

楽器中心設計に基づく人間形サクソフォン演奏ロボットの開発研究

Development of an anthropomorphic saxophonist robot based on instrument-centered design

内山 純^{1,2*} 橋本 智行¹ 近藤 嘉男^{1,2} 林 家宇² 高西 淳夫²

Jun Uchiyama^{1,2*} Toshiyuki Hashimoto¹ Yoshio Kondo^{1,2} Jia-Yeu LIN² Atsuo Takanishi²

¹東京都立産業技術大学院大学 Advanced Institute of Industrial Technology

²早稲田大学 Waseda University

*Corresponding author: jun-uchiyoama@aait.ac.jp

Abstract As robotics continues to evolve, a growing interest is in developing humanoid robots designed to integrate seamlessly into human activities. Central to this endeavor is crafting an anthropomorphic saxophonist robot, embodying both musical prowess and emotional resonance. While traditional designs focused on intricate mimicry of human organs, they presented inherent challenges regarding their structural complexity. A novel approach derived from design thinking, termed "Instrument-centered Design," was proposed to address these challenges. By considering the instrument at the core of the robot's design, this methodology eliminated preconceived notions and achieved significant miniaturization. Furthermore, by integrating soft materials into the robot's fingertips, sound quality has been enhanced, especially in the lower registers.

Keywords anthropomorphic saxophonist robot; instrument-centered design; soft material

1 はじめに

これまでロボット産業は主に製造分野の産業用ロボットとして発展してきたが、近年は非製造分野、特にサービス分野での進展が著しい[1]。なかでも人々の日常生活の支援を目的とするロボットは「パートナーロボット」[2]と呼ばれ、家事支援や介護支援、店舗での接客サービスにも普及している。さらに、最近では革新的な人間形パートナーロボットへの挑戦も始まっている。

一方、人間形ロボット[3]の研究は人間（生物）を究極の模範として、実証的なロボットの開発を通して人間の心身メカニズムの解明を目指しロボット設計方法論の確立を探求している。模範とする人間を演奏家としたロボットの研究では、「巧みで力強い楽器演奏パフォーマンス」だけでなく、感情を伴う「豊かなユーザーインタラクション」も必要となる。

早稲田大学、高西淳夫研究室では1990年から人間形楽器演奏ロボットの研究及び開発を進めている[4]。ロボットの規範は人間であり、ロボットの開発を通じて人の心と体のメカニズムを追求することが研究目的である。楽器演奏者は高度な演奏技術を持ち、演奏を通じて人々に共感を呼び起こす。よって、楽器演奏ロボットの開発研究はロボティクス研究の重要な分野の一つと言える。人間形フルート奏者ロボットの研究を開始し、2008年以降は、人型サクソフォン奏者ロボットの開発に焦点を当ててきた。多岐にわたる表現で多様なジャンルをこなすアルト・サクソフォンを使用楽器とすることは、挑戦的であると同時に最適な研究課題である。

2 概要

本研究は、観客を引きつけ音楽家と感情的なコミュニケーションができる人間形サクソフォン演奏ロボットの開発を目指している。直近の『WAS-5』(Waseda Anthropomorphic Saxophonist robot No.5)は第5世代目となり、人間の臓器を模倣し、その性能を向上させてきた。しかし、研究の進展に伴いロボットは複雑さを増し、大型化を余儀なくされ、人間とのインタラクションを難しくさせている。

そこで、著者らはこれらの課題を解決するために、構造の簡

素化と小型化を目指した新ハードウェアプラットフォーム開発に取り組んでいる。音楽を通して、人とのインタラクション研究に活用するという本来の開発目的に立ち返るためには、ブレイクスルーが必要と考え、開発にあたって課題解決の突破口を探るための試みとして、プロダクトデザインプロセスを取り入れた[5]。演奏の観察と体験から、音を奏でる楽器を中心に捉え、楽器と人間（ロボット）との接点を改めて見直し、サクソフォンを中心に据えて再構築を行った。

結果は同じであるはずだが、演奏するロボット（人間）側の視点ではなく楽器側の視点で（時には、さらに多面的な視点で）考察することにより、課題発見を促す狙いがあり、課題解決の糸口となることを狙っている。

このアプローチを「楽器中心設計」と呼び、『WAS-X』開発コンセプトとした。非連続的なアプローチにより開発を進めたことから『WAS-6』ではなく『WAS-X』(Waseda Anthropomorphic Saxophonist robot X)と名付けられた。

2019年は、楽器の保持の仕方に着目して、人間と同様なネックストラップを用いた保持を可能とするフレームを作成し[6]、続いて2022年には、安定した2オクターブの吹鳴を可能とした[7]。さらに、2023年は、軟素材のチップを指先に装着することによって、吹鳴の安定性を高め、低音域の音質を改善している[8]。

以降、3章では、楽器中心デザインについて述べ、現状の『WAS-5』の課題を確認し、プロダクトデザインプロセス[5]を活用した新ハードウェアプラットフォーム『WAS-X』の開発コンセプトを提示する。第4章では『WAS-X』開発プロセスを示す。第5章では評価結果を分析し、議論を行う。まとめとして、第6章では結論と今後の課題を示す。

3 課題抽出と解決手法

プロダクトデザインプロセスを取り入れたロボット開発

前章で述べたように、第5世代となる『WAS-5』は31自由度を有し、ハードウェアプラットフォームとして研究を継続している。しかし、制御性向上のために構造が複雑化し大型化を余儀なくされ、ユーザーインタラクション研究への道を閉ざしている。加えて、吹鳴のための調整は煩雑となり、楽器の冗長

な拘束は音質の低下を招いている。

開発にあたって、課題解決の突破口を探るための試みとして、「デザイン思考」[9]のマインドセットを基礎においたプロダクトデザインプロセスを取り入れた。

「デザイン思考」は、スタンフォード大学の Hasso Plattner Institute of Design（通称 d. School）が提唱している「5つのデザイン思考プロセス」と、イギリスの公的機関であるデザイン・カウンシルの「ダブルダイヤモンド」が良く知られている。

d. School「5つのデザイン思考プロセス」[10]は以下の5つのプロセスを上げている。

- ・ Empathize
- ・ Define
- ・ Ideate
- ・ Prototype
- ・ Test

一方、デザイン・カウンシルの「ダブルダイヤモンド」は、以下の4つのDで始まるプロセスを、2回繰り返す課題解決方法である。

- ・ Discover
- ・ Define
- ・ Develop
- ・ Deliver

d. School の「5つのデザイン思考プロセス」も、デザイン・カウンシルの「ダブルダイヤモンド」も、本質的には同じプロセスを踏むフレームワークである。

両者とも、一般的な手順通りのプロセスを示しているが、プロセスの順番は厳密には定義されていない。d. School の創設者である IDEO のティムブラウンは、プロセスではなく、以下のマインドセットを身に着けることが重要としている。

- ・ It's Human-Centered.
- ・ It's Collaborative.
- ・ It's Optimistic.
- ・ It's Experimental

「デザイン思考」は、各分野で活用されているデザインプロセスや思考法を、ビジネス向けにアレンジしたもので、こちらの方が話題となっているが、d. School は、MIT の創造工学研究室を立ちあげたプロダクトデザイナーであり、エンジニアでもあるジョン・アーノルドにそのルーツがあるという。アーノルドはスタンフォードに招かれたが、急死により、その意思が同僚のロバート・マッキムと弟子のジェームス・アダムスに受け継がれた。d. School を立ち上げた IDEO のデイヴィッド・ケリーは、マッキムの弟子で、アダムスの授業を聞いていたとのことである[11]。

機械工学科を中心とした 'Creative Design' の教育が引き継がれ、今の「デザイン思考」につながっていることは興味深い[12]。

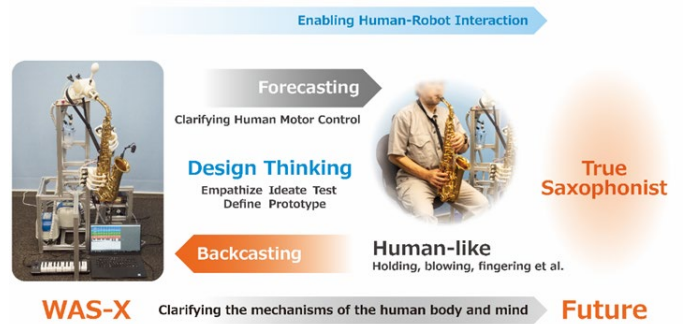


図1 “WAS-X” Design Concept [8]

楽器中心デザイン

デザイン思考では、ユーザ体験を観察・体験することでユーザに共感し、顕在化、潜在化した問題を解決する。この場合、機器やシステムは「ユーザ中心」で設計される。「ユーザ中心設計」は、最も価値のある人間がユーザであることから、基本的には「人間中心設計」と同じ考え方である。

一方、サクソフォン奏者は、自身の楽器をまるで大切なパートナーのように敬意を持って扱う。演奏者にとっては「共感」する対象は人間ではなく、楽器の「アルト・サクソフォン」であるとみることができる。少し違和感を覚えるかもしれないが、先入観を取り払うことが目的であり、本研究では「アルト・サクソフォン」を「ユーザ」に見立て、「楽器中心」のアプローチを行った（図2）。

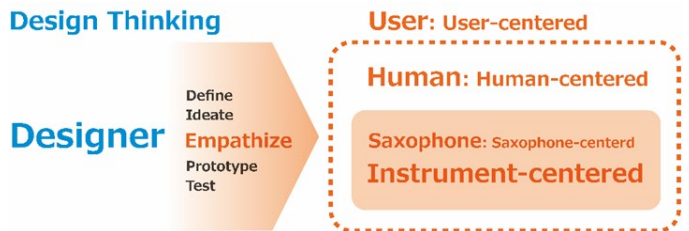


図2 Empathetic Targets in Design Thinking

著者らは、サクソフォンの演奏を観察し、体験しながら『WAS-X』の設計を進めた。サクソフォン演奏家は楽器を操作して音を出す。『WAS-X』が演奏家の代わりに操作する。サクソフォン側の視点で考えると、どのような操作が、どのようにされると発音するのか、ということ考察することは、設計を進める上で多くの示唆を与える（図3）。



図3 Instrument-centered design conceptual diagram

「楽器中心」を基本とした開発プロセスは、共感的な気づきを得ながら、複数案のプロトタイピングを繰り返す非連続的なプロセスで進められるため、定量的な方法論の評価は容易ではない。しかし、ロボットにとって安定した吹鳴自体が難しい状況であり、「サクソフォンが音を奏でる」ことを初期の目標としていることから、評価はかなり明快なものとなる。発音が安定して持続できるか否かを確認し、試行錯誤を迅速に繰り返すことができる。

『WAS-X』の開発プロセス全体は、3D プリンタ (Stratasys Objet260 Connex1)、レーザー加工機 (Trotec Speedy 300) などのラピッドプロトタイピングツールを活用した、3DCAD データの作成には、PTC Creo parametric を使用し、アルト・サクソフォンは YAMAHA YAS-475、マウスピースは AS4C、リードは Legere Alto sax studio cut 2 とした。

『WAS-5』の課題抽出

現在第5世代となる『WAS-5』は、人間の臓器を忠実に再現し、その機能を模倣し、人間の運動制御を工学的に研究するために開発され、管楽器における音の発生機構の解明に貢献してきた[13-15]。しかし、フォアキャストイングに重点を置いた設計のアプローチは、各部を個別に改良することに着目していたため、ロボットの全体の最適化は不十分であった。汎用の流量計や空気回路制御弁は、応答性能に悪影響を及ぼし、人間の口腔圧は 5 kPa 程度にもかかわらず[16]、動的に求められる口腔圧の調整は難しい。また、口唇機構は、より繊細な調整が要求されている。運指と指の初期設定も煩雑で、すべての音階の運指が実現できていない。

『WAS-5』は、実験的にユーザとの感情コミュニケーションに活用されているが[17, 18]、ロボットを正しく機能させ、制御するためには、機械的に冗長な拘束が避けられない (図 4 (b), (c))。大きさも人間の平均より 30%ほど大きく (図 4)、ユーザに威圧感や複雑な印象を与えている。加えて、楽器との位置合わせも熟練も必要である。

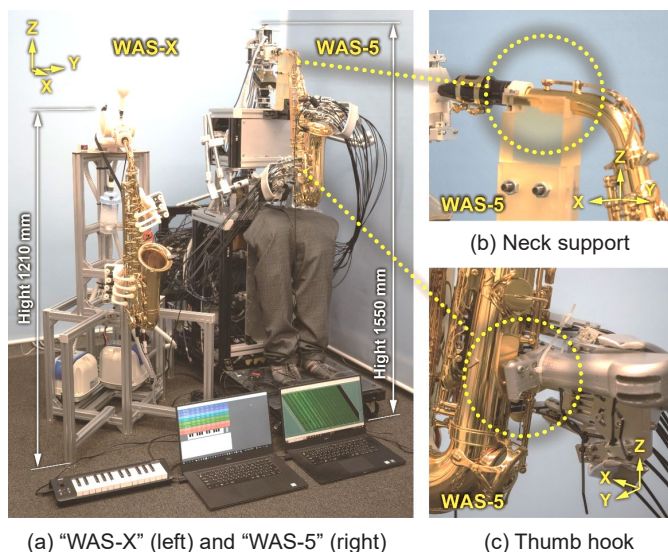


図 4 WAS (Waseda Anthropomorphic Saxophonist)

4 『WAS-X』開発

楽器保持メカニズム

『WAS-X』は、将来的にユーザとの対話に活用されることが想定されるため、ユーザが威圧感を感じないようなサイズにすることを目指している。「楽器中心」の視点でサクソフォン奏者の楽器の構え方を観察し、サクソフォンの演奏教本[19]を参考に開発を進めた。サクソフォンをネックストラップで首から下げ、マウスピースを上顎中切歯に当て、右手親指をサムフック、左手親指をサムレストに乗せ、他の指をキーに軽く添える。このことにより、煩雑な拘束から解放され、豊かな音色を奏でることが示唆される。

表 1 は、人間と『WAS』の楽器保持の違いをまとめたものである。『WAS-5』の構造は、サクソフォンは筐体 (地面) に固定され、ネックストラップやサムレストは活用されていない。これに対して、人間の演奏者は、ネックストラップでサクソフォンを首に掛け、楽器の重さを全身で支えることで腕の負担を軽減している。楽器の重心はネックストラップのリングよりやや低い位置にあり、プレイヤーの体から約 50 mm 離れている。ネックストラップは、プレイヤーが左右の親指で押すことで簡単にサクソフォンを回転させることができるため、楽器の調整を素早く行うことができるだけでなく、オクターブキーを押す際にも、楽器の重さが操作の助けになる。

表 1 Comparison of saxophone holding method

| | Human | Robot | |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| | | WAS-5 | WAS-X |
| Reference point and flexibility | Flexible attached to the human body | Fixed to robot chassis | Flexible attached to sax reference |
| Neck strap | Neck strap | No use | Neck strap |
| Thumb hook | Right thumb | Robot chassis | Instrument chassis |
| Thumb rest | Left thumb | No use | Robot arm chassis |
| Mouthpiece | Upper anterior teeth and lips | Adjustable lips, no teeth | Upper anterior teeth and lips |
| Fingers | 3 phalanges fingers | 3 phalanges fingers | 1 phalanges finger |

開発に際して、人間の楽器保持を模倣するためにサクソフォンを持った人間の着座姿勢を 3D スキャンし、そのデータを『WAS-X』のリファレンスとして活用した。図 5 は、スキャンした状況を筆者が再現したものである。初期段階として、3D スキャンのデータを基にアルミ製の筐体を製作し、ネックストラップでサクソフォンを吊るし、楽器保持の検証を行った。正しい保持姿勢を確定した後、指を正しい位置に装着するためのアルミサッシのヒンジをサムフック付近に取り付けている。



(a) Oblique view (b) Front view

図 5 “WAS-X” sax holding compared to human seated posture

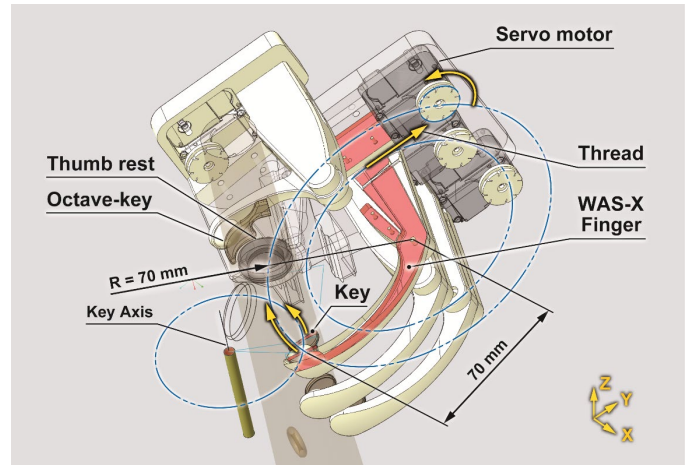


図 7 Section of the finger and the key mechanism

運指システム

演奏教本によると、演奏者は、サクソフォンを構える際に、サムフックを右手の基準とし、サムレストを左手の基準としている。構えの状態ではすべての指を軽くキーにのせる。『WAS-X』においては、各親指を基準として、基本の構えの状態では指を配置することにより、位置調整が不要となると考えた(図6)。

キーの稼動範囲も 5 mm から 10 mm と非常に狭く、基本キーの多くは、指先の丸みが軌道から外れないように窪みが施され、バネ機構によりキーが自動的に復帰する。これらにより、人間の MP 関節を模擬した 1 自由度のシンプルな機構で基本的な運指が可能となる。小型のサーボモータを使用し、短いワイヤー駆動とすることで、初期設定不要かつキーの軌道を柔軟に追従可能な指の実現を目指した(図7)。

指のフレームには、PP ライク樹脂 RGD 450 (Stratasys) を採用している。



(a) Finger holding position (b) Lips and oral cavity position

図 6 Human holding posture

口唇・口腔システム

サクソフォンは、とても表現力が豊かな楽器で、舌、頬、口唇、口腔、喉、横隔膜などの関連器官を連携させて空気の流れをコントロールして吹鳴を実現する。正確な空気のコントロールは、サクソフォン演奏の最も重要な技術であり、演奏教本では、アンブシュアの重要性を指摘している。演奏者は複数の器官を複雑に連携させながら吹き、口輪筋の助けを借りて口の中の気密性を保ち、同時にマウスピースを上前歯にしっかり当てながらリードを中心に下唇を微妙に調整する。サクソフォンのビブラートは、主にこのようなやり方で行われる。

『WAS-5』の場合、マウスピースとリードを柔らかいシリコーンゴム素材で挟み、その開口部を金属製のアクチュエーターで制御している。しかし、この方式では、異なるマウスピースのデザインに合わせた開口部のキャリブレーションやダイナミックな調整が非常に難しく、しかも空気漏れが発生しやすい。演奏教本や人間の吹き方の観察・経験では、上顎の前歯を位置決め基準として活用している。これを手掛かりに試行錯誤を重ねた(図8)。

実証実験

『WAS-X』の構成試作機を検証するために、2つの実験を行った。最初に、ロボットがサクソフォンを演奏できるかどうか、どの程度まで演奏できるかを確認した。

同時に、人間が演奏した場合、『WAS-5』が演奏した場合、『WAS-X』が演奏した場合のサクソフォンの吹鳴を倍音成分の周波数成分を比較した。基準となる音は、すべてのキーが解放された状態に相当する E4 音を選択した。

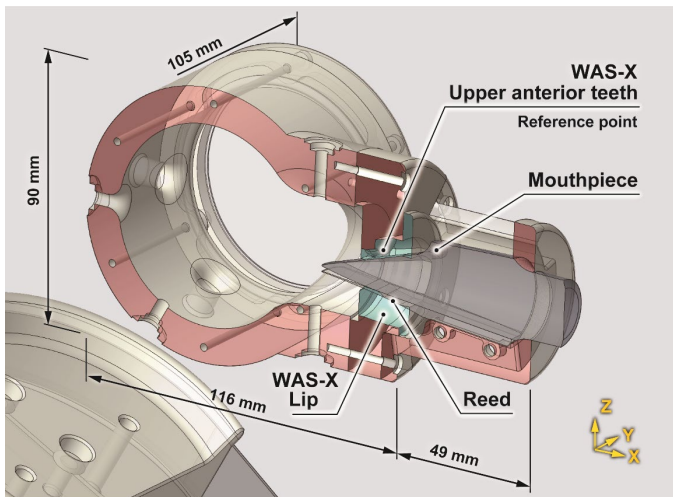


図 8 Section of the lip and the oral cavity mechanism

5 評価・分析と考察

今回開発した、人間がサクソフォンを持つ姿を模擬したロボット『WAS-X』は、構造を簡略化し、制御を大幅に小型化・簡略化したことにより、MIDI 入力にて E \flat 3 から E \flat 5 まで 2 オクターブ演奏できることを確認した。サクソフォンの持ち方が音質にどのように影響するかを検証するために、FFT 解析による視覚化を行い倍音成分の相対レベルを比較した。

保持メカニズム

人間が座った姿勢で楽器を持つ様子を観察し、ネックストラップで楽器を吊るす筐体を開発した (図 5)。しかし、親指フック付近を軸とした 1 自由度のヒンジ構造であるため、人間の保持姿勢を模擬するには十分ではない。今後は、2 自由度のボールジョイントや、より柔軟な構造を検討し、人間の保持機構をよりよく模擬することを目指す。さらに、制御装置やセンサー、ポンプなどの肺機能の実装を検討し、プロのサクソフォン奏者に近い動作を開発してインタラクションを実現する必要がある。

運指システム

キーは、左手親指で操作するオクターブキー (図 9 (a)) と右手小指で操作する C キー (図 9 (b)) を除いて共通 (図 7) であり、キーは左手親指と右手小指で操作する。サーボモータは Futaba RS303MR コマンド式サーボを使用し、60mm 長のアラミド繊維糸を半径 5mm のプーリに通してキーに張力をかけている。機構から想定されるモータの動作角度は、指の剛性を考慮して 0° ~50° 程度となるようにしている。

柔軟性の高い素材 PP ライク樹脂 RGD 450 (Stratasys) を採用することにより軌道に柔軟に対応できた。右手はサムフック、左手はサムレストを基軸として、基本的な 7 キーとオクターブキーの 8 キーの運指を実現した。アクチュエーターをハンドに収納することで大幅な小型化を実現し、位置調整不要の運指を可能にした。

モータの作動角が 300° であるため、指の変形や糸を装着するなどの問題があっても、巻き上げによる調整が可能であることが確認できた。同時に開発したテストプログラムでは、MIDI 対応のキーボード入力による演奏を実現した。

しかし、繰り返しの使用による指部形状の変形も見られる。モータの巻き上げ量で対応可能だが、特性を維持するためには、糸の太さや材質、コンプライアンス特性などをさらに考慮する必要がある。

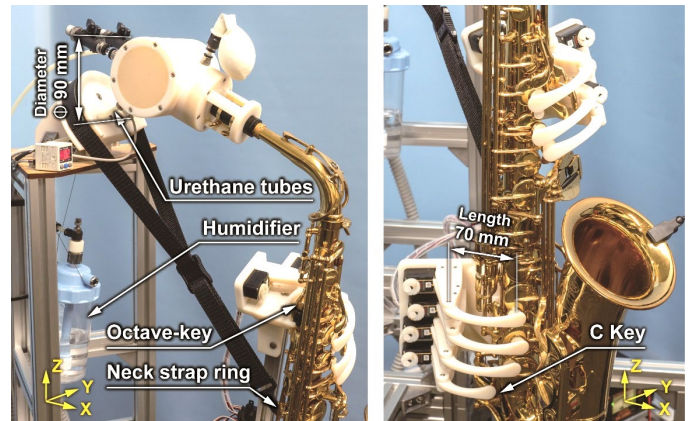


図 9 Waseda Anthropomorphic Saxophonist "WAS-X"

複合軟質材料を用いた指部

サクソフォンの特徴的な倍音が聴衆を魅了する [20]。そのため、サクソフォン奏者たちは不必要に楽器を拘束しないように細心の注意を払う [19]。『WAS-X』の音質は、ネックストラップで保持されているにもかかわらず、これまでのロボットとほぼ同じであった。そのため、吹鳴音質の大幅な向上が求められている。そこで本研究では、楽器とサクソフォン奏者の接点である指に着目し、さらに、音質の改善を図った。

現在の『WAS-X』は 1 指あたり 1 自由度だが、柔軟なプラスチック素材であるため、キーストロークに柔軟に適応することができる。一方、人間の指は、キーを柔軟に適応させるだけでなく、柔らかい生体材料で覆うことで、楽器の煩雑な拘束を緩和している。そこで、サクソフォンのキーとの接点である指先に、柔らかいシリコンゴム製を装着することを試みた。硬さの異なる軟質素材をハイブリッドに組み合わせることで、音質性能を向上させることができる (図 10)。指先には、頬に近い柔らかさのシリコンゴム (Ecoflex™ 00-30) を採用した。

ロボット工学におけるソフトマテリアルの研究は、ソフトマニピュレーションを行うロボット部品の開発と、ソフトアクチュエーターの開発の 2 つの観点から行われることがほとんどである [21]。この意味で、ハイブリッドなソフトマテリアルを機能的に活用する『WAS-X』の指の研究はユニークな応用研究といえる。

頬に近い硬さの柔らかいシリコンゴム製の指チップを装着することにより、調整幅が広く、低音域でも安定した吹鳴音を得ることができた (図 11)。

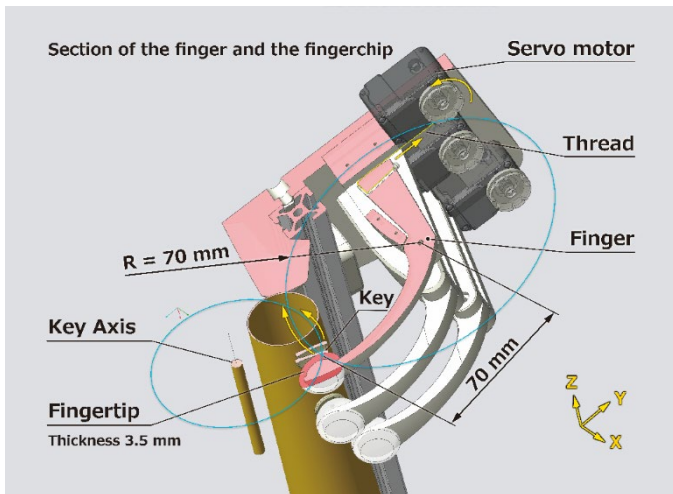


図 10 Finger mechanism using Soft hybrid materials

MIDI signal

Auto playback
Keyboard
GUI
PC
Windows 10

Angle
Speed
Torque
Command

WAS-X finger

| | | |
|------------------|-----------|------------|
| ... Servo 01 ... | Finger 01 | ... Key 01 |
| ... 02 ... | 02 | ... 02 |
| ... 03 ... | 03 | ... 03 |
| ... | ... | ... |
| ... 08 ... | 08 | ... 08 |

Servo motor: TTL command type

Saxophone

図 12 Fingering control system

- ・MIDI キーボードと GUI キーボードによる演奏
- ・事前に準備した曲の自動演奏
- ・各サーボモータのオープン、クローズの目標値設定
- ・各サーボモータの状態のダイナミックな視覚化

キークローズ時における各指の適正なサーボトルク値を調査し、目標値を決定するための指針として活用した。今後、このアルゴリズムを初期キャリブレーションに活用していく予定である。

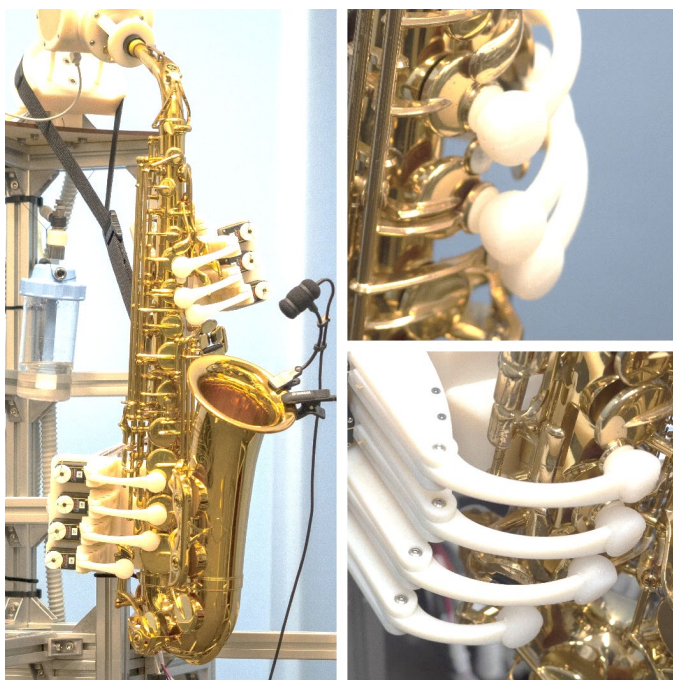


図 11 "WAS-X" with Soft silicone rubber fingertips

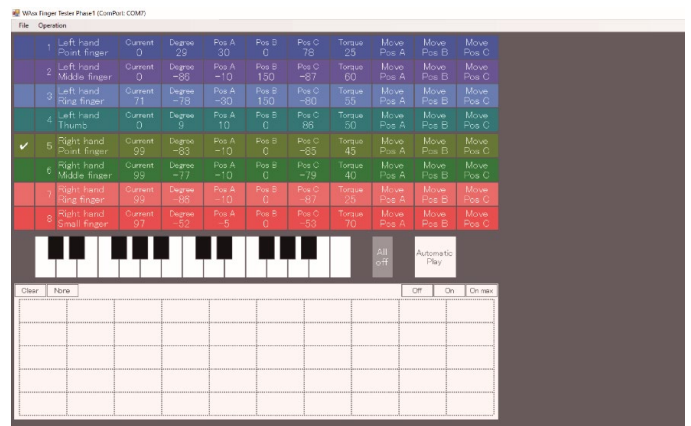


図 13 Fingering control graphical user interface

運指制御システム

現在の『WAS-X』制御システムは、主に指の動きを確認するためのシンプルなものである (図 12)。楽器中心設計により、『WAS-X』のハードウェア調整性能は大幅に向上した。しかし、キーオープンの設定値調整とキークローズの設定値調整は、手動での調整となる。

次のステップとして、サーボモータのトルク値を知ることで、初期設定の簡略化を図った。各サーボ目標値は、Windows PC からのコマンド制御で行う。サーボ目標値は、キーがクローズするサーボトルク値に達した際のサーボ値を調査し、初期設定に反映する。

図 13 は運指制御システムの GUI を示す。

口唇・口腔システム

上顎前歯を基準とした口唇と口腔の装着により、安定した吹鳴を実現した (図 8)。吹鳴を維持するためには、口腔内圧を安定させることが必要である。しかし、一般的な流量計や制御弁などの制御装置を口腔の前に装着すると、装置の抵抗により吹鳴に悪影響を与える。そこで、排気を制御し、手動で圧力を調整することで、安定した吹鳴を実現した。

マウスピースとリードにフィットするようにシリコンゴムのリップを成形し、シリコンゴムの乾燥を防ぎ気密性を保つために加湿器を装着した。さらに、シリコンゴム製のゴム風船と頬のパーツが吹鳴を安定させることも確認した (図 9 (b))。今後は、今回実現できなかったリードギャップの調整機構を検討し、圧力を同時に制御することで音量とピッチの調整を検討する。

空気供給用の 2 本のウレタンチューブは、唇と口腔を柔軟に支えることに成功した (図 9 (b))。しかし、人間の頸部や気道を模擬するために、どのような機構が適しているかについては、

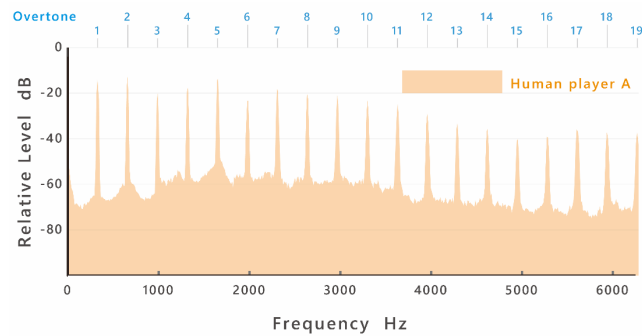
まだ議論の余地がある。なお、流量計や制御弁などの制御機器を装着することで、吹鳴を損なうことが懸念され、さらなる検討が必要である。

周波数成分分析 (人間・WAS-5, WAS) 比較

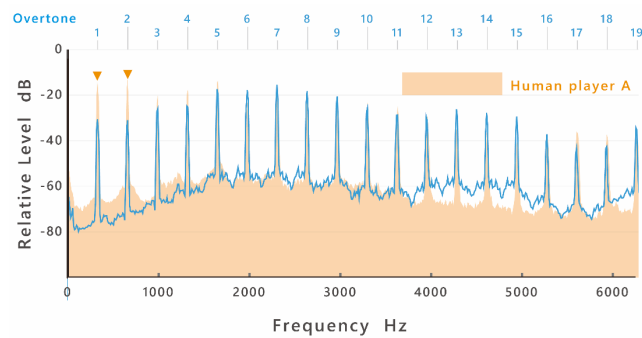
人間 (初学者) の開放音 E4 と『WAS-5』、『WAS-X』の倍音成分の周波数成分分析を図 14 に示す。FFT は 1.0 秒間隔のデータを使用し、ハミング窓でエッジ処理した。WAS-5, WAS-X では、音の低域部分が顕著に減少する結果となっている。

『WAS-X』と『WAS-5』の音質の違いについては、議論が難しい。比較できない理由は、セッティングの状態や口唇の状態によって、両ロボットの音質が顕著に変化するためである。安定した気流を得ることは、今後の開発で解決していく次の大きな課題である。

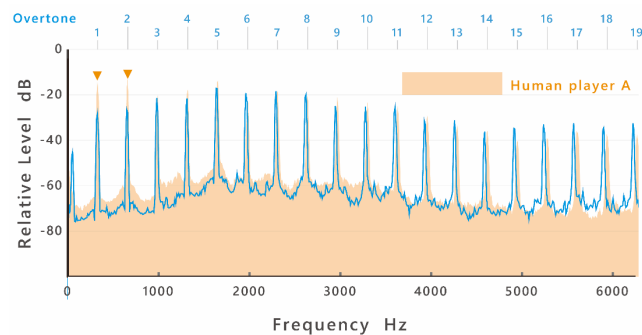
当然、両ロボットの音質は初心者と比較してもまだ十分でないことは明らかである。しかし、今回開発した新しいハードウェアプラットフォーム『WAS-X』は従来の『WAS-5』と同等以上の音質が得られた。



(a) Human (Beginner)



(b) WAS-5



(c) WAS-X

図 14 FFT frequency analysis.(E4)

周波数成分分析 (指チップあり・指チップ無し)

楽器の響きを損なわないために、プラスチック製の指にシリコンゴム製チップを実装した。結果として、新しい指の貢献により低音域の音質が向上した。指の影響が少ない開放音では貢献はなく、保持構造をより柔軟にする必要がある。勿論、指形状や材料の最適化による性能向上の余地もある。さらに、運指制御システムにより、初期設定を簡単に調整することができる。設定の自動化、口腔、口唇制御との連携も期待される。また、運指の他の側面では、閉じる順序、速度、強さが吹鳴の安定性に影響することが分かっている。今後、これらの影響を詳細に調べ、運指の演奏性能向上を図る。

軟質シリコンゴム製チップの有無による音質の比較として、運指の影響を最も受けにくい開放音 (E4) と、運指の影響を最も受ける完全閉鎖音 (E♭3) を、振幅スペクトルを用いて倍音成分を可視化し比較した。FFT は 1.0 秒間隔のデータを使用し、ハミング窓でエッジ処理した。吹鳴時の口腔内圧は 3 kPa 程度で通常演奏と同程度であった[16]。

すべてのキーを開けた E4 では、倍音成分の減衰に両者で大きな差は見られない。強いて言えば、シリコンゴムで覆われた指の影響を緩やかに受けている (図 15)。

基本キーを閉じた E♭3 は、低音域の倍音の減衰が顕著に緩やかで自然であることがわかる。実際に聴いてみると、豊かな倍音がはっきりと認められる。(図 16)。

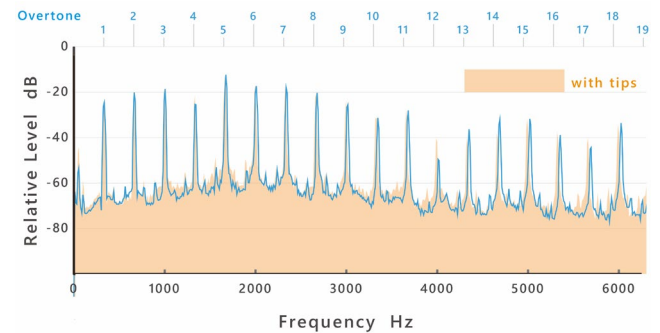


図 15 FFT frequency analysis (E4) without tips and with tips

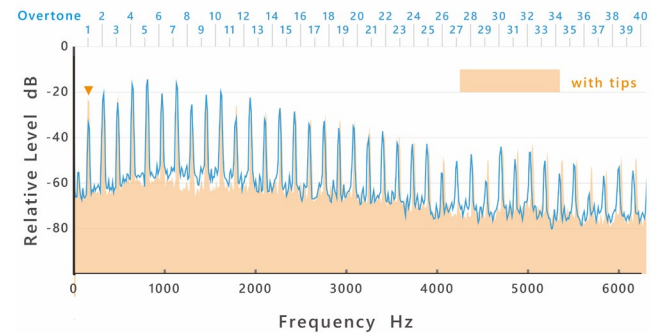


図 16 FFT frequency analysis (E♭3) without tips and with tips

6 結論と今後の課題

「デザイン思考」を取り入れることで、楽器を中心とした視点からの示唆を得ることができた。この「楽器中心設計」の方法論は、新ハードウェアプラットフォーム『WAS-X』の開発に大きく寄与し、大幅な小型化と簡素化を果たし、吹鳴の安定をもたらした。

長期的に取り組んでいるラピッドプロトタイピングとの相乗効果も認識できた。特に、研究の初期や停滞期においては効果的である。また、複数の軟素材を使用した指先の改良は、今後のソフトマテリアルの活用に対する洞察を与えている。

しかし、現段階の『WAS-X』は、まだプロのサクソフォン奏者のレベルには達していない。今後の研究の方向性として、人とのインタラクションの深化や、従来の手法の統合を通じて、研究の質をさらに高めることを目指している。

7 おわりに

本稿は、本学支援による研究テーマである「パートナーロボットの開発研究：コンセプト構築におけるラピッドプロトタイピングの有用性」の成果事例の報告でもある。

また、本研究は、本学だけでなく東京女子医科大学・早稲田大学連携先端生命医科学研究センター (TWIns)、パラメトリック・テクノロジー株式会社、ダッソー・システムズ株式会社、ヤマハ株式会社に支えていただいた。

早稲田大学未来ロボット研究機構、早稲田大学ヒューマノイド研究所、早稲田大学高西研究室の皆様に対して改めて感謝の意を表す。

参考文献

1. 一般社団法人 日本機械工業連合会. 2021 年度 ロボット産業・技術振興に関する 調査研究報告書. 2022.
2. 総務省. 平成 27 年版 情報通信白書. 2015. pp. 192-198.
3. 高西 淳夫. ヒューマン・コミュニケーションを志向したヒューマノイドロボット. 日本ロボット学会誌. 1997;15: 971-974. doi:10.7210/jrsj.15.971
4. Takanishi A. Dream to a humanoid robot. What is robot? Dream to a humanoid robot. *J Inst Electr Eng Jap*. 1998;118: 5-8. doi:10.1541/ieejjournal.118.5
5. 日本インダストリアルデザイン協会(JIDA). プロダクトデザイン: 商品開発のための必須知識 105. ビー・エヌ・エヌ; 2021.
6. 水上 和彦, 内山 純, 山田 晃久, 馬 翊翔, 韓 衍, 高西 淳夫, et al. ネットホルダーを使用した人間型サクソフォン演奏ロボットの開発: 現行指部の改良と再検証 (2G2-03). 2020 年 9 月.
7. Uchiyama J, Hashimoto T, Ohta H, Nishio Y, Lin J-Y, Cosentino S, et al. Development of an Anthropomorphic Saxophonist Robot Using a Human-like holding Method. 2023. pp. 1-6. doi:10.1109/SII55687.2023.10039316
8. Uchiyama J, Hashimoto T, Ohta H, Lin J-Y, Cosentino S, Takanishi A. A Humanoid Saxophone-Playing Robot Based on Instrument-Centered Design. *Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS)*. Cham: Springer Nature; 2023. pp. 295-306. doi:10.1007/978-3-031-35634-6_21
9. Brown T. Design thinking. *Harv Bus Rev*. 2008;86: 84-92, 141.
10. Platner H. An Introduction to Design Thinking PROCESS GUIDE. 30 Sep 2012 [cited Oct 2023]. Available: <https://web.stanford.edu/~mshanks/MichaelShanks/files/509554.pdf>
11. 徐方啓. 創造性研究から見たデザイン思考のルーツ. *デザイン学研究特集号*. 2017;25: 110-115. doi:10.11247/jssds.25.1_110
12. 見崎 大悟, Ge Xiao. 工学教育におけるデザイン思考の活用. *精密工学会誌*. 2019;85.
13. Petersen K, Solis J, Ninomiya T, Yamamoto T, Takeuchi M, Takanishi A. Development of the anthropomorphic saxophonist robot WAS-1:

Mechanical design of the lip, tonguing, fingers and air pump mechanisms. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE; 2009. pp. 3043-3048. doi:10.1109/ROBOT.2009.5152313

14. Solis J, Petersen K, Yamamoto T, Takeuchi M, Ishikawa S, Takanishi A, et al. Implementation of an Overblowing Correction Controller and the proposal of a quantitative assessment of the sound's pitch for the anthropomorphic saxophonist robot WAS-2. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. pp. 1943-1948. doi:10.1109/IROS.2010.5649257
15. Lin J-Y, Kawai M, Nishio Y, Cosentino S, Takanishi A. Development of Performance System With Musical Dynamics Expression on Humanoid Saxophonist Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4: 1684-1690. doi:10.1109/LRA.2019.2897372
16. Fletcher NH, Rossing TD. *The physics of musical instruments*. 1991st ed. New York, NY: Springer; 2012.
17. Han Y, Nishio Y, Yi-Hsiang MA, Oshiyama C, Lin J-Y, Takanishi A, et al. A human-robot interface to improve facial expression recognition in subjects with Autism Spectrum Disorder. 2018 9th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST). 2018. pp. 179-184. doi:10.1109/ICAwST.2018.8517228
18. Yi-Hsiang MA, Han Y, Lin J-Y, Cosentino S, Nishio Y, Oshiyama C, et al. A Synchronization Feedback System to Improve Interaction Correlation in Subjects With Autism Spectrum Disorder. 2018 9th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST). 2018. pp. 285-290. doi:10.1109/ICAwST.2018.8517233
19. Teal L. *The Art of Saxophone Playing*. Alfred Music; 1963.
20. Cottrell S. *The Saxophone*. Yale University Press; 2013.
21. Elango N, Faudzi AAM. A review article: investigations on soft materials for soft robot manipulations. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015;80: 1027-1037. doi:10.1007/s00170-015-7085-3