

# 自動運指機構による楽器演奏支援システムの試作

上瀧 剛<sup>1,a)</sup>

**概要：**楽器演奏は多くの人の趣味として定着しているが、その演奏技術の習得はハードルが高く、途中で挫折する人も多い。本研究では誰でも高度な演奏が可能な電腦楽器を提案する。具体的にはギターやサククスなどの複雑な運指をロボットにより自動化し、利用者は音楽ゲームの要領で、タブレット画面で流れる音符のタイミングに合わせて、ピッキングや吹奏を行うことで高度な演奏を行うことができる。これまで完全自動楽器ロボットはあり主に鑑賞用途であったが、あえて半自動化することで人とロボットとのインタラクションが可能となり、実際の楽器の振動を通じて演奏を体感することができる。元の楽器を破壊せずに、安価・小型・安全であるという設計思想の元で、フルート・サククス・クラリネット・ギター・大正琴の半自動化を行ったのでこれらを紹介する。

## 1. はじめに

音楽・楽器演奏は人生を豊かにする普遍的なスキルであり、誰もがコンサートで演奏を聴いたり、youtubeの演奏動画をみて、一度は「こんなふう演奏できたらいいな」と憧れることがあるであろうが、そのスキル習得のハードルは高い。代表的な楽器として、ピアノなどの打鍵楽器、ギターやバイオリンなどの撥弦楽器、サククスやクラリネットなどの木管楽器、トランペットなどの金管楽器、ドラムなどの打楽器などがある。

ピアノは幼少期に習う人が多く、電子楽器やタブレットを用いたピアノの演奏指導や練習システムが既に普及している。自動で演奏可能な自動ピアノも開発されている。一方で、ギターやサククス等は、さらに演奏ハードルが高いように思われる。これは弦楽器では押弦・撥弦と左右の手の動作が異なり、管楽器では運指に加えて吹奏が必要であり、楽器そのものの操作が難しいためである。ドレミファソラシドの音を出せずに挫折する人も多いであろう。

一方、楽器の自動演奏化の試みは100年以上前から行われている。オルゴールの仕組みを使って、バイオリンやピアノを演奏する装置がある。管楽器の自動化は1980年代より主に日本で行われてきた。2005年の愛知万博で披露されたトヨタの管楽器や早稲田大学のサククスロボットWAS(WAseda Saxophonist)は有名である。人工肺や人工唇の開発により細かな演奏表現も可能となっており、完全自動演奏の目的は達成されている。しかしこれらのロボッ

	分類	楽器例	動作1	動作2
弦楽器	ギター	アコースティック/エレキギター・ベース・大正琴	フィンガリング: 押弦	ピッキング
	撥弦楽器	ヴァイオリン・ヴィオラ・チェロ・コントラバス	フィンガリング: 押弦	擦弦
管楽器	ピアノ	ピアノ・ハーブシコード・クラヴィコード	フィンガリング: 打鍵	
	金管	トランペット・ホルン・チューバ	フィンガリング: キー	吹奏 (唇振動)
	木管	クラリネット・オーガエ・バスーン・サククス	フィンガリング: キー・指孔	吹奏 (リード)
	フルート	フルート・リコーダ	フィンガリング: キー・指孔	吹奏 (空気ジェット)
打楽器	ドラム	スネア・タム・シンバル・バス	打撃	
	マレット	マリンバ・シロホン・ヴィブラフォン	フィンガリング: 打鍵	

図1 楽器の分類と演奏動作

トは観賞や合奏用途であり、人間との相互作用（インタラクション）は低いように思われる。

これに対して提案する電腦楽器は、完全自動ではなく、あえて一部の機能のみを自動化（半自動化）することで、人間による完全手動演奏～ロボットによる完全自動演奏の中間の機構をつくり、ロボットと人間とのインタラクションを実現する。これにより、演奏者は実際の楽器に触れながら高度な演奏が可能となる。

## 2. 楽器の分類と機械による演奏可能性

図1に示すように、楽器は大きくは弦楽器、管楽器、打楽器に分類される。これらの楽器を機械による演奏を考えた場合に、多くの楽器は2つの動作により実現される。弦楽器は左手で弦を押さえることで音階を定め、右手でピッキングあるいは弓による擦弦を行うことで音を出す。管楽器は両手でキーあるいはトーンホールを押さえることで音階を定め、口でリードないしマウスピースを吹奏することで音を出す。加えて、管楽器では吹奏によりピッチやオクターブといった音階を吹き分ける必要がある。ピアノを鍵盤を叩く1つの動作で音階と撥弦を兼ねており、打楽器も叩く動作で音色と発音を兼ねている。

<sup>1)</sup> 現在, 熊本大学  
Presently with Kumamoto University  
<sup>a)</sup> koutaki@cs.kumamoto-u.ac.jp

これらの動作を機械により自動化ができれば自動演奏ロボットが実現できる。既にソレノイドを用いたピアノの自動演奏ロボットは実用・商用化されている。ドラムを演奏できるロボットもいくつか見かける。その他、ギター・バイオリン・トランペットなどのロボットも見かける。しかし、商用化されたピアノと比べて、完成度や演奏能力、コストの面から普及は進んでいない。

## 2.1 半自動化における技術的な課題

一方で、本研究で対照とする、楽器演奏の一部を自動化（半自動化）を考えた場合に、上記の2つの動作で演奏する楽器に関しては、そのうちの1つの動作を自動化することで実現できる。たとえば、ギターの場合は押弦動作はロボットが行い、ピッキング動作は人間が行う、サクスの場合はキー操作はロボットが行い、人間が吹奏動作を行う、といった具体である。

ただし、半自動ロボットにおいては、半分は人間が演奏するという性質上、単に完全自動ロボットの一部の機能を削るだけでよい、という簡単な問題ではない。すわなち、コンプレッサーを使う場合は装置が大型化するため楽器を手持ちで演奏することができなくなるし、大型のモーターや大電力を使うアクチュエータを使う場合は安全性の問題が出てくる。

## 2.2 開発目標

上記の技術的な課題から、本研究での半自動楽器ロボットの開発目標を次のように定める。

- (A) **小型・軽量化** 人間が手持ちできるようにロボットの小型化および軽量化が必須である。
- (B) **省電力・安全化** 5V程度の直流電源で動くことが望ましい。ロボットに指を挟んでケガをしないようにしなければならない。
- (C) **元の楽器を破壊しない** 特殊な加工が不要で既存の楽器に装着可能なデバイスが望ましい。

## 3. 開発機構

前記の開発目標を達成可能となるキー技術について述べる。大きくはハードウェア部とソフトウェア部に分かれる。

### 3.1 ハードウェア部

#### 3.1.1 アクチュエータ：サーボ・ワイヤー機構

当初、サクスロボットの制作にあたって、先行事例と同様にソレノイドおよびワイヤー機構によるキーの開閉動作を試みたが、重量・電力・安全性の面で、多くの問題があることが発覚し断念した。

具体的にはアルトサクスのキー開閉においてローキー周辺では、15mm程度のストロークが必要であるが、大型ソレノイドでは長ストローク動作はパワー確保のために

24Vの電圧が必要であった。一方でサクスは場合によっては同時に10個のキーを押さえる必要があり、この時の消費電力が200Wを超えてしまった。この時の発熱で管へのダメージ・ピッチの変化が懸念された。重量も5Kg以上重くなり、アルミフレームでソレノイドを支える必要があり、とても手持ちできない据え置き型のロボットとなってしまった。

これに対し、マイクロサーボモータにナイロンコートワイヤーを取り付け、キーを引っ張って開閉動作を試したところ、5Vの電源でありながら十分な力とストロークが得られることが判明した。ナイロンコートワイヤーはネックレスなどのアクセサリ手芸で用いられる物を用いた。また、同様に手芸で用いられる「つぶし玉」を使ってワイヤーが簡便かつ強力で固定できることも分かった\*1。

#### 3.1.2 制御：小型マイコン・電源

初期の開発では、PICマイコンやstm32系列のマイコン、フォトカプラを用いたMIDI信号変換回路を自作していたが、近年になってESP32系統のマイコンであるm5stack atomに置き換えた。m5stack atomは2cm角でありながら240MHzで高速動作し価格も安い。また、標準でBluetooth通信を備えており、BLE MIDI通信が可能である。

BLE MIDIはマスターPCから送信されるMIDI信号のやり取りが無線化できるため、非常に魅力的であったが、通信遅延（複数デバイスとの混線）やWindowsではBLE MIDIが標準化されていないため使えない、といった問題点があった。今後に期待される。

サーボモーターはシリアル通信で16ch制御可能なPWMドライバを用いて制御を行った。

モーター電源はUSB電源では足りないため、安定化電源もしくは、ドローン用の2セルのリチウムイオンポリマーバッテリーを5Vに降圧して用いた。ドローン用電源は小型でパワーがあるため、開発した電腦楽器を屋外に持っていき安定して動作することも確認できているが、安全性に関しては検討が必要である。

#### 3.1.3 ロボットの設計

基本的には2D CADで平面図形を設計し、それを基に、アクリル板をレーザー加工機でカットして、サーボモーターおよびマイコンなどを取り付けた。5mmアクリル板で剛性が足りずに曲がってしまうケースが出たため、2mmステンレス板を外注して制作した。アクリル板加工は研究室で可能であるが、外注では2週間および高額費用を要するため、可能な限りアクリル板で設計をした。

複雑な3D形状およびキー配置となるサクスロボットの設計は極めて困難であり、複数の平面を組み合わせる必

\*1 当初はタコ糸で引っ張っていたが、糸が伸びて力がでない、摩擦してすぐ切れる、固定するために狭い空間で糸を結ぶのに非常に手間がかかる、と問題だらけであり、実際の制作上「つぶし玉」機構の発見がなければ楽器ロボットは作れなかったと言っても過言ではない。

要があった。特に、サーボモーターの配置・スペースの確保、ワイヤー経路、なおかつ人間が持てる構造にしなければならない。これらは全て試行錯誤的に設計したが、今後、コンピュータショナルに配置最適化して設計するなどの余地があると考えられる。

### 3.2 ソフトウェア部

#### 3.2.1 制御プログラム

m5stack は arduino 言語で動作し、MIDI や PWM ドライバのサンプルも豊富にあるため特に問題なく作成できた。

#### 3.2.2 キャリブレーションツール

楽器ロボットを正しく動かすためには各サーボモーターの回転角度を適切に設定しなければならない。この作業をキャリブレーションと呼ぶことにする。すなわち、モーターの回転量でナイロンコートワイヤーの張力が定まるため、張力が小さいとキーや弦を十分に押さえることができず音がでない。かといって、張力を過剰に大きくしようとすると、モーターに負荷がかかり故障<sup>\*2</sup>したり、楽器にダメージを与えてしまう。

楽器ロボットにとって、チューニングに相当するであろうキャリブレーションは非常に重要である。当初は、1つ1つ数値を変えながらマイコンプログラムを書き換えて、動作を確認する、といったような調整を行っていたが、モーターの数が増えるとこの作業量が無視できなくなった。そこで、特定の MIDI 信号によって、モーターの移動量を変更したり、マイコン内のフラッシュメモリに設定値を書き込むようにして、PC 側ではこれらの値を調整できる GUI を作成した。これにより、キャリブレーションに要する時間が大幅に減り、なおかつ、細かいモーター回転量を調整できるようになり、楽器ロボットの安定性が大きく向上した。

#### 3.2.3 演奏 GUI システム

ロボットがキーや押弦などの運指動作を行い、人間がピッキングや吹奏を行う、という半自動楽器の性質上、機械と人間の動作を同期させる手段が必要である。

このために、人間の視覚を用いた同期システムを開発した。ようするに、所謂リズムゲームと呼ばれるシステムと同等のものであり、PC やタブレットの画面上に流れるノートのタイミングに合わせて、ロボットはフィンガリング動作を行い、人間はピッキングや吹奏動作を行う。

当初は、synthesia と呼ばれるピアノ練習ソフトをそのまま用いていたが、実際にはロボットの動作には通信やモーターの動作による遅延が含まれており、そのままだと機械と人間のタイミングが合わずに音が出ない、という問題が発生した。そこで、ロボットの動作はこれらの遅延<sup>\*3</sup>を見越して、早めに動作させるようなシステムを独自に開発

した。

## 4. 実例

以上のハードウェアおよびソフトウェアによって実現できた各種の楽器ロボットを紹介する。

### 4.1 フルートロボット

12 個のサーボモーターによりキーを自動開閉して、人間は頭部管に息を吹き込むことにより演奏することができる。サーボモーターはフルートの下側に一直線に並べて配置している。フルートは直径の大きさが一定の円筒形であり、長方形の箱型のアクリル板にはめ込んで楽器を固定できる。サクセスに比べるとボディがシンプルな構造であるため、設計は比較的容易であった。人間側でオクターブの吹き分けを行う必要がある。

### 4.2 サクセスロボット

16 個のサーボモーターによりキーを自動開閉し、人間はリードから息を吹き込むことで演奏ができる。全てのキーは押さえることができないが 2 オクターブ程度の音が出せる。フルートと比べて、管の直径がベルの方向にしたがって大きくなり、キーが多く、配置も非常に複雑である。ロボットはサムレストとサムフックのねじ穴を利用してアクリル板を取り付け、サーボモーターを配置、ワイヤーを通す穴を設計した。通常のサクセスと同様に、左手と右手が入るように設計した。アルトサクセスおよびソプラノサクセスの 2 種類で試作した。ソプラノサクセスのほうが小さく、キーの力が少なく済んだ。実際の演奏では、一定の楽曲が演奏できることを確認できた。筆者は管楽器未経験者であったが、それ以上の演奏はできていると思われる。

### 4.3 トランペットロボット

3 つのサーボモーターでキーを自動開閉し、人間はマウスピースから息を吹き込むことで演奏ができる。トランペットのキーピストンは、必要なストロークが長く、マイクロサーボモーターでは多くの回転量が必要なため開閉動作がフルート等と比べて遅いように思われた。3 つのキー操作で、楽器への取り付けも容易であったため、これまでの楽器ロボットの中では制作が最も簡単であった。

しかし、金管楽器はキー動作よりも吹奏動作が難しいため、筆者では音を出すことができなかった。金管楽器の経験者に使ってもらったところ、一応の音が出ることは確認できた。しかし、金管楽器は吹奏動作で 5 度、オクターブなどの多くの吹き分けを行う必要があり、今回の演奏システムでは難しいように感じた。今後、吹奏部分をロボットにより支援する仕組みが必要であると考えている。

\*2 具体的にはサーボモーター内の MOS-FET が焼き切れる。

\*3 50~120msec 程度である

#### 4.4 クラリネットロボット

クラリネットはサクセスと同じくリード楽器であり構造が似ているが、サクセスとは異なりボディが円筒形であることが特徴である。したがって、フルートと同様に長方形の箱型のアクリル板にはめ込む形でロボット部を固定することができる。当初、ソプラノクラリネットで作成しようとしたが、クラリネットはキーだけではなく、リコーダーと同様にホールがあるため断念した。そこで、全キーがカバードキーであるバスクラリネットでの試作を行った。バスクラリネットはサイズが大きいが、キー開閉のストローク長はサクセスよりも短いため、マイクロサーボモーターでの動作が可能であった\*4。

#### 4.5 大正琴ロボット

次節のギターロボットの前に試作した。なぜならば、ギターの押弦機構は、フレット間のスペースが狭く、押弦のためには真上から押さえる必要があり、十分な力が必要であり、制作が困難であると考えたためである。これまで先行例でコンプレッサーやソレノイドを用いたギターの押弦機構があったが、電力の問題や治具部分が大掛かりとなり、手持ちでの実現は難しい。

これに対して着目したのが本大正琴である。大正琴は基本的にはギターと同じく、複数の弦をフレットで押さえて弦を弾く楽器であるが、押弦はテコの原理を利用しキー操作により行っている。このため、これまでのサーボモーターおよびワイヤー機構によって回転運動を押弦運動に効率よく変換することができる。大正琴は一時期のブームによって高齢者に広く普及しており、入手性が良かった（低価格）のも今回の試作理由である。

大正琴の優れた機械機構により、ロボット化は比較的容易であった。小さなソプラノ大正琴はマイクロサーボモーターでの押弦が可能であったが、少し大型のアルトおよびバス大正琴はパワーが足りずに音がでなかった。そこで、中型サーボモーターおよび、ボディをアクリル板ではなく、2mm ステンレス板で作成したところ発音が可能となった。

#### 4.6 ギターロボット

前述の大正琴を参考にして、同様にテコの原理を用いたキー機構をギターのネックに取り付けた。ただし、ギターは6弦あるが、モーターの数とスペースの都合上、1弦と2弦のみを押さえる機構とした。なお大正琴は複弦を1つのキーでまとめて押さえる方式であり、ギターとは演奏方法が異なる\*5。

作成した機構で複数の弦で独立して押弦可能であり、和音を演奏できることを確認した。

\*4 ただし、ローの4キーはマイクロサーボモーターでは少し厳しいと感じた。

\*5 大正琴では基本的にオクターブ以外の和音が出せない。

#### 4.7 ドラムロボット

打楽器に関しては動作の遅いサーボモーターではなく、高速応答のプッシュソレノイドにより打撃を行う。キー操作と異なり、長時間押さえる必要もないため発熱の問題がない。打撃のベロシティはソレノイドの電流制御（電圧のPWM制御）により速度をコントロールする。打撃ロボットは小型ユニット化して、シンバルやスネアのリムに取り付けることができる。ハイハットのオープン/クローズ動作はパワーが必要なため、サーボモーターおよびナイロンコートワイヤーで動作させた。ドラムロボットはシンプルで簡単に制作できたわりには、安定して正確な動作が実現できた。ただし、シンバルのクラッシュなどの動作はソレノイドではパワー不足であり、今後バネ機構を用いた、瞬発力のあるアクチュエータが必要である。またオープン・クローズドリムショットなどの動作の検討も必要である。

#### 4.8 コスト

サーボモーターは1個300円以下であり、マイコンのm5stack atom liteは1200円程度である。例えば、フルートロボットの場合は12個のサーボモーターとアクリル板で実現でき、材料費は1万円以下である。

### 5. むすび

楽器ロボットの開発を行っており、あえて完全自動ではなく、一部の演奏機能のみを自動化し、残りの演奏動作は人間により行う半自動楽器の提案と具体的な開発事項を紹介した。半自動化のためには、人間が手持ちで残りを演奏する必要があるという性質から、ロボットの小型化・軽量化・省電力化・安全性の確保などの多くの技術課題が生じる。

その解決手段として、サーボモーターと手芸用のナイロンワイヤーコート機構を利用したアクチュエータが有効であることを実例を挙げて示した。近年のマイコンの小型化・高性能化、ドローン技術の発展による小型大容量バッテリーの普及により、屋外で演奏可能なレベルの手持ち可能な楽器ロボットの実現可能性を示した。