

チェロ演奏における 自動運指および運弓支援機構の検討

伊東 健太^{†1} 上瀧 剛^{†1} 田中 一敏^{†2}

概要: これまでに様々な自動演奏ロボットが開発されている。それらは運指や吹奏などを含めロボット側で演奏が完結するものが多く、主に鑑賞や技能分析が目的であった。それに対して当研究室では、あえて運指のみを自動化することで、楽器演奏のハードルを下げつつ最終的に人が演奏体験できるシステムの開発を行ってきた。楽器演奏では運指が難しい点の一つであるが、特にヴァイオリンやチェロなどの擦弦楽器においては弓の制御も大きな壁となりやすい。そこで本研究では、チェロの運指自動化および運弓支援機構の試作を行った。自動運指機構では楽曲演奏が可能なること、運弓支援機構では直線的な運弓や移弦などの基本的な動作の支援が可能なることを確認した。

1. はじめに

近年、楽器を演奏する様々なロボットが研究・開発されている。例えば、トヨタ自動車のヴァイオリン演奏ロボット[1]やトランペット演奏ロボット[2]、および早稲田大学のフルート演奏ロボット[3]などが挙げられる。こうしたロボットには、ロボット側で演奏が完結する「全自動」のものが多く、鑑賞や技能分析などが目的である。なかには、人と合奏する全自動のロボット^{*1}も存在するが、これもロボットのみで演奏可能なものになっている。

当研究室では、人間とロボットとの協同による音楽演奏を目的として、これまでに、ロボットと機械学習を用いた演奏パラメータ推定[4]、深層学習を用いたジャズ音楽の自動生成[5]、マルチタスク学習と物理データ拡張を用いたギターコードの認識[6]、音の強弱が可能な自動ギター演奏ロボットの開発[7]などのソフトウェアおよびハードウェアの開発を行ってきた。

その中で、楽器演奏動作を支援する半自動楽器演奏ロボットを開発してきた[8][9]。ここでの「半自動」とは、楽器演奏にあたって比較的難しいと考えられる運指などを自動化し、弦をはじいたり息を吹き込んだりして実際に音を出す行為は人間の演奏者に行ってもらうことを指している。半自動化により、全自動にはほとんど無かった、人間が演奏に関わる余白が生まれる。あえて半自動化することで、ロボットの助けを借りながら楽器演奏を行えるため、

ただ演奏を聴くよりもさらに直接的な音楽体験を得られる。特に楽器経験の浅い初心者や身体的に不自由な人にとっては、気軽に演奏を楽しめるようになると考えられる。

本研究では、チェロの運指自動化および運弓支援機構の試作を行った。自動運指機構では楽曲演奏が可能なること、運弓支援機構では直線的な運弓や移弦などの基本的な動作の支援が可能なることを確認した。

2. チェロについて

図1に示すチェロは擦弦楽器の一つで、弦を弓で擦って発音する。チェロは4本の弦をもち、低い弦からC2, G2,

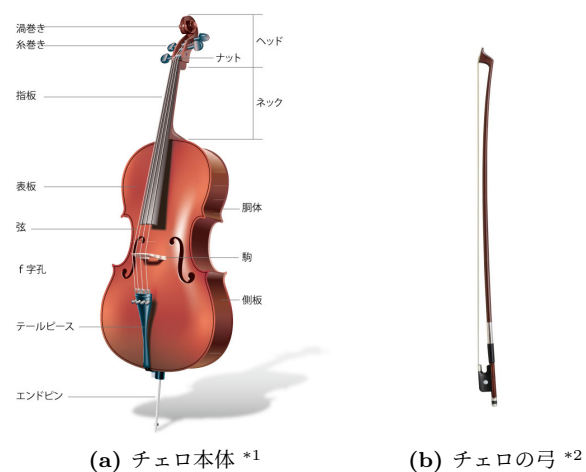


図 1: チェロ本体と弓

^{†1} 現在, 熊本大学

^{†2} 現在, オムロンサイニクエクス株式会社

^{*1} http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/music/saxophone/was_4r/index-en.htm

^{*1} <http://cello-classroom.com/> チェロの知識/

^{*2} http://www.sugito-bow.co.jp/product/product_cello.html

D3, および A3 に調弦され, よく使用される音域は C2~G4 程度 (国際式) である. また, 図 1(b) の弓において上側を弓先, 下側を弓元といい, 弦と弓の毛との接点が弓元から弓先へ移動するように弾くことをダウンボウ (下げ弓), その反対に動かして弾くことをアップボウ (上げ弓) という.

3. 関連研究

3.1 ヴァイオリン演奏ロボット (慶熙大学校)[10]

このロボットでは外部からのノイズに強い電子ヴァイオリンを採用している. 6 自由度ロボットアームによって右手の運弓部分のみを自動化し, 弓の速さや弓を押し当てる強さ, 弓と弦が接触する点を変化させて演奏することができる. このロボットシステムではセンサで計測した弓にかかる力のフィードバックにより, 弓を押し当てる強さを制御している. この研究では, 弓の速度の変化が音質に与える影響の評価を目的としているため, 実際に曲を演奏したり, 人とロボットの相互作用などについては触れられていない.

3.2 楽器自動演奏システム MUBOT (電気通信大学)[11]

MUBOT (MUscian roBOT) は電気通信大学の楽器の自動演奏システムである. 2 台のリコーダ (アルト・ソプラノ) とヴァイオリン, チェロの計 4 台の楽器での合奏に成功しており, このうちヴァイオリン MUBOT とチェロ MUBOT はどちらも運弓機構と運指機構から成る.

運弓機構は, 3 つの独立したアクチュエータおよびリンク機構・パンタグラフ機構により実現され, 楽器本体あるいは運弓機構の回転により移弦を可能としている.

運指機構はペンシル型エアシリンダを各弦の半音ごとの位置に配置し, チェロの運指機構は全体がわずかに弦方向に動くことで弦長を変化させ, ビブラートの効果を出せるようになっている.

3.3 本研究の自動運指および運弓支援ロボット

ロボットに使われるアクチュエータには, 電動式 (モータやソレノイド) および空気圧式などがあるが, 空気圧式は必要な機構が多いため装置全体が大きくなり, ソレノイドは小型であるが消費電力や発熱が大きいなどの問題点があった.

本研究で作製した半自動楽器演奏ロボットは, 人とロボットとのインタラクションを目的としているため, ロボットを使用した状態で人が実際に演奏できることが重要である. 作製したロボットではサーボモータを用いることで空気圧式よりも省スペースでソレノイドよりも省電力で駆動できるようにした. また, 人間の身体に干渉せず, 演奏に支障をきたすことのないように構造になるように設計を行った.

4. 提案ロボット

4.1 自動運指機構

図 2 に自動運指機構を取り付けたチェロの概観を示す. 自動押弦機構は, 押弦部分とそれを支える土台部分から成っている. これらは主にアクリル板と PLA 樹脂の部品からできており, サーボモータでアクリル棒を押すことで押弦している. この機構は, いくつかのネジを外すことですぐに取り外すこともでき, ロボットの助けを借りて演奏したい時のみ使用することが可能である. このロボットで演奏可能音域は 2 オクターブほどで, その音域に合わせるように調整することで様々な楽曲を演奏できる.

土台部分

押弦部分を取り付ける土台としての役割を担っているのが図 3 の部品である. これはネックの根本とナット付近に配置した PLA 樹脂の部品をアクリル板で繋いだものである. 楽器のネックを取り囲むような構造の PLA 樹脂の部品によって, 楽器に直接接着したり穴を開けることなく固定している. そのため, 土台の部品は簡単に取付・取外しできる. 左右の透明なアクリル板には押弦機構の取り付けのために穴をあけ, この縦長の穴に沿って押弦位置を調整することでピッチの大幅なずれを抑えられるようにしている.

押弦部分

図 4 と図 5 に今回作製した押弦部分を示す. 図 4 は押弦部分の模式図で, 図 4(a) は押弦部分 1 セット, 図 4(b) は 6 セット全て取り付けられた状態のものである. このロボットの押弦部分は, 本研究室で作製されたギターロボット [7] に採用されている機構を参考に作製した.

今回ロボットに用いたサーボモータは FlashHobby の FH-D9257 である. このサーボモータのトルクは 6.0V 駆動時に 4.20kg・cm, 寸法は 36.0 × 15.3 × 21.8mm, 重さは 23.6g となっている. サーボモータの出力軸にサーボホー

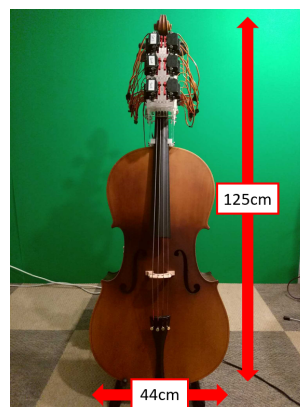


図 2: 作製したチェロロボットの概観

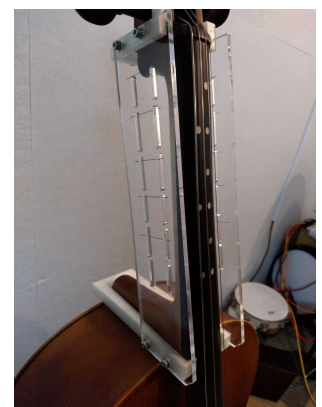


図 3: 押弦部分取付のための土台部品

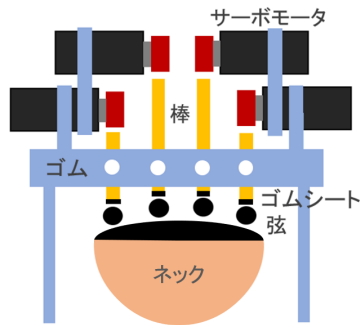
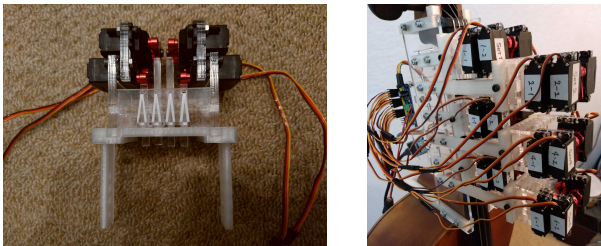


図 4: 押弦機構の模式図



(a) 作製した機構 (1 セット分) (b) 押弦機構 6 セット取付時

図 5: チェロロボットの押弦機構

ンを取り付け、サーボホーンが回転してアクリル板の棒 (図 4 の黄色) を直接押さえ、その棒がチェロの弦を押さえることで押弦する仕組みになっている。棒の先にはゴムシートを取り付けて押弦時に弦と接触して生じるノイズを防ぎ、棒の長さは各音に対して適切な長さとなるように調整した。特に一番高い A 線 (1 弦) は、楽器の構造上他の弦よりも弦高が低めになっており、棒の長さが少し長めになっている。押弦しない時に棒を一定の位置に戻すためにゴム (図 4 中央付近の白い部分) を用いている。押弦するとこのゴムが伸び、そこからサーボホーンを元の位置に戻すと、このゴムの張力によりアクリルの棒を引き戻される。

制御回路およびマイコンプログラム

図 6 と図 7 にロボットの制御回路を示す。図 6 は制御回路のシステム図で、図 7 は実際に作製し使用した制御回路である。マイコンには M5Stack 社の ATOM Matrix を、サーボドライバには NXP 社の PCA9685 を用いた。ロボットのサーボモータの動作には PWM 制御を利用している。PWM (Pulse Width Modulation) とは、一定電圧の入力から、パルス列のオンとオフの一定周期を作り、オンの時間幅を変化させる電力制御方式のことである。

マイコンでは、PC の MIDI シーケンサソフトから送られた MIDI 信号を読み取り、その信号内のノート番号に応じて対応するサーボモータを PWM 制御によって動作させている。音域外の音は音域内に収まるようにオクターブ上げる、もしくは下げる処理を行うようになっているため、およそ 2 オクターブ以上の跳躍を伴う楽曲でない限り、元のメロディの形を崩さずに演奏できる。サーボモータの制

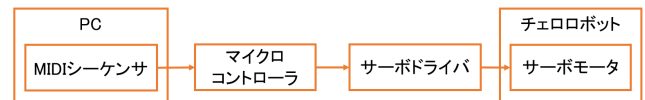
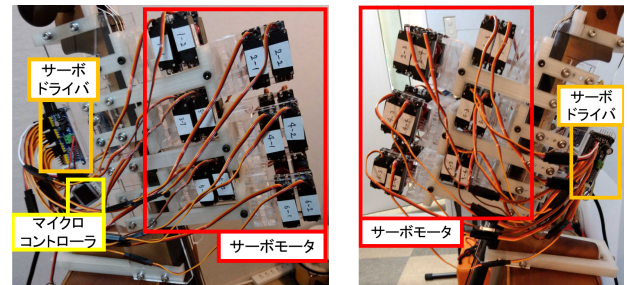


図 6: 制御回路のシステム図



(a) ロボットを左から見た図 (b) ロボットを右から見た図

図 7: 作製した制御回路

御において、ノートオン時とノートオフ時のサーボホーンの角度をそれぞれ決めておく必要があるが、それらはプログラム内で予め設定されている。

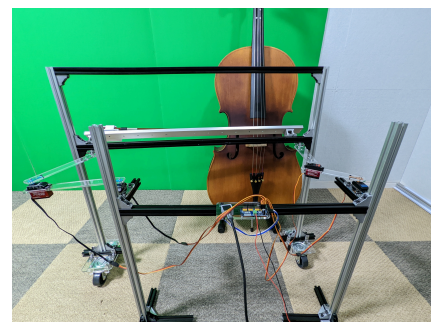
4.2 運弓支援機構

4.2.1 支援対象の運弓動作

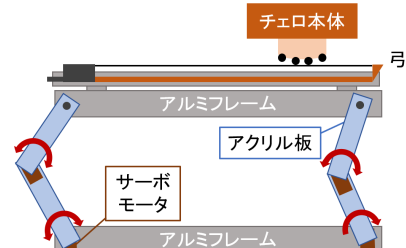
擦弦楽器の運弓技術は様々なものがあるが、楽器演奏で最低限必要な 2 つの動作の実現に焦点を当てた。具体的には、「単一の弦での直線動作」および「移弦動作」である。

4.2.2 機構の概観

図 8(a) および図 8(b) に、作製した機構の概観とその模式図を示す。この機構には、アルミフレームとアクリル板およびサーボモータ 4 つを使用した。



(a) 機構の概観



(b) 機構の模式図

図 8: 運弓支援機構の概観と模式図

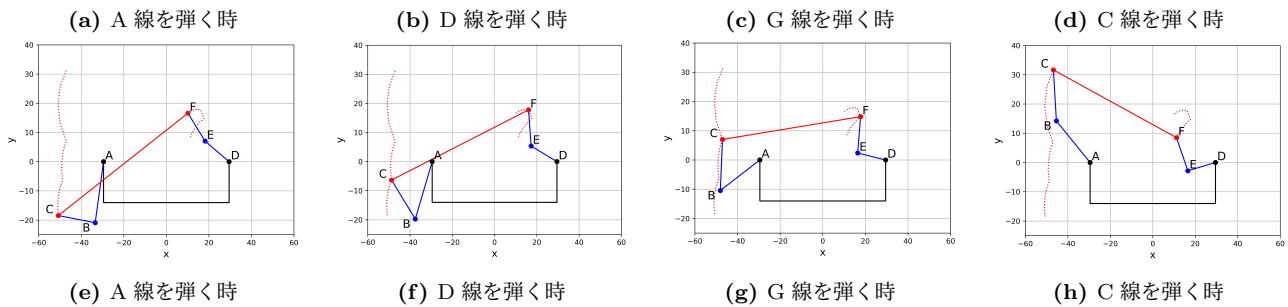
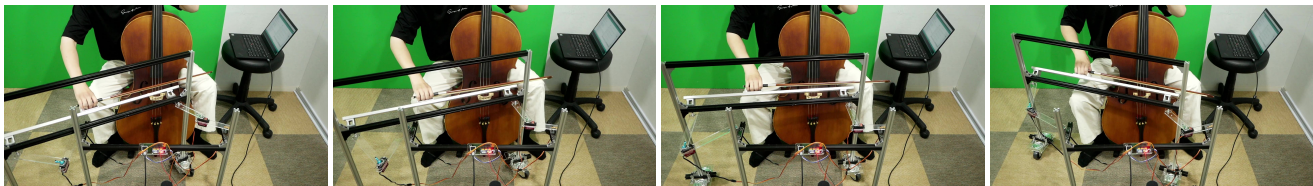


図 9: 各弦を弾く際の機構の状態

4.2.3 単一の弦での直線動作

直線動作の実現には、アルミ製の直線ガイドレールを使用した。このレールに沿ってキャリッジを滑らせると直線動作を行える。キャリッジと弓との接続(図 11 参照)には、3D プリンタで作製した PLA 樹脂のパーツを使用した。また、その接続部には弓が楽器本体に対して上下する可動域を持たせることで、人が演奏する際に適切な圧力で擦弦できるようにした。

4.2.4 移弦動作

ハードウェア

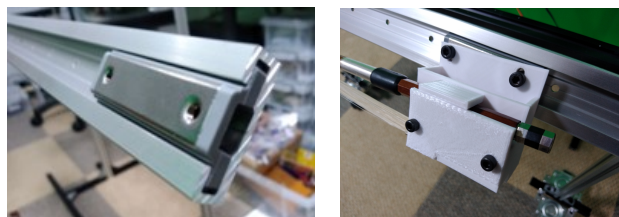
移弦とは、演奏の途中で異なる弦を弾くために弓の傾きを変える動作である。この機構では、計 6 つの関節を持ったリンク機構を用いて、前述のガイドレールを各弦を弾く

ために適切な位置まで水平に移動させることで移弦を実現した。6 関節のうち、4 つの関節にサーボモータを使用して角度制御を行っている。

また、ガイドレールを移動しやすくするために、このアルミフレームの足元にはキャスターを左右に 2 つずつの計 4 つ取り付けた。これらは自作の亚克力製の部品を介して、アルミフレームと接続している。

ソフトウェア

サーボモータの制御には自動運指機構と同じマイコンを用いた。あらかじめ手動で機構を動かして各弦を弾く際の各関節の角度を計測し、それを基にサーボモータの回転角を決定しておく。機構動作時には、シリアルモニタからいずれかの弦を指定するとそれに対応する角度に動き、ガイドレールが所望の位置に移動するようになっている。



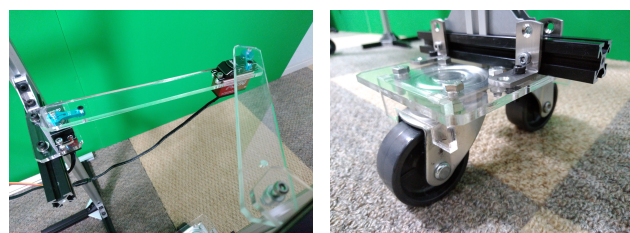
(a) ガイドレールとキャリッジ (b) キャリッジと弓の接続部

図 10: 作製機構での弓の手元周辺の構造

4.2.5 各弦を弾く際の弓の角度

運弓支援機構を用いて各弦を弾く際の直線ガイドレールおよびリンク機構の動きを、図 9 に示す。図 9(a) (d) は、実際に機構を動作させて各弦を弾いた時の様子である。(e) (h) は機構の動きをシミュレーションした図であり、A-D はアルミフレーム(黒)、A-B-C および D-E-F は亚克力板のリンク(青)、C-F は前述の直線ガイドレール(赤)を表している。

また、単一の弦を弾ける弓の角度はただ一通りではなく、図 12 に示すようにある程度の範囲に収まっていれば特定の弦のみを弾くことができる。特に、両端の 2 弦では他の 2 弦に比べて、その範囲が広がる。



(a) リンク機構の一部 (b) 機構の足元の可動部

図 11: 移弦動作を行うための機構

5. 実験

5.1 自動運指機構

実験内容

自動押弦機構で押弦した際の音を録音し、十分に押弦で

きているかを音の波形の比較や分析によって確かめる。

録音マイクは Blue の Yeti BM400MB, 録音ソフトはフリーソフトの Audacity を使用した。マイクとの距離を維持するためチェロは楽器用スタンドに固定し, 楽器の f 字孔 (図 1(a) 参照) とマイクとの水平距離は 20cm とする。各音の録音時間を揃えるため, 演奏時にはメトロノームを使用してそれぞれ 3 秒ずつ録音する。演奏の際, 弓はすべてダウンボウ (弦との接点が弓元から弓先へ移動するように演奏) に統一する。録音時のサンプリング周波数は 44.1[kHz] である。録音した音は振幅が -1 から 1 までの範囲になるよう正規化を行い, その結果得られた波形。ロボットで押弦した各音の波形に対する比較対象は, 同じ弦の開放弦の音の波形や, 人間が押弦した際の図 13 および図 14 の波形とする。

押弦の程度による音の波形の違いについて, 人間が押弦した時の例で説明する。図 13 は十分に押弦できている時の波形, および図 14 は押弦が不十分な時の波形であり, どちらも人間が押弦して A2 の音を鳴らした際の波形である。図 13 および図 14 の録音波形と一部拡大波形のグラフの縦軸は振幅 (amplitude), 横軸は時間 [s] である。周波数スペクトルのグラフの縦軸は周波数スペクトルの強度 [dB], 横軸は周波数 [Hz] である。周波数スペクトルのグラフ中の赤い線は, 比較の基準となる「平均律での周波数」を示しており, ロボットで押弦した際のスペクトルのピーク周波数がこの基準からどの程度ずれているかを確認するために表示してある。

表 1 および表 2 はそれぞれ, 波形の立ち上がり時間およびピーク周波数と基準の周波数との差を図 13 および図 14 の波形に対してまとめたものである。ここでの「立ち上がり時間」とは, 音が鳴って振幅が増加し始めてから振幅が安定し始めるまでにかかる時間のことを指している (図 15 参照)。

図 13 および図 14 のそれぞれの録音波形において, 押弦が十分な場合は不十分な場合に比べて波形の振幅が安定していることが分かる。録音波形の一部を拡大波形ではその違いがより分かりやすくなる。図 13 および図 14 の一部拡大の波形において, 押弦が十分な時は振幅が安定していて周期的な波形であるが, 不十分な時は振幅や波の形状が時間とともに変化して安定せず, 波形が周期的ではなくなっていることが分かる。また, 図 13 および図 14 の波形の周波数スペクトルからは目立った違いはなく, 表 2 から周

波数のずれは両者に大きな違いは見られない。自動運指機構で十分に押弦できているかは, 図 13, 図 14, および押弦していない状態である開放弦の波形やスペクトルと比較して考察する。

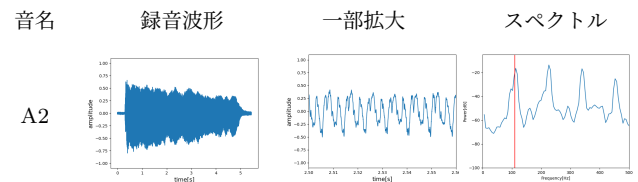


図 13: 押弦が十分な場合の録音波形, 一部拡大波形, および周波数スペクトル

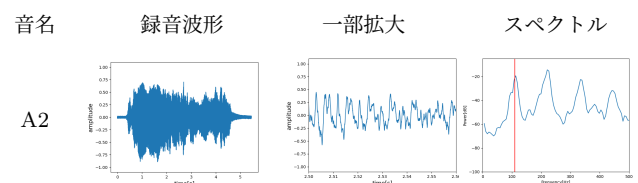


図 14: 押弦が不十分な場合の録音波形, 一部拡大波形, および周波数スペクトル

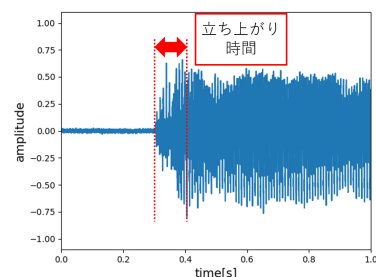


図 15: 録音波形の立ち上がり時間。ここでは, 音が鳴って振幅が増加し始めてから, 振幅が安定し始めるまでにかかる時間のことを指している。

表 1: 録音波形の立ち上がり時間の比較

	立ち上がり時間 [s]
十分な押弦	0.104
不十分な押弦	0.598

表 2: 平均律での周波数とピーク周波数の比較

	平均律 [Hz](①)	ピーク周波数 [Hz](②)	周波数の差 [Hz](②-①)
十分な押弦	110.0	114	4
不十分な押弦	110.0	112	2

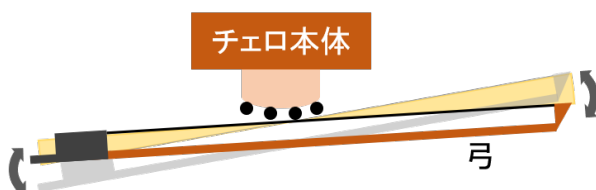


図 12: 単一の弦を弾く際の弓の角度の範囲

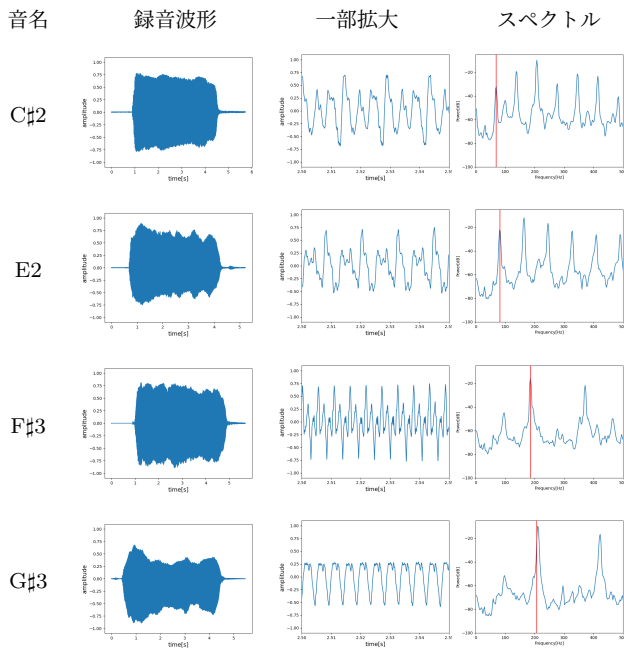


図 16: 実験結果の一部抜粋

実験結果

自動運指機構の音域内の音について、ロボットで押弦した際の音の波形およびスペクトルの一部を抜粋したものを図 16 に示す。各グラフは録音したデータを元にプロットしたものである。録音波形と一部拡大波形のグラフの縦軸は振幅 (amplitude)、横軸は時間 [s] である。周波数スペクトルのグラフの縦軸は周波数スペクトルの強度 [dB]、横軸は周波数 [Hz] である。また、表 3 および表 4 はそれぞれ、録音波形の立ち上がり時間およびピーク周波数と基準の周波数との差をまとめたものである。

考察

どの音の一部拡大波形においても安定した振幅をもった周期的な波形が見られ、一部拡大波形から、音が高くなるにつれて同じ時間で観測できる周期的な波の数が増え、周波数が大きくなっている様子も確認できた。これらの一部拡大波形のうち、図 16 の G#3 は波形の振幅が他の波形よりも小さく、開放弦および図 13 の波形とは形状が少し異なっている。これは図 16 の G#3 の録音波形にも表れており、同じ弦の開放弦 D3 の録音波形のような一定の振幅が保たれていないことが分かる。表 4 より、G#3 のスペクトルのピーク周波数のずれが最も大きく、これは押弦位置が弦長が短くなる方向、すなわち駒のほうに少しずれていると考えられ、弦を真上から垂直に押弦できていない可能性がある。このことから、D 線 (2 弦) の G#3 に対応する部分の押弦が十分ではなく、改善の余地があると考えられる。

また、図 16 の E2 および図 16 の F#3 の録音波形において、発音時の最初の振幅が大きく、時間の経過とともに振幅が少し小さくなっているが、これは弓元から弓先に移動するにつれて力がかかりにくくなる弓の性質が関係してい

表 3: 各音の録音波形の立ち上がり時間

弦	音名 (国際式)	立ち上がり時間 [s]
C 線	C2	0.141
	C#2	0.175
	D2	0.395
	D#2	0.258
	E2	0.464
	F2	0.155
	F#2	0.148
G 線	G2	0.279
	G#2	0.323
	A2	0.478
	A#2	0.523
	B2	0.127
	C3	0.275
	C#3	0.251
D 線	D3	0.113
	D#3	0.292
	E3	0.364
	F3	0.179
	F#3	0.178
	G3	0.395
	G#3	0.309
A 線	A3	0.201
	A#3	0.406
	B3	0.557
	C4	0.418
	C#4	0.364
	D4	0.213
	D#4	0.481

るのではないかと考えられる。

表 1 および表 3 より、録音波形の音の立ち上がりは押弦位置によってばらつきがあり、表 3 における F2 の 0.155[s]、F#2 の 0.148[s] および B2 の 0.127[s] のように、押弦が十分である場合の 0.104[s] に近い値をとっている音がある一方で、A#2 の 0.523[s] および B3 の 0.557[s] のように押弦が不十分である場合の 0.598[s] に近い値をとるものがあることが分かる。録音波形および一部拡大波形において安定した振幅をもった周期的な波形の音であっても、押弦が不十分な場合に近い立ち上がり時間 (0.598[s]) の音があることから、立ち上がり時間が大きくても必ずしも不規則な弦の振動が生じているとは限らないことが分かった。しかし、表 1 より、押弦が不十分であった場合に立ち上がり時間を大きくなっていったことから、押弦が不十分で弦の振動が安定しないことによって振幅が大きくなるまでに時間を要している可能性もある。また、今回は実験において押弦動作はロボットによるものであったが運弓動作は人が行ったため、それに起因するばらつきが生じていることも考えられる。

周波数スペクトルのグラフからは、基準音の周波数を示す赤い線とスペクトルのピーク周波数の差はほとんど確認

表 4: 各音の周波数スペクトルにおける最初のピーク値に対応する周波数と、同一音名の平均律での周波数の比較

弦	音名 (国際式)	平均律 [Hz](①)	ピーク周波数 [Hz](②)	周波数の差 [Hz] (②-①)
C 線	C2	65.4	66	0.6
	C#2	69.2	69	-0.2
	D2	73.4	73	-0.4
	D#2	77.7	78	0.3
	E2	82.4	82	-0.4
	F2	87.3	88	0.7
G 線	F#2	92.4	93	0.6
	G2	97.9	98	0.1
	G#2	103.8	104	0.2
	A2	110.0	110	0.0
	A#2	116.5	116	-0.5
	B2	123.4	125	1.6
	C3	130.8	130	-0.8
D 線	C#3	138.5	141	2.6
	D3	146.8	147	0.2
	D#3	155.5	156	0.5
	E3	164.8	166	1.2
	F3	174.6	174	-0.6
	F#3	184.9	186	1.1
	G3	195.9	195	-0.9
A 線	G#3	207.6	211	3.4
	A3	220.0	221	1.0
	A#3	233.0	236	3.0
	B3	246.9	248	1.1
	C4	261.6	264	2.4
	C#4	277.1	278	0.9
	D4	293.6	296	2.4
	D#4	311.1	314	2.9

できなかった。そのため、表 4 の値から、基準の周波数とピーク周波数の差を確認する。

表 4 より、基準の周波数とスペクトルのピーク周波数の差は最大でも 3.4[Hz] 程度であり、周波数のずれが抑えられていることが分かる。C 線 (4 弦) および G 線 (3 弦) では基準音に対する周波数のずれは特に小さく、C#3 以外では差が 1 以下になっている。D 線 (2 弦) および A 線 (1 弦) のように音が高くなると周波数の差も大きくなる傾向が見られるが、これは表 4 の平均律の周波数 (基準音) から分かるように、音が高くなると隣り合う音同士の周波数の差が大きくなり、音が低い場合と同じだけ押弦位置がずれたとしても、相対的に基準音に対する周波数のずれが大きくなるからだと考えられる。これらから、正しい押弦位置とほとんど一致した箇所を押弦できており、押弦機構の移動によりピッチ (音高) を調整を可能にする構造は十分機能していると考えられる。

以上のことから、D 線の G#3 以外のほとんどの部分で正しく押弦できており、運指機構は機能していると考えら

れる。

5.2 運弓支援機構

実験内容

作製した運弓支援機構での移弦について、隣り合う弦への移弦の速さを計測によって調べる。また、楽曲の BPM がどのくらいであれば演奏可能かを考察する。

移弦の所要時間の測定は、A 線-D 線間、D 線-G 線間、G 線-C 線間の 3 パターンで行う。それぞれのパターンでの移弦は、隣り合った弦への移動となる。機構を用いた移弦を 1 回行い、その所要時間を各パターンで計測する。これを高弦側から低弦側、およびその逆方向の移弦を各 5 回ずつの計 10 回計測する。一度の計測中に繰り返し移弦すると機構自体の揺れが大きくなるため、各 1 回ずつの移弦としている。そして、PC から移弦開始の入力を与えたタイミングと同時に計測を開始し、所望の位置に移動し終わったタイミングで計測を止める。また、それと同時に、サーボモータ駆動の直前および直後の時刻を Arduino のシリアルモニタに出力するようにする。これらの値の差から、移弦時のサーボモータの駆動にかかる時間を求める。

実験結果

人による測定値、シリアルモニタの時刻から計算値、および各パターンにおけるそれらの平均値をまとめたを表 5 に示す。A 線 ↔ D 線、D 線 ↔ G 線の 2 パターンではほとんど同じような結果となり、G 線 ↔ C 線ではそれらよりも時間がかかる結果となった。

考察

表 5 において、A 線 ↔ D 線、D 線 ↔ G 線の 2 パターンでは近い数値となり、G 線 ↔ C 線はそれよりも大きな値をとっている。これは、最も低い C 線へと移弦する際のサーボモータの回転量が他の場合よりも大きいため、各移弦の際に必要なサーボモータの回転角度の違いによるものだと考えられる。

また、人が測定した場合とシリアルモニタに表示させた場合を比べると、A 線 ↔ D 線および D 線 ↔ G 線では約 0.2s、G 線 ↔ C 線では約 0.1s の差がある。これは、人が計測した数値には、人の反応の遅れや PC から信号送信とサーボモータ駆動までのタイムラグなどが含まれているが、シリアルモニタの数値からの計算値にはサーボモータ駆動による移弦動作のみに近い時間を表しているからではないかと考えられる。

表 6 はいくつかの BPM での 4 分・8 分・16 分音符にかかる時間をまとめたものである。楽曲演奏するには、少なくとも移弦箇所での音符の音価よりも短い時間で移弦する必要がある。これらの値を参考に、楽曲を演奏する場合にどの程度の BPM ならこの機構が有効かを考える。ここ

表 5: 作製した運弓支援機構での移弦の所要時間

弦	人による測定		シリアルモニタ	
	測定値 [s]	平均 [s]	計算値 [s]	平均 [s]
A 線 ↔ D 線	0.41	0.45	0.218	0.243
	0.46		0.284	
	0.46		0.260	
	0.47		0.225	
	0.45		0.234	
	0.45		0.243	
	0.45		0.253	
	0.43		0.251	
	0.45		0.240	
	0.43		0.222	
D 線 ↔ G 線	0.44	0.45	0.207	0.222
	0.47		0.229	
	0.45		0.212	
	0.47		0.244	
	0.43		0.208	
	0.44		0.219	
	0.45		0.258	
	0.45		0.239	
	0.47		0.222	
	0.45		0.182	
G 線 ↔ C 線	0.53	0.58	0.475	0.469
	0.60		0.474	
	0.56		0.474	
	0.60		0.484	
	0.59		0.467	
	0.58		0.483	
	0.57		0.466	
	0.60		0.469	
	0.60		0.439	
	0.61		0.461	

表 6: BPM ごとの 4 分・8 分・16 分音符にかかる時間

BPM	60	80	100	120
4 分音符にかか る時間 [s]	1.0000	0.7500	0.6000	0.5000
8 分音符にかか る時間 [s]	0.5000	0.3750	0.3000	0.2500
16 分音符にかか る時間 [s]	0.2500	0.1875	0.1500	0.1250

で、表 5 のシリアルモニタからの計算値が移弦のみの時間に近いとすると、A 線 ↔ D 線および D 線 ↔ G 線では 0.3s 以下、G 線 ↔ C 線では 0.5s 以下に収まっていることになる。この場合において、A 線～G 線では BPM80 の 8 分音符間での移弦、G 線～C 線では BPM100 程度の 4 分音符間での移弦であれば、少し余裕をもって動作できると考えられる。例としては、きらきら星などのシンプルなりズムであまり早くない曲は演奏できるのではないと思われる。

6. まとめ

本研究では、人間とロボットとの協同による音楽演奏を目的として、チェロの運指自動化および運弓支援機構の試作を行った。

自動運指機構ではどの押弦位置でも一定の周期を持つ安定した波形が確認された。波形の立ち上がり時間が正しく押弦できていない例に近い値だとしても、正しく押弦できている場合もあり、立ち上がり時間の大小だけでは押弦の程度を判断できないことが分かった。また、基準とした平均律との周波数スペクトルのずれは最大でも 3.4Hz であり、この自動運指機構によって楽曲演奏が可能であった。

運弓支援機構では直線的な運弓や移弦などの基本的な動作の支援が可能であることを確認した。ただし、A 線～G 線では BPM80 の 8 分音符間での移弦、G 線～C 線では BPM100 程度の 4 分音符間での移弦は行えると考えられるが、これ以上の BPM もしくは細かい音符間での移弦は現状難しいため、この点は今後改善していく必要がある。

参考文献

- [1] Yoshihiro Kusuda: Toyota's violin-playing robot, *Industrial Robot*, Vol.35, No.6, pp.504-506, 2008.
- [2] R. Bloss: Robot Show 2009: music to the ears, literally, *Industrial Robot*, Vol.37, No.1, pp.8-12, 2010.
- [3] J. Solis, K. Taniguchi, T. Ninomiya, T. Yamamoto, and A. Takahashi: "Development of Waseda flutist Robot WF-4RIV: Implementation of auditory feedback system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3654-3659, 2008.
- [4] Kuroda J., Koutaki G.: Sensing Control Parameters of Flute from Microphone Sound Based on Machine Learning from Robotic Performer. *Sensors*, Vol.22, No.5, pp.2074, 2022.
- [5] 小笠原 稜, 上瀧 剛: コード進行と小節数の条件制約下での深層学習を用いたジャズ音楽の自動生成の検討, 第 132 回音楽情報科学研究発表会, No.12, pp.1-5, 2021.
- [6] Byambatsogt, G., Choimaa, L., Koutaki, G.: Guitar Chord Sensing and Recognition Using Multi-Task Learning and Physical Data Augmentation with Robotics. *Sensors*, Vol.20, No.21, pp.6077, 2020.
- [7] 児玉 慶太, 上瀧 剛: ソレノイドを用いたギター演奏ロボットの音の強弱可能な撥弦機構の開発, 第 128 回音楽情報科学研究発表会, No.1, pp.1-6, 2021.
- [8] 上瀧 剛: 自動運指機構による楽器演奏支援システムの試作, 第 132 回音楽情報科学研究発表会, No.3, pp.1-4, 2021.
- [9] 陶山 祐太, 上瀧 剛: スマート頭部管による自動ピッチ補正機構の検討, 第 132 回音楽情報科学研究発表会, No.1, pp.1-6, 2021.
- [10] Wonse Jo, Hyeonjun Park, Bumjoo Lee, Donghan Kim: A Study on Improving Sound Quality of Violin Playing Robot, *Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, pp.185-191, 2015.
- [11] 梶谷誠: 音楽を奏でるロボット, *電学誌*, Vol.118, No.1, pp.13-16, 1998.