解説

サキソフォンとトランペットの自動演奏ロボットについて

Automatic Performance Robots of Saxophone and Trumpet

高 島 俊* *法政大学工学部

Suguru Takashima* *Faculty of Engineering, Hosei University

1. はじめに

自動演奏装置は、オルゴールやオートマタとして古くから製作されている。マルチメディア時代の現代での自動演奏ロボットの存在価値はなんだろうか。優秀なロボットであれば音源としての価値（演奏者としての価値）も出てくるかも知れない。

ところで、鍵盤楽器や弦楽器の自動演奏装置に比べて、管楽器の自動演奏ロボットの研究は少ない。管楽器には木管楽器と金管楽器がある。これまで、木管楽器では、リコーダ、フルートの自動演奏ロボットの研究が行われているが、金管楽器については皆無であった。この解説では、筆者らが開発した管楽器の自動演奏ロボットについて述べる。木管楽器の代表としてシングルリードのサキソフォンの自動演奏ロボットを取り上げ、金管楽器では、代表的なリップリードの楽器であるトランペットの自動演奏ロボットを紹介する。サキソフォンでは、マウスピースに取り付けられた一枚の、リードと呼ばれる葦の一種でできた薄い板が振動源となり、それを唇で押さえる力により音の高さを調節している。これに対して、金管楽器は唇を振動源として用い、唇とその周りの筋肉を緊張させて音の高さを制御している。このような機能を果たす人工唇の作製は難しく、また、柔らかい振動体の特性を自由自在に制御することも困難であることが、これまであまり試みられなかった理由と考えられる。

管楽器では、送り込まれる空気がエネルギー源となり、管内の空気管との共鳴により独特の音色の吹鳴音が発する。図1に人間が管楽器を演奏しているときの動作を示す。脳に蓄えられた楽譜などからの音楽情報に基づいて、口と唇（顎も含む）、舌、腕と指、肺を操作して演奏を作り出す。各部分で様々な種類の制御が行われているが、人間に特徴的な制御は、音を耳で聴いてそれを演奏にフィード

図1 人間の演奏者による演奏時の情報の流れ

図2 自動演奏システムの送気供給システム

バックしていることであろう。以下では、各部分について説明する。

2. 送気システム

サキソフォンおよびトランペットの送気システムを図2に示す。

空気源としては、低圧で吐出量の多いエアコンプレッサー（最高圧力：50[kPa]、吐出量：50リットル/[min]程度）が適している。コンプレッサーから送られた空気を市販の圧力レギュレータを通して10[kPa]以下に減圧する（人間の呼吸は5[kPa]以下）。その後自作のコンピュータ指令による圧力可変形のリリースバルブを用いて0~5[kPa]の任意の圧力に制御可能としている。演奏時には、各音毎に変更可能であり、音量の制御に使うことができる。また、超音波加湿器を用いて送気の加湿を行っている。人間の呼吸は相対湿度がほぼ100%であり、特に木管楽器では、リードの湿り気が音質にかなりの影響を及ぼすことが知られている。

送気圧制御機構に用いられるリリースバルブは、圧力の検出にコイルばねを用いたものであり、ポテンシオメータによってばねの長さを検出し、位置制御を行うことにより

原稿受付 1996年1月24日

キーワード：Performance Robot, Wind Instruments, Artificial Mouth System, Pitch Control

*〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2

*Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo

バルブ押さえ圧を制御している。制御回路はアナログ PD 制御である。このバルブは、軽量化により高速に動作する。

3. サキソフォン自動演奏システム

テナーサキソフォン自動演奏システムでは、送気システムによって、吹鳴に適した圧力に減圧した空気を人工口顎部装置に送り込むことによりリードが振動し、吹鳴が行われる。さらに、楽譜からの音楽データに基づいて、人間の指に相当する運指機構が、0~23 個のキーを押すことにより管長を変え、音の高さを変化させて、楽曲の演奏をする。これらの装置の概要を以下に示す。

3.1 人工口顎部装置[1]

人間の口に相当する人工口顎部装置では、人工唇を用いたリード押さえ圧制御機構とタンギング機構により、リードの振動を制御している。図 3 に人工口顎部装置の構造を示す。

図 3 サキソフォン自動演奏ロボットの人工口顎部装置

図 4 サキソフォン自動演奏装置と運指機構

図 5 トランペット自動演奏装置の概略

1) 人工唇

音の発信源であるリードに唯一接触する器官である人間の唇は、楽器演奏時には演奏に適した形状と柔らかさにある。自動演奏システムで人間の演奏者と同様な音質を得るためにも、唇に代わる材料の選択は重要である。そこで様々な材料で検討した結果、人工唇にはシリコンオイルを充填したゴム風船にアメゴムチューブを貼り付けたものを用いた。このアメゴムチューブ部が下前歯にかぶせた唇の堅い部分に相当し、ゴム風船部がリードに軽く触れて自由に振動する唇の柔らかい部分に相当する。

2) リード押さえ圧制御機構

安定した吹鳴のためには、人工唇をリードに押さえつける力を微妙に制御する必要がある。そこで、DC サーボモータを駆動源とし、ばねとポテンシオメータからなる張力センサを用いた張力制御機構を製作した。糸が引かれると人工唇がリードに押さえ付けられる機構になっており、その糸の張力をコンピュータから与えられた指令値に制御することによりリードを押さえる力を制御することができる。

3) タンギング機構

タンギング動作とは、リードの振動を舌で止め、送気を遮断し、急激に開放することで立ち上がりの鋭い音を出すことであり、このために、パッドの付いたリンク機構をソレノイドアクチュエータによって駆動している。

3.2 運指機構

サキソフォンの演奏では、音の高さを変えるために管体の 23 個のキーを操作する必要がある。人間はこれらを 9 本の指を用いて操作している。しかし、人間同様に 9 本の指で演奏を可能にするためには、1 本の指に多くの自由度を与えなければならない。ここでは、簡単のため各キーに 1 つずつソレノイドアクチュエータ駆動の指を対応させている。運指機構の概略を図 4 に示す。

4. トランペット自動演奏システム

トランペットは唇が振動源となる代表的な金管楽器であり、人工唇の材料、構造、制御方法が吹鳴の可能性を左右する。

4.1 自動演奏装置[3]

自動演奏装置は送気システム、人工口腔部（上唇、下唇とそれらの緊張度制御用機構）、運指機構からなっている。運指機構は指の先端が約 15[mm]直線で動作する平行リンク機構とし、駆動にはソレノイドアクチュエータを用いている。このトランペット自動演奏装置の全体を図 5 に示す。

4.2 人工唇

トランペットの自動演奏システムにおいて最も重要な部分はサキソフォンと同様に、ピッチを制御するために用いる人工唇である。ここでは、主にこの人工唇について説明

する。

金管楽器は奏者自身の唇が振動体となり、原音を作り出す楽器である。トランペットの場合、3本のピストンバルブにより管長を変化させ音の高さを変えることができるが、そのみでは全音域を吹鳴することは不可能である。そのため、奏者は振動体である唇の緊張度を変化させることにより、同じ管長での倍音の吹鳴を可能としている。また、同様の方法を用いて各音ごとのピッチの調整も行っている。

そのため、人工唇においてもその機械的特性を変化させてピッチを制御し、倍音を発生させることができると考えられる。しかし、人工唇の緊張度を筋肉でできた人間の唇と同様に変化させることは非常に困難であるため以下のような方法を用いている。

(a)上唇 材料として厚さ2[mm]の板状のシリコンゲル材を用い、それに2本の絹糸を通し、それらの張力を操作することにより、上唇の機械的特性を変化させている。

(b)下唇 ゴム風船にシリコンオイルを充填したものを使用し、これを機械的に押さえることにより、ゴム風船の機械的特性を変化させている。

人工唇の緊張度の制御は、糸の張力を正確に制御するためにバネとポテンショメータを用いたテンション制御系により行っている。また、人工唇の直前に取り付けられたゲートバルブを開閉することにより送気流速を変化させ、ピッチをある程度制御することも可能である。

5. ソフトウェア[2]

基本的な自動演奏システムでは、送気圧制御、運指制御、タンギング動作の制御、木管楽器ではリード押さえ圧の制御、金管楽器では人工唇の緊張度の制御、が必要となる。これらのすべてを1つのコンピュータによるデジタル制御で実現することは計算速度の点から困難であるため、各サブシステムの制御ループはアナログ回路で組んでおき、コンピュータは各システムの目標値を適当なタイミン

グでD/A変換器から送出するという方法を用いている。

このとき信号の送出タイミングや演奏すべき音の長さの計時は、コンピュータ内蔵のプログラマブル・インターバルタイマによる割り込みを用いることで行っている。

タンギング動作では、各音の演奏すべき時刻の前にタンギングパッドで送気を止める必要がある。また、運指機構のダイナミクスによる遅れに対応するため、目標値信号を指定時間だけ早く送出することによりかなり速い曲の演奏を可能にしている。

6. その他の制御

6.1 音量制御

演奏に強弱をつけることは、曲の表現を豊かにするために欠かすことができない課題である。管楽器では音の強弱は主として送気圧によって決まるが、送気圧を変化させるとピッチも変化する。そこで、自動演奏システムで音量制御を可能にするためには、あらかじめ、数段階の音量変化を与える送気圧変化に対して、ピッチが変化しない吹鳴可能なリード押さえ圧または人工唇の緊張度との関係式を各音毎に求めておく。演奏時にはこの関係式を用いて吹鳴が停止せず、かつピッチがあまり変化しないように音量を変化させることができる。

6.2 自動チューニング[2]

吹鳴している各音のオクターブ、音名、正確なピッチからのずれなどの情報を市販の楽器用チューナーを用いてコンピュータに取り込み、正確なピッチ(±5セント程度)で吹鳴するための送気圧およびリード押さえ圧、または、人工唇の緊張度をオンラインで求めることができる。これを自動チューニングといっている。推定のための計算は、max-min合成重心計算形のファジィプロダクションルールによるファジィ推論によって行う。

6.3 外部音源との協調演奏[4]

合奏している人間は、ピッチやリズムを常に他の演奏者と比較、調節しながら強弱や曲全体の雰囲気、その他演奏

図6 自動演奏システムの構造概略

に必要な情報を交換しながら演奏している。しかし、人間とロボットの合奏を想定した場合では、人間がロボットにあわせて演奏することは容易であるが、逆の場合は難しい。ロボットが人間に合わせて演奏することを目指し、その初期段階として、1拍毎に刻むクリック音に合わせて演奏速度と各音符の演奏タイミングを決定し演奏することを試み、良好な結果を得た。

7. 自動演奏ロボットの能力について

現在の当研究室のサキソフォン自動演奏ロボットは、サキソフォンらしい音色が出ており、音域もほぼ全音域が出せるようになった段階である。能力を測る方法として人間の演奏者と比較してみると、人間に並ぶものとしては、

- 1) 一度正確なチューニングを行えば、 ± 10 セント以内のピッチのずれを保ちつつ演奏が可能である。
- 2) 楽譜（音符の長さ）に忠実な演奏ができる。
- 3) 毎秒 10 回以上のタンギングが可能。
- 4) 4 分音符 = 240 のテンポで、16 分音符の演奏が可能。
- 5) 初見（初めて楽譜を見ること）で演奏可能。

などがある。一方、これから開発すべき能力としては、

- 1) 音のエンベロープを自由に変えることができる。
- 2) 音色、音質を自由に変化させられる。
- 3) リズム感を持つ (Jazz の演奏時には Swing する等)。
- 4) 曲全体の雰囲気への把握、感情を込めた演奏ができる。
- 5) 人間との合奏ができる (人間にロボットが合わせる)。

トランペット自動演奏ロボットについては唇の状態を安定させることが難しく、いわゆる調子の良いときと悪いときの差が大きいため評価しにくい。トランペットの身上は華やかな高音と歯切れの良いタンギングであるが、現在のロボットは音域が約 1 オクターブ半であるため、もう 1 オクターブ欲しいところである。

8. おわりに

最後に図 6 に自動演奏システムの全体図を示す。サキソフォン、トランペットとも構造はほぼ同じである。図 7、図 8 にはサキソフォン自動演奏ロボットとトランペット自動演奏ロボットの概観を示す。

一口に管楽器と言っても、バスーンやチューバなどの低音用からソプラノサックスやホルネットなどの高音用までその種類は多い。それらのすべてを演奏するロボットができれば言うことはないが、人間で言えば頭脳の部分はなんとかできても、口に相当する部分がどうにもならない。人工筋肉、人工皮膚などの素材とその素材をいかに制御するかが決め手となりそうである。

図 7 サキソフォン自動演奏装置

図 8 トランペット自動演奏装置

参考文献

- [1] 下田浩史, 高島俊: “木管楽器の自動演奏のための基礎研究—第 4 報 テナーサキソフォンの自動演奏—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス '93 講演会講演論文集, pp. 384-389, 1993.
- [2] 坂野尚史, 人見孝一, 高島俊: “木管楽器の自動演奏のための基礎研究—第 7 報 自動チューニングについて—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス '94 講演会講演論文集, pp. 1097-1100, 1994.
- [3] 高島俊: “金管楽器の自動演奏のための基礎研究—第 3 報 トランペットの自動演奏—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス '94 講演会講演論文集, pp. 1093-1096, 1994.
- [4] 射場大輔他: “金管楽器の自動演奏のための基礎研究—第 6 報 送気圧の制御と音量の制御—”, 日本機械学会 ROBOMECH '95 講演論文集, vol. A, pp. 37-40, 1995.
- [5] 高島俊, 堀岡絵美: “金管楽器の自動演奏のための基礎研究”, 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no. 2, pp. 653-654, 1994.
- [6] 高島俊: “管楽器を演奏するロボットについて”, 日本ロボット学会第 13 回学術講演会予稿集, no. 3, pp. 1199-1200, 1995.

高島 俊 (Suguru Takashima)

1947 年 2 月 20 日生。1972 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大産業機械工学科助手。熊本大学教育学部講師, 助教授を経て, 1991 年法政大学工学部機械工学科教授。自律移動ロボット, 体操ロボット, 自動演奏ロボットの研究に従事。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)