

# 楽器未経験者のための弦管打複合電子楽器の開発

矢田 絵理奈\* 岩井 将行\*

**概要.** 楽器未経験者にとって、楽器を始めるハードルは高く日常的に楽器に触れる機会も限られている現状がある。演奏者を増やすためには何よりも「きっかけ」が重要であると考え、演奏方法に着目して簡易的に楽器を体験する機会を増やす方法を模索し、弦楽器、管楽器、打楽器の要素を一体化した複合電子楽器「kiMera」を考案した。この楽器は、表面に鍵盤、裏面にはヴァイオリンの構造、側面にはフルートのキーやトランペットのピストンが配置されている。各楽器の要素をセンサーで再現し、MIDI規格で音を生成することで、ユーザーが複数の楽器を一度に体験することができるコンパクトな楽器である。試作機の外見に対するアンケートでは、92%が各楽器のイメージを持つことができたと回答しており、主観的な評価としては、演奏は難しくとも音を出す体験が容易になったことを示す。

## 1 はじめに

日本における楽器演奏人口は約10%（令和3年度調査[13]）に過ぎない。これは、楽器に触れる機会が限られていることが一因と考えられる。世界には歴史的価値と美しい音色を持つ楽器が多く存在し、音楽文化において重要な役割を果たしてきたが、それらの楽器に触れる機会は限られており、その魅力を直接知る機会は少ない。楽器を始めるきっかけは、楽曲を聞いたり、周囲の影響を受けて演奏したくなるケースと、楽器のある環境や習い事が要因となるケースに大別される。つまり、楽器自体や音色、その楽器の知識に触れることがなければ、演奏を始める機会も生まれ難い。学校教育においては、リコーダーやピアノ、大太鼓や木琴・鉄琴などに触れる機会があるが、オーケストラや吹奏楽で使用される本格的な楽器に触れる機会は、部活動に入るなどしない限り皆無である。また楽器の持つ固定観念[1]（例えば、ヴァイオリンは裕福な家庭で親しまれ、エレキギターにはカジュアルで軽快な印象が伴うなど、楽器に対するやや偏ったイメージ）が楽器演奏の敷居の高さにつながり、そうした先入観で楽器に触れる機会を逃すこともある。こうした現状を踏まえ、本研究では、楽器演奏人口を増やすことを目指し、従来楽器を始めるきっかけになる体験楽器として、弦管打複合電子楽器「kiMera」を提案する（図1）。

複数の楽器を演奏できるものとして、スマホアプリやシンセサイザが挙げられる。スマホアプリにはキーボードやギターなどの楽器アプリが存在するが、画面を介した操作では、実際の楽器演奏とは異なり、鍵盤を押す、弦をはじくことはできても、弓で弦を弾く感覚や管楽器を演奏する実体験は得られない。シンセサイザで各楽器の音を出すことは可能である

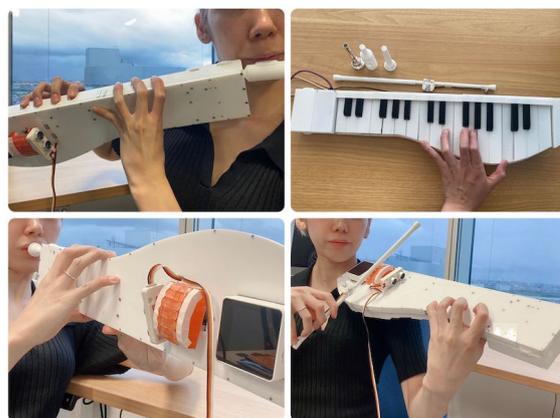


図 1. kiMera 各モードの構え方

が、楽器の演奏体験を再現することはできない。シンセサイザの特徴は音色作りであって他楽器の体験を目的としたものではない。そこで演奏方法に着目し、弦楽器、管楽器、打楽器から代表的な楽器を選定し、それらを一つの楽器に統合することで、様々な演奏方法を体験できるようにすることを考えた。

楽器を模倣したものとして、市販されている玩具も存在するが、実際の楽器の難しさを排除しすぎた結果、演奏のリアルさを失ってしまう課題がある。一方で、初学者にとっていきなり何のガイドもなく演奏することは難しい。どこまで簡易化するのか、そしてどこまで従来の形を残すのかが、慎重に議論すべきポイントである。

複数の楽器を1つのシステムに実装するにあたり、ハードウェア上の制約や楽器演奏の難しさを軽減するための演奏方法については、オーケストラに所属していた経験をもとに考慮して設計した。また、楽器演奏には多くのメリットがあり、認知症予防など様々な研究[2]がされており、従来楽器の難しさの

Copyright is held by the author(s).

\* 東京電機大学大学院 未来科学研究科 情報メディア学専攻

軽減を目指した「誰でも簡単に演奏可能な楽器」が数多く開発されてきた [4]。しかし、本研究は「誰でも簡単に演奏可能な楽器」という位置付けではなく、「従来楽器を始めるきっかけとなる楽器」という位置付けで複合楽器を提案している。これまで IoT ヴァイオリン [16] という名前でヴァイオリン機構を作成し、その後鍵盤機構を作成した [15]。本稿では、本システムに採用した関連研究における技術を紹介し、従来の楽器演奏方法と比較しながら、音程、音量、発声タイミングをどのようにセンサで表現したのかを記述する。また、外見における評価実験の結果を報告し、本システムが複数の楽器体験を提供できるのか、さらに、それが従来楽器を始めるきっかけに繋がるのかどうかを議論する。

## 2 関連研究

### 2.1 無弦チェロ

従来楽器のハードルを下げるため、弦楽器、管楽器それぞれ電子化されたものがある。三井ら [11] は、チェロに着目し、ボディの大きさや重さ、音量の問題、購入時や維持費のコスト等の問題をあげ、これらはチェロの広音域のための弦の長さによるものと考えた。そこで、弦を無くしセンサで置き換えることで、電子楽器としてチェロを再現するアプローチを考案した。我々も同様に、弦を押さえる動作が初心者にとってつまづきやすい点だと考える。通常の演奏では、弦と弓の接触方法が重要となるが、本システムでは、演奏方法を簡略化し、弓と弦の触れさせ方を省略し、JOYSTICK によって発声タイミングを取っている。JOYSTICK が動いたときに弓の真ん中に取り付けた加速度センサが弓の角度を読み取り、左手の指の位置を超音波センサで読み取ることで距離から音程を算出した。このように弦を押さえる動作をなくすことで、体験する際のハードルを除きながら演奏方法を知ることができるシステムにした。しかし、体験楽器から従来楽器へ移行する際には、弦を押さえる指の痛みは発生してしまうため、どのように慣らすのかという課題にも対応する必要がある。

### 2.2 ウィンドシンセサイザ

気圧センサを用いて息の量を判定し、静電容量のタッチセンサによってキーを作成した管楽器を作る試みがある。黒川ら [10] はリコーダー型のウィンドシンセサイザを作成していた。静電容量センサをプリント基板で作成し、本体やマウスピースは 3D プリンタで作られており、本体は上部と下部で回転して使用することができる新たな機能を追加していた。気圧センサを使用すると、その場の環境の気圧に息の圧力がプラスされた値が読み取れる。そのため楽器起動時の気圧を基準に息の圧力を求められる。ま

た、従来楽器は息を入れて必ず出口が存在するが、販売されている既存のウィンドシンセサイザでは管内の蒸気による不具合を防ぐため、口の両端を開けて息を抜き、リードを噛む力を読み取るバイト (bite) センサを用いて音が出る判定を制御する方法をとる楽器がある [3]。本研究で実装する際には、楽器内の蒸気の対策として、防水加工がされているセンサを選び、息の出口を作り楽器内の手入れや複数人での使用も視野にいれ、衛生的に演奏可能な設計を心がけた。

### 2.3 EZ-TP

YAMAHA が 2004 年に発売した EZ-TP (イーゼー トランペット) [6] はトランペットの電子化がされている。トランペットは唇で震わせたマウスピースの音が増幅して発声する楽器である。マウスピースの振動パターンとピストンの押さえ方によって音程が決まる。EZ-TP では、マウスピースからの音を声で認識させるというマウスピースの簡略化を行った。本システムでのトランペット機構は、先行研究 [5][8] を参考に、マウスピースの振動を読み取って音に変換しようと考えていたが、マウスピース自体にセンサをつけることになると、マウスピースの取り外しができず、複数人での使用が困難になるため、前者の EZ-TP を参考に PDM センサでマウスピースを吹いた際の周波数を測定することにした。弦楽器での弓や弦の懸念点と同じく、金管楽器のハードルはマウスピースを鳴らすことである。しかし、マウスピースを鳴らすということを体験するのは金管楽器を演奏するにあたって比重が高いと考えた。マウスピースをうまく制御できなくても、初心者でも吹くことができるように、システムによって音程の誤差をアシストするように設計した。

### 2.4 複合楽器

本研究では、演奏方法をそのままに組み合わせる一つの楽器として設計することを考案しているが、複合楽器として UnitInstruments を紹介する。既存の電子楽器は従来楽器の形を模倣することが主な目的だったが、楽器を発音、音程の決定などの構成要素 (ユニット) の集合であると考え、これらの構成要素を部位ごとに分離し、他ユニットとの組み合わせを行うことによって新たな形の楽器を組み合わせられる楽器を丸山ら [7] が作成した。各ユニットを組み合わせる場合、指板ユニットがピックアップユニットに 2 方向についているマルチネックギターや、ギターのように押弦し鍵盤で打鍵して演奏する楽器を作成することができる。従来楽器の構成要素を組み合わせることによって演奏の難易度は高くなってしまったため、未経験者向けの楽器ではなく、上級者向けの楽器であるが、楽器を構成要素の単位として見る視点が参考になった。また、本システムも演奏活

動にも応用できそうな機能をつけていくことによって体験楽器としてだけでなく、新しい楽器としての面も補えると考えた。

### 3 楽器の選定

楽器は、弦楽器、管楽器、打楽器という大枠の分類がされ、管楽器も木管楽器と金管楽器に分かれる。楽器の大きさから音の高さ、構え方や奏法の違い、もちろん音色に至るまで、それぞれの特徴を持っている。本システムを開発するにあたって、弦楽器、木管楽器、金管楽器、打楽器から楽器を選定することにした。

初めて手にする人が手軽に扱える適度にコンパクトで持ちやすい大きさが望ましいと考えた。また、楽器には認知度に差があり、全く知らないものよりも、名前を聞いたことがある楽器の方が興味を引きやすい。そのため、弦楽器、管楽器、打楽器のそれぞれから、最も認知度が高く、典型的な楽器を選定することとした。

さらに、小型化を目指す、必然的に高音域の楽器を選ぶこととなる。具体的には、打楽器からはピアノを選んだ。ピアノは鍵盤ハーモニカとしても馴染みがあり、鍵盤のビジュアルから手に取りやすい印象を与えることができると考えた。弦楽器では、高音域のヴァイオリンを選んだ。管楽器からは、金管のトランペットと、横持ちという特徴を持つ木管のフルートを選定した。

### 4 システム

システム構成図を図2に示す。使うマイコンとセンサを表1に示す。M5Stack-Core2(以下 M5Core2 と示す)と、加速度付きで Wi-Fi 通信も可能な Arduino nano33 IoT(以下 nano と示す)を採用した。赤で示したセンサは M5Core2 に、青で示したセンサは nano に接続されている。センサから読み取られた値によって得られた音声情報を、SAM2695 を使用し MIDI 規格でスピーカーから出力している。シリアル通信でモード切り替えを行ってそれぞれの楽器を演奏することができる。各モードごとに構えると図1のようになる。(上段左がフルート、右がピアノ、下段左がトランペット、右がヴァイオリン)

#### 外装設計

外装は fusion360 を用いて作成した。全体像の 3D モデルを図3に示す。3章で述べた楽器の選定基準より、ピアノは鍵盤ハーモニカと考え、その他ヴァイオリン、トランペット、フルートは大体大きさが 50~60cm の楽器であるため、本システムの最長辺を 50cm とした。レーザカットしたアクリル板(図4)と、他部品を 3D プリンタで生成した。

実際の鍵盤の大きさと大きく違わぬよう鍵盤の幅

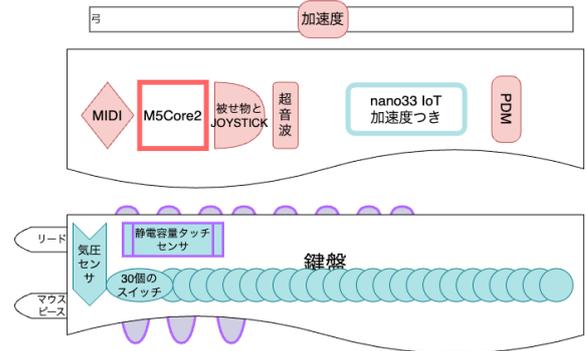


図 2. kiMera システム構成

表 1. 使用するセンサ・デバイス.

	M5Stack Core2	nano 33 IoT
ピアノ	MIDISynth	ソフトタクトスイッチ
ヴァイオリン	超音波センサ 外付け加速度 JOYSTICK MIDISynth	内蔵加速度 - - -
トランペット	MIDISynth PDM	静電容量 タッチセンサ
フルート	MIDISynth -	静電容量 タッチセンサ 気圧センサ

を白鍵は 21.5mm 黒鍵は 10mm で設計した。丸みを帯びたデザインに沿わせて鍵盤を作成したため、鍵盤の長さは変化していている。鍵盤の沈み込みは既存の電子ピアノを参考に設計した [14]。既存の電子ピアノの鍵盤の機構は根本にバネがついており、鍵盤を押すとバネの力で滑らかに沈み込む仕組みで、下がってきた鍵盤の窪みに圧力センサが押されている。この機構を参考に、図5のように鍵盤の根本に穴をあけ、棒を通すことでプラスチックの柔軟性を利用し、バネではない方法で鍵盤の沈み込みを再現でき、全ての鍵盤が通った棒を両端でねじ止めし固定することもできた。

ヴァイオリンは弦を弾く時にできる弓の角度によって弦を判定するため、弓を模した棒の中央に加速度センサを設置した。JOYSTICK はゲームのコントローラのため、そのままでは弓を置くことができない。弦の判定がしやすいように JOYSTICK のヘッドに被せられる角度をつけた部品(図6)を作成した。

フルートのキーとトランペットのピストンは図7のように側面に設置している。静電容量センサの先に金属製のボタンやスペーサを付け通電するように



図 3. 全体像の CAD データ



図 4. 従来楽器とのサイズ比較

した。複数人で使用することも考慮にいれ、リードやマウスピースが取り外せたり、実際の(市販の)マウスピースを使用することも可能にした。また、図8のように蓋をつけることで手入れのしやすさも考慮した作りになっている。トランペットのピストンを作成しようと考えていたが、ヴァイオリンの演奏時に妨げてしまうことや楽器の幅が大きいことでピストンに手が届かない恐れが出たため、フルートのキーと同様に金属製のボタンで作成した。そのため、トランペットのピストンの位置とフルートの左親指のキーを同じ場所に作成することになった。今後の発展としてキーの周りにLEDを実装するなどしてキーの差別化を図りたい。

### 回路基板

本システムのために二つの回路基板をKiCadを用いて設計した。一つは鍵盤の下に設置するスイッチのための基板である。もう一つはM5Core2にセンサを接続するために端子を増やした基板である。作成した基板を組み立てると図9のようになる。基板のソフトタクトスイッチの上に鍵盤が配置され、図での底であるレーザーカット面の穴から弓の中央に設置した加速度センサのケーブルが伸びている。

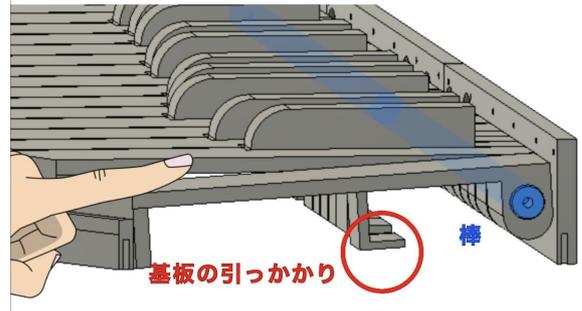


図 5. 鍵盤の設計

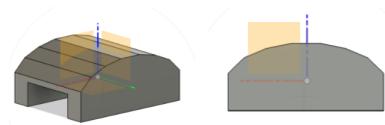


図 6. JOYSTICK に被せる部品

### 演奏制御

各センサが繋がったマイコン同士が、シリアル通信で値をやりとりしている。電源はnanoに給電することでM5Core2も起動する。M5Core2の画面からモードを選択し、各楽器を演奏できる。ピアノは鍵盤を押しているかどうかを一音ずつフラグを用意することで和音も鳴らすことができる。ヴァイオリンはJOYSTICKが動いている間、超音波と加速度が動き、2つの値から音程を定めてMIDIが鳴るようになっている。JOYSTICKが動いたタイミングでnanoに合図が送られ、nanoの加速度によって得られた本体の角度をM5Core2に送り、本体と弓の間の角度が測定できるようになったため、より正確に音程を定めることが可能になった。トランペットはPDMセンサが一定の音量を検知したらその音の周波数からマウスピースの音を基準音(B♭やF)に変換し、ピストンのパターンで音を設定している。フルートではLPS3xの気圧センサで一定の息の量を検知し、キーのパターンで音程を定めた。指使いはリコーダーにプラスして既存のウィンドシンセサイザを参考に、半音あげるキーと下げるキーを左手の小指で操作できる場所に設け、左手の親指で3オクターブを操作できるように設けることでフルートの音域をカバーした。

## 5 評価実験

本研究のシステムを評価するにあたって、従来楽器の簡略化が適切に実装されているか、楽器として機能するかという面と、未経験者にとって興味を持つきっかけになり得るか、という面を評価実験における先行研究[9][12]を参考に、調査する必要がある。まずは弊学のオープンキャンパスにて、本シス

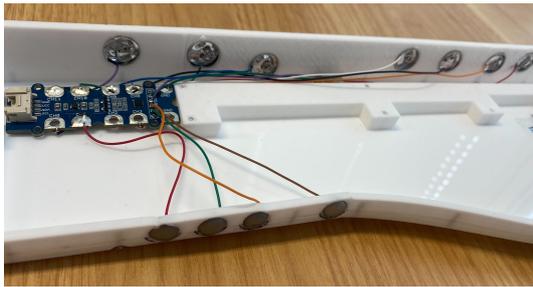


図 7. 管楽器のキーとピストン

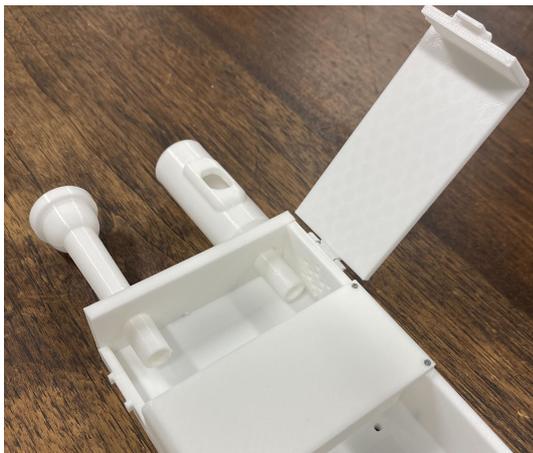


図 8. 吹き口手入れ用の蓋

テムの外見がそれぞれのモデルである楽器をイメージできるかのアンケート調査を行った。

### 5.1 外見の評価実験

本システムのハードウェアについて、各奏法のモチーフがどの程度認識されるかを評価するため、アンケートを実施した。被験者には楽器の概要を説明し、各面がどの楽器に対応するかを示した後、それぞれの奏法がイメージできるか、また複数の楽器を統合することで楽器の認知度が高まると考えるかについて、5段階評価で回答を求めた。前者は25件、後者は35件の有効な回答が得られた。各楽器の奏法がどの程度イメージできたかの結果を図10に示す。結果として、40%が「かなりイメージできた」と答え、52%が「まあまあイメージできた」と回答した。特に、ピアノの面を上にして楽器の概要を説明したため、第一印象としてピアノのイメージが強く、その後他の楽器も演奏できると伝えると、多くの被験者が驚きの反応を示した。また、クラリネットやホルンといった他の従来楽器も実装して欲しいという意見や、デザインに対するポジティブな意見も多く寄せられた。さらに、体験楽器としてのコンセプトも十分に伝わり、複数の楽器を統合することで楽器の認知度が高まるかという設問には、48.6%が「と

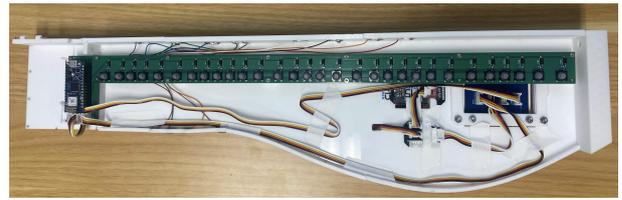


図 9. 楽器の内側

てもそう思う」と答え、40%が「そう思う」と回答した。一方で、予想通り「使いにくそう」といった意見も見られた。今回の評価では、外観に基づく認識のみを対象とし、使用感についての質問は含まれていなかったが、複数の楽器の要素を統合しつつ、一般的な楽器のイメージから大きく逸脱することなく実装することができたと評価された。今後、楽器に興味を持っていない人や、難しそうというイメージを持った人などに対して、本システムを説明した同一のシナリオを用意し、体験することでイメージが変わったか、楽器に対して興味が湧いたか、複数の楽器が合わさることによって一度の機会に体験することができたことに対する意見を問うアンケートを行う。

kiMeraを見て弦・管・打楽器の弾き方がイメージできましたか？(25件の回答)

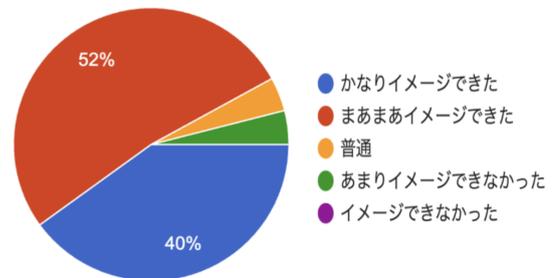


図 10. アンケート結果 1

複数の楽器(演奏方法)を一つにまとめることによって楽器の認知度は高まると考えますか？(35件の回答)

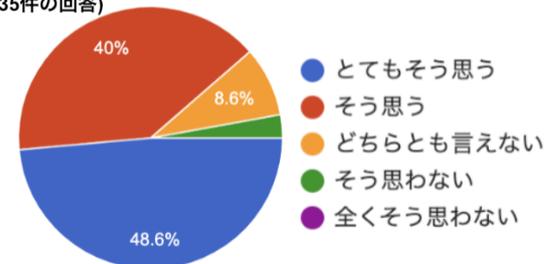


図 11. アンケート結果 2

## 5.2 主観評価

本システムが楽器として機能するかどうかを評価するために各モードを実演し、著者自身の主観評価を行った。

まず、ピアノは簡単な曲を演奏するレベルには達していると感じた。丸みを帯びたデザインは弾きにくさに個人差があると思われるが、見た目のインパクトが強調されていて非常に良いと感じた。フルートの機構と合わせて鍵盤ハーモニカのようにも演奏できるようになれば機能の追加もできる。

ヴァイオリンは、nanoによって本体の角度を算出できたことから精度の向上が見られたが、I2C通信の遅延が目立ち、反応面で不具合が生じた。また、外装のデザインに丸みをつけたため、一番端のE線を弾く際に弓が楽器の縁に当たってしまい、弾きづらくなってしまおうという設計ミスを発見した。JOYSTICKに取り付けた角度をつけた部品の足を少し伸ばすことで対応できればと考えている。さらに、MIDIの不具合により、ヴァイオリンの音ではなくピアノの音が出てしまうことがあり、この問題の解決が必要である。これはトランペットでも同様に発生し、ソフトウェア面での改善が課題であると考えられる。

トランペットの吹き心地はマウスピースを鳴らせるかどうかにかかっているため難しさが残ってしまう結果となった。著者はトランペットの経験が浅く、マウスピースをうまく鳴らすことができなかつたため、声で評価を行ったが、意図した通りに音が出るのがわかった。しかし音量によって発声を検知しているため、物音で鳴ってしまう点や、音が連なって鳴ることもあった。音声の機械学習を用いてマウスピースの音やタンギングを判断できるようになれば、スムーズな演奏が可能であると考え、今後実装を進めていく。

フルートは、リコーダーの指使いにしたことで吹きやすさを感じた。音の切り替えもうまくいき、少しの遅延はあるものの、狙い通りの音程が出た。また、タンギングの反応や息の読み取りもスムーズであると感じた。著者は肺活量が弱いため、息の量の最大値を事前に設定する等で奏者個人に合わせることでできれば吹きやすさにつながると考える。

総じて、どのモードも従来の楽器のように滑らかに演奏するレベルには達していない。しかし、見た目はコンパクトにまとまり、各楽器の特徴に寄せることができた。今後、母校のオーケストラ部に協力を依頼し、楽器としての有用性を評価する。

## 6 まとめ

本研究では、楽器未経験者が楽器演奏を体験する機会を増やすため、弦楽器、管楽器、打楽器の要素を一体化した複合電子楽器「kiMera」を提案した。

この楽器は、ピアノ、ヴァイオリン、トランペット、フルートという代表的な楽器の特徴をセンサ・デバイスで再現し、ユーザーが一度に複数の楽器を体験できる設計となっている。

評価実験では、本システムの外装に対して25件中92%の被験者が各楽器のイメージを持つことができ、楽器の再現性とユーザへの親しみやすさが確認された。また、主観評価では、演奏は難しくとも音を出す体験が容易になったと感じ、kiMeraが楽器を始めるきっかけとなり得る可能性を示す結果となった。今後の評価実験での結果によって有用性を示すことができればと考えている。しかし、本研究にはいくつかの課題が残されている。各楽器の演奏体験をより精密に再現するためのセンサー技術の改善や、複数のセンサーを同時に使用した場合の精度向上が挙げられる。

今後の展望としては、システムの改善に努め、外部デバイスに繋げての作曲作業の機能を追加するなど、体験楽器に留まらないシステムの拡張を目指したい。これにより、楽器未経験者のみならず、経験者にとっても魅力的な楽器となる可能性が広がる。本研究が示すように、楽器演奏の体験を提供する新たな手段としての複合電子楽器は、音楽教育やエンターテインメントの分野で多くの可能性を秘めている。今後も更なる改良と発展を重ねることで、音楽文化の普及と楽器演奏人口の増加に貢献したい。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、株式会社PlanckUnitsの野中直樹氏には、基板設計の多大なご支援、アドバイスを頂きました。本論文の執筆に先立ち、明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科の宮下芳明教授には、多大なご助言を賜るとともに、本研究で作成した楽器の命名にあたりご示唆を頂きました。名古屋大学大学院工学研究科の米澤拓郎准教授には、本論についてご議論を頂きました。東京電機大学ものづくりセンターには、本楽器の部品作成にて技術協力を受けました。最後に、本研究の基盤となった、関東学院中学校高等学校オーケストラ部では貴重な音楽体験をさせて頂きました。また、本システムの評価実験のご協力もして頂きました。全ての方々により感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] I. M. Cantero and J.-A. Jauset-Berrocal. Why do they choose their instruments? *British Journal of Music Education*, 34(2):203–215, 2017.
- [2] D. Marie, C. A. Müller, E. Altenmüller, D. Van De Ville, K. Jünemann, D. S. Scholz, T. H. Krüger, F. Worschech, M. Kliegel, C. Sinke, and C. E. James. Music interventions in 132 healthy older adults enhance cerebellar grey matter and



## 未来ビジョン

電子楽器は、音量制御や多様な音色の再現、持ち運びの容易さといった特徴により、従来のアコースティック楽器に代わる新たな表現手段として、20世紀後半から急速に普及した。電子楽器はアコースティック楽器に代わるものとして台頭してきたが、著者はアコースティック楽器も電子楽器も、どちらの素晴らしい点も広めていきたいと考えている。本システム「kiMera」は体験楽器としての役割を果たしており、将来的には体験楽器を脱却し、従来の楽器へとレベルアップしてほしいと考える。しかしながら、kiMeraの電子楽器としての有用性も高めるため、今後の展望としてアプリ等の接続を通じて多様な機能を拡張する可能性も視野に入れている。最初に述べた通り、楽器に興味を持たない人は自ら楽器に触れる機会を求めようとはしないであろう。逆に、楽器に興

味を持つ人は自ら購入を検討したり、楽器店で試奏を行うことが容易に想像できる。kiMeraは、楽器に興味を持たない人にこそ使用してもらいたい楽器である。自ら動かなくても自然に楽器に触れる機会が増える世界に寄与したいと考えている。音楽を聴く人は多いが、楽器を弾くことへのハードルが高い現状は、音楽を楽しむ上で非常にもったいない状況である。音楽が好きなら、カラオケに行くことがあるかもしれない。その場にタンバリンの代わりにkiMeraがあったらどうだろう。小学校時代、各教室に一台あったオルガンのように、kiMeraが設置されていたらどうだろう。新しい体験を提供することは十分に可能であると考える。情報を得て満足してしまう時代に、新しい体験を提供していきたい。