

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330422

研究課題名(和文)バイオリン演奏ロボットにおける自動弓付けアルゴリズムの構築

研究課題名(英文) Design of Algorithm to Automatically Determine Bowing Directions for Violin-playing Robot

研究代表者

渋谷 恒司 (Shibuya, Koji)

龍谷大学・理工学部・教授

研究者番号：20287973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、バイオリン演奏ロボットの表現力向上を目指し、楽譜から弓の運動方向を自動的に決定する「弓付け」アルゴリズムの構築を中心に研究を行った。構築したアルゴリズムは、(1)楽譜情報から演奏実現可能性を判断、(2)弓速の上昇による弓付けパターンの減少、(3)演奏者が用いる弓付けルールの適用、という段階を踏んで弓付けを行った。4小節の3種類の楽譜に適用したところ、2種類で弓付けが可能となった。そのうちの1つでロボットによる演奏を実現した。また、演奏者の演奏音の解析を通して、音量変化によって意図する印象の音を生成しようとしていることがわかった。加えて、ロボットハードウェアの向上にも取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：We are trying to increase the ability of our violin-playing robot to convey its musical intention to human audiences. We designed an algorithm to automatically determine the bowing directions from the musical scores. It judges whether the robot can play the score or not based on the hardware specifications. Then, it reduces the number of the possible bowing patterns by increasing the bow speed, which demanded the high hardware specifications. In addition, we proposed an evaluation function based on the rules violinists use to chose the pattern of the bowing movements. Finally, we determined the bow force and the sounding point based on the researches on the acoustic violin sounds. We also analyzed the sounds of trained violinists to investigate how they alter sound volume when expressing bright and dark timbres. As a result, we found that they change sound volume differently for giving us different impressions. We improved the hardware of the violin-playing robot, too.

研究分野：ロボット工学

キーワード：バイオリン演奏 弓付け ロボット

1. 研究開始当初の背景

近年、ロボットに代表されるメカトロニクス分野でも、人間親和性を高めるため感性や感情が注目されている。人間親和性を高める一つの手段として、ロボットやメカトロニクス機器における表現力の向上が挙げられる。本研究では、ロボットの表現力向上を最終目的としている。

本研究ではこれまで、表現力が要求される作業として、表現の幅が大きいと考えられるバイオリン演奏に着目してきた。音楽と感性や感情との関係についての従来研究では、音の物理パラメータと音色等に代表される人間の心理との関係が主に分析されていた。しかしこの結果をどのようにロボットの表現力向上や運動決定に生かすかについての、構成論的な研究は十分にはなされていない。また、楽器演奏ロボット、特にバイオリン演奏ロボットに関しては、少ないながらも従来から研究が行われている。しかし、それらは表現力の向上に着目した研究ではなかった。バイオリン演奏に関する自動演奏は情報工学の分野でも研究されているが、最終的な音は電子的に生成されたものであり、実際の音とは異なる。最終的な表現にまで到達するためには、実際にロボットで演奏させることが重要である。

本研究では、バイオリン演奏ロボットの表現力を向上させるため、楽譜から演奏動作を自動的に決定する過程に着目した。バイオリン演奏においては、弓の運動方向を比較的自由に決定でき、その過程は「弓付け」と呼ばれる。弓付けでは純粋に音楽的な要求だけではなく、ハードウェアの性能にも影響されると予想される。この両者の要求を適切に考慮することが必要となる。楽譜から自動的に弓付けを行うことができれば、バイオリン演奏において問題となる「弓付け」の科学的な指針の構築にも役立ち、弦楽器演奏初心者への指導にも貢献できると期待できる。

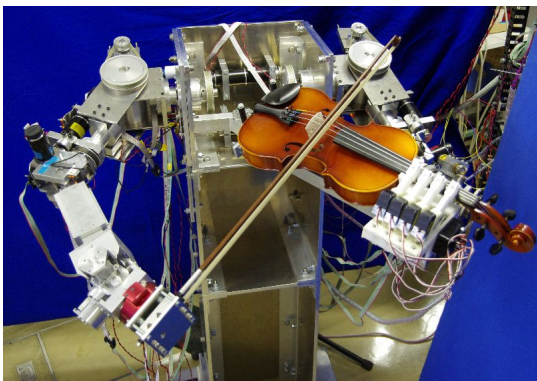


図1 バイオリン演奏ロボット

また、本研究では、図1に示す人間型ロボットアームを用いて、弓速や手関節のトルクを調節することで音量を調節するアルゴリズムを構築してきた。しかし、これらのアル

ゴリズムは、単音で弓速のみまたは弓圧のみを変化させており、表現力という意味では十分ではなかった。更なる表現力向上のためには、音量等を動的に変化させる「動的演奏」が必要であるとの認識に至った。また、動的演奏のためには更なるハードウェア能力の向上が必要であることがわかった。

2. 研究の目的

1. で述べたことより、本研究の目的は以下の3点とした。

(1) 自動弓付けアルゴリズムの構築

楽譜から弓の運動方向を自動的に決定する弓付けアルゴリズムを構築し、その結果を基に7自由度アームの運弓動作を決定するシステムを構築する。

(2) 演奏パラメータの動的変化と音の関係の解明

実際のバイオリン演奏では、弓圧と弓速の両方が動的に変化し、音量や音質が変化している。また、ビブラートによっても表現力が大きく向上することが予想される。このような動的に変化するパラメータと、生成される音の物理的および心理的側面との関係は、楽譜から弓付けを決定するためには欠かすことのできないものであるが、まだ十分には明らかにされていない。そこで、これらの関係を求めるため、熟練者の演奏音の解析する。

(3) ハードウェアの向上

バイオリン演奏ロボットは、様々な演奏に対応するだけの性能を有していない。より表現力を向上させる耐え、ロボットのハードウェアの向上に取り組む。

3. 研究の方法

以下に示す手順で研究を行った。

(1) 楽譜から自動的に弓付けを行うアルゴリズムの構築

楽譜から自動的に弓付けし、現有の7自由度ロボットアームの動作を生成するアルゴリズムを構築し、いくつかの楽曲に本アルゴリズムを適用した。そして、その1つを用いてロボットによる演奏を試みた。

(2) 演奏パラメータの動的変化と音の関係の解明

熟練者に簡単な曲を演奏してもらい、そのときの音を計測した。そして、音量をどのように変化させているか、ビブラートがどの程度の周波数でどの程度の音量変化が伴うかを調べた。

(3) 人間型バイオリン演奏ロボットの改良

手首関節の精度向上、弓圧調整方法の再検討、右手指の改良、およびビブラート音を生成するための機構の製作に取り組んだ。

4. 研究成果

4.1 弓付けアルゴリズム

4.1.1 アルゴリズム概要

本研究で構築した弓付けアルゴリズムの概略を以下に示す。

(1) 楽譜情報抽出と演奏実現可能性の判断
楽譜情報として、定量的な数値として扱えるテンポ、音の高さ、音の長さを抽出する。そして、演奏可能どうかを、ハードウェアの性能（モータの角速度、角加速度）を基に判断する。楽曲のテンポを変更し実現可能かを、運動学的情報を基に判断する。

(2) 弓付け

演奏可能と判断された後弓付けを行う。弓の運動方向の組合せは膨大に有り、それを減らして、最終的に1つにする必要がある。この過程を、次の2つの段階に分けて構築した。

(a) 弓速の上昇による弓付けの限定

弓速を上げると、ハードウェアの性能上実現可能な弓付けが減る。これを利用して弓付けを限定した。しかし、これでは弓付けを一意に決定することはできなかった。

(b) 演奏者へのインタビュー結果に基づく評価関数の導入

(a)の方法では一意に弓付けを決定することが出来なかった。そこで、動作計画システムの弓付けを決定するルールの参考となる知見を得ることを目的として、アマチュアの演奏経験者へのインタビューを行った。その結果、「スラー記号のみが付いた連続する音符の弓付け記号」、「切り返しの回数」、「演奏終了位置」の3つの評価項目を考慮した評価関数を導入し、弓付けパターンをさらに限定することに成功した。

(3) 弓圧とサウンディングポイントの決定

前節までで、ロボットのハードウェア性能と弓付けルールの設定から楽曲演奏時の弓速を決定した。しかし、バイオリンを演奏するためには、弓圧とサウンディングポイント（弦上の弓との接触点の位置）も決定する必要がある。このため、音響分野の文献を調査し、演奏音の評価が高い弦の振動を生成すると報告されている弓圧とサウンディングポイントを選択することとした。

4.1.2 アルゴリズムの適用

(1) 楽曲のテンポと実現性の関係

初心者向けの練習曲3曲の4小節を対象として、本動作計画を適用した。その一例を図2に示す。図2で、□の記号が下げ弓、V字の記号が上げ弓である。下げ弓とは、弓元から弓先へ引く方向で、上げ弓はその反対である。対象とした楽曲の内、2曲は120BPMという高いテンポにおいても実現可能な演奏動作を得ることが出来た。実現不可能な楽曲

では、D線からA線への移弦動作を短時間に行う必要があり、ハードウェアの性能が高ければ演奏可能になったと考えられる。

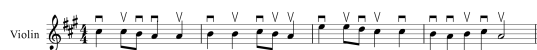


図2 アルゴリズム検証に用いた楽譜と弓付けの例

(2) 弓付けパターンの選択

実現可能な動作が得られた楽曲について、弓速の変化と得られる弓付けパターンの総数を調べた。その結果、弓速を増加させると弓付けの組み合わせの数が減少していることがわかった。これに加えて、4.1.1(2)(b)で述べた評価関数を導入した場合、1曲については、弓付けパターンを更に減らすことができたが、もう一曲（図2の楽譜）については8個となった。弓付けを一意に限定できなかった理由は、楽譜にスラーがなかったためであると考えられる。なお、図2の楽譜については、弓付け結果の一例を用いて、図1のロボットによって演奏を実現している。

4.2 演奏パラメータの動的変化と音の関係の解明

4.1のアルゴリズムは、一定の弓圧、弓速、サウンディングポイントを対象としており、その意味では一定の音量であったと考えられる。しかし、人間の演奏は強弱を繰り返しており、どのように強弱を付けるのかを明らかにすることは重要である。

そこで、熟練者2名を対象として、演奏実験を行った。楽譜を様々な音色を意図して弾いてもらい、その際の音を分析した。その結果、音量は一定ではなく、また意図した音色によって変化が異なることが明らかとなった。これは、ロボットにおける表現においても、音量をはじめとしたパラメータを意図した音色になるよう設計する必要があることを示している。

4.3 ハードウェアの向上

ハードウェアの向上として、手首関節の精度向上を図った。具体的には、減速機としてバックラッシュのない波動減速機を用いて、手先位置の精度向上を図った。また、腕の内旋関節で弓圧を調整するシステムも構築した。また、右指を人間型にするため、ケーブル駆動方式の指を製作した（図3）。

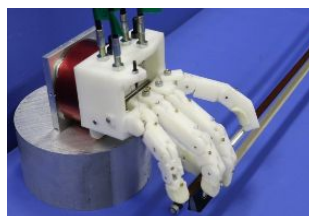


図3 人間型右ハンド

左指の表現力向上のため、振動モータとクランク機構の2種類の方法によってピブラート音の生成に着手した。その結果、ほぼ人間と同様の周波数のピブラート音を生成することに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

西村友之, 土本凱斗, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットの研究 - 左手指改良によるピブラートの再現 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2A2-F02, (2017.5.12), (ビッグパレットふくしま, 福島県郡山市)

石本浩之, 森島大智, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットに関する右ハンドの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2A2-F01, (2017.5.12), (ビッグパレットふくしま, 福島県郡山市)

Koji Shibuya and Natsumi Hasegawa, How Violinists Alter Sound Volume and Tempo When Expressing Bright and Dark Timbres, The IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2016), 138-143, (2016.8.28), (New York(U.S.))

森島大智, 長谷川夏見, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットにおける演奏表現の研究 - 「明るい」「暗い」の音色が演奏に与える影響 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1P1-14b4, (2016.6.9), (パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市)

石本浩之, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットのフィンガリング用ワイヤ駆動ハンドの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1P1-14b5, (2016.6.9), (パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市)

森島大智, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットにおける右ハンドの設計・製作, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 1A2-03, (2015.9.3), (東京電機大学 東京千住キャンパス, 東京都足立区)

長谷川夏美, 藪博之進, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットの弓圧変化による音量調節システムの構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1A1-M07, (2015.5.18), (京都市勤業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

藪博之進, 荒谷貴夫, 渋谷恒司, バイオリン演奏ロボットの演奏動作生成アルゴリズム-弓の進行方向とボーイングパラメータの決定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 1A1-D05, (2014.5.26), (富山国際会議場, 富山県富山市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mec3342.mecsys.ryukoku.ac.jp/sibuya/jindex.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

渋谷 恒司 (SHIBUYA, Koji)

龍谷大学・理工学部・教授

研究者番号: 20287973

(2)研究協力者

荒谷貴夫 (ARATANI, Takao)

藪博之進 (YABU, Hironoshin)

長谷川夏美 (HASEGAWA, Natsumi)

森島大智 (MORISHIMA, Daichi)

石本浩之 (ISHIMOTO, Hiroyuki)

西村友之 (NISHIMURA, Tomoyuki)

土本凱斗 (TSUTIMOTO, Gaito)