

スマート頭部管による 自動ピッチ補正機構の検討

陶山 祐太^{†1} 上瀧 剛^{†1}

概要: 管楽器を正しいピッチ (周波数) で発音を行うには、リードを咥える位置や、口の広さといったアンブシュアの細かい調整が必要となる。そのためには演奏者自身が発音ピッチの正否が判断できなければならず、初心者にとって大きなハードルとなる。そこで本研究では、発音ピッチをセンシングし、機械的に管長を変化させることで自動でピッチ補正が可能なスマート頭部管を提案する。具体的には、ネック部分に取り付けた分岐管をサーボモータにより管長制御する。実際に本機構を用いたソプラノサックスのスマート頭部管の設計および試作を行い、正しい音の周波数への補正が行うことができることを確認した。

1. はじめに

サックスはマウスピースを噛むように咥え、下唇を巻き込み、下の歯をあて、息を漏れないように吹き込むことで発音を行う。しかし、サックスはピアノやギターのように、鍵盤を弾くことや弦を押さえて弾くことで正しいピッチの音が鳴るというものではなく、構える角度やリードを咥える位置、下の歯をあてる強さ、口の中の広さを総称したアンブシュアに応じてピッチが変化する。そのため、正しいピッチで演奏を行うためには、自分の発している音のピッチが正しいかどうか、周りの音と比較して高いのか低いのかどうかを聞き分けながらアンブシュアをうまく調整する必要がある。

一般的なピッチのズレの改善方法はチューナーやピアノと合わせて発音練習を行うことや、自分の音の測定をしながら、そのズレを小さくするようにアンブシュアを変化させながら練習を行う。しかし、初心者にとってアンブシュアの調整を行いながら演奏することや、ピッチをうまく聞き分けることは難しいため、サックスの演奏における課題となる。

そこで本研究では、そのサーボモータと管長を変化させることのできるネック部分を作成し、それらを用いてピッチのズレを自動で補正を行うスマート頭部管を作成し、その手法の提案を行う。

また、管長を変化させることのできるネックを用いた音の周波数の評価、およびその機構を用いた単音におけるピッチのズレの補正を行い評価する。

2. 先行研究

サックスを用いた自動演奏ロボットや演奏補助機構の先行研究例を2つ挙げる。

2.1 装着型演奏支援システム [1]

この研究では運指機構の自動化を行っており、息を送り込む口腔部は実際に人間が演奏している。装着型演奏支援システムの模式図を図1に示す。運指機構にはプルソレノイドを用いてワイヤーを介してキーを抑えている。キーの付け根に比較的容易に着脱可能な挟む機構を取り付け、ソレノイドを装着している。そのため、演奏者が必要とするキーのモジュールのみを使用することも可能である。

口腔部に関してはマウスピースに穴を開けてチューブを差し込み、圧力センサーを取り付け、息を送り込んでいる。圧力がある一定の値を下回った際に演奏音の切り替えを行い、息継ぎやタンギングのタイミングでソレノイドを動作させ、運指の切り替えが可能である。

このシステムにより、障がいを持った方の運指動作の補助や、運指を考慮することなく自分自身の感性で表現できる演奏支援が可能となる。

2.2 WAS[2]

WAS(WASeda Saxophonist) は人型ロボットであり、口腔部分や運指部分のみならず、目や首、腰など計32の自由度で構成されている。WASの写真を図2に示す。演奏機構においては、口腔内断面積を変化させ、音色を変えることや、舌機構を作成し、アタックやリリースといった技法も可能としている。

^{†1} 現在、熊本大学
Presently with Kumamoto University

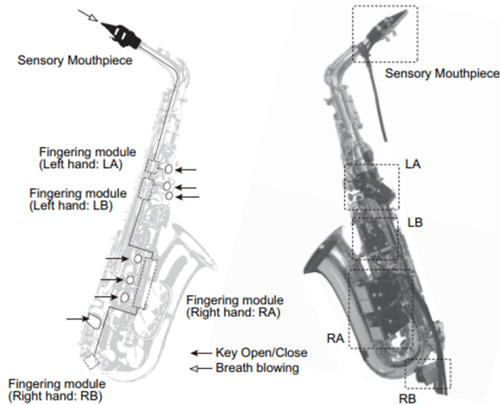


図 1 装着型演奏支援システム [1]

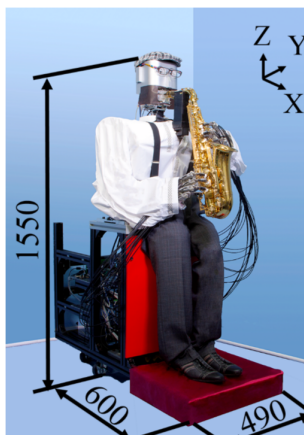


図 2 WAS[2]

2008 年より人間型サキソフォン演奏ロボットの開発を開始し、現在では 5 代目の WAS-5 が制作されている。この研究では、ロボットを用いて楽器の演奏を行い、人々の心を豊かにすることや、人とともに高度な演奏することを目的としている。

2.3 先行研究と本研究の位置づけ

装着型演奏支援システムは運指の補助を行うロボットであるため、完全な初学者や運指動作を行うことができない人に対しては有用ではあるものの、発音まではできるがピッチの補助はできない。また、WAS は完全自動演奏で人を楽しませる演奏ロボットであるため、人の演奏を補助するものではない。

本研究は運指やソプラノサックスの基礎的な発音と運指を行うことができる人へ向け、発した音のピッチを自動で補正することによる演奏補助を目的としている。

3. 提案システム

管楽器は指でキーを押さえることで管長を変化させ、音の高さを変化させている。このことを用いて発音している音の周波数をマイクで検出し、その音が本来発音したい目

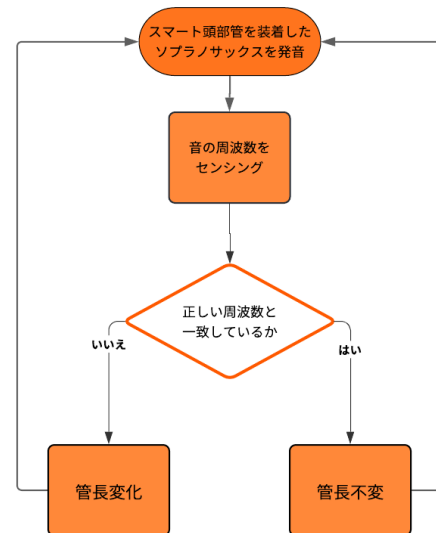


図 3 提案するピッチ安定化機構の大まかな流れ。

標の周波数とどの程度差異があるかを求め、その差異を小さくする方向へネック部分の管長を変化させる。大まかな流れを図 3 に示す。本項では、スマート頭部管の構成するネック部、管長を変化させる機構および周波数のセンシングであるピッチ検出アルゴリズムについて説明する。

3.1 スマート頭部管の試作

ソプラノサックスはマウスピース部、ネック部、2 番管の 3 つに分解できる。マウスピース部と 2 番管は形状が複雑で管長を変化できるよう作成することが難しいため、今回はネック部での作成を行う。

また、管長を変化させることのできるネック部の設計として U 字型、垂直方向に管長変化、水平方向に管長変化の 3 つが考えられる。U 字型の設計では、管長が通常のネック部より長くなるような設計や、3D プリンタを用いた曲形の筒状の印刷が難しいことから断念する。

垂直方向に管長変化の設計では、長さが変化する度にマウスピースを咥える位置が上下することや、余計な力が入ってしまうことによりピッチに影響を与えること、歯や舌などにマウスピースがぶつかる危険性があることが挙げられるため断念する。

このことを考慮し、水平方向に管長可変となるネック部の試作を行った。水平方向に管長を変化するための機構としてラックアンドピニオン機構を用いた。ピニオンと呼ばれる円形の歯車と、ラックと呼ばれる平板に歯がつけられたものを組み合わせたものであり、回転力を直線の動きに変換する。今回はラックを 180° 回転させるように引き伸ばし、半円柱状とすることで管を覆うようにしている。

ラックアンドピニオン機構を用いたスマート頭部管の機構設計は図 5 のように行い、実際に作成したスマート頭部管を図 4 に示す。

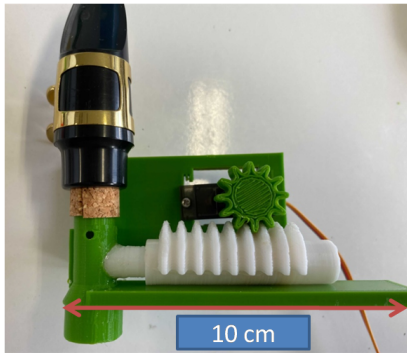


図 4 開発した管長変化可能なスマート頭部管

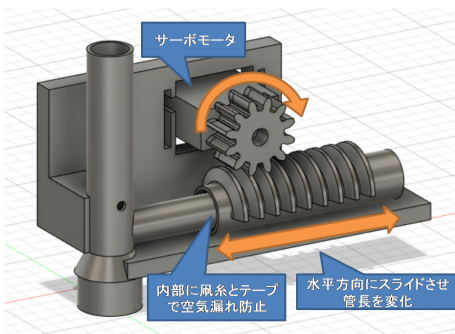


図 5 スマート頭部管の機構設計

マウスピースとネック部の装着箇所にはマウスピースが痛むことの無いようコルクを装着し、ネック部と2番管の装着箇所も空気漏れが無いよう、本来のネック部と同様の外径としている。また、マウスピースの奥深くにネック部に先端が届くようにすることで空気がしっかりと伝わり、吹きやすさや音の安定感が増すよう設計している。

現在試作している機構ではピニオンを回転させるためのアクチュエータとしてサーボモータを用いている。使用したサーボモータは Tower Pro 社の MG90S である。サーボモータの位置がずれることの無いようにネック部とモータ固定部を一体化し、ピニオンがラックに加える力が下方へ逃げることをないようにスライド部分と同等の長さの支えも一体化させている。図のようにピニオンと連動したサーボモータを回転させ、ラックの円柱がスライドすることで管長を変化させている。

試作したネック部から伸びる内側の管の先端には両面テープと風糸を用い、表面にはスライドグリスを塗布することで、空気の漏れを塞ぎ、スライドさせることができるように設計している。この作成したスマート頭部管は図6のように装着し使用する。

3.2 ピッチ検出アルゴリズム

音の高さを検出するピッチ検出アルゴリズムにはいくつか種類がある。当初は高速フーリエ変換 (FFT) を用いてピッチの検出を行っていたが、周波数分解能と時間分解能がトレードオフの関係にあることでリアルタイムで 1 Hz

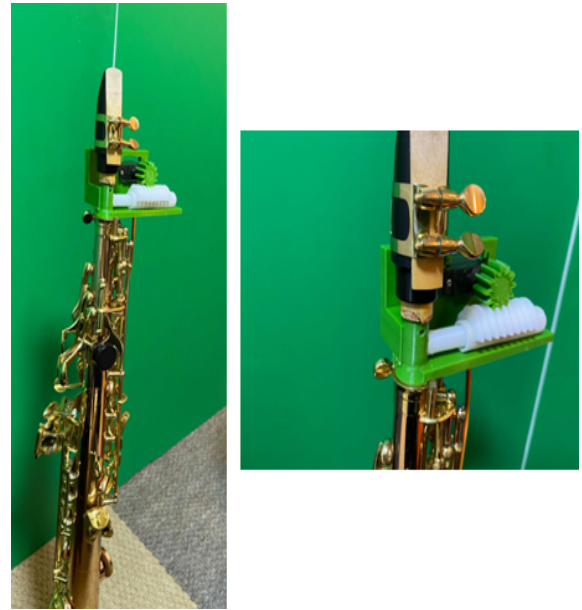


図 6 スマート頭部管を装着したソプラノサクソ

単位といった細かいピッチ検出が不可能であったことや、発した音とは全く関係のない周波数の誤検出が多く見られた。

できる限り誤検出が少ないように MPM (McLeod pitch method) アルゴリズムを採用した [3]。MPM アルゴリズムは波形を時間軸方向にずらし、元の波形とどのくらい一致するかという自己相関関数を計算し、それを基にした Normalized Square Difference Function (NSDF) という関数を用いて波形のピークを求めることによってピッチを推定する。これを用いることで高速フーリエ変換と比較して周波数分解能と時間分解能ともに高く、リアルタイムでの音の周波数の測定が可能となった。

4. スマート頭部管の発音可能周波数の評価

サーボモータを動作させずにスマート頭部管を用いてソプラノサクソの演奏を行った際の各音の周波数と正しい音の周波数との比較を行う。チューニングは通常と同様にし、管長の変化によって補正できるようにラックの円柱の管は根元から 15mm 程度の余裕を持たせている。

発音は 5 秒間行い、周波数を計測し、最小値から最大値の範囲と正しい周波数を表 1 に示す。録音にはコンデンサマイク (Yanmai 社の GM-888) を用いた。

音の高さが G5 以下の場合には、比較的正しい周波数と一致しているという結果が得られた。この時、管長を変化させると周波数の変化が観測される。

A5 および B5 の高い音は 20 Hz 程度のズレが生じた。これは、吹き手のリードを囁む強さが安定していないことや、この 3 つの音を発音する際にオクターブ孔を開放する必要があり、その穴の大きさや位置によって吹きづらくなったため生じたものであると考える。

表 1 各音の目標周波数とスマート頭部管の発音可能周波数

音名	正しい音の周波数	試作したネック部の音の周波数
C6	932	939~942
B5	880	901~904
A5	784	809~812
G5	699	700~702
F5	622	624~626
E5	587	587~589
D5	523	522~526
C5	466	470~473
B4	440	440~444
A4	392	388~390
G4	349	345~347
F4	311	311~313
E4	294	294~296
D4	262	264~266
C4	233	234~237

また、ラックの管を広げる(管長を長くする)ことで A5 以外の音高の周波数は正しい周波数に達することができるが、A5 に関してはラックの管を伸縮させても音の周波数は変化しなかった。これはスマート頭部管のオクターブ孔の位置が影響でスライド部分に空気が送り込まれていないことが考えられる。そのため、オクターブ孔の位置や大きさを再度検討を行う必要がある。今回は A5 の音高は考慮せず、スマート頭部管の動作を行うこととする。

5. スマート頭部管を用いたピッチ補正の評価

5.1 条件

図 4 のスマート頭部管を用いて C5 の発音を行った。C5 の周波数は 466 Hz、半音下の B4 は 440 Hz であるため、発音した周波数が C5 と B4 の中間の周波数である 453Hz から 465Hz の間の時は、管長を短くし、音が高くなるように回転させる。また C5 の半音上の C#5 の周波数は 494 Hz であるため、467 Hz から中間の周波数である 480 Hz の間にある時は管長を長くし、音が低くなるように回転させるように動作させる。

この時、回転角度幅を 1°、2°、3°、5° として試奏を行った。回転角度幅は音の周波数のセンシング一回につき回転させる角度のことである。奏者は筆者であり、音が鳴らせる程度の初心者である。また、音を高め、低めおよび普通の 3 パターンとなるように意識し吹き分けた。吹き始めと吹き終わりはアンブシュアが変わらないよう意識した。

5.2 動作の検証

回転角度幅による違いは以下のような結果が得られ、1° のときの低めを意識したとき、5° のときの低めを意識したときのピッチ補正の様子を図 7 おとび 8 に示す。横軸は時間、縦軸は音の周波数である。

1° のとき

目標の周波数に達するまでの時間が 4~5 秒程度と長い、安定して 466 Hz 付近に留まり、ピッチを補正することができる。

2° のとき

目標の周波数に達するまでの時間が 1~2 秒程度と短い、466 Hz に近づくと、464 Hz から 468 Hz の間を振動することがしばしば生じる。

3° のとき

目標の周波数に達するまでの時間が 1~2 秒程度と短い、振動がほとんど生じる。

5° のとき

目標の周波数に達するまでの時間が 1 秒程度と短い、大きな振動が常に生じる。

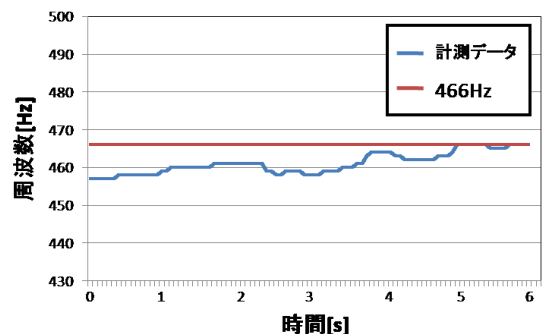


図 7 回転角度幅 1° における低めを意識した発音を行った際のピッチ補正

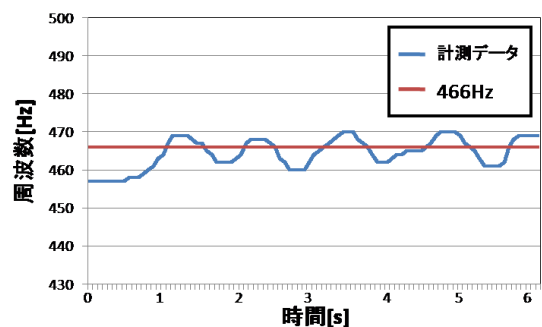


図 8 回転角度幅 5° における低めを意識した発音を行った際のピッチ補正

回転角度幅が 2°、3°、5° の時に発生した振動は回転角度幅が大きいことにより目標の周波数に達するための管の長さうまく到達することができないためであると考えられる。回転角度幅が小さいと目標周波数到達時間は長い、振動は小さい。回転角度幅が大きいと目標周波数到達時間は短い、振動は大きいというトレードオフの関係が見られた。

また、音の高さの吹き分けに関しては、回転角度幅に依ることなく音を高めに意識した際には、ピッチ補正されると吹きづらく、音を低めに意識した際には、ピッチ補正されると吹きやすくなるという結果が得られた。音を高めに意識した演奏はリードを強く嘯み、息が細くなるよう送り込んでおり、ピッチが補正されると管長が長くなるため、送り込む息がさらに必要になることから吹きづらさが増したと考えられる。また、音を低めに意識した演奏はリードを優しく嘯み、息が太くなるよう送り込んでおり、ピッチが補正されると管長が短くなるため、送り込む息がそれほど必要ではなくなるから吹きやすさが増すといった高めを意識したときと、反対のことが起こった。

次に、このトレードオフの関係を解消することを目的とし、検知した音の周波数の値に応じて回転角度幅をさらに区分けして動作の検証を行った。

5.3 条件

検知した音の周波数は目標の周波数と大きく離れているときは回転角度幅を大きくし、近づいてきたときは、回転角度幅を小さくすることで、トレードオフの関係を解消できるかどうかの検証を行った。具体的な数値は以下のようになる。453 Hz から 462 Hz のときは回転角度幅を 5°、463 Hz から 465 Hz のときは回転角度幅を 1° とし管長を短くし、音が高くなるように回転させる。467 Hz から 469 Hz のときは回転角度幅を 1°、470 Hz から 480 Hz のときは回転角度幅を 5° とし管長を長くし、音が低くなるように回転させる。

5.4 動作の検証

高めを意識した発音を行った際のピッチ補正の様子を図 9 に、低めを意識した発音を行った際のピッチ補正の様子を図 10 に示す。

両図からも、補正を行うまでに 1 秒程度要した後、466Hz 付近に補正を行うことができている。2°、3°、5° の時に見られた振動を解消することができ、前項で述べたトレードオフの関係を解消しピッチの補正を行うことができた。これらの結果をまとめたものを表 2 に示す。また、波形の途中に乱れが見られる。これは、奏者が発音可能な程度の初心者であるため、低めや高めを意識して発音を行う際のアンブシュアの制御が難しく、安定して空気を送り込むことができていないことに依るものと考えられる。これは、通常のネック部を装着した状態で同環境で計測した際にも幾分か生じる。

音の高さの吹き分けによる吹きやすさは、前項と同様であった。

6. 結論と今後の展望

本研究では、ソプラノサックスの初学者が直面するピッ

表 2 各回転角度幅における目標周波数到達時間および振動の有無の結果

回転角度幅	目標周波数到達時間	振動
1°	4~5 秒	無し
2°	1~2 秒	有り
3°	1~2 秒	有り
5°	1 秒	有り
5° と 1° を使い分け	1 秒	無し

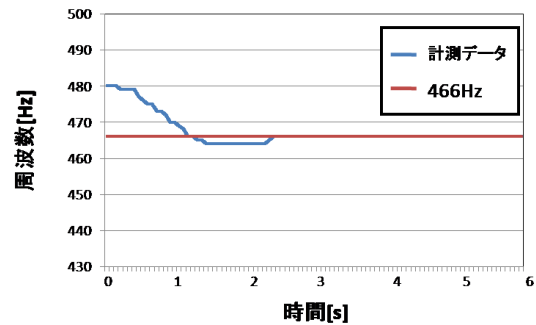


図 9 高めを意識した発音を行った際のピッチ補正

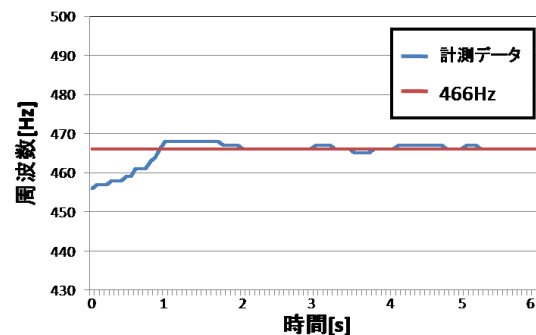


図 10 低めを意識した発音を行った際のピッチ補正

チのズレを改善するための機構としてピッチの自動補正を行うスマート頭部管を作成し、それをを用いた音の周波数の評価と単音の発音をした際のピッチのズレを補正できるかどうかを確認した。C5 の音において、目標周波数に到達する時間は 1 秒程度を要し、振動のないピッチを補正することが可能となった。

今後の展望としては、音階を変えた際のピッチ補正や、吹きやすさの検証、また、目標周波数に到達する時間をさらに改善させ、BPM の速い曲や、短い拍などの運指の切り替わりが速い曲でも補正可能とすることなどが挙げられる。

参考文献

- [1] Kurosawa, Y., Suzuki, K., "Robot-Assisted Playing with Fingering Support for a Saxophone," Proc. of International Computer Music Conference, pp. 1-4, 2010
- [2] Jia-Yeu Lin, Mao Kawai, Yuya Nishio, Sarah Cosentino,

and Atsuo Takanishi, Development of Performance System With Musical Dynamics Expression on Humanoid Saxophonist Robot, IEEE Robotics and Automation Letters Volume 4, Issue 2, p.1684 - 1690

- [3] Philip McLeod, Geoff Wyvill, A smarter way to find pitch, Proc. of Int. Computer Music Conf. January 2005.