解説

人間形フルート演奏ロボットの開発

Development of Anthropomorphic Flutist Robot

高 西 淳 夫* *早稲田大学理工学部

Atsuo Takanishi* *Waseda University

1. はじめに

筆者らのフルート演奏ロボットの開発は、NEDO（新エネルギー産業技術総合開発機構）、（株）ATR、（株）ナムコおよび（株）安川電機（五十音順）の援助を受けて、早稲田大学理工学総合研究センターの産官学共同プロジェクト研究ヒューマノイドにおいて行われている研究テーマのひとつである。本プロジェクトでは、人間の住環境において人間との協調的行動を行う人間形ロボットヒューマノイドについて、形態と機能の両面からのアプローチによる基礎的研究を行っている。

筆者らは将来、ヒューマノイドと人間との音楽空間における感性・情緒レベルでのコミュニケーションを実現したいと考え、人間形のフルート演奏ロボットの開発を行っている。そのための第一段階として、現在は楽器演奏時の人体各器官の働きを機械モデルにより再現し、人間と同様のフルート演奏を実現することで、人間のフルート演奏における工学モデルを構築すべく、フルート演奏ロボットのハードウェア機構と制御方式の開発を進めている。

本解説では、これまで筆者らが行ってきたフルート演奏ロボットの開発の流れ、人間のフルート演奏、そして現在のフルート演奏ロボットの原型となっている WF-2 のハードウェア機構と演奏制御法を中心として以下に述べる。

2. フルート演奏ロボット WF シリーズ 開発の流れ

筆者らは、まず 1990 年に 1 号機の WF-1 (Waseda Flutist-No. 1) を製作して以来、今日まで WF シリーズとしてフルート演奏ロボットの開発を続けている。WF-1 は人間の肺に相当する速度制御が可能な呼吸・吸気系を持っており、これに簡単な口唇部を取り付け、時間情報の管理および伴奏音源の制御を行う MIDI (Musical Instrument

Digital Interface) プロセッシング・ユニットをロボットの制御用パソコンに付加した。肺からの呼気流速を制御することにより音程の補正を行い、キーは人間が伴奏に合わせて押すことで、WF-1 は 1 オクターブの音域の楽曲の演奏および平均律音程の吹鳴を実現した[1]。

91 年には WF-1 に口唇部とフルート歌口の相対位置(姿勢)決めができる 3 自由度位置(姿勢)制御機構および 1 本の指に一つのキーを対応させたソレノイド駆動方式の簡単な指を追加した WF-2 を開発、同位置制御機構を用いた音程補正の結果、1 オクターブ半の楽曲の演奏および 2 オクターブの平均律音程の吹鳴を実現した[2]。93 年には、口唇部のスリット幅を可変・制御する 1 自由度機構を追加し、これを用いて高音域では空気のビーム幅を絞ることで WF-2 で問題であったノイズを減少させ吹鳴可能範囲を広くし、さらに喉部にスピーカのボイスコイルをアクチュエータとした振動子を取り付け、喉部断面積を動的に可変することで楽音に変調をかけるヴィブラート奏法が可能な WF-3 を開発した。4 号機 WF-4 では、舌を付加することでタンギングが可能となり、吹鳴音にめりはりを付けることができるようになった。

さらに現在の 5 号機 WF-5 では肺部を改良し、息継ぎに要する時間を短くすることでテンポの速い曲の演奏が可能になり、また口唇部の開口スリット厚を可変とする機構を付加し、空気ビーム偏心を可変することで、吹鳴音にある程度の抑揚をつける制御を実現した。最初のモデルに比べるとかなり表現力が高くなった。

3. 人間のフルート演奏

フルート演奏ロボットの開発において、お手本となる人間のフルート演奏はどのようになっているのであろうか。本章では、人間のフルート演奏における音発生メカニズムと人体各器官の働きについて簡単に整理しておく。

3.1 フルート音発生仕組み

フルートは、唇によって板状に整形された空気ビームを歌口のエッジに当て、中空円筒形をした楽器内に囲まれた気柱を励振することにより音がでる。その演奏は、指孔の

原稿受付 1995 年 12 月 7 日

キーワード: Anthropomorphic Robot, Music, Flute, Humanoid

*〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

*Shinjuku-ku, Tokyo

図1 空気ビーム・パラメータ

表1 フルード演奏時の制御項目と人体各器官との対応

Human Organs	neck lips jaw	tongue	throat	lung	fingers arms
interval	○			○	○
timbre	○	△		○	○
pressure	○			○	○
vibrato			○	○	
attack and release	△	○		○	△
duration				○	
respiration	○			○	
holding instrument	○				○

○: Influential △: Influential a little

開閉などによる気柱長さの制御, および数々の空気ビームの条件の制御に要約できる. 空気ビームの状態は安藤らによると図1のように表せる. 空気ビーム自体の状態を表すパラメータとしては, 空気ビーム流速, 空気ビーム厚, 空気ビーム幅があり, 空気ビームと楽器の相対位置を表すパラメータとしては空気ビーム長, 空気ビーム偏心, 空気ビーム角度がある. その他, 下唇により楽器の歌口を塞ぐ度合いを表すパラメータとして GAP がある[3][4].

3.2 フルード演奏時の人体各器官の働き

フルード演奏において人体各器官は複数の機能を担っており, これらの巧みな協調動作によりフルード演奏は実現されている. 表1にフルードの演奏時の制御内容とそれに関わる人体各器官の関係を示す[1].

筆者らのロボットのハードウェアは, これら人体各器官の働きをできるだけ忠実に再現することを目標としている. このうち肺部に関しては, 横隔膜駆動時の速度制御を, その他の器官については位置制御を行っている. ただし, 人間がフルードを支える場合, 細長い円筒管を下顎, 左手人差し指の根元付近, 右手親指の3点のモーメントの釣合いをとる支持法(3点支持)を用いており, 力制御も必要となる. その他ヴィブラートに関しては喉頭の果たす役割が大きいことが Gältner らの研究により報告されている[5]. また音の立ち上がり, 立ち下がりに関しては, 舌に

よるタンギングのテクニックが重要である. また表1より, これらの器官のうちフルード演奏に最も基礎となる器官が肺であることがわかる.

4. フルード演奏ロボット WF-2 と演奏制御

4.1 空気ビーム流速と音程

前章で述べたように, フルード演奏に関係した人体器官のうち最も基礎となる器官が肺である. そこで筆者らは, まず人間の肺に相当する呼気・吸気系を開発しこれに簡単な口唇部を取り付けた空気ビーム流速制御のみによる基本的な演奏ロボット WF-1を開発した. すなわち, ある長さの気柱の振動を促す空気ビーム流速にはある程度の幅があり, その範囲内で流速を調整することにより平均律音程の吹鳴が可能であると考えた.

肺の設計においてまず基本に据えたことは, 人間と同程度の容量を持つことである. このことは人間の肺活量の限界に基づくフレー징の決定やダイナミック・レンジに対する影響など, 人間的で自然な演奏を実現するために重要な要素となる. そこで, 実際の人間のデータを参考に最大肺活量 5100[ml]として設計した[6].

また, ロボットが演奏する際に実現するタイミングは, 人間が感じ取れるほどに遅れを生じないことが必要となる. 演奏家の実現するタイミングに関する研究報告は多数あり, その多くが時間の比率の判断, 算出, 模倣などに対して系統的で無視できない偏差を持つことでは一致している[7]. 中島らによる報告では, 演奏家の実現する時価は記譜された時価にある定数, 約 80[ms]を加えたものであると述べている[8]. これらを総合判断し, ロボットの持つ遅れが 80[ms]以内であれば人間はそれを知覚できないと考えて設計を行い, 横隔膜の速度応答時間が 80[ms]以内である肺部を製作した. ここでロボットの口唇部スリットの大きさは, 吹鳴予備実験において最も吹鳴可能範囲が広がった幅 8[mm]で厚さ 2[mm]とした[1].

同ロボットを用いて平均律音程吹鳴実験を行った結果, 吹鳴可能音域は C#4 から F#5 であり, 空気ビーム流速を制御することによって音程を調整することができるとわかった. また, 音域が上がるほど音程が高めにずれていくこともわかったが, この現象は管楽器自体の性質に原因がある. すなわち, 気柱長さの開口端補正や指孔部分の断面積の変化などにより倍音列間の共振周波数比が正しい整数比に保たれていないためである[9]. 楽器にこの性質がある限り, 上記のような空気ビーム流速制御のみによる音程の補正には限界が現れてしまう. また空気ビーム流速の増減に伴う音圧, 音色の変化も伴ってしまい, 細かい音楽表現を求める場合, 他の空気ビームパラメータとの兼ね合いが重要になってくる[3].

図2 WF-2の演奏姿勢制御機構

図3 人間形フルート演奏ロボット WF-2 のシステム構成図

4.2 演奏姿勢と音程

上記の問題をふまえ、より広い音域の吹鳴を実現する制御法として、筆者らはフルートの歌穴を下唇により塞ぐ度合いを変化させることにより気柱長さを微調整できることに着目し、演奏姿勢制御による音程補正法を考案した。具体的ハードウェアとしては図2に示す x, z, θ の3自由度を持つ演奏姿勢制御機構を開発した。これにより、空気ビーム長、空気ビーム角度、空気ビーム偏心、そしてGAPといった空気ビームの位置に関する条件を制御できるようになる。図3は前節のWF-1に図2の演奏姿勢制御装置を付加したフルート演奏ロボットWF-2のシステム構成図である。

WF-2を用いて平均律音程吹鳴実験を行った。このとき各音程に対する演奏姿勢は実際の人間により実現されている姿勢データを参考に決定した。空気ビーム長に関してはFletcherによる写真解析結果[10]を、空気ビーム偏心に関しては安藤による機械吹鳴装置と人間による音との比較

(a) Deviation from temperament
(Air beam velocity + attitude control) (b) Air beam velocity of each pitch
(Air beam velocity + attitude control)

図4 空気ビーム速度と演奏姿勢制御を行った場合の音程と空気ビーム速度

による推定値[11]を用い、実際にその近辺に位置を合わせ音を吹かせ人間の耳で聞いて音圧、音程、音色について十分に良い音のなる位置を決定した。この手法による平均律音程からのずれの度合いを図4(a)に、空気ビーム流速値を図4(b)に示す。これらの図から、平均律音程吹鳴可能音域はC4からD6であることがわかり、それ以降では前節で述べたのと同様に高めにずれていくことがわかる。ところで、D6より上の高音域においては音程がずれているにもかかわらず演奏姿勢補正を行わなかった。その理由は、この領域においてはWF-2のような固定の口唇部では速い流速を持つ呼気を発生できず、音質が楽音としては許容しがたいものとなってしまったからである。そのため同ハードウェアによる高音域における音程制御は断念したが、WF-3以降のモデルでは口唇幅を可変できる機構により空気ビーム流速を高め、その問題に対処している。

以上の結果により、空気ビーム流速制御に加え、演奏姿勢制御を用いることで、より広い音域において平均律音程

図5 人間形フルート演奏ロボット WF-2 の全景 (1992 年)

を吹鳴できることがわかった。

4.3 演奏実験

WF-2 による演奏実験を行った。WF-2 に MIDI 伴奏システムおよび全体の統括を行うパソコンを加えたものが全体のシステムである。開発したロボットハードウェアの写真を図5に示す。演奏はパソコンと MIDI プロセッシング・ユニット (以後 MPU と呼ぶ) との相互通信により行う。

このシステムによりモーツァルト作曲「フルート・カルテット イ長調 K. 298」を演奏した。演奏における問題点としては、口唇部形状を固定としているため高音域吹鳴時に必要な速い空気ビーム流速を得るために必要以上に横隔膜を動かすこととなり、息継ぎが多くなってしまったことが挙げられる。また同様に、高速な空気ビーム流速使用時に口唇のスリット部においてエッジトーンを発生し、大きなノイズとなってしまうのも問題点の一つである。このことより高音域の演奏に際しては口唇部形状の制御が不可欠であることが明らかになった。このことは数々のフルート教則本の内容とも一致する[12]。前節でも述べたが、WF-3 以降のモデルでは口唇幅を可変できる機構により、この問題点は大幅に改善されている。

5. お わ り に

本解説では、フルート演奏の基本的なメカニズムおよび、それに関わる人体各器官との対応について述べた。また人間形フルート演奏ロボット WF-2 のハードウェア機

構、ならびに空気ビーム流速および演奏姿勢制御により 2 オクターブ強において平均律音程の吹鳴を実現し、「フルート・カルテット・イ長調 K. 298 (モーツァルト作曲)」の演奏に成功したことについて説明した。

これまででは、主に正確な平均律音程の吹鳴とその範囲拡大に力点をおいて開発・研究を行ってきたが、本来、音楽演奏は人間の感性に訴えるものである。今後は、そのために重要と思われる音色や音圧に関する吹鳴制御の問題を感性や情緒と関連付けながらロボットの開発を進め、最終的には感性自体を身につけたフルート演奏ロボットにすることで、冒頭で述べたように、音楽空間における人間との情緒レベルのコミュニケーションの問題に迫ってみたいと思っている。

参 考 文 献

- [1] 高西淳夫, 他: “人間形フルート演奏ロボットの開発〜第1報: 展望および呼吸吸気系の開発〜”, 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集(2), pp. 715-718, 1991.
- [2] 高西淳夫, 他: “人間形フルート演奏ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 3, pp. 105-109, 1994.
- [3] 安藤由典: “フルートの駆動条件と発生音圧レベルおよび基本周波数との関係(フルートの実験的研究 I)”, 日本音響学会誌, vol. 26-6, pp. 253-259, 1970.
- [4] 安藤由典: 楽器の音響学, p. 95, 音楽之友社, 1971.
- [5] Jochen Gältner 著, 石原利矩訳, 吉田雅夫監修: フルート奏者のヴィブラート理論と方法, pp. 154-155, シンフォニア, 1983.
- [6] Arthur C Guyton 著, 相川貞男, 伊藤寛志監訳: エッセンス人体の生理学, pp. 251-252, 廣川書店, 1982.
- [7] Dian Deutsch 著, 寺西立年, 大串健吾, 宮崎謙一監訳: 音楽の心理学(上・下), pp. 284-286, 西村書店, 1987.
- [8] 中島祥好, 他: “楽譜に記された時価と演奏家の実現する長さとの系統的な違いについて”, 日本音響学会誌, vol. 43-7, p. 478, 1987.
- [9] 安藤由典: 楽器の音響学, p. 77, 音楽之友社, 1971.
- [10] N. H. Fletcher: “Acoustical correlates of flute performance technique,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 57-1, pp. 233-237, 1975.
- [11] 安藤由典: 楽器の音響学, p. 109, 音楽之友社, 1971.
- [12] Henry Altes 著, 植村泰一訳: アルテス・フルート奏法, pp. 40-41, シンフォニア, 1978.

高西淳夫 (Atsuo Takanishi)

1956 年 4 月 12 日生。1985 年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年同大学理工学部助手。1988 年同専任講師を経て、1990 年より同助教授。2 足歩行ロボット、咀嚼ロボットなどのヒューマノイド関連の研究に従事。工学博士。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)