

人間形サクソフォン演奏ロボットの開発研究：パートナーロボット設計に資する設計アプローチ

Design study of a humanoid saxophone-playing robot: An approach informing partner-robot design

内山 純^{1,2*}

Jun Uchiyama^{1,2*}

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 Uchiyama, jun-uchiya@aiit.ac.jp

Abstract This paper summarizes design insights gained through the development of a saxophone-playing robot and reorganizes them as an integrated design approach grounded in a product-design perspective within bio-robotics. By employing design abduction to reframe prior assumptions, we revisited the holding and blowing conditions of the instrument and coupled them with an evaluation framework grounded in the harmonic structure of the produced tones. This approach led to verifiable improvements, including downsizing, enhanced maintainability, an expanded practical pitch range, and greater stability in the low register. In parallel, we concisely review the lineage of musical-instrument performance robots and clarify a human-normative viewpoint that informs partner-robot design. The paper is intended as a short research note that consolidates prior results and articulates a practical, design-oriented framework that can support subsequent development of partner robots.

Keywords design abduction; reframing; harmonic structure; human normativity; partner robot

1 はじめに

ロボット産業は製造分野での産業用ロボットを中心に発展してきたが、近年はサービス分野へと対象領域を拡大しつつある[1]。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、家事や介護、店舗での接客などにも活用されている。これらの領域では機能的価値に加え、感性価値を含むユーザー体験が重視され、人間中心の視点に立脚した開発が求められる。

人間形ロボットの研究では、バイオ・ロボティクスの枠組みのなかで人間（生物）を究極の模範とし、実証的なロボットの開発を通じて人間の心身メカニズムを解明し、ロボット設計方法論の確立を目指している。『楽器演奏家』を模範とする楽器演奏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」に加え、「豊かなユーザーインタラクション」が重要な要件となる。

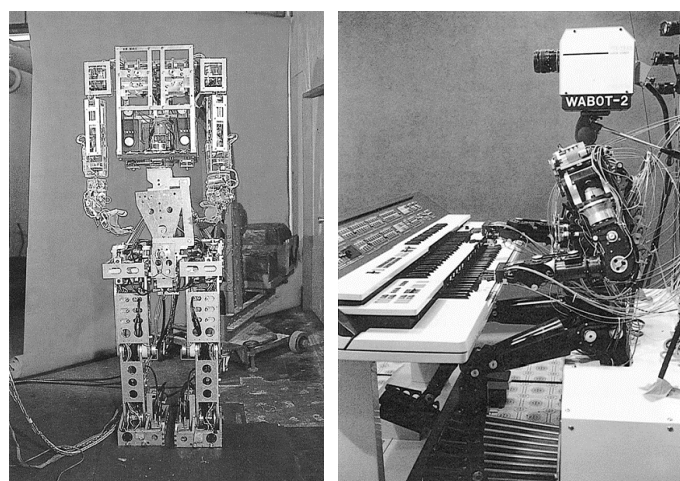
なかでも多様な演奏表現が可能なアルト・サクソフォンを対象とした演奏ロボットの研究は、学際的な視点から意義ある研究課題といえる[3,4]。

本稿では、楽器演奏ロボット開発で得られた知見を踏まえ、パートナーロボット設計に資する視点を整理する。

本研究の源流は、1973年に世界に先駆けて開発されたヒューマノイドロボット『WABOT-1』（WAseda roBOT, 図1(a), 早稲田大学（早大））である。これに続く鍵盤楽器演奏（電子オルガン演奏）ロボット『WABOT-2』（WAseda roBOT-2, 図1(b), 早大）は、1980年に準備が開始され、1985年の国際科学技術博覧会（つくば'85）で公開された。

加藤（早大）によると、『WABOT-2』の開発コンセプトは「人間をロボット化させないために機械を人間化させる」ことであり、『WABOT-2』のような楽器演奏機能を持つロボットと『WABOT-1』のような二足歩行機能を持つロボットの融合は、未来の「マイロボット」の形を予見させるものである。必ずしも人間型になることを意味しないが、結果として形は人間に似てくることが予想され、『WABOT-2』は「マイロボット」への道を開くきっかけになるという[7]。

『WABOT-2』から始まった人間形楽器演奏ロボット（早大）の系譜は、人間形フルート演奏ロボット『WF』（Waseda Flutist robot）[8]、さらに本研究の人間形サクソフォン演奏ロボット『WAS』（Waseda Anthropomorphic Saxophonist robot）の開発へと発展した[9]。



(a) "WABOT-1"

(b) "WABOT-2"

図1 "WABOT" (WAseda roBOT; Waseda Univ.) [5,6]



From left: ERS-300, ERS-220, ERS-110, ERS-210, ERS-7

図2 "AIBO" [10] (Sony Group), adapted from author's previous publication in Sony Group: ERS-300[11], ERS-210[12], ERS-7[13-16]

この流れは、産業からサービスへの市場文脈の変化と呼応し、人間規範に基づく設計要件の具体化に寄与してきた。また、社会実装の観点からは、AIBO に代表される製品事例が、感性価値を内包したロボティクスの可能性を社会に提示している(図2) [10]。

2 概要

本稿は、以上の文脈に立脚し、『WAS』の第六世代となる『WAS-X』(図3) [17,18]開発で得られた知見を、プロダクトデザイン視点に基づき再構成し、統合的な設計アプローチとして要約する[3,4]。

『WAS-X』は、デザイン・アブダクション[19,20]に基づくリフレーミング(課題の再構築)により、これまでの先入観を払拭し、視点を変えることで多くの「気づき」を得て、小型化と構造の簡素化により煩雑な調整から解放された。さらに、楽器本来の響きを回復しつつ、将来のユーザーインタラクション研究の可能性を広げた。

ここでいうデザイン・アブダクション (design abduction) とは、Dorst のいう既知の「価値」から逆算して構想/結合し、検証する固有の推論様式を指す。フレーミング/リフレーミングは、その推論を駆動するフレーム(枠組み)の再構築であり、デザイン・アブダクションの鍵となる。

このリフレーミングは、従来の枠組みでは見過ごされがちであった課題に対する解決策の創案に寄与し、プロダクトデザインの多様なアプローチがパートナーロボット開発に新たな視点と解決策をもたらす可能性があることを示唆する。バイオ・ロボティクス研究にプロダクトデザインのプロセスを取り入れることで、人と共生するパートナーロボット開発に資する視座を提示できる。

以降、3章で系譜を概観し、4章で本アプローチを述べる。さらに、5章で展開可能性を示し、6章で今後の課題を述べる。

3 『WF』および『WAS』の系譜

本章では、1章で述べた『WAS-X』に至る『WF』および『WAS』の進展を概観する。

『WF』の推移

『WABOT-2』の後、『WF』は、1990年から開発が進められ、フルート演奏に必要な呼吸および口唇/口腔の制御を中心課題として段階的に洗練された。初期には、楽器特性に合わせた呼吸の圧力/流量の安定化と指機構の整備を行い、その後、演奏者の口腔の模擬にも取り組み音質向上を図った。

2005年の『WF-4RIII』以降は、演奏方法の高度化に加えてユーザーインタラクションの研究も進められ[21-24]、2013年の『WF-4RVI』まで開発が継続された。図4[4,9]に示す外観の変遷からも分かるように、人間形に近づく一方、制御性向上のための構造が大型化と複雑化を招き、ユーザーインタラクション研究の進展が阻まれた。

『WAS』の推移

『WF』において、演奏者とロボットとの双方向インタラクションの難しさから、演奏者を再現性の高い演奏ロボットに置き換える方針が検討され、使用楽器としてフルートに加えアルト・サクソフォンが採用された。

2007年に開始された『WAS』は、サクソフォン固有の楽器保持/吹奏/運指を含む複合課題に取り組んだ。五世代目の『WAS-5』は、代表的な楽器演奏ロボットとして広く知られている[9,25]。しかしながら、制御性向上のための構造は、大型化と複雑化を招き、機構の位置調整は煩雑で、実用的な吹奏音域は狭く安定していない(図5[4,9])。ユーザーインタラクションに関する研究も、ハードウェアプラットフォームと連携せずに進めざるを得ない状況であった[26,27]。

そこで、小型化、保守性の向上、実用音域の拡大を最優先課題として、著者らは2019年に『WAS-X』開発に着手した。改めてバイオ・ロボティクスの観点から、発音メカニズム全体の設計を見直し、開発方針を以下の二点とした。

- ・演奏者の楽器保持を規範とする。
- ・演奏者吹奏音の倍音構造を規範とする。

また、次のステップとして、ユーザーインタラクションを可能にするため、以下の二点を開発目標として策定した。

- ・座位の演奏者を規範とした楽器保持の具現化
- ・演奏者の倍音構造を規範とした吹奏音の生成

これらの方針と目標に基づき、設計→試作→評価の反復を重ねた結果、以下の三点を実装し、それぞれの効果を確認した。

- ・ネクストラップを用いた楽器保持システム：
楽器固定による倍音成分の損失の緩和に貢献
- ・上顎中央切歯基準、軟素材頬搭載の吹奏システム：
実用的な吹奏音域の拡大に貢献
- ・左手第一指と右手第一指を基準とした手指部システム：
位置ずれがなく保守性の向上に貢献

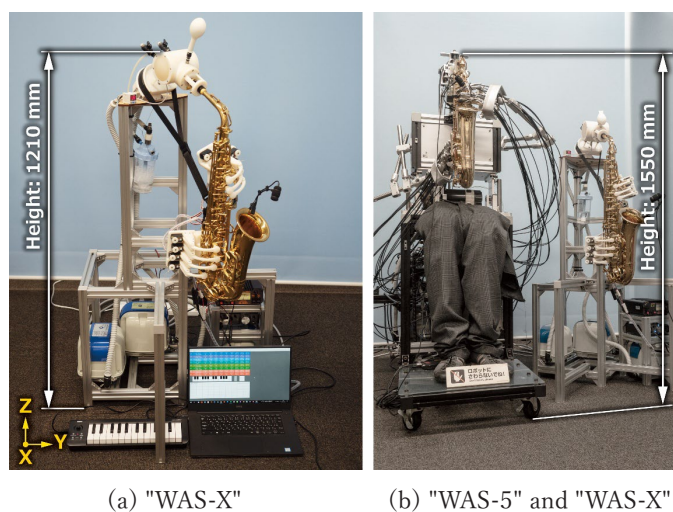


図3 "WAS-X" Hardware Platform Appearance[18]

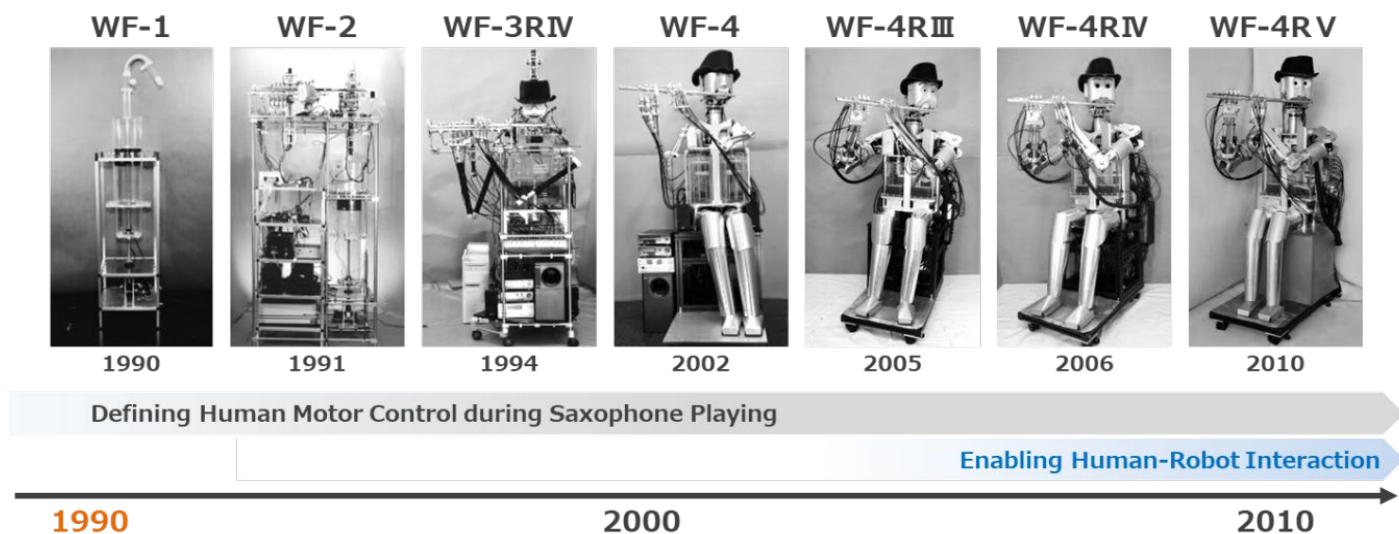


図 4 Evolution of the “WF” Series (Waseda Flutist Robot, Waseda Univ.)
—timeline of key mechanism updates in blowing, embouchure, and fingering. Redrawn by Author

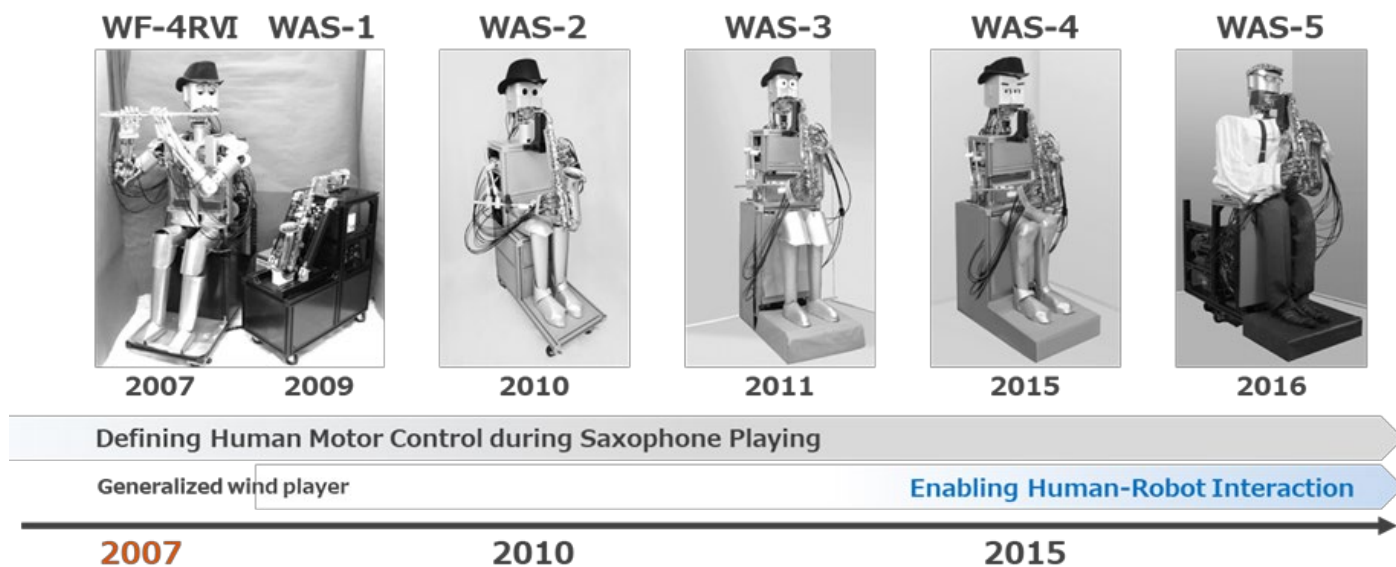


図 5 Evolution of the “WAS” Series (Waseda Anthropomorphic Saxophonist robot, Waseda Univ.)
—timeline of key mechanism updates in blowing, embouchure, and fingering. Redrawn by Author

4 『WAS-X』開発アプローチ

本章では、『WAS-X』開発アプローチについて、パイオ・ロボティクスの観点からプロダクトデザイン視点の運用を統合的な設計アプローチとして整理する。『WAS-X』開発では、デザイン・アブダクションに基づくリフレーミングにより設計視点を再定義し、結果として「楽器中心設計」の考え方に基づく楽器保持／吹奏／運指システムを構築した。さらに、評価視点を「有効な楽音域」に定めた倍音構造の分析により、小型化／保守性／実用音域／低域安定の到達点を明確化できた（ここでいう「有効な楽音域」とは、楽音として有効利用が可能とされる音域（30～5500 Hz）[4,28]を指す。）。

開発におけるリフレーミング

『WAS-X』開発の各段階で、従来の設計方法に起因するバイアスを排し、客観的な視点を維持するためにプロダクトデザイン視点に基づく設計アプローチを適用した。

楽器を基準とした設計および倍音構造の分析による評価の着想は、発音原理や演奏方法、演奏観察、自身の演奏経験および演奏教本[29]から得られた知見に基づくデザイン・アブダクションによるリフレーミングを通じて創出された。

楽器を中心に据えた設計方針は、演奏観察、発音原理の分析、演奏方法の調査、さらに自らの演奏体験に基づく試行錯誤を通じて得られたリフレーミングにより導かれた。この設計方針を「楽器中心設計」[3,4,18]と名付け、『WAS-X』の開発指針として位置づけた。これにより、楽器保持条件（楽器支持／拘束）、吹奏条件（口唇／口腔／呼気）、運指条件（設計基準／キーとの接触）の再定義が促され、設計→試作→評価の反復過程において設計バイアスの抑制が図られた。

統合的設計アプローチ

設計プロセスは、1 仮説形成（演奏観察／発音原理／演奏方法／自らの演奏体験）→ 2 探索的モデリング（人間規範にもとづく楽器保持／吹奏／運指、生体材料の模擬）→ 3 ラピッドプロトタイピングと検証（モデルの具現化と反復の開発により機能を確認）→ 4 倍音構造の評価（有効な楽音域を対象）→ 2へ還流という循環で構成される（図6）。各段の通過条件は簡潔で、「吹奏不可なら2へ戻る／吹奏可なら4へ進む」であり、評価結果に応じて再び2へ戻す。

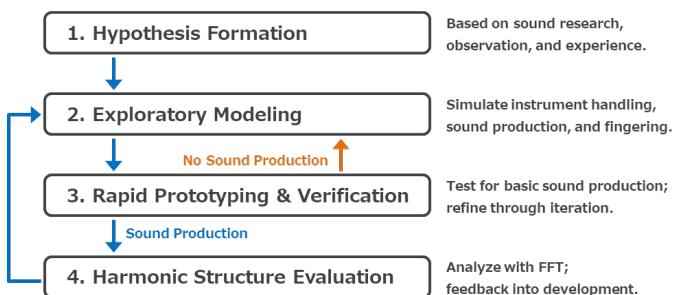


図6 WAS-X Development Process Overview[4]

開発段階に応じた評価

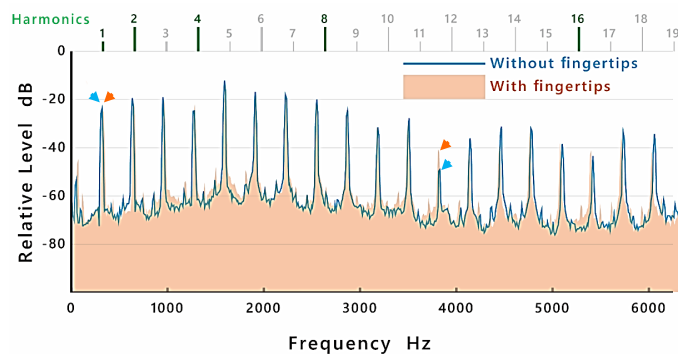
『WAS-X』開発において、初期段階では吹奏の可／不可による判定で十分であったが、次段階では吹奏音の質の評価が求められた。これまで十分に注力されてこなかった有効な楽音域の倍音構造について、基音を基準とした視覚化により再評価した。

例えば、本学紀要17[3]でも提示したように、指先ティップ（軟素材）有無の評価において、図7（a）および（b）に示すように、E4のように全キー開の指運（運指因子の影響が小さい）では指先ティップ有無の差は限定的であり、D#3のように複数キー閉の指運では基音の損失が顕著であることが可視化された。

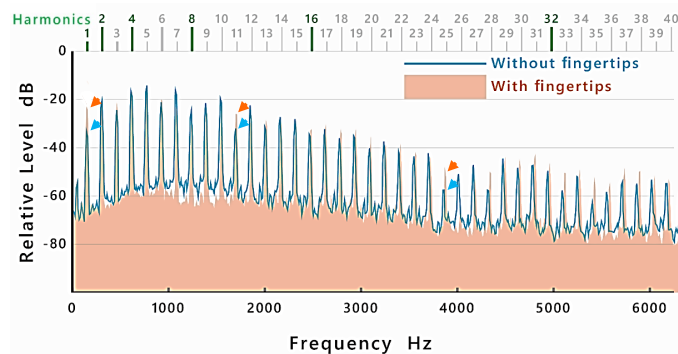
一般的な可聴域（20～20000 Hz）全域にわたる従来の『WAS』評価では見逃されていたが、上記のようにデザイン・アブダクションによるリフレーミングを通じて創出された評価法によって、『WAS-X』における軟素材ティップの導入が低域の倍音欠損を緩和する可能性が示された。

さらに、SC (spectral centroid) / PNR (peak-to-noise ratio) / HER (harmonic energy ratio) などの一般的な指標を整理し、人間の聴覚特性に基づき主要倍音の重みづけを行った評価関数（HEI a-sax）[4]を提案し、人間の演奏に対する近接度の定量化を試みた。

このように、評価においても人間規範に基づいたデザイン・アブダクションによるリフレーミングが行われ、開発段階に応じて評価法を柔軟に採択することにより開発効率を高められることが示唆される。



(a) "WAS-X" (E4, all keys open)



(b) "WAS-X" (D # 3, multiple keys closed)

図7 "WAS-X" frequency spectrum: fingertips' impact[4]

5 パートナロボット開発への展開

本章では、人間形サクソフォン演奏ロボット『WAS-X』の開発で得られた設計上の知見を、パートナロボット開発に関連する設計視点として整理する。4章で述べたように『WAS-X』では、演奏者の楽器保持を規範とし、演奏者の吹奏音の倍音構造を規範として設計判断を行い、その評価を有効な楽音域に限定した倍音構造分析で行った。この評価枠の切り替え自体がリフレーミングとして機能し、設計→試作→評価の反復を通じた改善に寄与した。

『WAS-X』開発ロードマップ

『WAS-X』の開発を通じて、アルト・サクソフォンが演奏者によって容易に保持・吹奏・運指できるよう、各構成要素のレイアウトや重心配置が精緻に調整されていることを改めて認識した。人間中心に設計された楽器を演奏するロボットの開発は、楽器設計において人間を規範としてきた先人の設計思想に直接触れる貴重な機会でもあった。

また、サクソフォンは人間が実際に演奏可能であるため、サクソフォン演奏ロボットの研究開発においては、人間の身体を設計の参照モデルとして活用できる可能性がある。すなわち、開発者自身が五感を通じて楽器の保持・吹奏・運指といった行為を体験することにより、制御原理への理解を深化させ、多くの気づきを得ることができる。このような体験的理解を通して、ロボティクス設計に関する新たな示唆が得られることが期待される（図8）。



図8 “WAS-X” development roadmap. Milestones linking mechanism updates with harmonic-structure evaluation and practical outcomes.

パートナロボット開発

1章で述べたように、人々の日常生活を支援する「パートナロボット」は、近年、社会において身近な存在となってきた。こうした商品開発には、ロボティクスエンジニアに加えてプロダクトデザイナーも参画し、デザイン手法やプロセスが積極的に活用されている。このことは、パートナロボット開発において、機能性の追求に加え、意匠性も重要な要素になりつつあることを示唆している。

『WAS-X』は、小型化、保守性の向上および実用音域の拡大により、ユーザーインタラクション研究の可能性を見出しつつある。しかしながら、現段階ではなお初級者レベルに達していない。また、プロダクトデザイナーでもある著者が関与しているが、いわゆるスタイリングを中心とした意匠性の追求は行っ

ていない。あくまでバイオ・ロボティクスの枠組みの中で、人間（演奏者）を規範とし、演奏観察、発音原理の分析、演奏方法の調査、さらに自らの演奏体験に基づいたラビッドプロトタイプピングによる試行錯誤を通じ、吹奏音の音響スペクトラル分析による定量的な評価を基に開発を進めてきた。

従来の設計方法に起因するバイアスを排し、客観的な視点を維持するための手段としてプロダクトデザイン手法を活用した。特に「リフレーミング（課題の再構築）」を通じて、設計の視点を再定義し、バイオ・ロボティクスにおける生物模倣／模擬の設計において、プロダクトデザインのアプローチが有効に機能することを示した。

これらの成果は、楽器演奏ロボットとしての課題解決にとどまらず、パートナロボット開発における設計的アプローチの深化にも資する知見を示している。『WAS-X』の開発で得られた知見が、パートナロボットにおける機能性と意匠性の両立にいかに関与し得るかを検討することは、今後の重要課題である。

以下では、著者が井口信洋研究室（早大）で開発に関わった形状記憶合金アクチュエータを利用した「パフォーマンス・ロボット」と、その後ソニーグループでプロダクトデザイナー／デザインエンジニアとして関わった「エンタテインメントロボット」について述べ、『WAS-X』開発を踏まえ、パートナロボット開発への展望に考察を試みる。

形状記憶合金アクチュエータを使用したパフォーマンス・ロボット開発

1985年の国際科学技術博覧会（つくば'85）[30]では、独特な未来的デザインを特徴とするルイジ・コラーニのロボットが芙蓉グループのパビリオン（芙蓉ロボットシアター）で披露され、『WABOT-2』（早大）も公開されている。

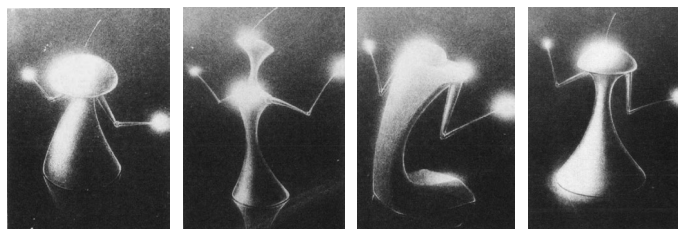
一方、1984年から井口信洋研究室（早大）では、著者らがプロダクトデザインのプロセスと手法を活用し、形状記憶合金アクチュエータを使用した「パフォーマンス・ロボット」の開発を進めていた[31]。デザインコンセプトを立案し、アイデアスケッチを展開（図9（a））、意匠確認用デザインモックアップを作成後、動作プロトタイプを制作した。また、SD法による複数の動作プロトタイプの評価も試みられている[32]。

デザインモックアップ（図9（b）中央）と動作プロトタイプ（図9（b）左）を比較すると、外観イメージ（サイズ、形態）に大きな相違が見られる。ここでは優劣を論じるのではなく、意匠性を優先したデザインモックアップと機能性を優先した動作プロトタイプの外観イメージの違いについて考察する。

このような相違は開発初期段階では頻繁にみられるが、ロボット開発においてハードウェアプラットフォームの構成は通常機能性が優先され、基本構成は開発エンジニアに委ねられる。機能的制約の十分な理解なくプロダクトデザイナーが構成を変更することは難しく、結果として外観イメージは開発エンジニアが構築したハードウェアプラットフォームの構成に強く影響を受ける。

本「パフォーマンス・ロボット」開発では、初期にはプロダクトデザイナーとしてアイデアスケッチからデザインモック

アップを担当し、後期には開発エンジニアとして動作プロトタイプ構築を行った。外観イメージの相違は、初期段階におけるメカニズム理解の不十分さ、後期段階における設計スキルの熟度不足に起因すると捉えられる。しかし、こうした課題は個々の役割の限界というより、プロダクトデザインとエンジニアリングの統合プロセスに内在する構造的問題として捉える必要がある。



(a) Performance robot idea sketches



(b) Back left: scene sketch, back right: Rendering, front right: image mockup, center: Design mockup, left working prototype

図9 Performance robot: Sketches and prototypes (Waseda Univ.). A visual summary of stage-oriented prototypes that connect expression and function.

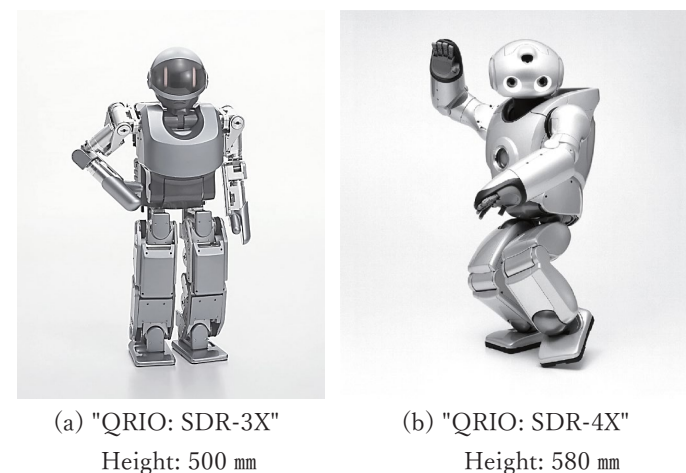


図10 "QRIO" (Sony Group, Yamaguchi Robotics Institute)[33,34]. Adapted from author's previous publications. An example of product-level integration of functional and affective values.

エンタテインメントロボット『AIBO ERS-210』（犬型）

『AIBO』については1章で触れたが、『AIBO ERS-210』におけるハードウェア開発プロセスを補足する[10]。初代『AIBO ERS-110』の開発時には、設計用3DCADシステム(I-deas, SDRC)と意匠設計用3DCADシステム(FRES DAM, ソニー)が異なり、開発部門も分かれていたため、動作領域やセンサ配置条件などの設計要件と外観意匠要件の情報共有が難しく、開発の長期化や非効率化が課題であった。

第二世代『AIBO ERS-210』[12] (図2)の開発では、プロダクトデザイナー(著者)がテクニカルディレクター/デザインエンジニアとして3DCADを用いたチーム設計に参画した。開発当初から、関節位置や可動範囲、センサ条件などの諸条件を盛り込んだアイデアスケッチを展開し、商品企画や原画製作者(空山基氏)とコンセンサスを図りつつ、開発エンジニアと3DCAD上でアイデアスケッチ画像を共有しながら開発を進めた。機構・構造開発と意匠開発を3DCAD上で同時進行し、相互に確認できる体制を構築した。

エンタテインメントロボット『QRIO』（人間形）

エンタテインメントロボット『QRIO』（ソニーグループ製）は、歌やダンス、記憶に基づく会話、物体認識、自律走行など多彩な特技を持つ二足歩行可能なエンタテインメントロボットである。2000年に『QRIO: SDR-3X』[35,36]が発表され(図10(a))、2002年に『QRIO: SDR-4X』[34,37-39]が発表された(図10(b))。

『SDR-3X』と『SDR-4X』の原画はソニーグループの沢井邦仁氏によるもので、丸みを帯びた体型と大きな目を特徴とするアニメ風キャラクターとしてデザインされた[40]。両モデルは共通のアニメ風原画を起点として開発されたが、外観には大きな差異が見られる。

『SDR-3X』では基本構造がエンジニア主体で検討され、構造確定後に頭部および胸部の外観形状をデザインエンジニア(著者)が3DCAD(Pro/ENGINEER, PTC)で構築した(図10(a))。一方『SDR-4X』では、『AIBO ERS-210』に引き続き構想設計段階から3DCAD(I-deas)を活用したチーム設計に参画し、デザインエンジニアとしての役割を担った。関節可動角、センサ配置、アクチュエータ位置を考慮した座標系を構築し、機構・構造開発と意匠開発を同時進行させた。全体デザインは原画の意向を尊重しつつ、機能性と意匠性の両立を図った形状へ最適化された(図10(b))。

チーム設計による3DCAD設計データによりデザインモックアップが制作され、意匠確認と形状の微調整に活用された。この際、意匠的な特徴の多くは、機能性と意匠性の両立を目指し、構造要素への深い関与を通じて創出された。

具体的には、腰部のシャッター構造は安全性に配慮した指挟み防止を目的として設計され、手部カバーは転倒復帰をサポートする役割を担う。また、センサやモータを機能的に配置することで、頭部形態に意匠的な特徴を持たせることが可能となった。これらの特徴は、当初の原画や『SDR-3X』には見られないものであり、機能的特徴を意匠的価値へと昇華させた例である。

開発過程では、3DCAD を活用したパラメトリックな形状データ構築が採用された。すなわち、設計条件や意匠的要件に基づき形状データを構築し、各パラメータの変更が関連形状へ自動的に反映される仕組みである。これにより、機能的意図と意匠的意図の双方を包含した設計が可能となる。

例えば、スケルトンモデル（自由度を考慮して可動関節位置を定義した骨格構造）に基づき、各部品の外観形状が連動して生成される。したがって、基本構造が決定した後でも意匠的な調整が可能であり、機能的な変更に伴う可動角、センサ配置、アクチュエータなどの配置変更にも対応し、意匠的な破綻を回避しながら効率的な修正を可能としている。

この柔軟な形状データ構築のアプローチは、機能性と意匠性の両立が求められるエンタテインメントロボットのハードウェア開発における有効かつ汎用性の高い設計戦略として確立され、その後の開発規範となった。複数プロジェクトにおける試行錯誤を通じてラビッドプロトタイピングが加速し、効率的な設計プロセスの実現につながった。当時はなお実験の段階にあったが、現在では一般化されたデザイン開発方法の一つとして定着している[4,10]。

6 今後の課題

人間形パートナーロボットの開発においては、機能や性能のみならず、意匠設計が重要な役割を果たし得る。ここでは、ロボティクスエンジニアが意匠設計で考慮すべき点に触れる。例えば、高トルクのサーボモータを搭載し安全規格を満たしていても、指挟みのリスクが残る設計であれば、外観を「親しみ易い」イメージとすることの適否は慎重に判断する必要がある。

また、「知的な」イメージを持つロボットが開発されたとしても、外観イメージと実装された知的能力の間に乖離が生じた場合、その調整の方途を検討する必要がある。

これらの課題では構造設計と意匠設計のバランスが求められる。ロボティクスエンジニアは、プロダクトデザインの手法やプロセスを理解し、統合的に活用することで、安全性と体験価値に配慮した設計に寄与できる。ただし、ここで述べた論点は仮説であり、さらなる検証と具体的研究が必要である。特に、構造設計が意匠設計に与える影響、およびその逆の関係は、今後の重要な研究課題である。

今後のロボット開発では、技術的進展に加え、ユーザーの安全性と体験価値を重視した意匠設計の方向性が求められる。エンジニアリングとデザインの協調を通じて、ロボットが日常生活により自然に適応し、幅広い場面で活用される可能性が示唆される。

7 おわりに

人間形ロボットの先駆者である加藤（早大）は、『WABOT-2』が巧みな演奏を可能とし、人間と調和する能力を有することから、「情報動力機械」という第三の機械[7]（パートナーロボット）の実現に向けた一歩であると指摘している。また、高西（早大）は「人間の生活空間との整合性と親和性」および「人

間との自然な意思疎通と相互理解」を目指すためには、ロボットの形態は「人間形」であるべきだと論じており[41]、工学とデザインの融合を目指す上で重要な示唆を与える。

本稿は、本学紀要 17[3]に掲載した『WAS-X』開発の続報であり、一連の研究成果をまとめた学位論文「サクソフォン演奏ロボットの設計方法論に関する研究」[4] の内容を整理したものである。

また、本学、基本研究費および傾斜的研究費（部局分）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ビッドプロトタイピングの有用性」の成果報告でもある。また、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へ感謝の意を表す。

参考文献

1. 株式会社日経 BP. ロボット未来予測 2033. 2024.
2. 総務省. 平成 27 年版 情報通信白書. 2015. pp. 192-198.
3. 内山 純, 橋本 智行, 近藤 嘉男, 林 家宇, 高西 淳夫. 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. 東京都立産業技術大学院大学紀要 第 17 号. 2024; 138-145.
4. 内山 純. サクソフォン演奏ロボットの設計方法論に関する研究. 早稲田大学. 2025.
5. Kato I, Ohteru S, Kobayashi H, Shirai K, Uchiyama A. ON THEORY AND PRACTICE OF RPBPTS AND MANIPULATORS. ROMAN. 1973;1: 12-24.
6. 加藤 一郎, 大照 完, 白井 克彦, 成田 誠之助. けん盤楽器演奏ロボット “WABOT-2” WASeda roBOT-2. 日本ロボット学会誌. 1985;3: 337-338. Available: <http://jlc.jst.go.jp/JST.Journalarchive/jrsj1983/3.337?from=Google>
7. 加藤 一郎. 第三の機械—マイロボット. 日本ロボット学会誌. 1985;3: 235-238. doi:10.7210/jrsj.3.235
8. 高西 淳夫, 平井 大生, 三好 茂貴. 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. 1994;12: 439-443. doi:10.7210/jrsj.12.439
9. Cosentino S, Takanishi A. Human-Robot Musical Interaction. In: Miranda ER, editor. Handbook of Artificial Intelligence for Music: Foundations, Advanced Approaches, and Developments for Creativity. Cham: Springer International Publishing; 2021. pp. 799-822. doi:10.1007/978-3-030-72116-9_28
10. 内山 純. Anatomy 9: 人と暮らし始めたロボットたち. In: 伊奈 史郎, editor. 図録: Anatomy, “Premium 10”, JIDA デザインミュージアムに観る日本デザインの力. 日本インダストリアルデザイン協会; 2019.3. pp. 58-61.
11. 公益財団法人日本デザイン振興会. 2003 グッドデザイン賞, エンタテインメントロボット 「AIBO ERS-300」. 2002 [cited 2 Oct 2023]. Available: <https://www.g-mark.org/gallery/winners/9d05dbc1-803d-11ed-862b-0242ac130002?years=2002>
12. 川北 貢造, 山岸 建, 武田 由佳, 内山 純, 空山 基. 自律歩行ロボットおもちゃ (AIBO ERS-210). Patent. 意匠登録第 1114065-70,1114864-74 号, 2001.
13. 武田 由佳, 内山 純, 川北 貢造, 星野 弘就, 石井 大輔, 大口 伸彦, 菅原 拓. 自律歩行ロボットおもちゃ (AIBO ERS-7). Patent. 意匠登録第 11205738-40 号, 2004.
14. 公益財団法人日本デザイン振興会. 2003 グッドデザイン賞, エンタテインメントロボット 「AIBO ERS-7」. 2003 [cited 2 Oct 2023]. Available: <https://www.g-mark.org/en/gallery/winners/9d13119e-803d-11ed-862b-0242ac130002?years=2003>

15. ソニーグループ. エンタテインメントロボット (2003 年) AIBO ERS-7. 2003 [cited 2 Oct 2023]. Available: <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/design/gallery/ERS-7/>
16. 公益財団法人日本インダストリアルデザイン協会. JIDA デザインミュージアムセレクション Vol.6, エンタテインメントロボット AIBO ERS-7. 2004 [cited 2 Oct 2023]. Available: <http://jida-museum.jp/archive/DMHP/2004/item02.html>
17. 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 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE; 2023. pp. 1–6. doi:10.1109/SII55687.2023.10039316
18. 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. Cham: Springer Nature Switzerland; 2023. pp. 295–306. doi:10.1007/978-3-031-35634-6_21
19. Dorst K. Frame Innovation: Create New Thinking by Design. MIT Press; 2015. Available: <https://play.google.com/store/books/details?id=UBt8BwAAQBAJ>
20. Dorst K. The core of ‘design thinking’ and its application. Des Stud. 2011;32: 521–532. doi:10.1016/j.destud.2011.07.006
21. Solis J, Chida K, Isoda S, Suefuji K, Arino C, Takanishi A. The anthropomorphic flutist robot WF-4R: from mechanical to perceptual improvements. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2005. pp. 64–69. doi:10.1109/IROS.2005.1545259
22. Solis J, Suefuji K, Taniguchi K, Takanishi A. The mechanical improvements of the anthropomorphic flutist robot WF-4RII to increase the sound clarity and to enhance the interactivity with humans. In: Zielińska T, Zieliński C, editors. Romansy 16: Robot Design, Dynamics, and Control. Vienna: Springer Vienna; 2006. pp. 247–254. doi:10.1007/3-211-38927-X_32
23. Solis J, Ozawa K, Petersen K, Takanishi A. Design and development of a new biologically-inspired mouth mechanism and musical performance evaluation of the WF-4RVI. 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts. 2013. pp. 200–205. doi:10.1109/ARSO.2013.6705529
24. Petersen K, Solis J, Takanishi A. Musical-based interaction system for the Waseda Flutist Robot. Auton Robots. 2010;28: 471–488. doi:10.1007/s10514-010-9180-5
25. 林 家宇. Musical expression system with psychoacoustic elements for an anthropomorphic saxophonist robot. Ph.D., Waseda University. 2021.
26. 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
27. 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
28. 大蔵 康義. 目で見る楽器の音: By FFT Analysis. 国書刊行会; 2004.
29. Teal L. The Art of Saxophone Playing. Alfred Music; 1963.
30. 白井 克彦 編. 科学万博出展ロボットの技術面を語る. 日本ロボット学会誌. 1985;3: 397–407. doi:10.7210/jrsj.3.397
31. Iguchi N, Uchiyama J, Kimura H, Hamashima Y. Development of a performance robot. Adv Robot. 1990;5: 3–13. doi:10.1163/156855391X00025
32. 松浦 壮一, 藤城 智子, 山本 一道, 井口 信洋. ダンスロボットの開発とその主観的評価. 日本ロボット学会誌. 1991;9: 177–183. doi:10.7210/jrsj.9.177
33. QRIO: SDR-3X. In: <https://www.sony.com> [Internet]. [cited 1 Nov 2023]. Available: https://www.sony.com/ja/pressroom/pict_data/e_robot/2000_sdr3x.html
34. QRIO: SDR-4X. In: <https://www.sony.com> [Internet]. [cited 1 Nov 2023]. Available: https://www.sony.com/ja/SonyInfo/CorporateInfo/History/commom/images/13/2003_QRIOprototype.jpg
35. ヤマグチロボット研究所. In: ヤマグチロボット研究所ウェブサイト [Internet]. [cited 10 / 02 / 2023]. Available: <http://yrt.jp/>
36. Kuroki Y. A small biped entertainment robot. MHS2001 Proceedings of 2001 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (Cat No01TH8583). IEEE; 2001. pp. 3–4. doi:10.1109/MHS.2001.965213
37. Ishida T. Development of a small biped entertainment robot QRIO. Micro-Nanomechatronics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society, 2004. 2004. pp. 23–28. doi:10.1109/MHS.2004.1421265
38. Sabe K. Development of entertainment robot and its future. Digest of Technical Papers 2005 Symposium on VLSI Circuits, 2005. 2005. pp. 2–5. doi:10.1109/VLSIC.2005.1469320
39. Qrio, the robot that could. IEEE Spectrum. 2004;41: 34–37. doi:10.1109/MSPEC.2004.1296012
40. 沢井 邦仁. “QRIO”におけるデザインプロセス. 日本ロボット学会誌. 2004;22: 979–983. doi:10.7210/jrsj.22.979
41. 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