

公立はこだて未来大学 2025 年度 システム情報科学実習  
グループ報告書

Future University Hakodate 2025 Systems Information Science Practice  
Group Report

プロジェクト番号/Project No.  
21-C

プロジェクト名  
生体信号を利用した身体拡張インターフェース～ASHURA～

**Project Name**  
Body augmentation interface using biologic signals～ASHURA～

グループ名  
グループ C

**Group Name**  
Group C

プロジェクトリーダー/Project Leader  
山口拓海 Takumi Yamaguchi

グループリーダー/Group Leader  
大野照流 Teru Ono

グループメンバー/Group Member

大野照流 Teru Ono  
一戸香花 Kanoha Ichinohe  
帆苺彩花 Ayaka Hokari  
中村則幸 Noriyuki Nakamura

指導教員  
櫻沢繁 高木清二 山田恭史 辻義人

**Advisor**  
Sigeru Sakurazawa Seiji Takagi Yasufumi Yamada Yoshihito Tsuji

提出日  
2026 年 1 月 21 日  
**Date of Submission**  
Jan. 21, 2026



## 概要

ドラムは、手足を同時に用いて複数の音を鳴らす身体性の高い楽器である。そして、ドラムの演奏に際しては、両手足を用いる。このため、演奏中にさらなる打音を加えたい場合でも、操作可能な身体部位が残っておらず、演奏の自由度に制約が生じる。本研究では、このような制約を乗り越え、演奏における表現の幅を拡張するために、身体の未使用部位である「顔」に着目した。顔の中でも特に頬の筋肉に伴って生じる筋電位信号を演奏入力として活用することで、手足以外の操作手段を追加する「身体拡張インターフェース」としての新しいドラム演奏システム「Face Drum」を提案する。具体的には、表面筋電位を計測する回路を構築し、Arduino で信号を MIDI に変換し、DAW ソフトを介して電子音を出力する仕組みと、Arduino のシリアル通信によってドラムスティックを遠隔制御し、物理的に打音する機械システムを実装した。これにより、頬を上げるなどの表情動作によって打音を追加することが可能となり、従来の演奏に顔を加えた自由度の高い演奏操作が実現された。本研究は、身体の未使用部位を演奏操作に転用するという発想に基づき、演奏行為と身体の間関係を再構築する新たなアプローチを示したものであり、身体拡張による楽器演奏の可能性を示す一提案として位置づけられる。

キーワード 筋電位, 身体拡張, ドラム演奏

# Abstract

The drum is a highly physical instrument that requires the simultaneous use of both hands and feet to produce multiple sounds. Consequently, even when a performer wishes to add additional beats during a performance, there are no remaining body parts available for manipulation, which imposes constraints on expressive freedom. To overcome these limitations, this research focuses on the “face,” an otherwise unused part of the body, with the aim of expanding the expressive range of drumming performance. By utilizing electromyographic signals generated by cheek muscles as performance input, we propose \*Face Drum\*, a novel drumming system that functions as a “body extension interface,” providing additional control methods beyond the hands and feet. Specifically, we constructed a circuit to measure surface electromyography (sEMG), implemented a system in which an Arduino converts the acquired signals into MIDI data and outputs electronic sounds via DAW software, and developed a mechanical system that remotely controls drumsticks through Arduino serial communication to physically strike the drum. This system enables the addition of drum hits through facial expressions such as raising the cheeks, allowing highly flexible performance control by integrating facial movements into conventional drumming. Based on the concept of repurposing unused body parts for performance control, this research demonstrates a novel approach to reconfiguring the relationship between musical performance and the human body, and presents the potential of body-augmented musical performance.

**Keyword** EMG, Body Augmentation, Drum Performance

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	背景 . . . . .	1
1.2	目的 . . . . .	2
<b>第 2 章</b>	<b>関連した知識や技術</b>	<b>3</b>
2.1	筋電位 . . . . .	3
2.2	筋電位計測 . . . . .	3
2.2.1	アクティブ電極 . . . . .	3
2.2.2	差動増幅器 . . . . .	3
2.2.3	ハイパスフィルタ . . . . .	4
2.2.4	半波整流器 . . . . .	4
2.2.5	積分回路 . . . . .	5
2.2.6	非反転増幅器 . . . . .	6
2.3	信号処理とデジタル化 . . . . .	7
2.3.1	Arduino による信号処理 . . . . .	7
2.3.2	制御プログラム . . . . .	7
2.4	電子音による出力 . . . . .	7
2.4.1	MIDI . . . . .	7
2.4.2	Arduino による MIDI 送信 . . . . .	7
2.4.3	MIDI 信号の PC 内部でのルーティング . . . . .	7
2.4.4	DAW の役割 . . . . .	8
2.5	物理的制御による出力 . . . . .	8
2.5.1	MOSFET 回路 . . . . .	8
2.5.2	ソレノイド . . . . .	8
2.5.3	電源および駆動条件 . . . . .	8
2.5.4	機構設計と 3D プリント . . . . .	8
2.5.5	シリコンマスク . . . . .	9
<b>第 3 章</b>	<b>成果物の設計と実装</b>	<b>10</b>
3.1	成果物 . . . . .	10
3.1.1	筋電位計測回路 . . . . .	13
3.1.2	システム制御 . . . . .	14
<b>第 4 章</b>	<b>結果とまとめ</b>	<b>15</b>
4.1	結果 . . . . .	15
4.1.1	研究目的 . . . . .	15
4.1.2	システム構成概要 . . . . .	15
4.1.3	フェーズ 1：電子音による出力 . . . . .	15

4.1.4	フェーズ 2：物理的打撃による出力 . . . . .	15
4.2	まとめ . . . . .	16
<b>第 5 章</b>	<b>考察</b>	<b>17</b>
	参考文献	19
付録 A	ソースコード (フェーズ 1)	20
付録 B	ソースコード (フェーズ 2)	21

# 第 1 章 はじめに

## 1.1 背景

音楽演奏は単に音を生成する行為ではなく、演奏者の身体運動や表情、姿勢といった身体的要素を通じて情動を表現し、他者と共有する行為であると考えられている。人間による音楽情報処理は、聴覚のみによって行われるのではなく、身体的な要素が強く関わっている。たとえば、寺澤らは、音楽情動が聴覚情報のみによって生起するのではなく、身体運動や表情などの身体機能が統合されることで形成されるとする「音楽情動コミュニケーションモデル」を提案しており、音楽体験における身体の重要性を理論的に示している [1]。このような身体と音楽情動の密接な関係は、実際の楽器演奏においても顕著に現れる。楽器演奏において、演奏者は理想とする演奏を実現するために、自身の身体を用いて音を表現していると指摘されている。関・橘は、ヒトが音楽の拍を検出し、その各時刻に合うように身体を予測的に動かすことができる現象を「リズム同調」と呼び、音楽活動における身体運動の重要性を示している [2]。このように、音楽と身体運動は密接に結びついており、演奏行為は高度な身体制御を伴う活動であるといえる。中でもドラムは、手と足を同時に用いて演奏するという特性を持っており、全身を駆使した演奏が求められる楽器である。ドラム演奏では、両手でスネアやシンバル、タムなどを叩き、足でバスドラムやハイハットのペダルを操作することにより、複数の音を同時に鳴らすことができる。これは楽器の中でも特に、手足による複数の動作を同時に行う演奏形態である。

しかしその一方で、演奏に用いる部位が手足に限定されることは、演奏時における身体的制約となりうる場合がある。たとえば、ドラマーによるライブパフォーマンスにおいて、その場の臨場感や演奏の盛り上がりに応じ、「さらに楽器を増やして新たなリズムパターンを加えたい」、「両手を必要とする楽器でアクセントを入れたい」といった欲求が生まれる。しかしこの状況では、両手両足がすでに役割を担っていることで、そのような欲求を実現できずにもどかしさを感じる。

そこで私たちは、このような身体的制約を身体拡張によって乗り越えようと考えた。身体拡張とは、人間拡張における四つの大きな方向性の一つであり、個々の人間の能力を高めることを目的とするものである [3]。具体的には、外骨格のように構造的に身体能力を増強するものや、機能的電気刺激 (FES) によって筋肉を駆動するもの、義手・義足のよう身体機能を補綴するものなどが含まれる。身体拡張の一例として、先行研究では、肘関節運動を力源とした前腕能動義手が開発されている [4]。本研究では、このように、力源を身体の内部に持った新たな操作部位を活用することで、ドラム演奏における新たな演奏動作を実現するデバイスの開発を目指す。特に、ドラム演奏における身体的制約があることと身体拡張による直感的な操作を実現したいという要素から、生体信号の中でも、筋肉が動く際に発生する筋電位を活用することにした。

その中でも、筋電位を計測する部位として着目したのが、顔の筋肉である。顔の筋肉は、ドラム演奏時に用いられる手足とは独立して動かすことができる部位である。また、顔の筋肉は日常的に誰もが意図的かつ直感的に扱える部位であり、特別な訓練を必要としない。このような特性から、顔の筋肉を動かすことをドラム演奏時における、新たな入力手段として利用することにした。しかし、顔の筋肉による動作には多様な種類が存在するため、新たな入力動作として適した動作を機能的な観点から検討した。

そこで私たちは表情フィードバック仮説と呼ばれるものに注目した [5]. これは実際には楽しいと感じていない場合であっても、意図的に笑顔を作ることで、次第に楽しさが喚起される現象のことである。また、Ekman らは、表情は、幸福、驚き、恐れ、嫌悪、怒り、悲しみという 6 種類あるが [6], 中でも幸福を示す” 笑う” という行為は、表情の中でも極めてありふれたものであるとした [7], その他にも、笑う状態は身体面、心理面ともにいくつかの良い影響を与えることが示唆されている [8]. これらの要素から、” 笑う” という行為に深く関係している「頬を上げる」という動作が新たな入力動作として適していると考えた。中でも、本研究では笑顔の主働筋であり随意的な筋収縮が容易な大頬骨筋を使用することにした [9].

よって、本研究では、この筋電位信号のうち顔の筋肉から得られる表情筋電位を利用し、演奏時に扱う音数を増やすことができる新たな演奏方法を提示する。この演奏方法では、” 頬を上げる” 動きと音を 1 対 1 に対応させる操作を通じて、演奏者は両手両足をすでに使っている状態でも、顔という第五の操作部位を加えることにより、新たな演奏の自由度を得ることができる。具体的な使用場面としては、ライブ演奏で手足による基本的なビートを刻みながら、顔の動きで追加のカウベルを鳴らすなどの使い方を想定している。このように、顔を演奏インタフェースとして活用するという本研究の取り組みは、感情や身体状態と強く結びついた表情筋の活動を音の生成に直接結び付けることで、単に入力数を増やすだけではなく、演奏と身体の関係性を再構築する試みでもある。

## 1.2 目的

本グループでは、表情筋から得られる筋電位を用いて、顔の動きをドラム演奏のトリガとして活用する演奏インタフェースの実現を目指す。本研究では、このようなインタフェースを「Face Drum」と名付けた。これにより、すでに両手両足を用いて演奏している状態においても、顔という新たな操作部位を活用することで、音の追加や制御が可能となる。すなわち、顔を第五の演奏部位として取り入れることで、身体を拡張し、演奏動作の自由度や即興性を高めることを目指す。また、表情筋を演奏操作に用いるという本手法は、演奏者の情動表現（楽しさや高揚感など）と意図的操作の境界が曖昧になる可能性がある。そのため、我々はこの問題に対し、演奏時に意図された筋活動と、自然な表情による筋活動を区別する必要があることを認識しており、先行研究においても、筋電位のパターンを機械学習などで識別する手法が提案されている。今回の取り組みでは、まず表情筋電位を用いた直感的な演奏操作の可能性に焦点を当て、基本的な動作と音の対応づけを通じて、その有効性を検証することとした。以上の背景と問題意識を踏まえ、本プロジェクトでは従来の手足による演奏では実現できなかった動作を実現し、新しい演奏スタイルと表現の可能性を提示することを目的とする。

さらに、これらの目的に対し、達成度を表す指標として、「演奏者が意図したタイミングで音を鳴らせること」・「演奏者が意図したときのみ入力を発生させられること」を示す必要がある。したがって、これらの指標を評価するため、以下の評価方法を設定した：

1. 手足で基本ビートを継続しながら、顔の筋肉で音を鳴らせるかどうか
2. 意図していないタイミングでの誤検出がどの程度発生するか

## 第 2 章 関連した知識や技術

### 2.1 筋電位

生体信号とは、生体内で発生する電気的あるいは物理的な信号の総称であり、代表的なものとして心電図 (ECG)、脳波 (EEG)、筋電位 (EMG) などが挙げられる。これらはそれぞれ心臓、脳、筋肉の活動状態を反映した信号であり、医療計測やヒューマンインタフェースなど幅広い分野で利用されている。本研究では、身体動作と直接的に対応づけやすく、意図的な制御が可能である点に着目し、生体信号の中でも筋肉の活動を反映する筋電位を用いた。筋電位とは、筋肉が収縮する際に発生する筋細胞の膜電位の変化である。脳や脊髄からの電気的な信号は、運動神経を通じて筋肉に伝えられる。この信号が筋細胞に到達すると、ナトリウムチャンネルが開き、ナトリウムイオンが細胞内に流入する。この信号が筋細胞に到達すると、ナトリウムチャンネルが開き、ナトリウムイオンが細胞内に流入する。その結果、筋細胞膜の内外の電位差は減少し、脱分極が生じる。この急激な電位変化が活動電位であり、活動電位は筋繊維内の T 管を伝播して筋小胞体からのカルシウムイオン放出を促す。放出されたカルシウムイオンはトロポニンと結合し、アクチンフィラメント上のトロポミオシンを移動させることで、ミオシン頭部がアクチンに結合できる状態を作り出す。この結果、ミオシンとアクチンの滑り運動が起こり、筋繊維および筋肉が収縮する。この一連の過程で生じた活動電位は、皮膚表面に装着した電極によって電気信号として検出可能であり、これが筋電位として記録される。

### 2.2 筋電位計測

筋電位の計測方法として、非侵襲的計測方法である表面筋電位を計測する手法を用いた。2つの電極を皮膚表面に貼り、皮下に存在する筋肉に沿って配置することで、2つの電極の電位差として筋電位を測定する。この電位差は非常に微弱であり、周囲の機器から発生する電磁波や電源による電磁誘導の影響を受けやすい。そのため、アクティブ電極、差動増幅器、ハイパスフィルタ、半波整流器、ローパスフィルタ、非反転増幅器を構成要素とする計測回路を構築した。

#### 2.2.1 アクティブ電極

アクティブ電極とは、皮膚表面の高いインピーダンスによって発生する計測時のノイズを防ぐことが可能な電極のことである。オペアンプを利用して電極側で皮膚より高いインピーダンスを作り出し、増幅率が1であるため入力電圧がそのまま出力される。

#### 2.2.2 差動増幅器

差動増幅器とは、2つの入力信号の差を増幅する回路である。この2つの入力の電位が同じとき、0を出力する。商用電源や電子機器から発生するノイズは、50Hzの正弦波成分であり、空間を通じた電磁誘導などにより、同じ体に張り付けられた複数の電極に、同じ極性やタイミングで同時に混入しやすい。このようなノイズは同相ノイズと呼ばれ、微弱な筋電位信号をかき消してしまう原因

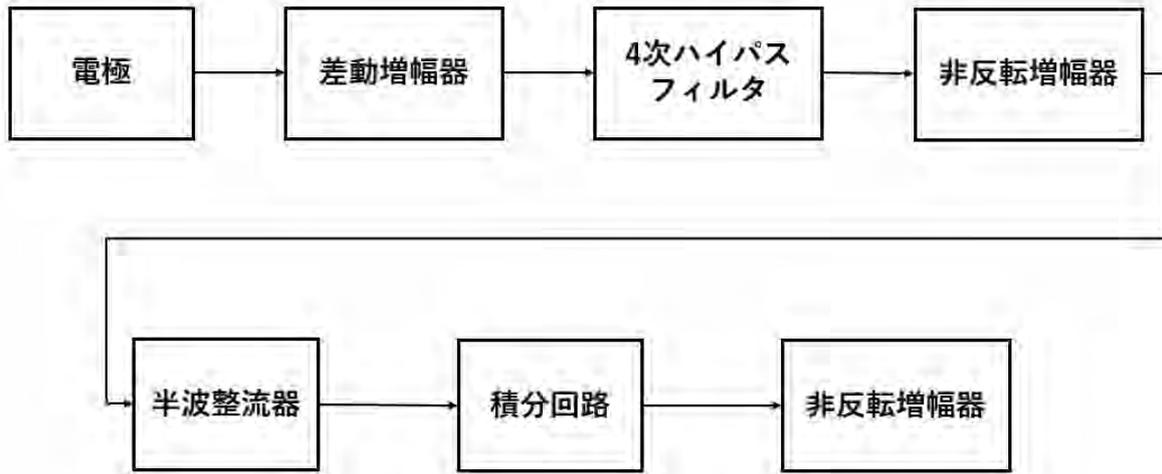


図 2.1 筋電位計測回路の全体構成

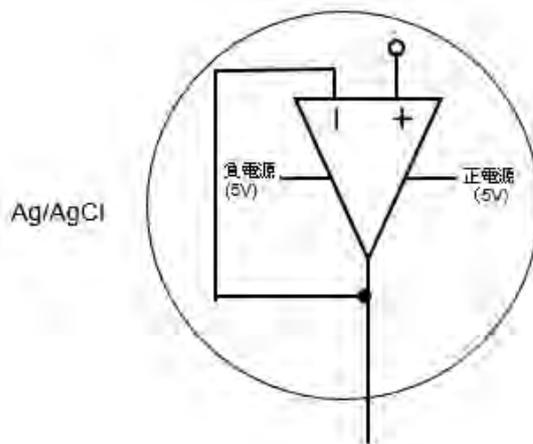


図 2.2 アクティブ電極

となる。差動増幅器はこの同相ノイズを除去し、2つの電極間に実際に発生した筋電位の差動成分のみを増幅することができる。これにより、筋電位計測の精度が大きく向上する。

### 2.2.3 ハイパスフィルタ

ハイパスフィルタとは、ある特定の周波数（カットオフ周波数）よりも高い周波数の信号のみを通過させ、それより低い周波数成分を減衰させるフィルタ回路である。これにより、微弱な信号を観測しやすくなり、不要な低周波成分を除去できる。

### 2.2.4 半波整流器

半波整流器とは、交流電圧の負の電圧を除去し、正の電圧のみを出力する回路である。整流によって信号の振幅変化を一方にそろえることで、後ろに接続する積分回路で包絡線を得るため、半波

整流器を使用する.

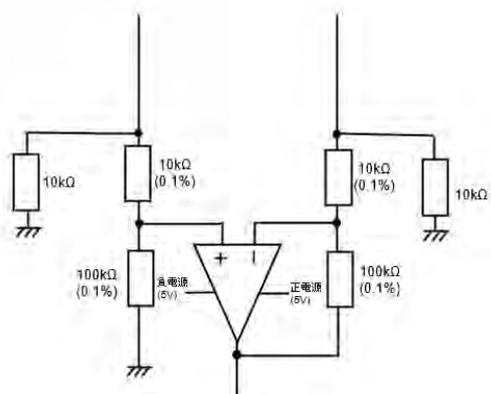


図 2.3 差動増幅器

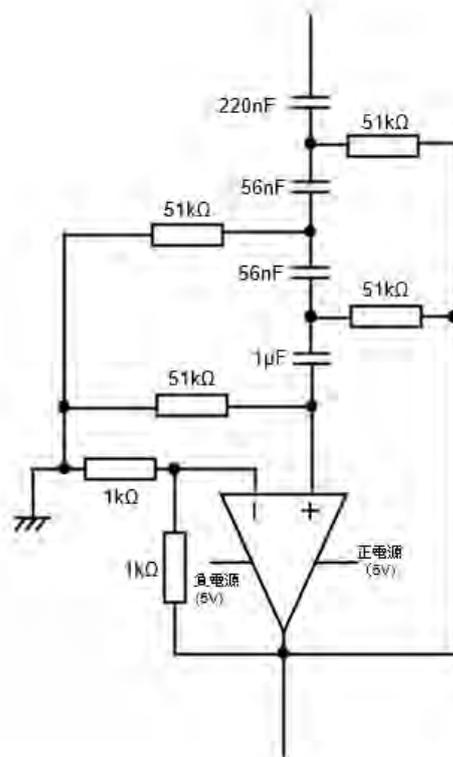


図 2.4 ハイパスフィルタ

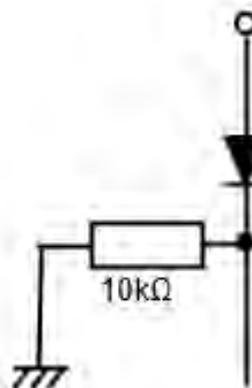


図 2.5 半波整流器

### 2.2.5 積分回路

積分回路とは、入力された筋電位を時間積分して出力する回路である。急激な振幅変動を抑えた包絡線を抽出できるため、筋肉の活動強度やタイミングを視覚的・定量的に把握しやすくなる。得られる包絡線の振幅は筋収縮の強さにおおよそ比例するため、筋活動強度を制御入力などに利用す

る際に信号として扱いやすくなる。このような理由から、積分回路を用いた。

### 2.2.6 非反転増幅器

非反転増幅器とは、入力の極性を変えずに増幅し出力する回路である。ハイパスフィルタや積分回路の出力の増幅に用いた。

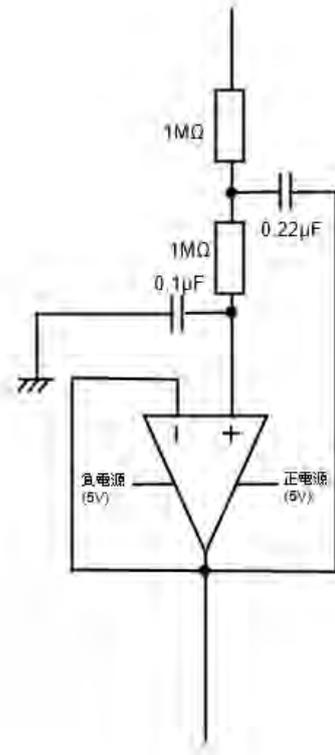


図 2.6 積分回路

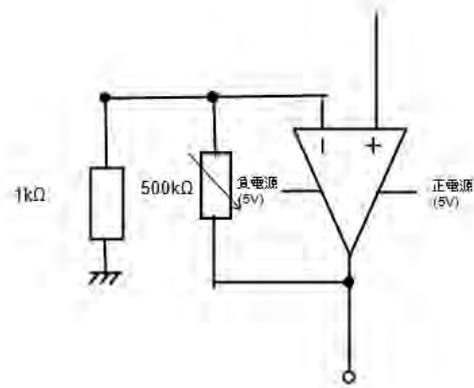


図 2.7 非反転増幅器

## 2.3 信号処理とデジタル化

### 2.3.1 Arduino による信号処理

本制作物では、筋電位計測回路によって処理された信号をデジタル信号に変換し、さらに MIDI 信号に変換して DAW ソフトに送信する必要があった。そこで、A/D 変換を行うことができ、シリアル通信が可能な Arduino Uno を用いた。シリアル通信とは、データを 1 ビットずつ連続して送受信する通信方式であり、Arduino と PC 間のデータ転送に用いられる。主に USB 経由で行われ、通信速度を設定することでリアルタイムに信号を送信できる。

### 2.3.2 制御プログラム

筋電位計測回路からの信号を Arduino で符号化し、その信号電圧に基づいて MIDI ノートの制御または、ソレノイドの駆動制御を行うプログラムを作成した。

## 2.4 電子音による出力

本研究では、まず身体操作による音の生成の仕組みを確立することを優先した。そのため、物理的に楽器を直接制御する前段階として、MIDI 信号を介して電子的に音を生成できる DAW を用いた。

### 2.4.1 MIDI

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) とは、電子楽器や音楽ソフト間で演奏情報をやり取りするための規格である。ノートオン・ノートオフ信号は、それぞれ特定の音高 (ノート番号) に対応しており、ドラム音源ではノート番号ごとに異なる打撃音が割り当てられる。ノートオン信号が送信されると、対応する音源が発音を開始し、ノートオフ信号が送信されると、その発音が停止する。ドラム音源の場合は、ノートオン信号を受け取った時点で打撃音が一度再生される。また、音の高さや強さ (ベロシティ) などをデジタル信号で表現することで、外部から音源を制御することが可能となる。

### 2.4.2 Arduino による MIDI 送信

筋電位計測回路からの信号を MIDI 信号に変換するために、Arduino MIDI Library を用いた。Arduino 上で閾値を超えた筋電位を検出すると、MIDI ノートオン信号を生成し、シリアル通信経由で PC へ送信する。

### 2.4.3 MIDI 信号の PC 内部でのルーティング

Arduino から送信された MIDI 信号は、Hairless MIDI を使用して PC に仮想 MIDI 信号として転送された。Hairless MIDI は、シリアル通信で受け取ったデータを MIDI 信号として変換・送出するソフトウェアである。さらに、loopMIDI を用いて仮想 MIDI ポートを作成し、DAW と接続することで、Arduino から送信された MIDI 信号を音源の制御に利用した。

#### 2.4.4 DAW の役割

DAW (Digital Audio Workstation) は, MIDI 信号の受信・編集・再生を行う音楽制作ソフトである。外部から受信した MIDI 信号に対応して, 音源を発音させる機能を持つため, Arduino からの入力に応じた音の再生が可能となった。また, DAW を用いることで, Arduino から送信される MIDI 信号と音の対応関係を柔軟に設定・調整でき, 筋電位信号の強度やタイミングと発音結果との関係を可視化・検証しやすくなる。これにより, 将来的な物理的な楽器の制御に向けた信号処理や閾値設計の基盤を築くことができる。

### 2.5 物理的制御による出力

本節では, 筋電位入力を物理的な打音として出力するために, ソレノイドを用いてドラムスティックを駆動し, 実際に楽器を打撃する装置について述べる。

#### 2.5.1 MOSFET 回路

ソレノイドは誘導性負荷であり, 通電のオン・オフ時に逆起電力が発生する。そのため, Arduino のデジタル出力端子から直接駆動すると, 過電圧による破損の危険がある。本制作物では, Arduino を高電圧・大電流から保護する目的で, MOSFET を用いたスイッチング回路を構成した。また, ドラムスティックを打撃するためには, 短時間でのオン・オフを繰り返す高速な駆動が必要となる。MOSFET は機械的な接点を持たず, 高速なスイッチングが可能であるため, 瞬間的な打撃動作を生成する用途に適している。

#### 2.5.2 ソレノイド

ソレノイドとは, コイルに電流を流すことで磁界を発生させ, 内部の可動鉄芯を直線方向に駆動する電磁アクチュエータである。本研究では, 瞬間的な打撃動作を生成する用途に適した点に着目し, ドラムスティックを打撃方向に駆動するためのアクチュエータとして用いた。使用したソレノイドは定格電圧 DC24V, デューティ比 25% のプルソレノイドであり, 短時間の断続通電による駆動を前提としている。

#### 2.5.3 電源および駆動条件

ソレノイドの駆動には, Arduino とは別系統の DC24V 電源を用いた。Arduino のデジタル出力を MOSFET 回路を介してソレノイドに接続し, オン・オフ制御を行った。ソレノイドはデューティ比 25% での使用を想定した製品であるため, 通電時間を短く制限することで過熱を防いだ。また, 通電遮断時に発生する逆起電力から回路を保護するため, フリーホイールダイオードを挿入した。

#### 2.5.4 機構設計と 3D プリント

本制作物では, ソレノイドの直線運動をドラムスティックの回転運動に変換するため, リンク機構を用いた機構設計を行った。設計には CAD を用いて 3D モデルを作成し, 3D プリンタによ

て ABS 樹脂製の各部品を製作した。これにより、ソレノイドの駆動に応じてドラムスティックが打撃動作を行う機構を実現した。

製作した機構の外形寸法は、全体でおおよそ幅 95 mm、奥行き 40 mm、高さ 70 mm 程度である。

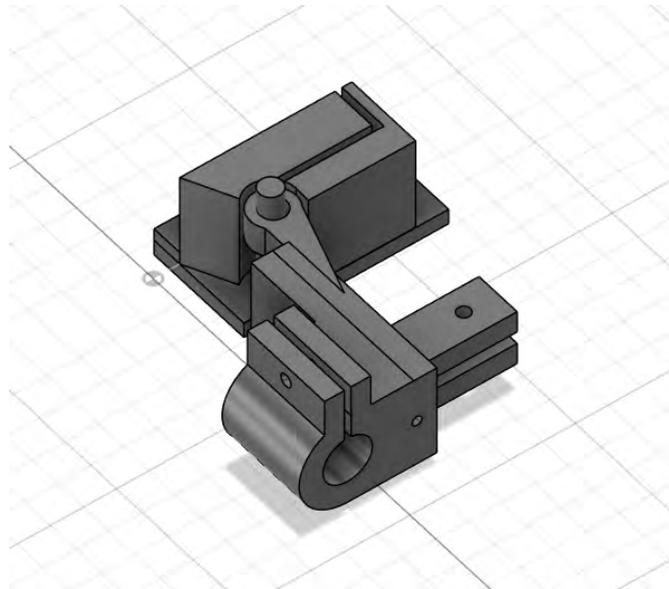


図 2.8 設計した 3D モデル

### 2.5.5 シリコンマスク

演奏動作中に電極位置がずれると筋電位の計測が不安定になるため、シリコンマスクによって電極を顔面に固定した。マスクを装着することで、演奏中の顔の動きや振動による電極のずれを抑制し、安定した筋電位計測を可能とした。

## 第 3 章 成果物の設計と実装

### 3.1 成果物

今回製作した成果物は、顔の大頬骨筋から発せられる筋電位信号を用いてドラム演奏の操作入力を行う身体拡張インターフェースである。本研究では、本システムの構築を二段階に分けて進めた。第 1 段階（フェーズ 1）では、筋電位信号を用いて電子音を制御するシステムを構築した。第 2 段階（フェーズ 2）では、フェーズ 1 で構築した入力および判定処理を基盤として、物理的な打音を出力する機構を追加した。以下に、本研究で製作した成果物の構成を示す。

本成果物では、顔に貼付した電極によって表面筋電位を計測する。計測された微小なアナログ信号は、差動増幅器およびフィルタ回路によって増幅・整形され、その後、整流・積分処理を行うことで制御入力として扱いやすい信号として Arduino に入力される。Arduino では入力された信号を A/D 変換し、設定した閾値に基づいて筋活動の有無を判定する制御信号を生成する。

フェーズ 1 では、上記の制御信号を用いて電子音を出力するシステムを構築した。Arduino 上で筋電位信号が閾値を超えた場合にトリガーを発生させ、これを MIDI ノートオン/オフ信号へ変換する。生成された MIDI 信号はシリアル通信を介して PC に送信され、仮想 MIDI ポートを通じて DAW ソフトに入力される。DAW 上ではドラム音源を割り当てることで、筋電位入力に対応した電子ドラム音が出力される。このシステムの全体構成図を以下の 3.1 の図に示す。

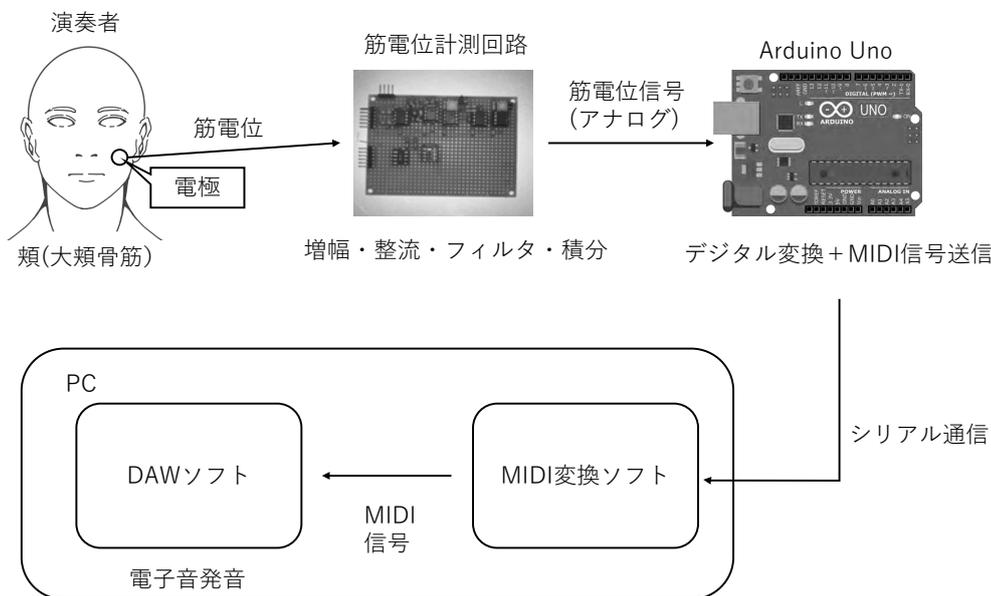


図 3.1 フェーズ 1 全体構成図

フェーズ 2 では、フェーズ 1 で構築した筋電位入力および制御系を用いて、物理的な打音を伴う出力機構を追加した。Arduino からの制御信号によってソレノイドを駆動し、それに接続したドラムスティックにて打楽器を打撃する構成とした。この回路図を以下の図 3.2 に示す。演奏中に電極位置がずれることによる計測の不安定化を防ぐため、電極を固定する手法としてシリコンマスクを

## Body augmentation interface using biologic signals～ASHURA～

採用した．シリコンマスク着用の様子を以下の図 3.3 に示す．また，ソレノイドの直線運動とばねの弾性力を組み合わせた機構のパーツを 3D プリンターによって作製し，打撃後にスティックが元の位置へ復帰する構造とした．その構造を以下の図 3.4 に示す．

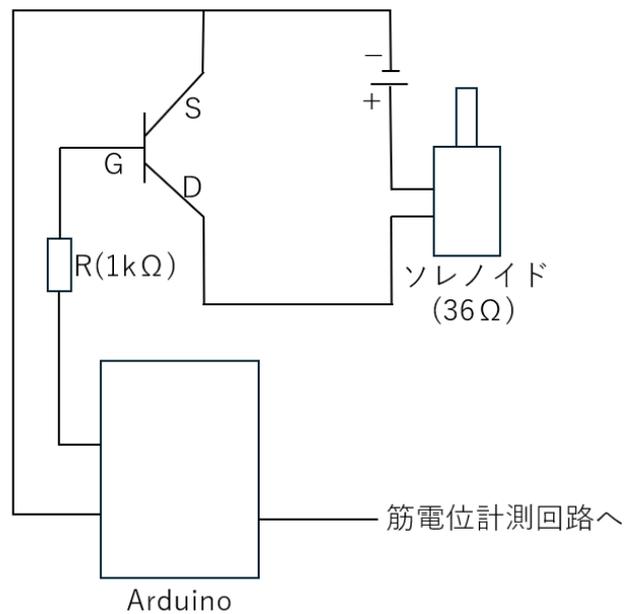


図 3.2 回路図



図 3.3 シリコンマスク着用の様子

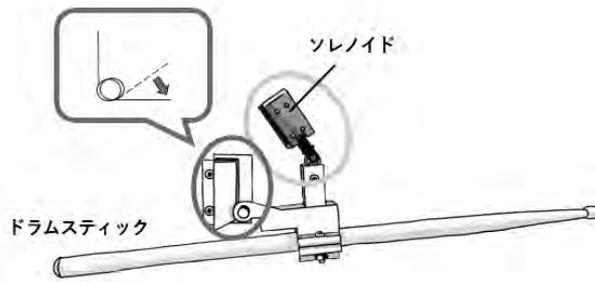


図 3.4 ソレノイド図

本成果物は、顔の筋電位を入力として、電子音出力および物理的な打音出力を行うシステムであり、入力、制御、出力から構成される身体拡張インターフェースである。実際に作製した成果物を以下の図 3.5 に示す。

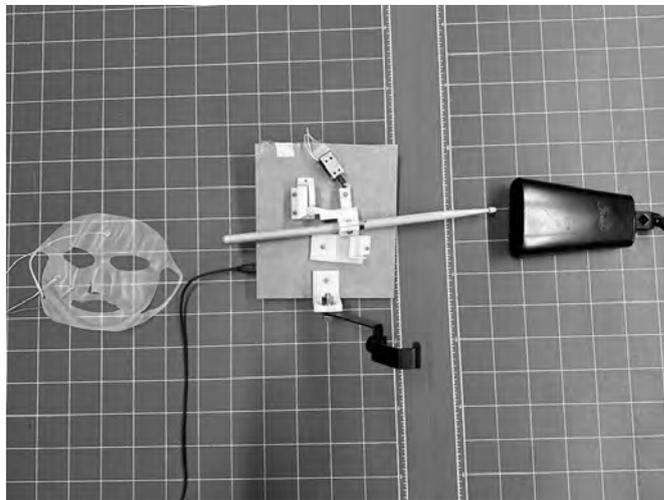


図 3.5 FaceDrum

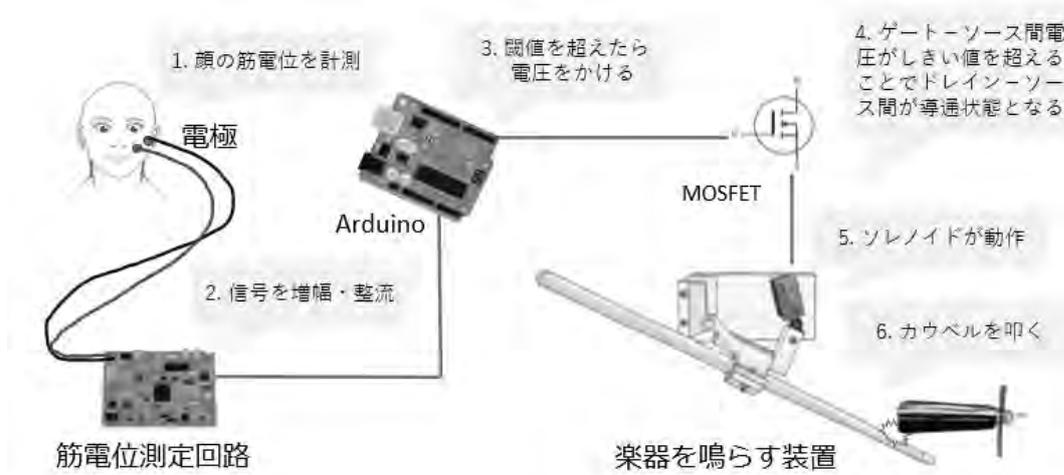


図 3.6 フェーズ 2 全体構成図

### 3.1.1 筋電位計測回路

頬の大頬骨筋に貼付した電極間に生じた電位差は、筋活動に応じた表面筋電位信号として取得される。取得された微小な信号は、まず差動増幅器によって同相ノイズを除去しつつ有効な信号成分のみを増幅する。その後、ハイパスフィルタにより低周波のノイズ成分を除去し、筋活動に伴う高周波成分を抽出する。さらに、半波整流器によって負の電圧成分を除去し、積分回路により信号の時間的な変化を平滑化することで、筋活動の強度やタイミングを反映した滑らかな信号へと変換する。この処理によって得られた信号は、Arduino によるデジタル処理や MIDI 変換に適した形となる。実際に作製した回路図と回路の全体像は、以下の図 3.6 および図 3.7 に示す。

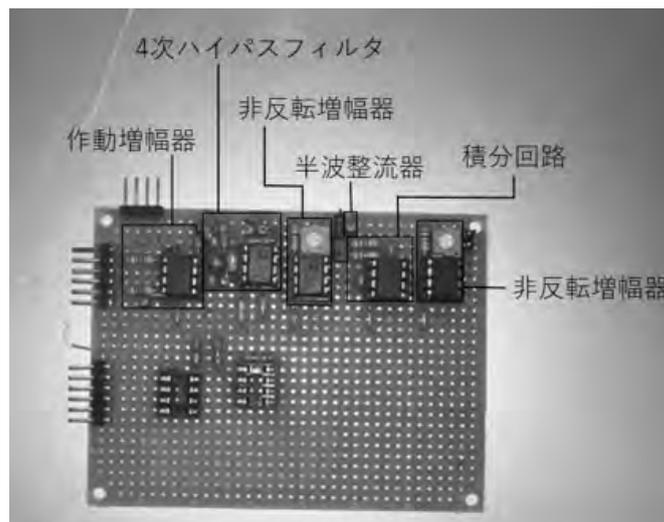


図 3.7 回路の全体像



図 3.8 製作したアクティブ電極 (10mm 方眼)

### 3.1.2 システム制御

頬に貼付された電極によって取得された表面筋電位は、計測回路に入力され、差動増幅、フィルタ処理、整流および積分処理を経て、ノイズ成分を低減したアナログ信号として出力される。この信号は電位差として Arduino に入力され、内蔵された A/D 変換機能によってデジタル信号へと変換される。Arduino 上では、取得したデジタル値をあらかじめ設定した閾値と比較することで筋活動の有無を判定し、制御信号を生成する。この判定処理は、本研究におけるシステム制御の共通処理として用いられている。

電子音による出力を行う構成では、上記の判定結果を MIDI ノートオン/オフ信号へ変換し、シリアル通信を介して PC に送信する。送信された MIDI 信号は仮想 MIDI ポートを通じて DAW ソフトに入力され、あらかじめ設定された打楽器音源が発音される。筋電位信号の取得から電子音出力までの一連の動作の流れを図 3.8 に示す。

物理的な打音を伴う出力を行う構成では、同一の判定処理を用い、Arduino のデジタル出力によって MOSFET のゲートに電圧を加える。これにより、外部電源 (24V) から機構部へ電力を供給し、ソレノイドを駆動する。ソレノイドの直線運動とばねの弾性力を組み合わせた機構によってドラムスティックが打撃動作を行い、筋電位による演奏操作を物理的な打音として出力する。筋電位信号の取得から物理的打音出力までの動作の流れを図 3.9 に示す。

以上のように、本システムでは筋電位信号を入力として共通の判定処理を行い、電子音出力および物理的打音出力の双方を制御する構成としている。



図 3.9 フェーズ 1 遷移図

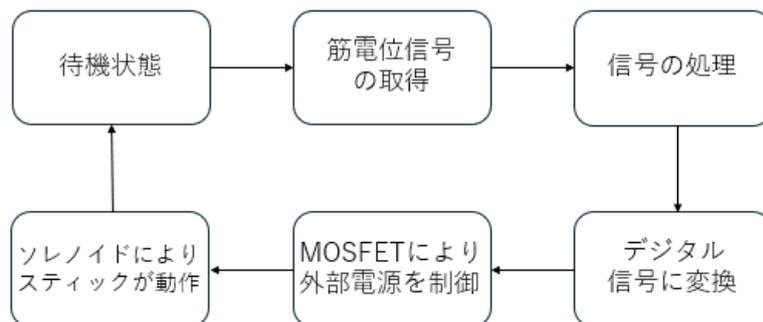


図 3.10 フェーズ 2 遷移図

## 第4章 結果とまとめ

### 4.1 結果

#### 4.1.1 研究目的

本プロジェクトでは、筋電位を用いた身体拡張によってドラム演奏における表現の幅を拡張することを目的とし、顔の筋肉の動きを入力手段とする新しい身体拡張インターフェース「Face Drum」の開発を行った。従来のドラム演奏は手足のみを用いて行われるため、演奏者が同時に操作できる音数や演奏パターンには物理的な限界が存在する。本研究ではこの課題を解決するため、演奏中でも意図的に動かすことができ、かつ演奏動作の妨げになりにくい身体部位として「顔」に着目した。

#### 4.1.2 システム構成概要

本システムは、開発段階に応じて大きく二つのフェーズに分けて構成した。まず、頬の大頬骨筋から発生する筋電位を電極によって計測し、増幅およびフィルタ回路による信号処理を行った後、Arduino を用いてデジタル信号へ変換した。

#### 4.1.3 フェーズ1：電子音による出力

フェーズ1では、筋電位信号をPCへ送信し、DAWソフト上で電子音を再生するシステムを構築した。実験では、大頬骨筋に貼付した自作電極から筋電位信号を取得し、信号の安定性および演奏時の操作性を確認した。複数回の動作試験を行った結果、顔の動きに応じて任意のタイミングで音を発生させることが可能であることを確認した。

なお、入力信号から音の出力までの遅延については、主観的な演奏評価に基づいて検討を行った。その結果、実演奏において大きな違和感は感じられなかったが、遅延時間の定量的な測定については今後の課題とする。

#### 4.1.4 フェーズ2：物理的打撃による出力

続くフェーズ2では、ソレノイドによってドラムスティックを駆動し、実際に楽器を打撃する物理的な出力機構を製作した。Face Drumを用いてドラム演奏を行い、演奏時の使用感について検討した。

演奏中の動作に伴う配線の干渉や電極位置のずれ、ならびに入力から出力までの遅延や意図しない入力による誤反応が、演奏操作に影響を与える可能性が考えられた。しかし、演奏者自身による主観的な評価においては、これらの要因が演奏動作の妨げとなることはなく、通常の演奏動作を継続しながらデバイス操作を同時に行うことが可能であると感じられた。また、打音の音量および応答性についても、実用上問題のないレベルであることが確認された。

一方で、実験を通じて、ソレノイド駆動による物理的な制約や、筋電位信号を主にオン・オフのトリガとして扱っている点に起因し、演奏テンポには上限が存在することが確認された。また、打撃の強弱や細かなニュアンス表現については、十分に制御することが困難であることが明らかと

なった。

## 4.2 まとめ

本研究では、顔の筋肉から得られる筋電位信号を演奏入力として利用し、ドラム演奏に新たな操作自由度を付加する身体拡張インターフェース「Face Drum」を開発した。Face Drum を用いた演奏実験を通じて、顔という従来は演奏操作に用いられてこなかった身体部位が、演奏入力として実用的に機能し得ることを示した。これにより、既存の手足による演奏動作を妨げることなく、新たな演奏操作を付加できる可能性が示唆された。

また、本研究は、筋電位を用いた身体拡張インターフェースを打楽器演奏という高い即時性と身体性が要求される分野に適用した点に特徴があり、演奏支援や表現拡張に向けた新たな設計指針を与えるものと考えられる。今後は、本研究で得られた結果を踏まえ、出力機構や制御方式の改良を通じて、より豊かな表現を可能とする演奏インターフェースへの発展が期待される。

## 第5章 考察

本研究では、Face Drum によって従来の手足による演奏では実現できなかった動作を可能とし、新しい演奏スタイルおよび表現の可能性を提示することを目的とした。この目的に対する達成度を評価するため、「演奏者が意図したタイミングで音を鳴らせること」および「演奏者が意図したときのみ入力を発生させられること」の2つを評価指標として設定した。

まず、手足による基本ビートを維持しながら、顔の筋肉によって音を鳴らす演奏操作が可能であるかを検証した。その結果、表情筋の筋電位を用いることで、意図したタイミングで音を鳴らす操作が可能であることを確認した。特に、基本ビートを継続した状態において、「頬を上げる」という明確な表情動作に対応してカウベル音を鳴らすことができた点から、手足による演奏に加えて、顔の筋肉を新たな操作部位として用いた演奏が可能であることが示された。

一方で、本システムには操作に対する応答の遅れ（ラグ）が生じるという課題も確認された。しかし、演奏者の主観的評価によれば、このラグはドラムのキックペダルにおける遅延と同程度に感じられ、実際の演奏ではラグを考慮した上での演奏が可能であった。このことから、少なくとも主観的な演奏感においては、大きな問題とはならないと考えられる。

次に、意図したときのみ入力を発生させられるかという点について、誤検出の発生状況を「意図していないタイミングで音が鳴る場合」と「意図したタイミングで音が鳴らない場合」の2つの観点から検討した。その結果、意図しないタイミングでの誤検出が数回確認されたが、これは主にグラウンド電極付近の接触不良に起因する電氣的ノイズが原因である可能性が高いと考えられる。ただし、電極の接触状態を改善することで動作が安定することが確認できたため、本問題はシステムの構造的欠陥によるものではないと判断できる。

また、意図したタイミングで音が鳴らない誤検出も確認されたが、これは Arduino による制御において、筋電位信号が設定した閾値を十分に下回らない場合があり、入力信号が適切に検出されなかったことが原因であると考えられる。この点についても、閾値設定や信号処理の改善によって解決可能であると考えられる。

以上の評価結果より、Face Drum を用いることで、新しい演奏スタイルおよび表現の可能性を提示するという本研究の目的は概ね達成できたと考えられる。

ここまでの評価に加え、演奏表現の幅という観点から、強弱表現およびテンポへの追従具合についても検討した。強弱表現については、フェーズ1の電子音出力に関して、Arduino 側の制御を改善することで、筋電位の大きさに応じた強弱表現が可能であると考えられる。一方、フェーズ2で製作した機構では、ソレノイドがオン・オフ制御であるため、打撃音において細かな強弱表現を行うことは困難である。

また、テンポへの追従具合については、電子音では約 110 BPM 程度まで、ソレノイドによる打撃音では約 100 BPM 程度まで追従可能であると感じられた。ただし、これらはいずれも演奏者の主観的評価に基づくものであり、定量的な評価には至っていない。今後は、テンポを計測し、入力と出力の関係を定量的に評価する必要がある。

さらに、演奏中に表情動作を意識することが演奏に及ぼす影響について検討した結果、実際の演奏において大きな影響は確認されなかった。一方で、入力手段として顔の表情が加わることで、演奏者が同時に制御すべき要素が増加し、演奏操作がより複雑になる傾向がある。この点について

は、演奏者の習熟やインタフェース設計の工夫によって負担を軽減できる可能性がある。

本研究を通じて、事前には想定していなかった成果および問題点も明らかとなった。予想されていなかった成果として、Face Drum を用いた演奏操作が、結果的に表情筋のトレーニングとして機能していた点が挙げられる。特定の「頬を上げる」といった表情動作を意識的に繰り返す必要があるため、演奏行為そのものが表情筋の運動を促す役割を果たしていた。このことは、本システムが演奏インタフェースとしてだけでなく、身体的な側面にも影響を与える可能性を示している。

一方で、予想されていなかった問題点として、電極の配線がばらつくことにより、演奏時の動作を妨げる要因となっていた点が挙げられる。演奏中に複数のケーブルが身体や楽器に干渉し、演奏動作の自由度を低下させる場面が確認された。この問題は、ケーブルを束ねるなどして身体への干渉を減らすことで、改善できると考えられる。

以上より、本研究では、筋電位を用いた Face Drum が身体拡張型演奏インタフェースとして機能する可能性を確認するとともに、操作性や表現の幅に関する課題を明らかにした。これらの課題を改善することで、本システムは演奏者に新たな表現やさらなる自由度をもたらす演奏インタフェースになり得ると考えられる。また、本研究では、顔の筋肉を主に演奏操作のための身体部位として扱っており、先行研究 [1] などに示される音楽と身体との関係から、一見すると、演奏操作としての頬を上げる動作が、情動体験や没入を妨げるようなマイナスな影響を及ぼしてしまうように考えられる。しかし、表情フィードバック仮説 [5] の考え方を用いると、身体動作が情動に逆にプラスの影響を与えると考えることもできる。このことから、本研究における演奏操作としての表情動作は、情動に影響を及ぼす可能性があるが、演奏者の情動表現や音楽的没入を必ずしも低下させるとは限らないと考える。

## 参考文献

- [1] 寺澤洋子, 星-柴玲子, 柴山拓郎, 大村英史, 古川聖, 牧野昭二, 岡ノ谷一夫, 身体機能の統合による音楽情動コミュニケーションモデル, 日本認知科学会論文誌「認知科学」, Vol.21, No.1, pp.112-129 (2013).
- [2] 関義正, 橘亮輔. 動物のリズム同調能力とその源泉. 日本音響学会誌 80(1), 33-40, 2024. DOI:10.20697/jasj.80.1-33
- [3] 暦本純一. 人間拡張が築く未来. 東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究, 2021. (100), pp.19-45.
- [4] 妹尾勝利, 小林隆司. 肘関節運動を力源とした前腕能動義手制御システムの開発 (第1報). 日本義肢装具学会誌, Vol.25, No.4, pp.216-220, 2009.
- [5] Buck, R. (1980). Nonverbal behavior and the theory of emotion: The facial feedback hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 38(5), 811-824.
- [6] Ekman, P. (1994). Strong evidence for universals in facial expressions: A reply to Russell's mistaken critique. *Psychological Bulletin*, Vol. 115, No. 2, 268 - 287.
- [7] 三宅優, 横山美江. (2007). 健康における笑いの効果の文献学的考察. 岡山大学医学部保健学科紀要, 17(1), 1-8. doi:10.18926/15165
- [8] 大平哲也 (2020). 笑いと身体心理的健康・疾病との関連についての近年の研究動向 —2010年～2020年の観察研究, 介入研究を中心に—. 笑い学研究, 27, 3-18.
- [9] 菅原徹 (2014). 笑顔の形状と表情筋活動の分析. 可視化情報学会誌, 34(133), 14-19. DOI:10.3154/jvs.34.14.
- [10] 福田修, 島圭介, 辻敏夫. 筋電位を用いた人間支援機器とその可能性 ～音楽演奏への挑戦～. 2011. 計測と制御. 50, 10, pp895-900

## 付録 A ソースコード (フェーズ1)

```
#include <MIDI.h>

MIDI_CREATE_DEFAULT_INSTANCE();

const int emgPin = A0;          // 筋電位センサー出力を接続するアナログピン
const byte emgNote = 36;       // 出力するノート番号MIDI
const byte velocity = 100;     // ノートオン時のベロシティ
const byte channel = 1;       // 使用するチャンネルMIDI

bool emgNotePlaying = false;

// 筋電位によるノートオン・オフのしきい値 (センサー出力値に応じて調整)
const int thresholdHigh = 900;
const int thresholdLow = 700;

void setup() {
  MIDI.begin(MIDI_CHANNEL_OMNI); // 全チャンネル受信を有効に
  Serial.begin(115200);          // デバッグ用シリアル出力
}

void loop() {
  int emgVal = analogRead(emgPin);
  Serial.println(emgVal); // 筋電位の出力値をシリアルモニターで確認 (調整用)

  // ノートオン判定
  if (emgVal > thresholdHigh && !emgNotePlaying) {
    MIDI.sendNoteOn(emgNote, velocity, channel);
    emgNotePlaying = true;
  }
  // ノートオフ判定
  else if (emgVal < thresholdLow && emgNotePlaying) {
    MIDI.sendNoteOff(emgNote, 0, channel);
    emgNotePlaying = false;
  }

  delay(10); // ノイズ防止のための短い待機
}
```

## 付録 B ソースコード (フェーズ2)

```
int TR = 8;           // ソレノイド出力ピン
int EMG_PIN = A0;    // 筋電位信号入力ピン
int threshold = 600; // 閾値

int state = 1;       // 状態 (待機, トリガー中) 1:2:

void setup() {
  pinMode(TR, OUTPUT);
  digitalWrite(TR, LOW);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("START");
}

void loop() {
  int emgValue = analogRead(EMG_PIN); // 筋電位を読み取る
  Serial.println(emgValue);

  switch (state) {

    case 1: // 状態: 閾値よりも下の時1
      if (emgValue > threshold) {
        // 閾値を超えたら状態2へ
        state = 2; 状態2に移行 //
        digitalWrite(TR, HIGH); // ソレノイド出力ON
        delay(200);           // 秒キープ0.30
        digitalWrite(TR, LOW); // ソレノイド出力OFF
      }
      break;

    case 2: // 状態: 閾値よりも上の時2
      if (emgValue < threshold) {
        // 閾値を下回ったら状態1に戻る
        state = 1;
      }
      break;
  }

  delay(10); // 安定化のため
}
```