

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

児玉 慶太^{†1} 上瀧 剛^{†1}

概要：楽器を演奏し、音楽を通して人間とコミュニケーションを行うロボットはこれまでに多く製作されてきた。本研究ではアコースティックギターを演奏し、人とセッションや即興演奏を行うことを目標とするロボットを製作する。ロボットがギターを演奏するためには、弦を押さえて音高を変化させる押弦機構、および弦を撥弦して音を鳴らす撥弦機構が必要となる。本論文では後者の撥弦機構の開発について述べる。開発する撥弦機構は、基本的な演奏表現である音の強弱をソレノイドというアクチュエータを利用したコンパクトなシステムで実現することを目指す。実験では、撥弦機構で使用するソレノイドの特性の調査、および撥弦機構を実装し、人間の撥弦と比較してどの程度音に強弱がついているかを確認した。実験の結果、今回製作した撥弦機構は音に強弱をつけることができているが、人間ほど明確に強弱がついていないことがわかった。今後はより明確な強弱をつけることができるよう撥弦機構を改良する必要がある。

1. はじめに

楽器を演奏するロボットはこれまでに多く開発されている。例えば、フルートを吹くロボット [1]、サクスを吹くロボット [2] がある。これらのロボットはどちらも人型をしたものであり、目や耳などの部位を人間と近い形で機械的に再現しており、音楽を通して人と自然なコミュニケーションを行うことを目標としている。

本研究も同様に人とコミュニケーションを行うことを目標とし、最終的にはセッションや即興演奏可能なアコースティックギターを演奏するロボットを開発する。これを開発するためには大きく分けて、音楽理論に添った譜面を生成するソフトウェア、および自然な演奏をすることができるハードウェアの2種類の開発が必要となる。本論文は後者のハードウェアの開発に関するものである。

ギター演奏ロボットのハードウェア開発では、押弦するための機構や撥弦するための機構の開発が必要である。そして、先行研究にてこれらの機構はすでに開発済である。しかし、音の強弱といった細かい演奏表現に関してはまだ発展途上である。そこで本研究では、音に強弱をつけて撥弦することが可能な撥弦機構の開発について述べる。

具体的には、弦を撥弦するための道具であるピックをつかむ力を制御することで強弱をつける。2章で紹介する先行研究で既にピックを掴む力を制御する研究が行われている

が、装置が大がかりであり、音高を変化させ演奏する部分まで実装されていないという課題があった。そこで本研究では、ソレノイドというアクチュエータを用いてシンプルな撥弦機構を開発し、それを用いて音高を変えた演奏を行うことを将来的に目指す。

ソレノイドに対してはPWMによる制御を行っており、検証実験にてソレノイドの発熱と出力の関係、PWMのデューティ比と出力の関係、およびPWMのデューティ比と音量の関係を明らかにした。

2. 先行研究と本研究の位置づけ

弦を弾いて音を鳴らす撥弦楽器を演奏するロボットの開発はこれまでも行われてきている。代表的なものとして図1に示すGuitarBotがある[3]。GuitarBotは4つの弦が張られた独自の演奏機構を持ち、弦を押さえる位置をスライドギターのように変化させることで、エレキギターと同様の音を出し演奏する。また、図2のようなエレキベースを演奏するロボットであるMechBassというロボットもある[4]。このロボットはGuitarBotと同様の機構を利用して演奏を行う。これらのロボットは実際に楽器を演奏するのではなく、弦を張った機構を製作し、それを撥弦することで音を鳴らしている。

実際に楽器を演奏するロボットとして、図3に示すウクレレの自動演奏ロボットがある[5]。このロボットは弦を弾くための道具であるピックを掴む力を空気圧を用いて変化させることで音に強弱をつけることができる。しかし、押

^{†1} 現在、熊本大学
Presently with Kumamoto University

弦を行い音高を変えて演奏することはまだできていない。

これまでに紹介した先行研究と本研究の比較を表1に示す。本研究は実際のアコースティックギターを演奏することを目標としているため、撥弦機構にはウクレレロボットと同様の機構を用いることにした。ウクレレロボットは空気圧でピックを掴む力を変えていたが、コンプレッサや電磁弁などを取り付ける必要があり、装置が大がかりになってしまう。よって本研究ではよりシンプルな構造で力の制御を行うことを目指す。具体的には電気で動作をするソレノイドというアクチュエータを使用し、その出力の制御を行う。これにより、PWM(Pulse Width Modulation)を利用してソレノイドにかかる電圧を制御するだけとなるため装置はシンプルになる。また、本論文では達成していないが、最終的にはウクレレロボットで実装されてなかった押弦による音高の制御も行い演奏することを目指す。

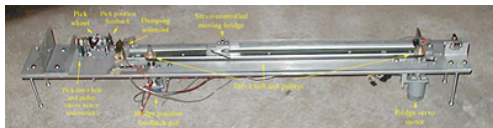


図 1: GuitarBot

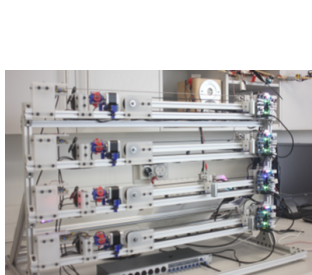


図 2: MechBass

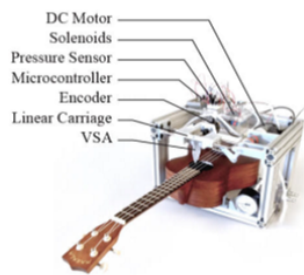


図 3: ウクレレロボット

表 1: 先行研究と本研究の比較

	演奏楽器	演奏手法	演奏の可否
GuitarBot	エレキギター	独自機構を使用	可
MechBass	エレキベース	独自機構を使用	可
ウクレレロボット	ウクレレ	実際の楽器を使用	不可
本研究	アコースティックギター	実際の楽器を使用	実現を目指す

3. ソレノイドについて

ソレノイドは直線動作を行うアクチュエータである。電磁石と鉄心から構成されるシンプルなつくりになっており、電流を流すとコイルに磁界が発生し、中の鉄心が引き込まれることで直線動作を行う。

今回使用したソレノイド (CA-134807 コウデン社製) を図4に示す。図4(a)の状態がオフの状態、電流が流れるとオンになり、鉄心が引き込まれ、図4(b)の赤丸で囲んだ箇所が押し出され直線動作を行う。ソレノイドに対する操作は、オンとオフの切り替えしかないため、シンプルであるというメリットがあるが、それゆえに力を制御するのが難しいというデメリットもある。また、ソレノイドは動作

する際に発熱し、その発熱により特性が変化し、出力される力が低下してしまうという問題もある。

本研究では発熱による特性の変化をなるべく抑えるために放熱ホルダを開発し、力の制御を行うことを目指す。放熱ホルダに関しては後の5.1.1節で詳細を述べる。



(a) オフの状態



(b) オンの状態

図 4: 今回使用したソレノイドとその動作

4. ギター演奏ロボットのシステムについて

ギターを演奏するためには、弦を弾いて音を鳴らす撥弦機構、および弦を押さえて音高を変えるための押弦機構の2つの機構が必要となる。以下で本研究で製作したこれらの機構について説明する。押弦機構に関しては、現在試作段階であり、実験的な性能評価ができていない。

4.1 押弦機構の設計と試作

弦を押さえるための押弦機構もソレノイドを使用して製作することを目指す。現在試作している機構の模式図を図5に示す。シンプルにギターの指板の上に垂直にソレノイドを設置するような設計である。フレットの真上が最も少ない力で弦を押さえることができるため、模式図のように一列に押さえる必要があるが、弦と弦の幅は狭く、ただソレノイドを横に並べるだけでは物理的にこの設計は実現できない。

よって図6のようなパーツをアクリルをレーザーカッターで切り出して試作した。図の右側の青い点の部分をソレノイドで押さえる。これによりソレノイドを二列に設置して物理的問題を解決しつつ、実際に弦を押さえる図の左側の赤丸で囲んだ部分は一列に並び弦を押さえることが可能となる。また、青丸で囲んだ部分のように輪ゴムを通すことで、張力を利用して戻りの力を与えている。

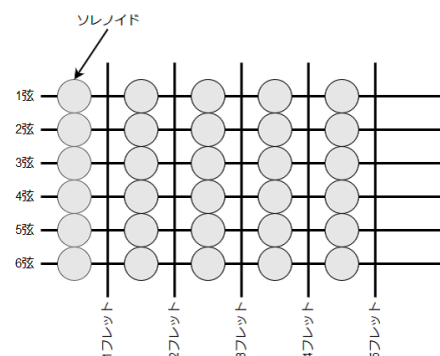


図 5: 押弦機構の模式図

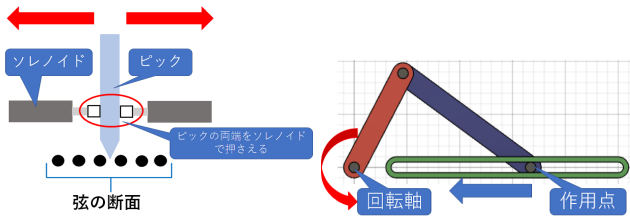


図 6: 試作した押弦機構

4.2 撥弦機構の設計と実装

弦を弾くための機構である撥弦機構の設計と実装について述べる。まず、弦を弾くピック部分の模式図は図 7(a) のようになる。図のようにピックを両サイドからソレノイドで押さえ、ギター弦に対して垂直にピックを当て、赤矢印方向に直線動作させることで音を鳴らす。直線動作はスライダクランクという回転運動を直線運動に変換する機構を用いて行う。スライダクランクとは図 7(b) のような機構である。図のように回転軸が赤矢印方向に回転することで、作用点が青色矢印方向に直線動作する。

ピック部分の機構設計は図 8 のように行った。主要なパーツはソレノイドを固定するためのホルダと実際に弦を弾くピックである。そして、これをもとにしてロボットに実装した撥弦機構が図 9 である。図中の白色のパーツはアクリルをレーザーカッターで切り出して製作したものである。ピック部分の直線動作は DC モータを利用したスライダクランク機構を製作することで実現した。



(a) ピック部分の直線動作 (b) スライダクランク機構

図 7: ピック部分の直線動作のイメージと直線動作を行うためのスライダクランク機構

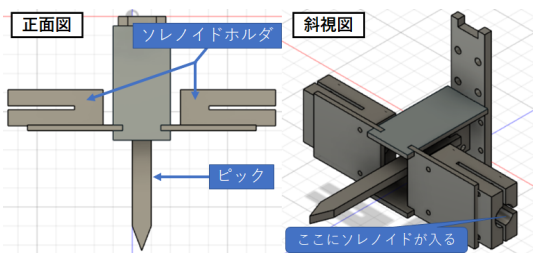


図 8: ピック部分の機構設計

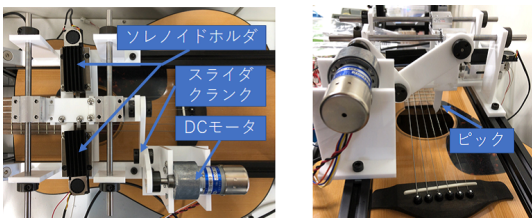


図 9: 実際に製作した撥弦機構

5. 検証実験

検証実験では以下 3 つの関係を明らかにする。

- (1) ソレノイドの発熱と出力の関係
- (2) PWM のデューティ比と出力の関係
- (3) PWM のデューティ比と音量の関係

上記 (1) では発熱により低下するソレノイドの出力を計測した。また、発熱による影響を抑えるための放熱ホルダを製作し、その性能を評価した。上記 (2) では PWM のデューティ比を変化させその際の出力の変化を計測した。上記 (3) では、ソレノイドを利用した撥弦機構をロボットに実装し、実際にデューティ比を変えて撥弦させ、その際の音量の変化を計測した。

上記 (1), (2) に関しては、図 10 のような実験装置を組み立てて実験を行った。実験に使用した機器は表 2 にまとめる。この装置により、ソレノイドから出力される力を計測することができる。また、ソレノイドにかかる電圧は 24V である。

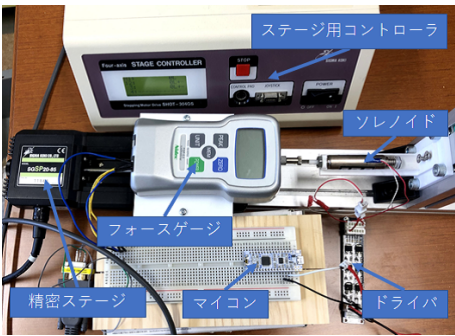


図 10: 組み立てた実験装置

表 2: 実験に使用した機器

装置の名称	型番	メーカー
ソレノイド	CA-134807	コウデン
マイコン	NUCLEO-F303K8	STMicroelectronics
ドライバ		自作品
フォースゲージ	FGP-0.5	Nidec
精密ステージ	SGSP20-85	シグマ光機
ステージ用コントローラ	SHOT-304GS	シグマ光機

5.1 ソレノイドの発熱と出力の関係

まず初めにソレノイドが動作した際に発生する発熱により、どの程度出力が低下しているかを確認した。今回は0秒から120秒まで連続動作させ、20秒ごとに出力されている力を計測した。その際の結果を以下の図11に示す。0秒の際の出力の最大値が2.4Nで、120秒後の出力の最大値が1.7Nであるため、120秒間の連続動作で出力が29.2%低下することがわかった。

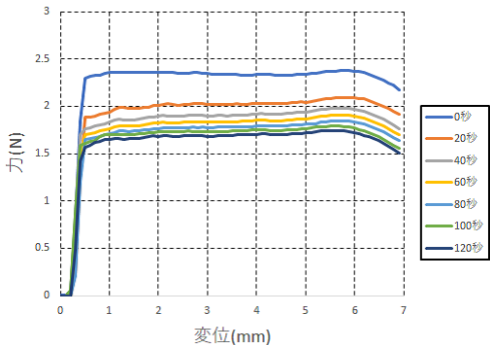


図 11: ソレノイドを0秒から120秒まで動作させた際の出力の低下

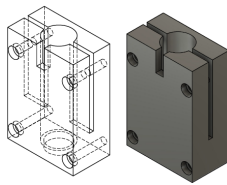
5.1.1 放熱ホルダの性能評価

5.1節の結果で示されたように、発熱による出力の低下が起きていることが確認された。この出力の低下をなるべく起こさないために、図12(a)のように設計した自作のアルミホルダとファン付きのヒートシンクを組み合わせた図12(b)のような放熱ホルダを試作した。今回はこのパーツの有用性を実験的に評価した。

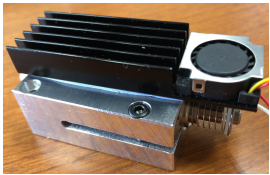
実験は表3実験条件の下で、ソレノイドを1分間オンにし、その後1分間オフにして冷却時間を設ける。冷却時間終了後のソレノイドの出力を計測するという手順で行った。また、ファン付きヒートシンクのファンは12Vで動作させる。

実験条件のPLAホルダはアルミホルダと同形状のものを3Dプリンタで製作したものである(図12(c))。これはホルダの素材にアルミを使用しなかった場合の性能を知るために製作した。また、ファン付きヒートシンクよりも強力な冷却を行った際の結果を知るために、保冷剤でホルダを冷却した場合も条件に追加した。

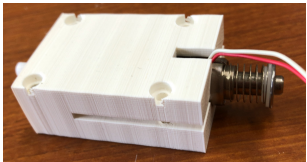
結果は図13のようになった。今回製作したパーツによる大きなメリットは見られなかったが、ファン付きヒートシンクの代わりに、保冷剤を使用して冷却した場合は良い結果になっていることがわかる。よって、今回使用しているファン付きヒートシンク以上の冷却力を付加することができれば今後より性能が改善される可能性があることが示された。



(a) アルミホルダの図面



(b) アルミホルダとファン付きヒートシンクを組み合わせて製作した放熱パーツ



(c) 実験で使った PLA ホルダ

図 12: 実験で使ったソレノイドのホルダ

表 3: 実験条件とその内容

実験条件	内容
ホルダなし	何もつけていない場合
PLA	図 12(c) の PLA パーツのみをつけた場合
PLA+ファン 12V	PLA パーツに 12V 動作のファン付きヒートシンクをつけて冷却した場合
PLA+保冷剤	PLA パーツを保冷剤で冷却した場合
アルミホルダ	図 12(a) のアルミホルダのみをつけた場合
アルミ+ファン 12V	アルミホルダに 12V 動作のファン付きヒートシンクをつけて冷却した場合 (図 12(b))
アルミ+保冷剤	アルミホルダを保冷剤で冷却した場合

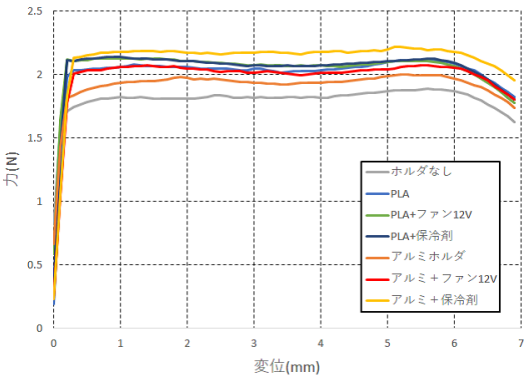


図 13: ソレノイドを1分間オン。その後、1分間オフにした直後の出力

5.2 PWM のデューティ比と出力の関係

PWM(Pulse Width Modulation) は電圧のオンとオフの時間の割合(デューティ比)を変更することで、見かけ上の電圧を変えることができる。例えば、5Vの電圧をデューティ比50%でかけた場合は、見かけ上2.5Vの電圧がかかることになる。これにより、ソレノイドからの出力を制御する。

また、PWMで制御をする際、PWMの制御周波数と同じ周波数で素子が振動し高周波ノイズが発生する。そのため、制御周波数を適切に設定することも重要である。具体的には、人間の高音における可聴域の外である20kHz程度に

設定することが望ましい。よって、今回は10kHz、15kHz、20kHzの3つの周波数で実験を行った。周波数は高いほどノイズが少ない。また、10kHzより低い周波数ではノイズが目立つため実用的でなかった。

この3つの周波数において、デューティ比を変更し、その際の出力を計測した。結果は図14のようになった。グラフの縦軸は横軸のデューティ比における出力の最大値である。図より10kHzと15kHzはほぼ同じ出力範囲となり、20kHzは10kHzと15kHzと比較して出力の範囲が狭いことがわかった。10kHzより15kHzの方がノイズが少ないため、今回は15kHzを採用した。

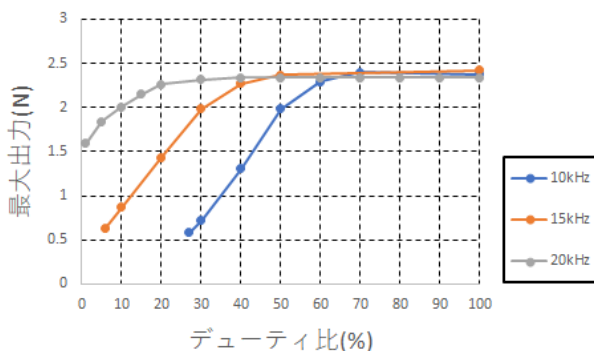


図 14: デューティ比とソレノイドの出力の関係

5.3 PWMのデューティ比と音量の関係

デューティ比を変えてソレノイドの出力を制御することで、ロボットがどの程度音に強弱をつけて撥弦できているか確認するために以下の2つの実験を行った。

- (1) 人の手で強弱をつけて撥弦をして録音
- (2) 撥弦機構を実装し、ソレノイドから出力される力を変化させて撥弦し録音

これにより、人間が撥弦した場合との比較をすることができる。

実験環境は図15のようにロボットのフレームの端のすぐ隣にマイクを設置して録音している。人の手で弾いた場合もこの環境下で録音した。実験条件は表4に示す。

結果は横軸が時間、縦軸が振幅で示される波形で示す。また、それぞれの最大音量の値を示し比較する。



図 15: 実験環境

表 4: 実験条件とその内容

実験条件	内容
録音に使用したマイク	USB コンデンサマイク (ammoon 社製 GM-888)
録音ソフト	Audacity
サンプリングレート	44.1kHz
録音方式	モノラル
録音時間	5秒
撥弦方法	ダウンストローク (6弦から1弦にかけて振り下ろす動作)

5.3.1 人が撥弦した際の音の強弱

人が強弱をつけて撥弦した際の音の波形は図16のようになった。上が強で下が弱である。この結果を見ると、強と弱で明らかに波形が異なっていることがわかる。

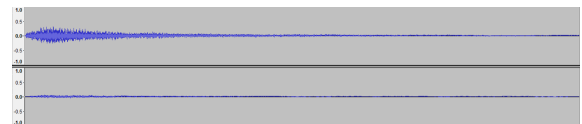


図 16: 人の手で強弱をつけた際の波形 (上が強, 下が弱)

5.3.2 撥弦機構を用いて撥弦した際の音の強弱

製作した撥弦機構を実装し、それを用いて強弱をつけて撥弦した。ソレノイドのデューティ比は0%(弱)と図14の15kHzにおける結果を参考にし、出力が最大まで上昇しきっている点である50%(強)を用いた。結果の波形は図17のようになった。上が強で下が弱である。結果より、撥弦機構での撥弦においても強と弱で振幅が異なっていることがわかる。

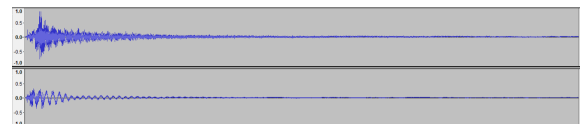


図 17: 撥弦機構で強弱をつけた際の波形 (上が強, 下が弱)

5.3.3 音量の比較

節5.3.1, 節5.3.2で、人と撥弦機構それぞれの音の強弱について、波形を示すことで視覚的に違いを示してきた。この節では具体的な数値を用いて実験結果を比較する。具体的には、それぞれの結果での最大音量を比較する。

最大音量の結果を以下の表5に示す。今回の結果における音量 (dB) の最大値は0dBである。表より、人の場合は強の最大音量が弱より13.3dB大きいことがわかる。一方、撥弦機構の場合は強の最大音量が弱より4.9dB大きいことがわかる。人の場合の結果とまだ差があるため、撥弦機構をさらに改良する必要があることがわかった。

表 5: 実験結果の最大音量の比較

撥弦方法	強弱	最大音量 (dB)	強と弱の音量差 (dB)
人の手	強	-11.1	13.3
	弱	-24.4	
撥弦機構	強	-5.3	4.9
	弱	-10.2	

5.3.4 まとめ

実証実験により明らかになった3つの関係についてそれぞれまとめる。

(1) ソレノイドの発熱と出力の関係

ソレノイドを連続で120秒間動作させた場合、動作直後と比較して出力が29.2%低下することがわかった。この低下がどれほど演奏に影響を与えるかまだ検証できていないため今後明らかにする必要がある。

(2) PWMのデューティ比と出力の関係

PWMの制御周波数は15kHzの場合がソレノイドの出力範囲も広くノイズも少ないということがわかった。

(3) PWMのデューティ比と音量の関係

現在の撥弦機構においては4.9dBの音量差を出すことができた。しかし、人間の場合は13.3dBの音量差を出しているため、まだ人間ほど強弱をつけることができていない。

6. おわりに

今回は音に強弱をつけて撥弦可能な撥弦機構を開発した。そして、検証実験によりソレノイドの発熱と出力の関係、PWMのデューティ比と出力の関係、およびPWMのデューティ比と音量の関係を明らかにした。これらの関係を明らかにすることでソレノイドの特性を理解し、ロボットに撥弦機構を実装して弦を弾き音の強弱がどの程度ついているか確認することができた。結果として、強弱をつけることができていたが、人の場合と比較して強弱が明確でないことがわかった。

今後の課題としては、より明確な強弱をつけることができる撥弦機構の開発が挙げられる。加えて、音高を変化させて演奏可能となるように押弦を行う機構の開発と実装も必要となる。

参考文献

- [1] Klaus Petersen, Jorge Solis, and Atsuo Takanishi, "Development of a Aural Real-Time Rhythmical and Harmonic Tracking to Enable the Musical Interaction with the Waseda Flutist Robot" Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [2] Jia-Yeu Lin, Mao Kawai, Yuya Nishio, Sarah Cosentino, and Atsuo Takanishi "Development of Performance System With Musical Dynamics Expression on Humanoid Saxophonist Robot" IEEE Robotics and Automation Letters Volume 4, Issue 2, pp. 1684 - 1690, 2019.
- [3] Eric Singer, Kevin Larke, David Bianciardi "LEMUR GuitarBot: MIDI Robotic String Instrument" Proceedings of New Interfaces for Musical Expression, 2003.
- [4] J. W. Murphy, J. McVay, D. A. Carnegie and A. Kapur "MechBass: A Systems Overview of a New Four - Stringed Robotic Bass Guitar" , 2012.
- [5] Austin B. Lawrence, Alexander N. Alspach, Darrin C. Bentivegna "Mechanical Implementation of a Variable-Stiffness Actuator for a Softly Strummed Ukulele" Pro-

ceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016.