

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00513

研究課題名(和文)バイオリン演奏ロボットの音色表現のための演奏設計

研究課題名(英文)Performance Design of Violin-playing Robot for Expressing Timbre

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：バイオリン演奏ロボットにおいて楽譜から演奏動作を自動的に導出するアルゴリズムの構築を目的に、まず、熟練者に簡単な楽曲を弾いてもらい、音圧とテンポの変化に注目して分析した。その結果、テンポで表情付けをする際には、テンポの変化パターンは同じにして、テンポの大きさを変える必要があること、および、音圧で表情付けをする際には、音圧の大きさは同じにして、音圧の変化パターンを変える必要があることが明らかとなった。その結果を用いてロボットによる演奏実験を行い、テンポと音圧を変化させると2つの音色の演奏を識別することが可能であることが分かった。また、強化学習を用いた演奏動作決定アルゴリズムも構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

楽器演奏には演奏動作という要因があり、すべての楽曲を好きなテンポ・音量で演奏できるわけではない。すなわち、ロボットの運動能力が選択するテンポや音圧に影響を与えているのである。そして、テンポと音圧の変化パターンと音色との関係は明らかではなかった。本研究結果は、人間の動作分析を軸にこの問題にチャレンジし、簡単な楽曲におけるテンポと音圧の設計指針の一端を明らかにした。また、また、強化学習という手法を導入し、演奏動作を自動的に決定するアルゴリズムも構築したことは、より汎用性のあるアルゴリズム構築に道を開いたといえる。これらの成果は、よりよい人間・ロボット間コミュニケーションに貢献するといえる。

研究成果の概要(英文)：We are aiming at building an algorithm which determines the violin performance for an anthropomorphic robot. We analyzed trained violinists' performance focusing on the change pattern of sound pressure and tempo, and we found typical sound pressure patterns. We also revealed the following design principles to convey the bright or dark impressions: (1) the same tempo change pattern should be used while the different tempo value should be used, (2) the sound pressure change pattern should be different while the same sound pressure value should be used. Based on the results, we designed the violin performance for the robot and realized the performance. Based on a preliminary experiment, we confirmed that listeners were able to distinguish the bright performances from the dark when the both the tempo and the sound pressure were changed. In addition, we succeeded in building an algorithm for determining the violin performance using reinforcement learning and neural network.

研究分野：ロボット工学

キーワード：バイオリン演奏 演奏設計

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

楽器演奏ロボットに関しては、これまでも多くの研究がある。1980年代には加藤・菅野らの鍵盤楽器演奏ロボット、梶谷らの自動演奏装置がある。本研究で対象とするバイオリン演奏では、梶谷らの他に、トヨタ自動車によるロボット、近年韓国で開発されているロボット等がある。上述の楽器演奏の研究では、ロボットによる演奏の実現および演奏音の向上が目的であった。

これに対して、近年、人間とロボットとの共演を目指したフルート演奏ロボットが高西らによって開発されている。人間との共演のためには人間とロボットとのコミュニケーションが必要である。すなわち楽器演奏ロボットの研究は、人間とロボットとのコミュニケーションに関する研究へと大きく変貌している。そして、その結果は、楽器演奏の科学的理解、ヒューマン・マシン・インタフェースの開発等、様々な分野での応用が期待されている。

本研究ではこれまでに、図1のバイオリン演奏ロボットを製作し、4小節からなる楽曲の演奏に成功した。本ロボットの開発目的は、楽譜から演奏動作を自動的に決定できるシステムを構築すること、すなわちバイオリンの演奏設計手法を構築することである。加藤・菅野らの鍵盤楽器演奏ロボットは楽譜から演奏動作を決定することができるが、音色については考慮されていなかった。音色を考慮してロボットに演奏させることにより、人間のロボットに対する印象が向上し、人間とロボットとのよりよりインタラクションの実現に資すると考えられる。

図2に、本研究で提案している演奏動作決定過程の概念図を示す。本研究で構築しようとするアルゴリズムは、破線で囲まれた部分である。バイオリン演奏に限らず楽器演奏においては、楽譜のみでは演奏が決定できず演奏者が付加すべき情報が多い。例えばバイオリンでは、弓の動かす方向が違っても、同じ高さの音を生成できる。その選択基準は、生成される音の音色が自分の表現したいものかどうか、が基本であると考えられるが、身体運動の制約から定まるものもあると考えられる。すなわち、音色と身体運動とのコンフリクトが生じ、両者の調整をする必要があるのである。こうした、音色と身体運動の両方を考慮したバイオリン演奏ロボットの演奏動作自動決定システムはまだ完成されておらず、工学的なモデル化も完成していない。

2. 研究の目的と意義

本研究ではこれまで、楽譜から弓の運動方向を自動的に決定するアルゴリズムの構築を試みてきた。そこで用いた演奏の評価基準は、できる限り弓の切り返し(弓の長手方向の運動方向を変えること)の数を少なくすることであった。また、これと並行して人間の演奏者の演奏を分析し、同じ曲でもその曲全体として「明るく」もしくは「暗く」聞こえるように、各音の音圧を変化させ、全体のテンポも変化させていることがわかった。しかしながら、演奏中のテンポ変化や音圧の強弱変化までは分析していなかった。

以上の背景を基に、本研究では以下の2点を研究目的とした。(1)演奏者の演奏を詳細に分析し、曲全体として音色を表現するためにテンポと音圧どのように変化させているのかを明らかにする、(2)分析結果をもとに演奏動作を決定するアルゴリズムを構築する。

3. 研究の方法

本研究は、演奏者の演奏分析と、動作決定アルゴリズムの構築に分けられる。演奏者の演奏分析では、主に熟練者(バイオリンを専攻している音楽大学学生、アマチュア演奏者)に簡単な楽譜(「むすんでひらいて」等)を提示しその際の音圧やテンポを分析した。まず、曲全体の音圧変化パターンを分析し、さらに演奏音それぞれの音圧を計測しその変化パターンを導出するとともに、それに基づいたロボットによる演奏を実現した。また、より汎用的な演奏動作決定過程構築のため、強化学習も用いた演奏動作決定システムの構築にも着手した。

4. 研究成果

4.1 曲全体とフレーズにおける音圧パターン分析

曲全体およびフレーズにおける音圧変化パターンに着目し、「明るい」と「暗い」の音色について、熟練者がどのようなパターンで演奏しているのかを分析した。被験者は、バイオリンを専門とする音楽大生とした。解析に用いる楽曲として、図1のロボットが演奏可能な「むすんでひらいて」(図3)と、同様の難易度で世界的にもよく知られている、「Long Long Ago」を選んだ。

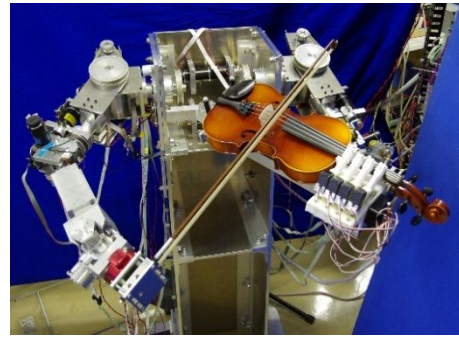


図1 人間型バイオリン演奏ロボット

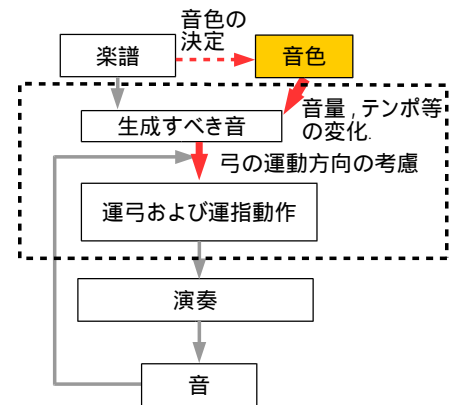


図2 演奏動作楽譜から音への変換過程

被験者には、「明るい」などの表情付けを行わない通常の演奏、「明るい」「暗い」を音圧変化のみで表現する演奏、および「明るい」「暗い」をテンポ等全ての変化を許容して表現する演奏の、合計3パターンで演奏してもらった。音圧は騒音計で計測し、ソフトウエアで音圧を計算した。また演奏調査に加え、演奏者に対するインタビューとアンケートを行った。



図3 むすんでひらいての楽譜

(1) 曲のはじめと終わりの音圧

演奏の最初と最後の音における音圧の傾きの平均値を比較した。その結果、演奏開始時の傾きは、「通常」と「明るい」が、急であるのに対し、「暗い」のみ緩やかに上昇する特徴がある。また、終了時の傾きは、「通常」が最も急であり、「暗い」が最も緩やかになる傾向があることがわかった。

(2) フレーズ間の音圧変化

インタビューとアンケートより4小節を1つのフレーズとして演奏設計を行っていることが明らかになった。そして、そのフレーズの合間に「明るい」は弓が弦から離れていることが確認できた。フレーズ間の音圧変化の度合いを求めめるために分散を求めたところ、「明るい」は分散の値が大きく、フレーズの終わりに音圧が急低下し、急上昇する傾向があることが確認できた。

(3) フレーズと楽曲全体の音圧

次に、フレーズと楽曲全体の音圧の平均値を求めた。その結果、暗いは、音圧が小さいことが多い為、平均の値も小さくなっている。明るい音圧が大きい平均は通常と差があまりない。平均が小さくなった要因に考えられるのが、音圧の上下が頻繁に行われていることである。またこれから、音圧の変化が表情付けに対して重要な役割であることがわかった。

(4) 一音の典型的なパターン

各音に対して、どのような音圧変化パターンがあるのかを調べた。その結果、「明るい」は最初から音圧が大きくその後上昇、「暗い」ははじめ音圧が小さくその後上昇、「通常」はほぼ同じ音圧が継続することがわかった。

(5) フレーズと楽曲全体の音圧パターンの提案

以上の分析結果からわかるのは、「明るい」は「通常」と「暗い」よりも音圧を急激に上昇させる、「明るい」ではフレーズ間で弓をいったん弦から離すため音圧が急激に下がる、「明るい」の音圧は他の2つよりも全体的に大きい」といった音圧変化のパターンである。図4に、上の分析結果をまとめた、それぞれの音圧パターンの概念図を示す。これらのパターンを使うことによって、「明るい」と「暗い」の印象を与えられるのではないかと考えられる。

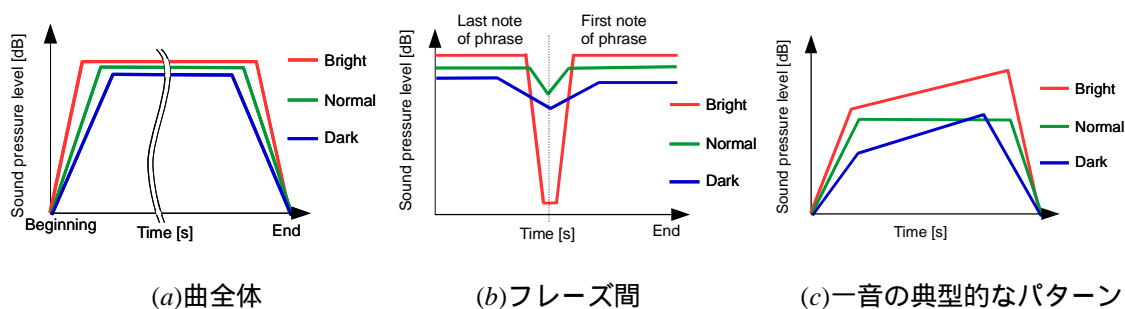


図4 音圧パターンと音色

4.2 音圧およびテンポの分析とロボットによる演奏実験

前節で述べた結果は、大まかな指針であり、ロボットで演奏させるためには、より詳細な分析が必要である。また、テンポの変化についても分析する必要があった。そこで、バイオリン演奏の熟練者(バイオリンを専攻する音楽大学学生)1名を対象に再度演奏実験を行った。

実験では、普通、明るい、暗いの3種類の音色となるように弾きわけてもらった。その際、音圧変化で音色を変化させてもらうよう指示した。また、同時に演奏者へのインタビューを行い、どのような意図で演奏を変化させたのかを調べた。演奏音は騒音計で計測し、各音の音圧を算出した。また、図3の12小節それぞれにかかる時間を調べ、各小節のテンポを算出した。

分析の結果、テンポで表情付けをする際には、テンポの変化パターンは同じにして、テンポの速さを変える必要があること、および、音圧で表情付けをする際には、音圧の大きさは同じにして、音圧の変化パターンを変える必要があることが分かった。「明るい」の音圧が全体的に大き

いという前節の結果と若干異なるが、これは演奏者の違いによるものではないかと考えている。

次に、ロボットによる演奏実験を行った。「むすんでひらいて」の最初の4小節の「明るい」と「暗い」の表情付けを、上記分析結果を基にテンポと音圧を変化させた場合、テンポ一定115 bpmで音圧のみを変化させた場合、音圧を70 dBで一定としてテンポを変化させた場合の3種類、合計6種類の演奏をロボットに行わせた。弓の運動方向は、「明るい」と「暗い」で同じとした。また、音圧調整は、ロボットの手首関節の関節角度を調整することで実現した。テンポと音圧の変化パターンは、熟練者のデータを参考に設定した。図5に、音圧の計測結果を示す。この図に示すように、ロボットの演奏による音圧は全体的に低い音圧となったが、これはハードウェアの性能によるものと考えられる。しかしながら、その変化パターンは、特に「明るい」ではほぼ再現できているものと考えられる。

ロボットの動画を被験者10人に視聴してもらい、その演奏が明るいかくらいかを判定してもらった。その結果、音圧とテンポを両方変化させた場合は正答率100%、音圧一定でテンポのみ変化させた場合は80%、テンポ一定で音圧のみ変化させた場合は20%であった。このことから、テンポと音圧を両方変化させることが、「明るい」と「暗い」の識別に有効であることが示唆された。

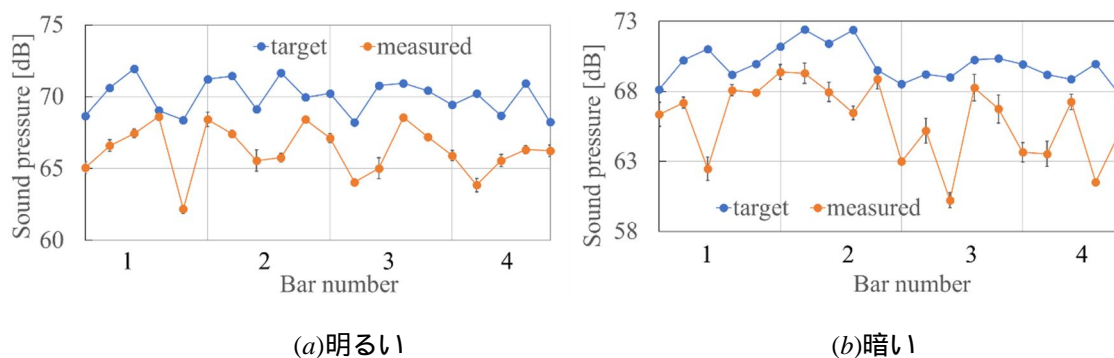


図5 ロボットによる演奏の音圧計測結果

4.3 強化学習を用いた演奏動作決定アルゴリズム

前節ではテンポと音圧を変更したが、弓の運動方向については人間が決定し、一定としていた。しかし、異なる曲においてすべて人間が弓の運動方向を決定することは困難であり、自動的に弓の運動を決定する方法が必要である。そこで、楽譜から自動的に弓の運動や弓速を決定するアルゴリズムの構築を試みた。

ロボットにバイオリンを演奏させる場合、弓の長さやロボットのアクチュエータ性能といった制約から、各音に対して任意の演奏パラメータを適用しても、一連の動作として演奏が不可能になる場合がある。また、弓の運動方向によってもこの実現可能性は変化する。そこで、機械学習手法の一つである強化学習の枠組みを楽曲演奏におけるパラメータ決定問題に適用することで、可能な動作の中から目標の音圧に近い演奏音が得られる動作を生成するシステムを構築することとした。

本手法においては、数小節のフレーズを学習1エピソードとし、音符1個を状態遷移の1ステップとして定義する。状態行動価値の更新については、1エピソード終了後に各ステップの状態・行動・報酬の記録をもとに行うものとした。行動変数については、弓速を30~110 mm/sから選択し、またボーイング方向についても上げまたは下げのいずれかから選択するものとした。状態変数については、弦に対するロボットの手先位置、音符の長さ、目標音圧の3つとした。報酬条件としては、シミュレーション段階で演奏不可能となった場合は一律の負の報酬を与え、演奏可能であった場合は、実際にロボットで演奏を行い録音し、その音圧の目標音圧との一致度に応じた報酬を式(1)より評価し与えるものとした。

$$r = \frac{k}{|Vol_{target} - Vol_{actual}|} \quad (1)$$

Vol_{target} : 目標音圧[dB], Vol_{actual} : 計測音圧[dB], k : 定数(=1000)

以上の問題設定の元、TD(0)-Q学習法及びgreedy手法により学習を行うものとした。また、連続の状態を扱う点と学習効率を考慮し、3層フィードフォワード型ニューラルネットワークにより価値関数近似を行った。入力行動及び状態、出力は状態行動価値である。中間層の要素数は15、活性化関数としては中間層に双曲線正接シグモイド関数、出力層に線形伝達関数を用いた。学習率については0.01とした。

提案手法の有効性を検証するため、実際の楽曲を用いて実験を行った。対象楽曲は「むすんでひらいて」の3-4小節とし、目標音圧は、人間の演奏者が「明るい」表情付けで演奏を行った際に得られたパターンを参考に決定した。また、本手法では、すべての音が演奏可能と判定された場合、ロボットを用いて演奏を行い、目標音圧との誤差から報酬を決定するが、本実験においては、得られる音圧値をシミュレーションにより評価することで実験を行った。シミュレーション

モデルについては、あらかじめロボットにより得られた実験結果から導出した。以上の設定のもとで、割引率 $\gamma = 0, 0.5, 1$ の3通りについて学習実験を行った。なお、ネットワークの初期値による誤差を考慮し、実験は各条件において3回ずつ行った。

各条件で学習を行った結果得られた、累積報酬(5エピソード毎の移動平均)の推移を図6に示す。 $\gamma = 0.5$ の場合は3回中2回で累積報酬を増加させている様子が確認できる。このとき、2回目の296~300エピソード目における累積報酬の平均値は5386であった。 $\gamma = 0$ では2000程度まで増加した場合がみられたが、その後減少している。 $\gamma = 1$ の場合、累積報酬の移動平均値は2691まで増加した。

$\gamma = 0.5$ の2回目の学習において獲得された行動を用いた場合の、各音の音圧を図7に示す。300エピソードにおいて、ほぼ目標音圧の変化パターンに近い音圧パターンになっていることがわかる。

また、このときの手先の動作の様子を図8に示す。(各点は各音のボーイング動作の開始、終了位置を示し、破線は手先の可動範囲を示す。)最初のエピソードでは、手先の位置が可動範囲外に出てしまい、演奏不可となった。演奏可能な動作が得られた31エピソード目では、6音目以外すべての弓速が30 mm/sで、切り返しを1回しか行わないという単純な動作が見られた。弓速がほぼ一定値であるため、目標音圧と異なる音圧パターンとなっている。その後、学習を重ねることで、弓付けパターンと弓速を変化させ、目標音圧に近い音圧が得られるようになったことが確認できた。

バイオリン演奏ロボットの動作生成問題に対し、価値観数近似を用いた強化学習による提案手法を適用することで、可能な動作の中から目標音圧に近い音圧が得られるような弓付け、弓速のパターンの獲得が可能であった。今後は、ロボット実機での適用のため、方策や価値観数近似用ニューラルネットワークの構成等、学習手法の詳細な検討を行うことで学習の効率化を図る必要があると考えている。また本手法の報酬条件、状態・行動を拡張することで、音色や左手の押弦状態、その他の演奏パラメータを考慮した学習も可能であると考えられる。

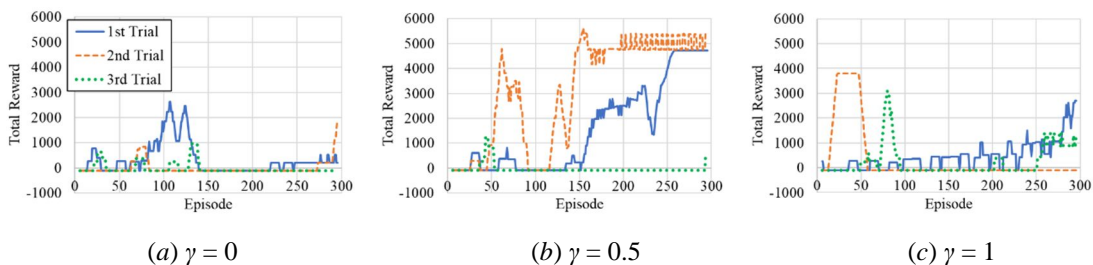


図6 獲得報酬の推移

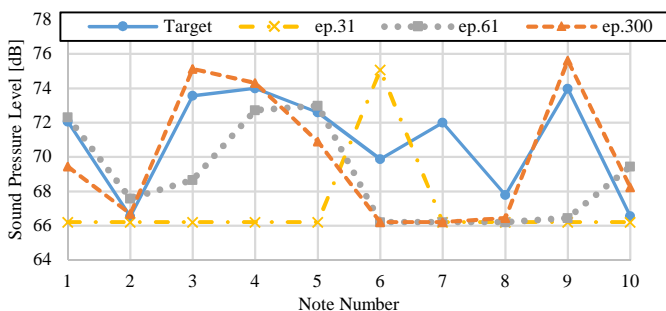


図7 音圧パターンの学習による変化

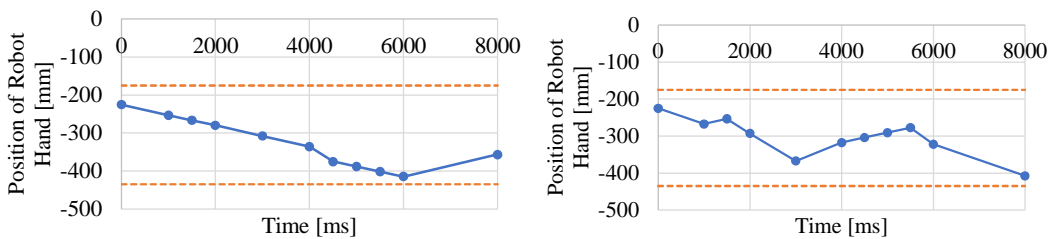


図8 弓付けパターンの変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Koji Shibuya and Hiroyuki Ishimoto
2. 発表標題 Design Principles of Loudness to Express Bright and Dark Timbres for Violin-playing Robot
3. 学会等名 the27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communicatio (RoMan2018, Nanjing, China) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村友之、石本浩之、渋谷恒司
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボットの開発～熟練者の音量変化の分析とロボット指の設計～
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018 (ROBOMECH2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小管堅渡、佐伯興盛、西村友之、渋谷恒司
2. 発表標題 「バイオリン演奏ロボットの開発」組み込み型モータ駆動システムの構築
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018 (ROBOMECH2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小管堅渡、赤間一太、野口来喜、渋谷恒司
2. 発表標題 「バイオリン演奏ロボットの開発」分散処理制御システムの開発および弓圧と弓軌道の関係
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 (ROBOMECH2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福原裕志、西村友之、渋谷恒司
2. 発表標題 「バイオリン演奏ロボットの開発」ピブラート演奏の分析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 (ROBOMECH2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石本浩之、森島大智、渋谷恒司
2. 発表標題 バイオリン演奏ロボットに関する右ハンドの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 (ROBOMECH2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西村友之、土本凱斗、渋谷恒司
2. 発表標題 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 -
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (ROBOMECH2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渋谷恒司、福原裕志、小管堅渡
2. 発表標題 強化学習を用いたバイオリン演奏ロボットの演奏動作決定手法
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 (ROBOMECH2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	石本 浩之 (Ishimoto Hiroyuki)		
研究協力者	西村 友之 (Nishimura Tomoyuki)		
研究協力者	小管 堅渡 (Kosuga Kento)		
研究協力者	福原 裕志 (Fukuhara Hiroshi)		