの手で叩打したかを識別し、譜面を生成する。

また、演奏動作を解析する上で、角速度センサをドラムスティックではなく、演奏者の腕や手に固定してデータを取得する方法も考えられる。しかし、ドラム演奏では手首を中心として、ドラムスティックが回転するため、腕や手に固定した場合、角速度の変動が得られない場合がある。本研究では、角速度の変動が大きくみられるドラムスティック上に角速度センサを配置した。

#### 4.3.2 選手の識別手法

図 31 は選手識別の処理の流れを示す。システムは最初に電子ドラムから送信される MIDI メッセージに基づいてドラム演奏者が打面を叩打したか識別する。ここでは MIDI メッセージからノートオン (発音を示すメッセージ) が送信された場合、実際に打面を

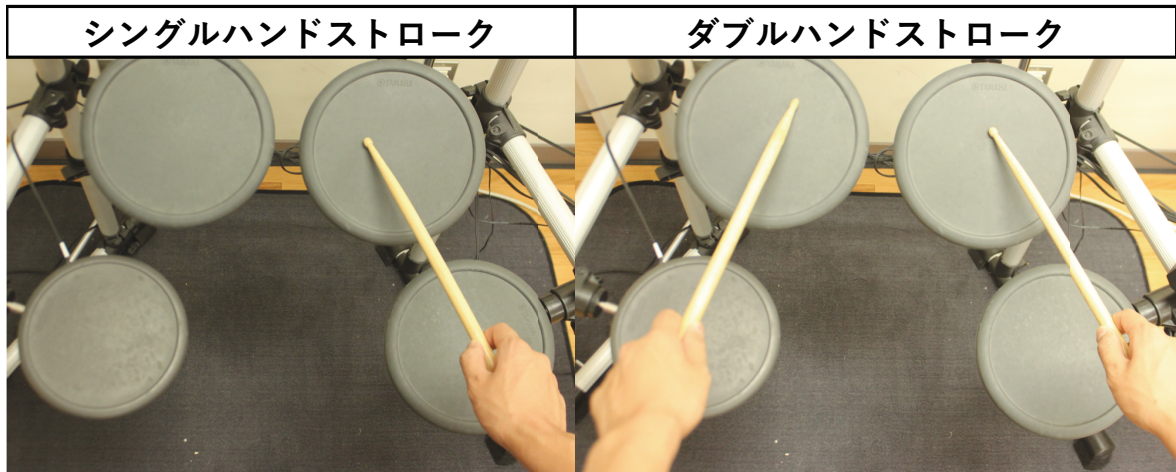


図 32: 叩打パターン

叩打したと判定する。

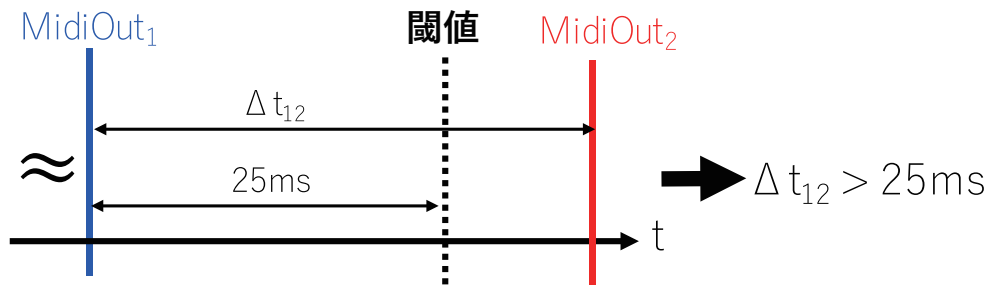
次に、システムは選手識別を行う前処理として2つの叩打パターンを識別する。1つは図 32 左に示すように左右のどちらかの手で1つの楽器を叩打する(以降、シングルハンドストロークと呼ぶ)パターンである。2つ目は図 32 右に示すように両手で同時に2つの楽器を叩打する(以降、ダブルハンドストロークと呼ぶ)パターンである。

システムはドラム演奏者がシングルハンドストロークを行ったのかダブルハンドストロークを行ったのか判定し、それぞれの叩打パターンにおける識別手法に基づいて選手の識別を行う。最後に、選手識別を行った後、システムは選手情報を記録し、楽譜を生成する。

### 叩打パターンの識別

システムは選手識別を行う前処理として2つの叩打パターンを識別する。提案システムはMIDIメッセージを受け取った時間間隔に基づいて実際の叩打がシングルハンドストロークかダブルハンドストロークであったか識別する。図 33 は2つのMIDIメッセージ(MidiOut<sub>1</sub>, MidiOut<sub>2</sub>)が送信されたタイミングを示している。提案システムは叩打パターンを識別するために時間間隔における閾値を設定する。ここでは例として閾値を25msに設定する。図 33 の下側で示すように、MidiOut<sub>1</sub>とMidiOut<sub>2</sub>を受け取った間隔 $\Delta t_{12}$ が25ms以下であった場合、システムは叩打パターンはダブルハンドストロークと識別する。また、図 33 の上側のように間隔 $\Delta t_{12}$ が25msより長かった場合、システムは2つの叩打が同時ではなく別々に行われたと判定し、叩打パターンをシングルハンドストロークと識別する。叩打パターンを識別した後に、提案システムは運

## シングルハンドストローク



## ダブルハンドストローク

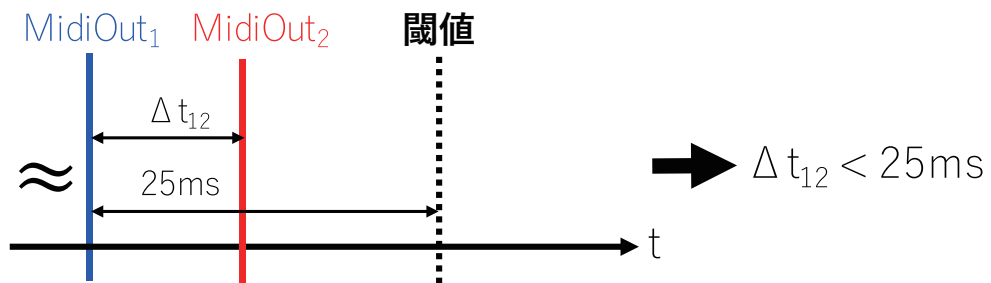


図 33: 叩打パターンの識別

手の識別を行う処理に移る。選手識別の手法は叩打パターンによって異なる。それぞれの叩打パターンにおける識別手法を下記で説明する。

### シングルハンドストロークにおける選手識別

提案システムは1軸方向の角速度のデータを用いてドラム演奏者が叩打したタイミングを認識する。図34の左側の2つの波形はシングルハンドストロークで打面を叩打した時の両手それぞれの角速度の変動であり、ドラムスティックを振り下ろしている場合、角速度の値は正を示す。ここでは、シングルハンドストロークとして、ドラム演奏者は左手でスネアドラムを叩打した後に、右手でフロアタムを叩打している。図はそれぞれ1回の叩打における角速度の変動を示し、腕の振りが最も速くなった時に角速度の値が最大となる。その後、角速度は減少し、図34の赤線に示すように、角速度の値が0となる。この瞬間が実際に打面を叩打したタイミングを示す。このとき、実際に電子ドラムからMIDIメッセージとしてノートオンが送信される。

システムは最初にMIDIメッセージを受信した場合にドラム演奏者が打面を叩打し

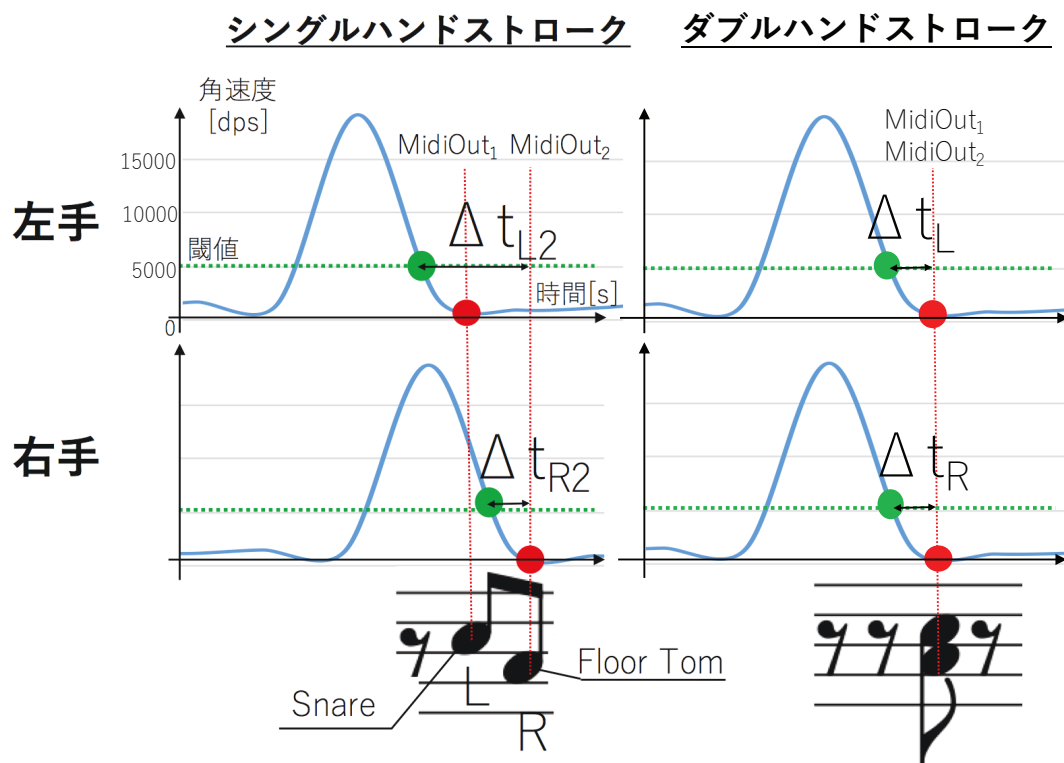


図 34: 叩打時の角速度データ

たと判定する。提案システムでは、ドラム演奏者が叩打していない場合における角速度の小さな変動による誤認識を防ぐために、識別を開始するための角速度の閾値を設定する。次にシステムはこの閾値を下回った瞬間の時間(図 34 中の緑色で示す点)と MIDI メッセージを受信した時間(図 34 中の赤色で示す点)を比較することで選手識別を行う。

ここで例として、MIDI メッセージ  $\text{MidiOut}_2$  が送信された場合における選手識別の処理について説明する。MIDI メッセージ  $\text{MidiOut}_2$  を受信した時間と両手それぞれの角速度データが閾値を下回った時間との間隔を比較すると、右手の間隔  $\Delta t_{R2}$  は左手の間隔  $\Delta t_{L2}$  より短い。したがって、システムは  $\text{MidiOut}_2$  は右手の叩打によって送信されたと識別する。

しかし、この識別手法はシングルハンドストロークのように 1 回に 1 つの楽器を叩打する場合には有効であるが、ダブルハンドストロークのように同時に 2 つの打面を叩打した場合、左右の叩打において時間間隔に大きな差が生じないため正しく識別できない。次にダブルハンドストロークにおける識別手法を述べる。

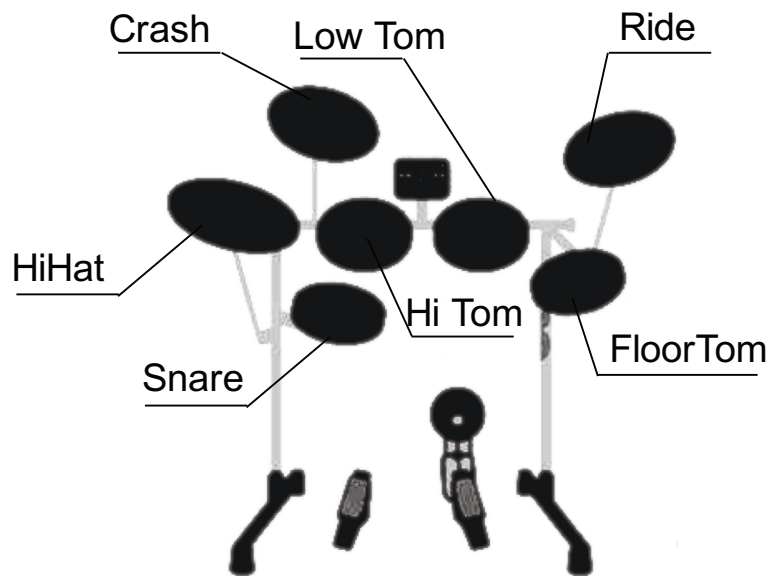


図 35: 想定するドラムセット

#### ダブルハンドストロークにおける選手識別

図 34 の右側の 2 つの波形はダブルハンドストロークにおける角速度データの変動および MIDI メッセージの受信タイミングを示す。ここでは、スネアドラムとフロアタムを同時に叩打した変動を示し、ダブルハンドストロークでは 2 つの MIDI メッセージが同時刻に送信される。このため、図 34 の右側に示すように、MIDI メッセージを受信した時間とそれぞれの手における角速度データが閾値を下回った時間との間隔は変わらない ( $\Delta t_L \cong \Delta t_R$ )。このように、シングルハンドストロークの選手識別で行なった時間間隔の比較を利用した手法では、ダブルハンドストロークにおいて叩打した 2 つの楽器それぞれをどちらの手で叩打したか識別は行えない。したがって、ダブルハンドストロークの選手識別においてはドラムセットの配置や演奏における叩打動作の特性によって定義する演奏ルールを用いて識別を行う。本研究ではダブルハンドストロークにおける以下の 3 つの演奏ルールを定義した。システムは叩打パターンがダブルハンドストロークであると判定した時、演奏ルールに基づいて、左右どちらの手でそれぞれの楽器を叩打したかを決定する。

**ルール 1:** 同じ高さに配置された楽器同士は手を交差して叩打しない。

本稿では図 35 に示すような一般的なドラムセットの利用を想定する。この場合、同じ高さに配置された楽器の組合せはスネアドラム-フロアタム、ハイタム-ロータムおよび

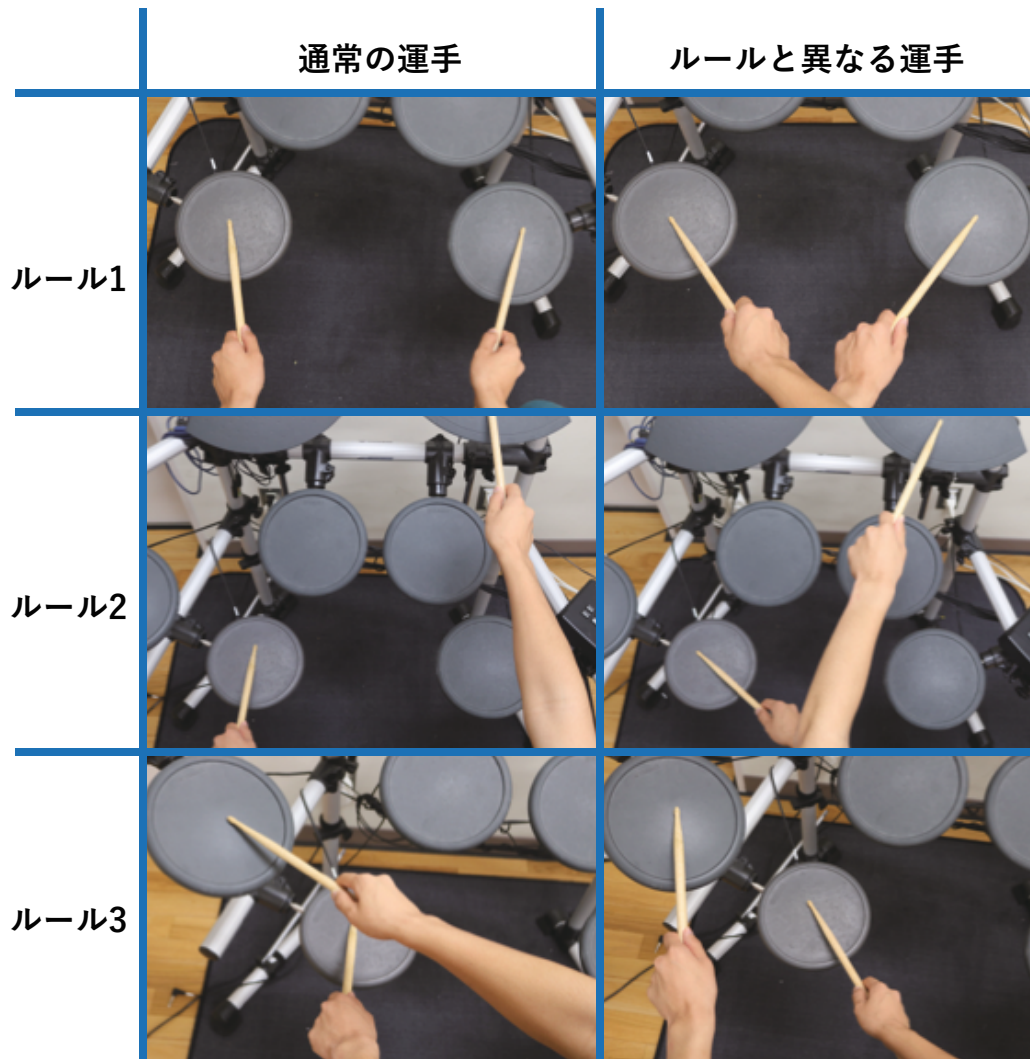


図 36: 各ルールにおける選手

クラッシュシンバル-ライドシンバルである。図 12 の上段はこれらを叩打する場合の選手を示しており、右側に示すように一般的にドラム演奏者はこれらの楽器同士を手を交差して叩くことはない。したがって、ドラム演奏者がこれらの組合せで叩打する場合、図 36 上段の左側に示すようにシステムは左側に配置された楽器を左手で叩打し、右側の楽器を右手で叩打したと識別する。例えば、スネアドラムとフロアタムを同時に叩打する場合。左手でスネアドラムを叩打し、右手でフロアタムを叩打したと識別する。表 12 はそれぞれの組合せにおける識別結果を示す。

**ルール 2:** 異なる高さに配置された楽器同士は楽器と同じ側の手で叩打する。  
叩打した 2 つの楽器が異なる高さに配置されている場合、叩打する手と楽器を同じ側に

表 12: ルール適用における識別結果

	組合せ	識別結果	
		左手	右手
ルール 1	Snare-Floor Tom	Snare	Floor Tom
	Hi Tom-Low Tom	Hi Tom	Low Tom
	Crash-Ride	Crash	Ride
ルール 2	Snare-Low Tom	Snare	Low Tom
	Snare-Ride	Snare	Ride
	Hi Tom-Ride	Hi Tom	Ride
	Hi Tom-Floor Tom	Hi Tom	Floor Tom
	Crash-Floor Tom	Crash	Floor Tom
	Crash-Low Tom	Crash	Low Tom
ルール 3	HiHat-Snare	Snare	HiHat

ある。例えば、図 36 の中段に示すようにクラッシュシンバルとスネアドラムを同時に叩打する場合、2つの楽器の中で左側にあるクラッシュシンバルは左側で叩打する。しかし、水平方向の楽器同士の位置が同じである場合、このルールは適用しない。また、一定のビートをハイハットを用いて演奏では頻繁に手を交差して演奏するため、このルールに含めない。表 12 はそれぞれの組合せにおける識別結果を示す。

**ルール 3:** ハイハットを用いた 8 ビートの演奏では両手は交差する。

一般的なドラム演奏においては、図 36 の下段に示すように、ハイハットで 8 ビートを演奏している間は左右の手は交差した状態で叩打する (演奏者の利き手が右手の場合)。したがって、8 ビートの演奏中のダブルハンドストロークではドラム演奏者は右手でハイハットを叩打し、左手でスネアドラムを叩打したと判定する。本稿では、ビートの検出認識は行っていないが、ハイハットとスネアドラムの同時叩打は 8 ビート演奏の場合に行われると想定している。また、16 ビートの演奏のようにハイハットを交互に叩打する演奏では、両手が交差していない状態で演奏を行うが、スネアドラムと同時に叩打するような場面は一般的な演奏でみられないため、シングルハンドストロークの識別手法で選手判定が行える。

### 4.3.3 選手情報の記録

提案システムは MIDI メッセージを用いて選手情報を記録する。選手情報は次に示すように MIDI メッセージ中のコントロールチェンジのひとつであるパンポット (左右

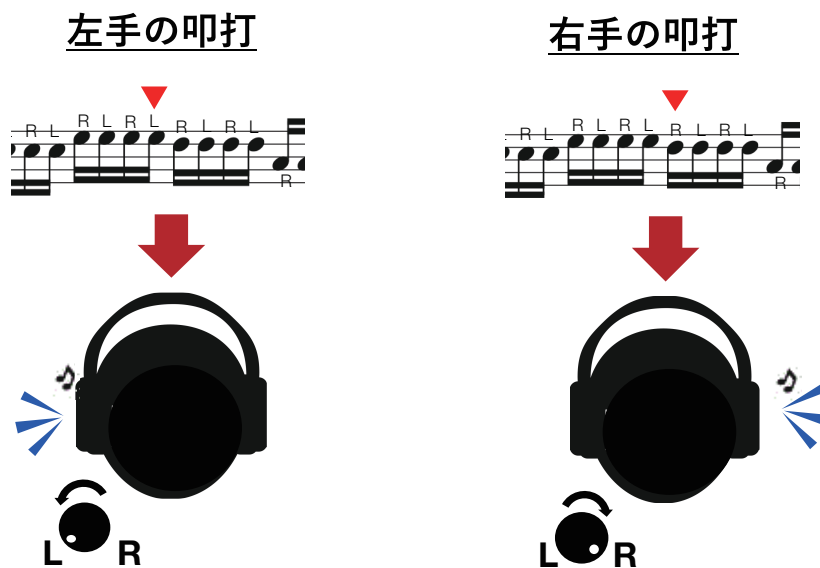


図 37: 選手情報の聴覚提示

の発音位置) の値として記録される。

左手の叩打 パンポットの値: 0

右手の叩打 パンポットの値: 127

両手の叩打 パンポットの値: 64

例えば、左手で叩打した場合、図 37 に示すようパンポットの値は“0”に制御する。この時、記録した MIDI データによる音声は左側からのみ聴こえるという仕組みである。このように、システムは選手情報を譜面を用いて視覚的に提示するだけでなく、パンポットの制御によって発音の定位が変化するため、聴覚による提示も行える。選手情報を MIDI メッセージとしてファイルに記録できるため、提案システムによって記録されたデータは DAW ソフトなどにおいて汎用的に利用することができ、ユーザは演奏後に記録した選手情報を振り返ることができる。また、これらのデータを指導者やプロの演奏者が作成することで、学習者と選手情報を共有できる。



図 38: 提案システムのプロトタイプ

#### 4.4 実装

提案システムのプロトタイプシステムを実装した。図 38 に示すようにプロトタイプシステムはドラムスティック、PC および外部 MIDI 音源で構成される。ドラムスティックはワイヤレステクノロジー社の角速度センサ WAA-010 を搭載している。角速度センサは図 38 に示すように叩打時に角速度の変動が大きく、打面に当たらない位置に取り付けた。出力音源は Roland 社の MIDI 音源モジュール SD-20 を使用した。電子ドラムは Roland 社の USB-MIDI インターフェース UM-1 EX[74] を用いて PC と接続している。電子ドラムは YAMAHA 社の DTXPLORER[75] を使用した。PC 上のソフトウェアの開発は OS X v10.10 上で Xcode 8.0 を使用した。

図 39 はプロトタイプのアプリケーションのスクリーンショットを示す。ユーザはアプリケーション上で角速度データの確認や MIDI の出力ポートの設定が行える。図 39 の中央は角速度データおよび MIDI メッセージより取得した叩打情報によって採譜された譜面である。譜面上には各打楽器の叩打情報を提示し、各拍の色はどの手で叩打したかを示している。赤色の拍は右手で叩打した場合を示し、黄色の拍は左手で叩打した場合を示している。バスドラムは青色で示す。

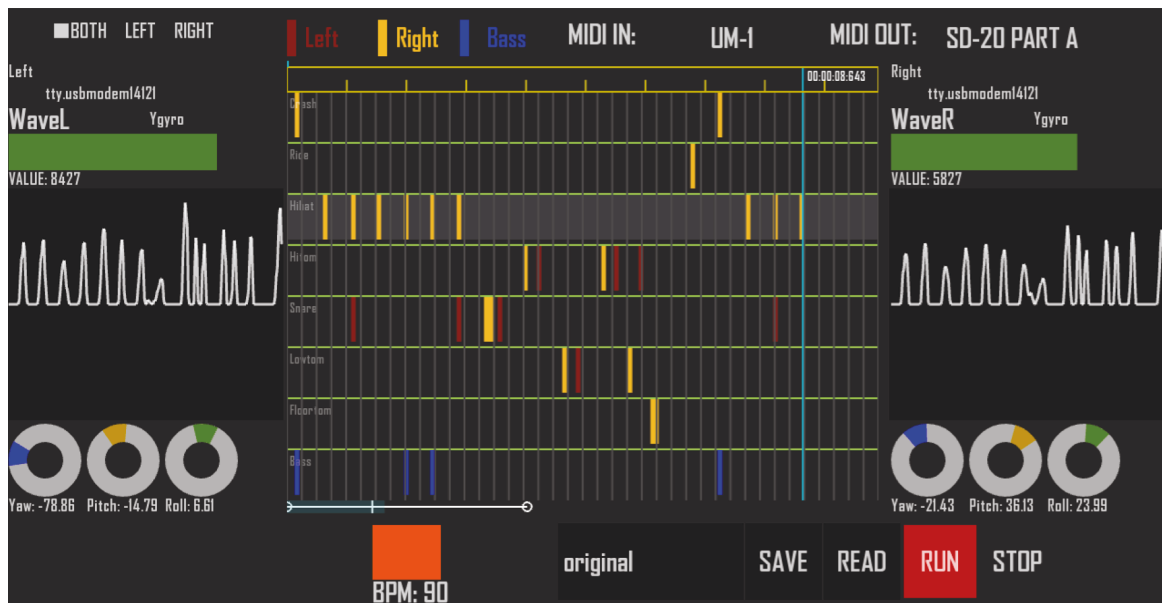


図 39: アプリケーション画面

## 4.5 評価

提案システムの有用性を検証するために、2つの評価実験を行った。最初に提案システムの選手識別の認識精度の調査を行った。次に、学習者が提案システムによって生成された譜面を利用した場合におけるパフォーマンスへの影響を調査した。

### 4.5.1 実験 1: 認識精度の検証

#### 実験方法

本実験では、プロトタイプシステムを用いて課題フレーズを叩打した場合の選手の認識率を検証する。実験では被験者は図 40 に示す 3つの課題フレーズを演奏する。演奏テンポとして BPM( beats per minute) は 90 および 120 の 2種類に設定した。課題フレーズは 2小節で構成される。被験者はそれぞれの演奏テンポで各フレーズを 10回繰り返し演奏した。

図 40 に示すように、フレーズ A ではドラム演奏においてよく用いられるリズムパターンである 8ビートを演奏する。フレーズ B ではハイハットを左右交互の手で叩打する 16ビートを演奏する。フレーズ C では 8ビート等のような一定にリズムパターンではなく、リズムパターンの繋ぎ目に行われるフィルイン (即興的な演奏) を想定した演奏を行う。

Figure 40 consists of three musical staves labeled A, B, and C, representing drum patterns. Staff A shows a sequence of four measures. The first measure has a crash cymbal (marked with an asterisk) and a snare drum. The following three measures have a snare drum and a bass drum. Above the staff, the rhythm is indicated as R R R R, R R R R, R R R R, and R R R R. Staff B shows a sequence of eight measures. The first measure has a hi-hat and a snare drum. The following seven measures have a snare drum and a bass drum. Above the staff, the rhythm is indicated as R L R L, L R L R, R L R L, L R L R, R L R L, L R L R, R L R L, and L R L R. Staff C shows a sequence of eight measures. The first measure has a hi-hat and a snare drum. The following seven measures have a snare drum and a bass drum. Above the staff, the rhythm is indicated as R L R, R L R, R R L, L R R, R L R L, R L R L, R L R L, and R L R L. Labels for Crash, HiHat, Snare, Bass, Hi Tom, Low Tom, and Floor Tom are placed below the staffs with lines pointing to the corresponding notes.

図 40: 課題フレーズ

被験者は図 40 に示すように楽譜の選手情報に従って課題フレーズを演奏する。また、被験者は大学院生と大学生を合わせた 4 名で、全ての被験者が 2 年以上のドラム演奏歴をもつ。被験者全員が右利きである。

本実験では、叩打パターンを識別するための MIDI メッセージ受信時間の間隔の閾値を 25ms に設定した。また、選手の判定のきっかけとなる角速度の閾値を 3000dps (degree per second) に設定した。

被験者は課題フレーズの演奏に慣れるため、認識率の検証を行う前に 10 分間のトレーニングを行った。

## 結果と考察

表 13 に被験者ごと各実験条件における認識率を示す。表 13 の各値は誤認識 (実際に叩打に使用した手と異なる識別が行われた場合) が生じた回数に基づいた認識率を示している。表 13 に示すように、認識率は全ての実験条件において 95% を上回った。また、ダブルハンドストロークにおいては誤認識がみられなかった。

しかし、被験者がフレーズ B およびフレーズ C を演奏した場合に誤認識がみられた。図 41 は被験者 II がフレーズ B を BPM120 のテンポで演奏した場合に生じた誤認識を示している。被験者 II は実際に図 41 の白枠で示す箇所を左手で叩打していたが、シス

表 13: 認識率 [%]

フレーズ		A		B		C	
BPM		90	120	90	120	90	120
被験者	I	100	96.3	100	100	98.5	99.2
	II	96.3	98.1	99.7	100	100	100
	III	99.4	97.5	100	99.4	99.6	98.5
	IV	99.4	96.9	99.4	99.1	99.2	98.8
平均値		98.8	97.2	99.8	99.6	99.3	99.1
		98.0		99.7		99.2	

被験者II: フレーズB (BPM120) ■:左手 ■:右手

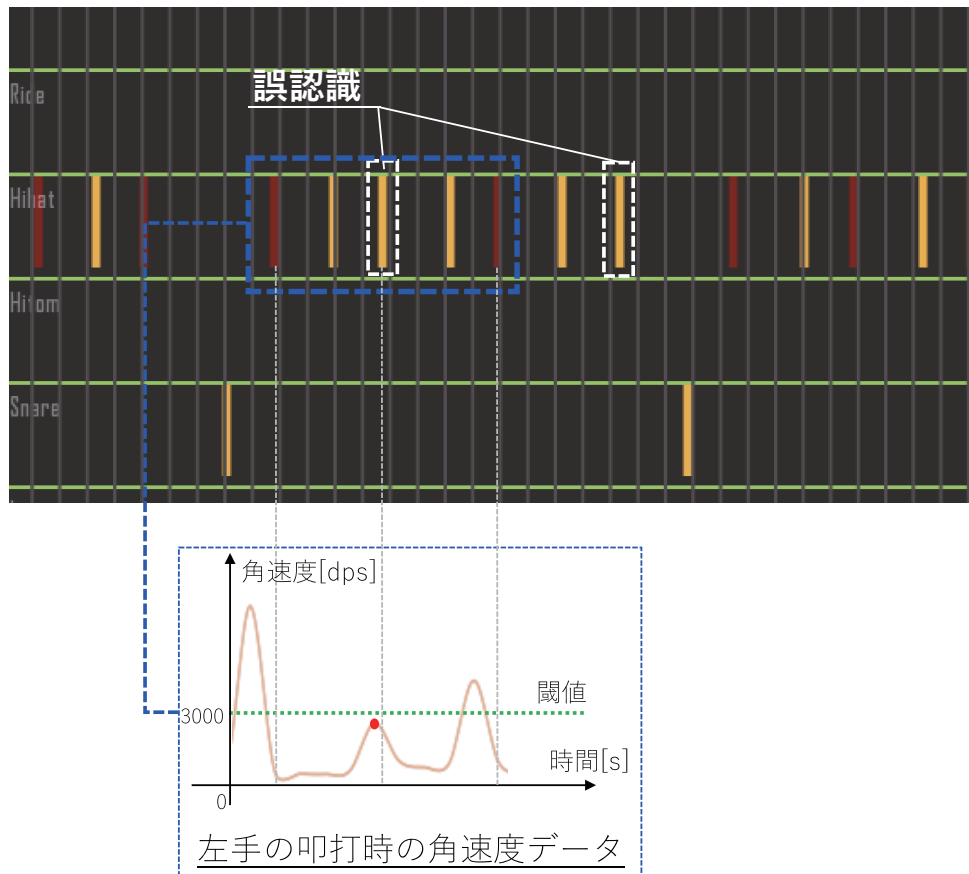


図 41: システムの誤認識

テムは右手で叩打したと誤って運手を識別している．図 41 の下部に示すように，この箇所での叩打における角速度の変動を見てみると，角速度の値が閾値を超えていなかったことが分かった．したがって，提案システムは学習者が打面を叩打していなかった

と判定し、選手識別を開始していなかった。結果として、この誤認識はシステムがそれぞれの手における時間間隔 (MIDI メッセージを受信した時間と各角速度データが閾値を下回った時間の差) を比較できなかったことが要因として考えられる。これらの未認識を防ぐために、振りの小さな叩打に対しても識別を開始する角速度の閾値の設定が必要である。

#### 4.5.2 実験 2: システムを使った学習による演奏の影響

##### 実験方法

本実験では、システムによって生成された譜面を用いてドラム学習を行った場合の演奏への影響を調査する。評価では、従来のように選手情報がない譜面と提案システムによって作成された選手情報がある譜面を使って学習を行い、それぞれの学習後の演奏の影響を比較する。実験では、被験者は図 42 に示す課題フレーズを異なる選手で 2 回学習する。また、課題フレーズの第 1 小節の 1 拍目で叩打するクラッシュシンバルは図 42 の下に示すように演奏者の右側に設置する。本実験では、図 42 で示す譜面の緑枠内のフレーズにおける選手の比較を行う。図 42 の下側は、緑枠内のフレーズの叩打順序を示している。また、譜面の緑枠以外の箇所は一般的なドラム演奏で用いられる 8 ビートのフレーズであり、このフレーズでは被験者はハイハットを右手でスネアドラムを左手で叩打するように指定する。

演奏テンポは 120 の BPM に設定した。被験者は 3 名の大学生で、1~3 年のドラム経験がある。演奏内容は電子ドラムの叩打によって送信される MIDI メッセージを DAW で記録し、叩打の大きさおよび叩打タイミングを調査する。

被験者は最初に従来手法として図 42 上部のように選手情報が付加されていない譜面を使用し、課題フレーズを 5 分間学習する。この時被験者は自分で設定した選手で演奏してもらう。フレーズの学習後に学習者の演奏内容を記録する。

次に、同じフレーズを提案手法として図 42 下部のように選手情報が付加された譜面を用いて 5 分間学習する。被験者には選手情報が付加された 2 種類の譜面を提示する。これらの譜面は 4 名のプロドラマーが設定した叩打順序に基づいて作成した。全てのプロドラマーが 15 年以上のドラム演奏経験をもつ。被験者は従来手法の譜面における選手が提案手法の譜面と異なっている場合、提案手法の譜面から選手を選択することができ、フレーズを学習する。この学習後に、演奏データの記録を行った。この 2 つ

**課題フレーズ(選手情報なし)**

**課題フレーズ(選手情報あり)**

**A**

**B**

課題フレーズの叩打順序

図 42: 課題フレーズ

の記録したデータをもとに提案システムの譜面を用いて学習した場合としない場合の演奏の質を比較する。

### 結果と考察

図 43 はそれぞれの被験者が従来手法の選手で課題フレーズを演奏した時の選手を示している。被験者Ⅱおよび被験者Ⅲは提案手法の譜面と異なる選手で演奏を行った。この被験者2名は図 43 で示すように提案手法の選手を選択した。また、被験者Ⅰは最初に提案手法の譜面 B と同じ選手で課題フレーズを演奏したため、2 回目に提案手法の譜面 A を提示して学習した。

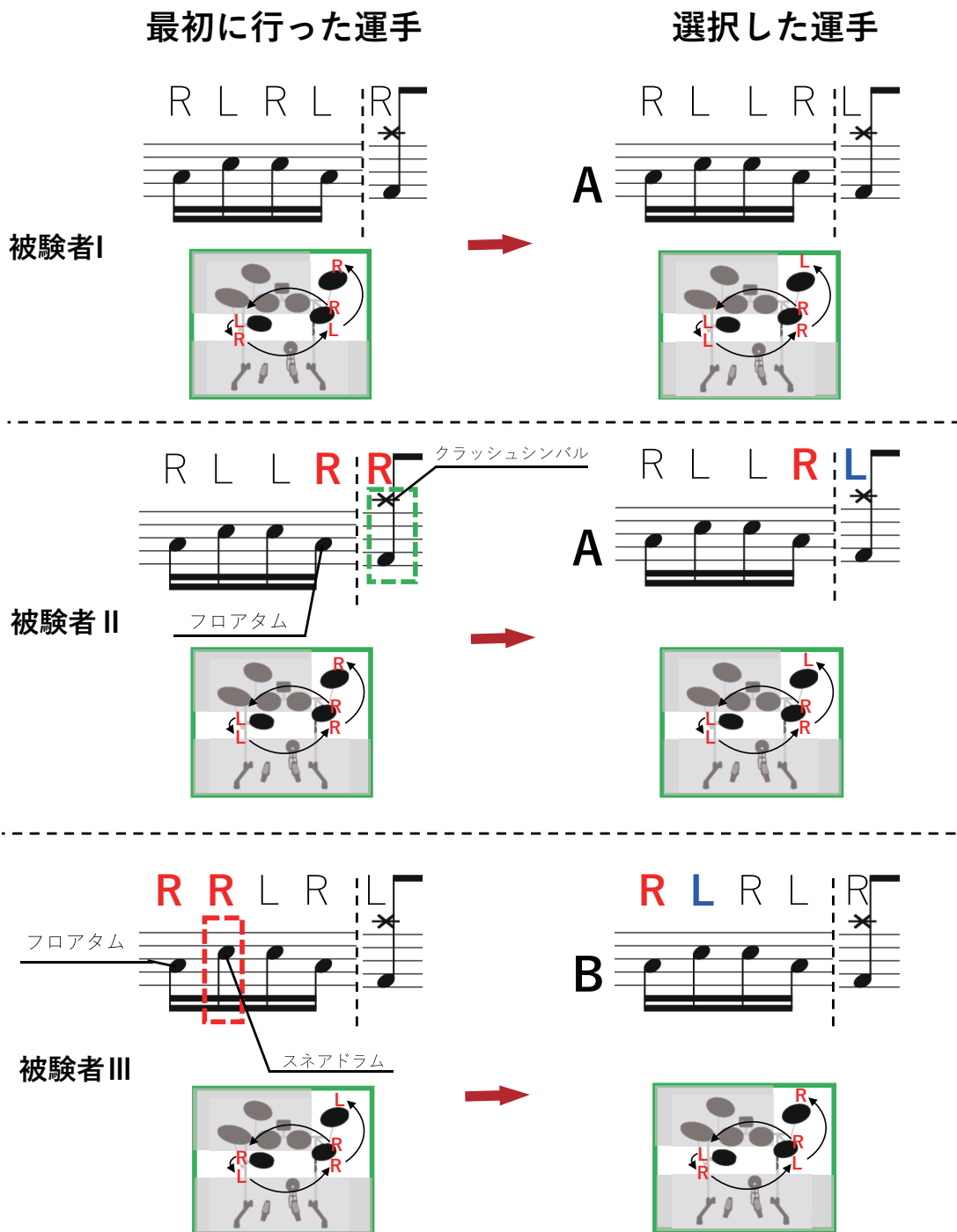


図 43: 各被験者の叩打順序

はじめに、提案手法の譜面を利用することによる叩打のタイミングへの影響について述べる。選手情報のない譜面を用いて演奏した場合、被験者IIは正しいタイミングでクラッシュシンバルを叩打できていなかった。つまり、被験者IIは図43の緑枠で示

す箇所を遅れて叩打する傾向があった。これは被験者Ⅱがフロアタム → クラッシュシンバルの順で2回連続して右手を用いて叩打を行なっているため、正しいテンポで右手をフロアタムからクラッシュシンバルに移動することができなかったと考えられる。一方で、図43中段の右に示すように、この被験者が選手情報を提示した譜面Aを用いて再び同じフレーズを演奏した場合、フロアタムとクラッシュシンバルをそれぞれの手を交互に使って叩打しているため、演奏テンポから遅れることなく演奏することができていた。これらの結果より、被験者Ⅱは選手情報が付加された譜面を用いることで演奏のタイミングのずれを防ぐことができた。

次に、叩打の強さへの影響について述べる。選手情報のない譜面を用いて演奏した場合、被験者Ⅲは図43の赤枠で示すスネアドラムを直前のフロアタムの叩打に比べて弱く叩打する傾向があった。これはフロアタム → スネアドラムの順で2回連続して右手を用いて叩打を行なっている上、距離の離れた2点の楽器間を片手で移動しているため、本実験の演奏テンポでは、スネアドラムの叩打において手を大きく振り上げることができず音量が小さくなったと考えられる。一方で、図43下段の右側で示すように、この被験者が選手情報を提示した譜面Bを用いて再び同じフレーズを演奏した場合、被験者Ⅲは2度の叩打を同程度の強さで演奏できていた。

しかし、被験者は提案する譜面の利用においてドラムスティックを演奏途中で落としたり、譜面と異なる打面を誤って叩打する場合はみられた。これは被験者が普段慣れていない選手で演奏を行なっているためと考えられる。このように、選手情報のある譜面を用いて学習することでテンポキープやアクセントなど演奏パフォーマンスを向上することができたが、被験者は提示する選手を使った演奏に慣れる必要がある。また、提案システムを利用する上で、プロドラマーによるそれぞれのフレーズに対する様々な選手パターンを収集する必要がある。学習者はそれらから自身の好む選手パターンを選択肢し学習することが、提案システムを効率的に利用できる方法であると考えられる。したがって、今後は様々な選手パターンが提案システムを用いて記録されたライブラリを作成する必要がある。

## 4.6 むすび

本研究では、ドラム演奏において演奏者の選手情報を付加した譜面を生成するシステムを構築した。提案システムはドラムスティックに取り付けた角速度センサのデータおよび電子ドラムのMIDIメッセージを用いて、ドラム演奏者がどの楽器をどの手で

叩打したかを識別する。提案システムは識別結果を用いて譜面を生成し、演奏者に選手情報を提示する。選手の識別には、角速度データと MIDI メッセージの受信時間およびドラムにおける演奏ルールを利用した。また、プロトタイプシステムを用いて課題フレーズを演奏した場合におけるシステムの選手の認識率を検証した。評価結果より、システムが高い精度で選手の識別を行えることを確認した。さらに、選手情報が付加された譜面を用いて課題フレーズを学習することで、テンポキープやアクセントにおいて演奏のミスを防ぐことができた。

今後の課題としては、システムのさらに高い有用性の検証を行うために、異なる演奏テンポや複雑なフレーズでの演奏および被験者を増やした実験の実施があげられる。システムの向上に向けて本研究では行えなかった叩打の組合せに対応した演奏ルールの適用や識別アルゴリズムの見直しが求められる。また、本システムでは1軸の角速度の変動に対して、選手識別を行っていたが、実環境での利用に対し、ドラムスティックを握り直した場合などにロール軸が回転した場合においても識別できるようにシステムの改良が必要である。さらに、選手情報だけでなく角速度センサを用いた叩打時の腕の振りの速度やスティックの握り方など演奏情報を付加した楽譜の生成を行う。

また、提案システムはさまざまな演奏ジャンルのドラム演奏者に利用してもらうことで、演奏ジャンルごとによる叩打順序の特性などを抽出し、演奏データの記録に適用できると考えられる。例えば、ロックミュージックの演奏においては、なるべく大きな叩打をすることを重視し、両手が交差しないような選手を行うドラマーが存在する。一方で、ジャズミュージックの演奏においては、叩打の強さよりも演奏のグルーブを重視し、手が交差してもタイミングがずれにくい選手を選ぶ可能性がある。このように、演奏するジャンルやテンポによって選手の特長や演奏で重視する点は異なる場合が存在する。今後は様々な演奏者のデータを収集することで、ドラム学習者に適した選手を提示し、データを共有できる環境の構築をめざす。



## 5 結論

### 5.1 本論文のまとめ

本論文では、情報技術を利用した打楽器演奏者のための支援を目的として「演奏・学習・記録」の3つの要素を支援するシステムを提案した。これらのシステムは演奏者の動作解析および情報提示を行うことで、打楽器演奏者に最適な動作識別と学習支援を行った。

まず、第1章では、近年の打楽器演奏における情報技術を利用した支援システムの例を「演奏・学習・記録」の3つ要素をもとに挙げた。次にその問題点について述べ、それぞれの要素において解決すべき点を挙げ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、打楽器演奏のうち、ドラム演奏の音色拡張および可搬性の向上を行うために、実ドラムと仮想ドラムを統合するためのシステムを提案した。本研究では、従来の単体でしか演奏が行えなかった仮想ドラムに対し、実ドラムと組み合わせて演奏できるシステムを構築することで両者の利点を活かすことができた。実ドラムと仮想ドラムの叩打の識別を行うために、提案システムはドラムスティックに内蔵された加速度の変動を用いて演奏者の動作解析を行った。叩打識別においては演奏動作を早期的に認識するため、電子音の出力における遅延を防ぐことができた。また、提案システムを用いた評価および実運用を行い、システムの有用性を確認した。

第3章では、打楽器演奏における学習支援を行うために、情報提示を用いた学習支援手法の提案とシステムの構築を行った。従来の電子譜面や音声などといった情報提示を用いた打楽器の学習支援では、情報提示を受けるフェーズと叩打動作を行うフェーズを同時に行ってきた。これに対し、本研究では打楽器演奏のように両手を異なるタイミングで強弱をつけて演奏するといった複数の動作を同時に行う学習においては、従来の学習方法のように情報提示と叩打動作を同時に行う場合、それぞれを効率的に学習できないのではないかと考え、両者を分離して学習する方法を提案した。正しい演奏情報を提示するために、視覚、聴覚および触覚提示を行うプロトタイプシステムを提案した。システムを用いた評価を行い、情報提示を受けるフェーズと叩打動作を行うフェーズを分離して学習することで学習時間を短縮できることを確認した。また、情報提示と身体動作を切り離して学習する方法は打楽器演奏だけでなくスポーツ分野などといったリズムの情報提示と身体動作を学習する環境においても利用できると考え

られる。

第4章では、ドラム演奏者が正しい叩打順序を学習するために、選手情報を記録する譜面生成システムを提案した。従来、ドラム演奏の選手情報を提示するドラム譜面を作成するには、演奏者が譜面に情報を書き込む場合や譜面作成アプリケーションを使って手入力で作成する必要があった。本研究では、ドラム演奏者の選手情報を演奏中にリアルタイムに譜面に記録するシステムを構築した。提案システムは第2章の研究課題で開発したドラムスティックを用いて角速度センサのデータと電子ドラムのMIDI情報を用いて選手の識別を行った。提案システムを用いてドラム演奏者による認識精度の評価を行い、システムの有用性が確認できた。さらに、選手情報が付加された譜面を用いることで、効率的な叩打順序を提示し演奏のミスを防ぐことができた。また、提案システムによって生成された譜面はMIDI情報として記録されるため、指導者がシステムで作成した課題フレーズを第3章のような情報提示を用いた学習において利用することができる。

## 5.2 検討課題

本研究では、情報技術を用いることで、打楽器演奏の新たな演奏支援、学習支援、制作支援を提案してきた。一方で、提案する支援技術は単一のアプリケーションや対象者にしか利用できない場合があり、今後はこれらの支援技術をさらなる分野において適用させる必要がある。本節では、今後検討する予定である技術課題について述べる。

**早期認識技術の転用:** 第2章ではドラム演奏において演奏者の動作を早期的に認識する手法を提案した。ユーザの動作を早期的に認識することで、音声を出力させるといった処理や無線通信におけるデータ送信などにおいて発生する処理時間を許容したシステムを実装した。本研究ではこの早期認識技術をドラム演奏の動作解析だけではなく、事前の認識を必要とする環境においても転用する必要をめぐす。例えば、ネットワーク環境においてはデータ通信において遅延が発生するが、こうした環境において動作を早期的に認識することで、遅延を考慮したシステム設計が行えると考えられる。

**フェーズ分離による学習効果の比較検証:** 第3章では、打楽器演奏の学習において情報提示と演奏動作の2つのフェーズを分離して訓練する手法を提案した。本研究では、提案手法を複雑な身体動作を必要とする打楽器演奏において適用し、学習の有用性を確認したが、今後は楽器演奏だけでなく、リズムを伴うどのような身体動作の学習に対してフェーズの分離が効果的であるか検証する必要がある。従来の身体運動の学習方

法としては、ランニングなど単純な身体動作に関してはフェーズを分離して学習するよりも実際に身体に動かしながら情報提示を受けた方が効果的であると考えられている [38, 76, 77]. これに対し、提案手法のように情報提示と身体運動を分離することで有用性が得られるのは、どのような動作を伴う身体運動の学習においてであるか調査する予定である。また、得られた調査よりそれぞれの動作において最適な情報提示と叩打動作を行う時間の解明をめざす。

**演奏動作の特性分析およびデータ収集:** 第2章および第4章では打楽器演奏における演奏者の叩打動作の解析を行ってきた。本研究では、解析した結果を電子音による出力や譜面生成といった特定のアプリケーションに向けてデータの解析を行ってきたが、今後は取得したデータを用いて演奏者ごとの演奏動作の特性を分析し、データ収集を行っていきたい。例えば、ドラム演奏では演奏する楽曲ジャンルによって叩打順序や叩打動作は異なると考えられる。様々な演奏者の叩打時におけるスティックを振る速度や握る強さといったデータを記録することで、「このジャンルにおける叩打順序はこのような傾向が多い」といったように、演奏者間やジャンル間における演奏の特性の解明が行える。これらの演奏データをライブラリとして蓄積することで、新たなフレーズを訓練する学習者に対してライブラリから叩打順序といった演奏方法を提示し、選択させることができる。



## 謝辞

本研究を推進するにあたり、直接の御指導、御助言、御討論を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本昌彦教授，寺田努准教授，はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科 竹川佳成准教授に衷心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、大変有益な御指導と御助言を多数賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻 的場修教授，神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 小澤誠一教授に心より感謝申し上げます。

神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻に在学中、御教示、御激励頂いた神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の諸先生方に感謝すると共に、諸職員の方々に感謝いたします。

本研究において、多大なる御助言を頂きました立命館大学情報理工学部情報システム学科 村尾和哉准教授，金沢工業大学工学部情報工学科 佐野渉二講師，神戸大学自然科学系工学域特命助教 磯山直也特命助教に深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、多くの御討論や御助言を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻塚本・寺田研究室の諸氏に心より感謝申し上げます。

最後に、研究生を送る上で、暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた両親を始めとする家族に心からの感謝と御礼を申し上げます。



## 参考文献

- [1] MIDI, <https://www.midi.org/>.
- [2] V-drum, <http://www.roland.co.jp/V-Drums/>.
- [3] SPD-SX, <https://www.roland.com/jp/products/spd-sx/>.
- [4] Aerodrums,  
<http://aerodrums.com/aerodrums-product-page/>.
- [5] Roland V-Drums Friend Jam,  
<http://www.roland.com/jp/FriendJam/V-Drums/>.
- [6] Freedrum, <https://www.freedrum.rocks/>.
- [7] Silverlit V-beat AirDrum, [http://www.silverlit.com/product\\\_04.htm](http://www.silverlit.com/product\_04.htm).
- [8] Wii Music, <http://www.nintendo.co.jp/wii/r64j/>.
- [9] J. O. Borchers: WorldBeat: Designing a Baton-Based Interface for an Interactive Music Exhibit, *Proc. of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI97)*, pp. 131–138 (1997).
- [10] T. M. Patola, A. Kanerva, J. Laitinen, and T. Takala: Experiments with Virtual Reality Instruments, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME05)*, pp. 11–16 (2005).
- [11] Lightning, <http://www.buchla.com/lightning3.html>.
- [12] Kinect, <http://www.xbox.com/ja-jp/kinect>.
- [13] PlayStation Move, <http://www.jp.playstation.com/ps3/move/>.
- [14] Theremini, <https://www.moogmusic.com/products/etherwave-theremins/theremini>.

- [15] 坂東哲平, 一ノ瀬元喜: 3次元動画像処理による仮想楽器システムの提案, 第24回人工知能学会全国大会論文集, 1G1-4 (2010).
- [16] TAKARA TOMY AIR GUITAR PRO,  
<http://www.takaratomy.co.jp/products/airguitar>.
- [17] MIBURI, <http://www.yamaha.co.jp/design/products/1990/miburi/>.
- [18] KAGURA, <http://www.kagura.cc/jp/>.
- [19] 富林 豊, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 装着型無線加速度センサを用いたウェアラブルDJシステム, 日本ソフトウェア科学会第15回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2008) 論文集, pp. 85–90 (Nov. 2008).
- [20] 藤本 実, 藤田直生, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: ウェアラブルダンシング演奏システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 12, pp. 2900–2909 (2009).
- [21] T. M. Nakra, Y. Ivanov, P. Smaragdis, and C. Ault: The UBS Virtual Maestro: Interactive Conducting System, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME09)*, pp. 250–255 (2009).
- [22] A-49, <https://www.roland.com/jp/products/a-49/>.
- [23] S. Gelineck, N. Bottcher, and L. Martinussen: Virtual Reality Instruments Capable of Changing Dimensions in Real-time, *Proc. of the International Conference on Enactive Interfaces* (2005).
- [24] 岩谷亮明, 澤田秀之: VR エンタテインメントに向けたエア楽器演奏システム, インタラクション 2014 論文集, pp. 587–592 (2014).
- [25] T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima and H. Kajimoto: HaCHIStick: Simulating Haptic Sensation on Tablet PC for Musical Instruments Application, *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology (UIST 11 Adjunct)*, pp. 73–74 (2011).
- [26] T. M. Patola: User Interface Comparison for Virtual Drums, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME05)*, pp. 144–147 (2005).

- [27] M. Collicutt, C. Casciato, and M. M. Wanderley: From Real to Virtual: A Comparison of Input Devices for Percussion Tasks, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME09)*, pp. 1–6 (2009).
- [28] WAA-010, <http://www.atr-p.com/sensor10.html>.
- [29] EE-SY110, [http://www.omron.co.jp/ecb/products/photo/33/ee\\_sy110.html](http://www.omron.co.jp/ecb/products/photo/33/ee_sy110.html).
- [30] SD-20, <http://www.roland.co.jp/products/jp/SD-20/>.
- [31] Xcode, <https://developer.apple.com/xcode/>.
- [32] Illumine KOBE 2010, <http://cse.eeddept.kobe-u.ac.jp/illumineKOB2010/main.html>.
- [33] エンタテインメントコンピューティング 2012, <http://ec2012.entcomp.org/>.
- [34] いしかわ夢未来博 2012, <http://www.yumemirai.jp/>.
- [35] Rock Band: <http://www.harmonixmusic.com/games/rock-band/>.
- [36] Guitar Hero: <https://www.guitarhero.com/>.
- [37] S. Holland, A. J. Bouwer, M. Dalglish, and T. M. Hurtig: Feeling the beat where it counts: fostering multi-limb rhythm skills with the haptic drum kit, *Proc. of the International Conference on Tangible, embedded, and embodied Interaction (TEI 2010)*, pp. 21–28 (2010).
- [38] 七澤朱音, 本田拓二: 運動のリズムを重視した体育学習がもたらす効果に関する研究 -低学年における「多様な動きをつくる運動遊び」を通して-, 体育科教育研究, Vol. 30, No. 2, pp. 1–11 (2014).
- [39] YAMAHA Song Beats: [http://jp.yamaha.com/products/apps/song\\\_beats/](http://jp.yamaha.com/products/apps/song\_beats/).

- [40] 斎藤恵一, 星 裕之, 川澄正史, 斎藤正男: テレビゲームと脳活動: 機能的 MRI による研究, *バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌*, Vol. 8, No.1, pp. 93–98 (2006).
- [41] C. Chafe: Tactile audio feedback, *Proc. of the International Computer Music Conference (ICMC 1993)*, pp. 76–79 (1993).
- [42] G. Grindlay: Haptic Guidance Benefits Musical Motor Learning, *Proc. of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 397–404 (2008).
- [43] C. Lewiston: MaGKeyS: A Haptic Guidance Keyboard System for Facilitating Sensorimotor Training and Rehabilitation, *PhD Thesis. MIT Media Laboratory*, (2008).
- [44] K. Huang, T. Starner, E. Do, and G. Weinberg: Mobile Music Touch: Mobile Tactile Stimulation For Passing Learning, *Proc. of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2010)*, pp. 791–800 (2010).
- [45] L. Hayes: Vibrotactile Feedback-Assisted Performance, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 2011)*, pp. 72–75 (2011).
- [46] G. Young, D. Murphy, and J. Weeter: AUDIO TACTILE GLOVE, *Proc. of the International Conference on Digital Audio Effects*, pp. 1–5 (2013).
- [47] S. Miura, and M. Sugimoto: Supporting Children’s Rhythm Learning Using Vibration Devices, *Proc. of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2006)*, pp. 1127–1132 (2006).
- [48] BODiBEAT:  
<http://jp.yamaha.com/support/fitness/bodibeat>.
- [49] Smart B-Trainer:  
<http://www.sony.jp/b-trainer/>.

- [50] J. Phillips-Silver, L. J. Trainor: Feeling the beat: Movement Influences Infant Rhythm Perception, *Science*, Vol. 308, p. 1430 (2005).
- [51] J. Phillips-Silver, L. J. Trainor: Hearing what the body feels: Auditory encoding of rhythmic movement, *Cognition*, Vol. 105, pp. 534–546 (2007).
- [52] 河島則天: 歩行運動における脊髄神経回路の役割, 国立障害者リハビリテーションセンター研究紀要, Vol. 30, pp. 9–14 (2009).
- [53] 小宮山伴与志: ヒトにおける四肢運動のリズム形成とその反射性制御, バイオメカニズム学会誌, Vol. 36, No. 2, pp. 66–72 (2012).
- [54] Jaynie F. Yang, Erin V. Lamont, and Marco Y. C. Pang: Split-Belt Treadmill Stepping in Infants Suggests Autonomous Pattern Generators for the Left and Right Leg in Humans, *Journal of Neuroscience*, Vol. 25, pp. 6869–6876 (2005).
- [55] 究極のドラム・トレーニング・バイブル: リットーミュージック.
- [56] 榎原彩子: 絶対音感習得プロセスに関する縦断的研究, 教育心理学研究, Vol. 47, No. 1, pp. 19–25 (1999).
- [57] S. Weinstein: Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality, *The Skin Senses*, pp. 223–261 (1968).
- [58] Arduino Nano, <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardNano>.
- [59] H. Uematsu, D. Ogawa, R. Okazaki, T. Hachisu, H. Kajimoto: HALUX: Projection-based Interactive Skin for Digital Sports, *Proc. of ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, No. 10 (2016).
- [60] P. Antoniadis and F. Bevilacqua: Processing of symbolic music notation via multimodal performance data: Brian Ferneyhough ’ s Lemma-Icon-Epigram for solo piano, phase 1, *Proc. of the International Conference on Technologies for Music Notation and Representation (TENOR2016)*, pp. 127–136 (2016).
- [61] T. Weyde, K. Ng, K. Neubarth, O. Larkin, T. Koerselman, and B. Ong: A Systemic Approach to Music Performance Learning with Multimodal Technology Support, *Proc. of the Support E-Learning Conference*, (2007).

- [62] K. Ng and P. Nesi: i-Maestro: Technology-Enhanced Learning and Teaching for Music, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 2008)*, pp. 225–228 (2008).
- [63] 林田教裕, 水谷哲也, 楽曲構造に基づくピアノ運指ルールの論理表現, 情報処理学会第 65 回全国大会講演 論文集, Vol. 65, No. 2, pp. 203–204 (2003).
- [64] M. Sawa, Y. Takegawa, T. Terada and S. Tsukamoto: Development of a Real-Time Fingering Detection System for Contrabass Using Musical Rules, *Computer Software (Japanese Journal of Japan Society for Software Science and Technology)*, Vol. 27, No. 1, pp. 56–66 (2010 in Japanese).
- [65] Y. Takegawa, T. Terada and S. Nishio: Design and Implementation of a Real-Time Fingering Detection System for Piano Performances, *Proc. of the International Computer Music Conference (ICMC2006)*, pp. 67–74 (2006).
- [66] A. Bouenard, S. Gibet and M. Wanderley: Enhancing the Visualization of Percussion Gestures by Virtual Character Animation, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 2008)*, pp. 38–44 (2008).
- [67] 村松慧一, 野口将人, 坪井邦明, 松島俊明: 音響情報と動画像情報を用いたドラムソロ演奏の採譜法の改良, 情報処理学会第 78 回全国大会講演 論文集, Vol. 2016, No. 1, pp. 465–466 (2016).
- [68] Logic Pro X, <http://www.apple.com/logic-pro/>.
- [69] Cubase, <https://www.steinberg.net/en/products/cubase/start.html>.
- [70] R. Van Rooyen and G. Tzanetakis: Pragmatic Drum Motion Capture System, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 2015)*, pp. 339–342 (2015).
- [71] RemoteLive, <http://www.y2lab.com/project/remotelive/>.
- [72] MuseScore, <https://musescore.org/>.

- [73] 森 郁彌, 西本 一志, 小倉 加奈代: BondScore: 連帯感醸成によるピアノ独習者のための練習動機づけ支援システム, インタラクシオン 2012 論文集, pp. 199–204 (2012).
- [74] UM-1EX, <https://www.roland.com/global/products/um-1ex/>.
- [75] DTXPLORER, [http://jp.yamaha.com/product\\_archive/drums/dtxplorer/?mode=model](http://jp.yamaha.com/product_archive/drums/dtxplorer/?mode=model).
- [76] 中川保敬, 上野崇雄, 小郷克敏: 短距離におけるリズム走の効果に関する研究, 熊本大学教育学部紀要, 第 43 号, pp. 55–62 (1994).
- [77] 富田寿人, 音淵理江, 松島亜紀: リズム運動を含んだ運動プログラムがおよぼす幼児のリズム感および体力への影響, 静岡理工科大学紀要, 22, pp. 51–56 (2014).
- [78] 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 実ドラムと仮想ドラムを統合するための叩打動作識別手法, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2010 論文集, p. 29 (2010).
- [79] 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 実ドラムと仮想ドラムを統合するための叩打動作識別機能をもつドラムスティックの設計と実装, 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-MUS-90, No. 1, pp. 1–6 (2011).
- [80] 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 実ドラムと仮想ドラムを統合するためのドラムスティックの設計と実装, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2011 論文集, p. 29 (2011).
- [81] 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: AirsticDrum: 実ドラムと仮想ドラムを統合するための仮想叩打拡張機能をもつドラムスティックの構築, エンタテインメントコンピューティング 2012, pp. 85–92 (2012).
- [82] H. Kanke, Y. Takegawa, T. Terada, and M. Tsukamoto: Airstic Drum: a Drumstick for Integration of Real and Virtual Drums, *Proc. of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2012 (ACE 2012)*, pp. 57–69 (2012).

- [83] 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: Airstic Drum: 実ドラムと仮想ドラムを統合するためのドラムスティックの構築, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2012 論文集, p. 38 (2012).
- [84] 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: Airstic Drum: 演奏技術を考慮した叩打識別を行うドラムスティックの実現, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1391–1401 (2013).
- [85] 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 触覚提示に基づくドラム演奏支援技術の確立に向けて, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2014 論文集, p. 23 (2014).
- [86] 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 触覚提示に基づくドラム演奏学習支援システム, インタラクシオン 2015 論文集, pp. 832–834 (2015).
- [87] H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: A Percussion Learning System by Rhythm Internalization Using Haptic Indication, *Proc. of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2015 (ACE 2015)*, pp. 14:1–14:5 (2015).
- [88] 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 触覚提示を用いたフレーズ内在化に基づく打楽器学習支援システム, インタラクシオン 2016 論文集, pp. 89–96 (2016).
- [89] H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Generating Musical Score Attached Stroking Information for Drum Performance, *Proc. of the International Conference for Asia Digital Art and Design 2016 (ADADA 2016)*, pp. 3A-1, 1–6 (2016).
- [90] H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: STICK TRACK: a Musical Score Generation System for Drums Considering Hitting Hand, *Proc. of the International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services 2016 (MobiQuitous 2016)*, pp. 284–285 (2016).
- [91] 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: STICK TRACK: 選手情報を付加したドラム譜面作成システム, 日本ソフトウェア科学会第 24 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2016), pp. 47–52 (2016).

- [92] H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: STICK TRACK: a System Generating Musical Score for Drums Indicating the Hitting Hand, *International Journal of Asia Digital Art and Design*, Vol. 20, No. 4, pp. 69–75 (2017).

## 関連発表論文

### 学会論文誌発表論文

1. 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: Airstic Drum: 演奏技術を考慮した叩打識別を行うドラムスティックの実現, *情報処理学会論文誌*, Vol. 54, No. 4, pp. 1391–1401 (2013).
2. H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: STICK TRACK: a System Generating Musical Score for Drums Indicating the Hitting Hand, *International Journal of Asia Digital Art and Design*, Vol. 20, No. 4, pp. 69–75 (2017).

### 国際会議等発表論文

1. H. Kanke, Y. Takegawa, T. Terada, and M. Tsukamoto: Airstic Drum: a Drumstick for Integration of Real and Virtual Drums, *Proc. of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2012 (ACE 2012)*, pp. 57–69 (2012).
2. H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: A Percussion Learning System by Rhythm Internalization Using Haptic Indication, *Proc. of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2015 (ACE 2015)*, pp. 14:1–14:5 (2015).
3. H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Generating Musical Score Attached Stroking Information for Drum Performance, *Proc. of the International Conference for Asia Digital Art and Design 2016 (ADADA 2016)*, pp. 3A-1, 1–6 (2016).
4. H. Kanke, T. Terada, and M. Tsukamoto: STICK TRACK: a Musical Score Generation System for Drums Considering Hitting Hand, *Proc. of the Inter-*

*national Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services 2016 (MobiQuitous 2016)*, pp. 284–285 (2016).

## 研究会等発表論文 (査読付)

1. 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 触覚提示を用いたフレーズ内在化に基づく打楽器学習支援システム, *インタラクシオン 2016 論文集*, pp. 89–96 (2016).
2. 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: STICK TRACK: 選手情報を付加したドラム譜面作成システム, *日本ソフトウェア科学会第24回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2016)*, pp. 47–52 (2016). (2016).

## その他の研究会発表論文

1. 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 実ドラムと仮想ドラムを統合するための叩打動作識別手法, *ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2010 論文集*, p. 29 (2010).
2. 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 実ドラムと仮想ドラムを統合するための叩打動作識別機能をもつドラムスティックの設計と実装, *情報処理学会研究報告, Vol. 2011-MUS-90, No. 1*, pp. 1–6 (2011).
3. 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 実ドラムと仮想ドラムを統合するためのドラムスティックの設計と実装, *ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2011 論文集*, p. 29 (2011).
4. 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: AirsticDrum: 実ドラムと仮想ドラムを統合するための仮想叩打拡張機能をもつドラムスティックの構築, *エンタテインメントコンピューティング 2012*, pp. 85–92 (2012).
5. 菅家浩之, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: Airstic Drum: 実ドラムと仮想ドラムを統合するためのドラムスティックの構築, *ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2012 論文集*, p. 38 (2012).

6. 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 触覚提示に基づくドラム演奏支援技術の確立に向けて, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2014 論文集, p. 23 (2014).
7. 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 触覚提示に基づくドラム演奏学習支援システム, インタラクシオン 2015 論文集, pp. 832-834 (2015).
8. 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: リズムフィードバックを用いた長距離走パフォーマンス支援技術に向けて, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2015 論文集, p. 2 (2015).
9. 菅家浩之, 寺田 努, 塚本昌彦: 学習フェーズ分離が与える身体運動を伴う学習効果の影響の解明, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2016 論文集, p. 32 (2016).

## 展示・パフォーマンス

1. プロジェクション楽器, 平城遷都1300年祭聖再来エンターテインメントファッションショー (2010).
2. アコースティックドラムとバーチャルドラムの融合, イルミネ神戸2010 (2010).
3. Airstic Drum, いしかわ夢未来博2012 (2012).
4. Airstic Drum, GUGEN 2015 (2015).
5. Airstic Drum, ウェアラブルデバイスって何だ? フェスティバル (2016).

以上



神戸大学博士論文「打楽器演奏のための情報提示技術に関する研究」全 95 頁

提出日 2017 年 7 月 14 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 菅家 浩之

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。