

# バイオリン演奏ロボットの音程制御に関する基礎的研究

## Experimental Study on Pitch Control of a Violin Playing Robot

○伊藤 駿生, 大槻 徳士, 鈴木 聖矢, 丸山 次人

○Toshio Ito, Norihito Otsuki, Seiya Suzuki, Tsugito Maruyama

東北工業大学工学部

Tohoku Institute of Technology

キーワード : バイオリン演奏ロボット (Violin playing robot), 音程制御 (Pitch control), 運弓動作 (Bowling), 運指動作 (Finger motion), 弓圧 (Bow pressure)

連絡先 : 〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1 東北工業大学工学部知能エレクトロニクス学科 丸山 次人 TEL: 022-305-3214, FAX: 022-305-3202,

E-Mail: [t-maruyama@tohtech.ac.jp](mailto:t-maruyama@tohtech.ac.jp)

### 1. はじめに

バイオリン演奏ロボットの研究については, 電通大が 1986 年から行っており長い歴史がある<sup>1)</sup>. また 2007 年にトヨタがヒューマノイド型のバイオリン演奏ロボットを開発してデモを行い大きな反響を呼んだ<sup>2)</sup>. しかしながら, 制御工学の観点から考察した論文はあまり見当たらない.

本研究では, バイオリン演奏ロボットを開発することによって, ヒトが音をつくり出すメカニズムを制御工学の観点から考察することを目的とする. その手始めとして, 今回バイオリン演奏ロボットを製作し, 音程制御のための基礎実験を行った. 特に弓圧と弦の押付け力に着目して実験検討したので報告する.

### 2. システム構成

開発したバイオリン演奏ロボットの外観とシステム構成を図 1 と図 2 に示す. このロボットは, 弓把持・運弓機構, 弦選択・運指機構からなる.

弓把持・運弓機構は, 6 自由度のロボットアームにより, 弓を把持して往復運動の運弓動作を行い, 音のリズムや弓圧を調整する. また, 弦選択・運指機構は, 直動アクチュエータで指を動かし, 回転モータで弦を押えることで音階を作り, 弦圧を調整する. 今回は基礎実験を目的としたため, 指は 1 本とした.

制御工学の観点からバイオリン演奏を捉えると, 弓把持・運弓機構においては弓圧と弓速の制御, 弦選択・運指機構においては弦押え位置と弦圧の制御が課題になる. ここでは, 弦圧のことを, 弦を指で押える時の力とする.



図 1 (a) バイオリン演奏ロボットの外観



図 1 (b) 運指機構

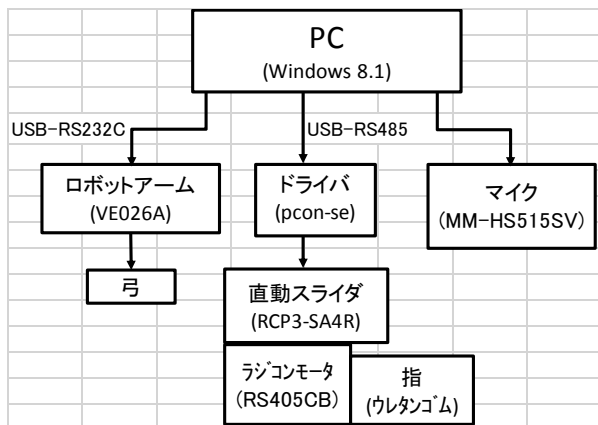


図2 システム構成

### 3. ロボットとヒトの音の比較

まず、ロボットにA線の開放弦を弾かせ、お手本（教本の音）や筆者（素人）が弾いた音と比較した。図3に音の時間波形を示す。図3から分かるように、お手本の音の振幅ばらつきは小さいが、ロボットでは大きい。特に上げ弓と下げ弓で大きく異なっている。そこで、この振幅ばらつきを、各周期のピーク値の標準偏差を求めて、表1に示す。文献[3]によると、熟練者（お手本）は運弓中の弓圧はほぼ一定であると記載されており、それが要因でお手本の振幅ばらつきが小さくなっているのではないかと推測できる。これに対し、今回ロボットはオープンループ制御であり、

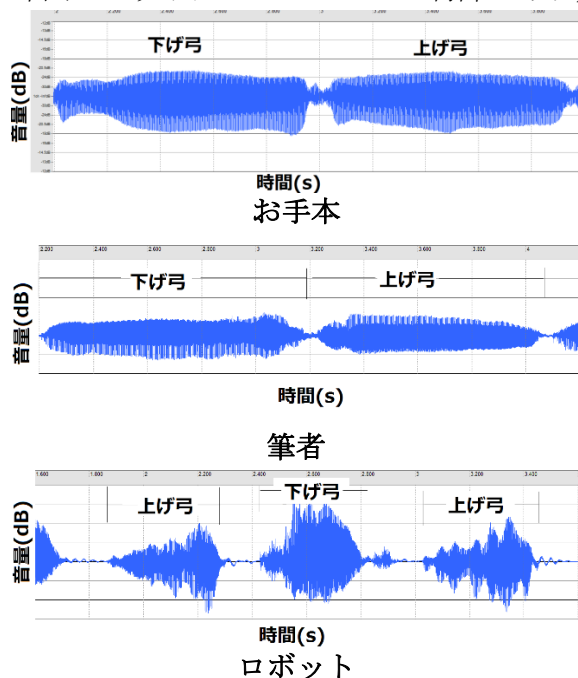


図3 音の時間波形

弓圧制御を行っていない。このため、下げ弓では弓圧が次第に下がり、上げ弓ではその逆になることから、振幅ばらつきが大きくなるのではないかと考えられる。

表1 ピークの振幅ばらつきの比較  
(5周期の平均)

	平均 (db)	標準偏差 (db)
お手本	27.6	0.66
人間	30.2	2.63
ロボット	22.7	2.91

### 4. 弓圧の影響評価

#### 1) 実験方法

前節の弓圧の影響を明確にするため、まず弓圧を変えて音程への影響を評価した。音程はA線の開放弦(440Hz)とし、ロボットの運弓軌跡をダイレクトティーチングで教えて動作を再生させた。弓圧は弓先端に錘を載せ5g~50gに変化させて、音の時間波形と周波数特性を調べ、お手本と比較した。

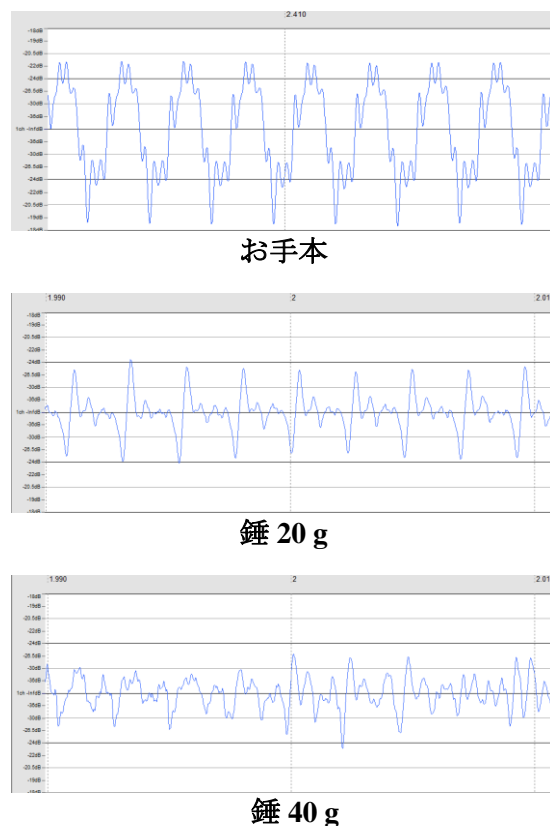


図4 錘の重さの違いによる音の時間波形

## 2) 実験結果

錘を増やし 30g までは音量が大きくなるが、それ以上では波形の歪が顕著になった。図 4 にお手本と、錘 20g と 40g の時間波形を示す。お手本の基本波 (440Hz) は音量の大きさが一定で大変規則正しい。これに対して、弓圧の大きい錘 40g の場合は、基本波はノイズに埋もれている。実際、基本波に比べ  $n$  倍波が増幅されて基本波が聞き取りにくくなっていた。このときの錘毎の各波形のピーク値の標準偏差を調べ、その結果を図 5 に示す。錘 20g のときに標準偏差 (波形ばらつき) が最も小さく、25g 以上では標準偏差が急激に増加しているのが分かる。

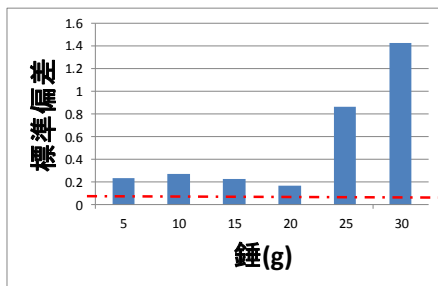


図 5 弓圧の違いによる波形ばらつき

つぎに、周波数特性を調べてみた。図 6 にお手本と錘 20g、40g の場合の周波数特性を示す。図 6 から分かるように、お手本では、基本波と  $n$  倍波の差は大きくしかも基本波はシャープである。一方、ロボットの錘 40g では、基本波はシャープではなく、しかも  $n$  倍波との差も小さい。これに対して錘 20g はお手本に比較的近い周波数特性が得られている。

以上の考察より、基本波と  $n$  倍波の差が大きくしかも基本波の周波数分布がシャープであることが重要な要素であることが明らかになった。そこでこれを表す定量化指標として、①基本波と 2 倍波の音量の差、②基本波の半値幅を設定して、弓圧の影響を調べてみた。その結果を図 7(a)と(b)に示す。両図から明らかなように、2つの指標がともに、お手本 (赤線のレベル) に近いのが錘 20g の場合であることが分かった。

## 5. 弦圧の影響評価

### 1) 実験方法

ここでは、弦を押える際の硬さと圧力の音程への影響を評価した。音程は A 線の 1

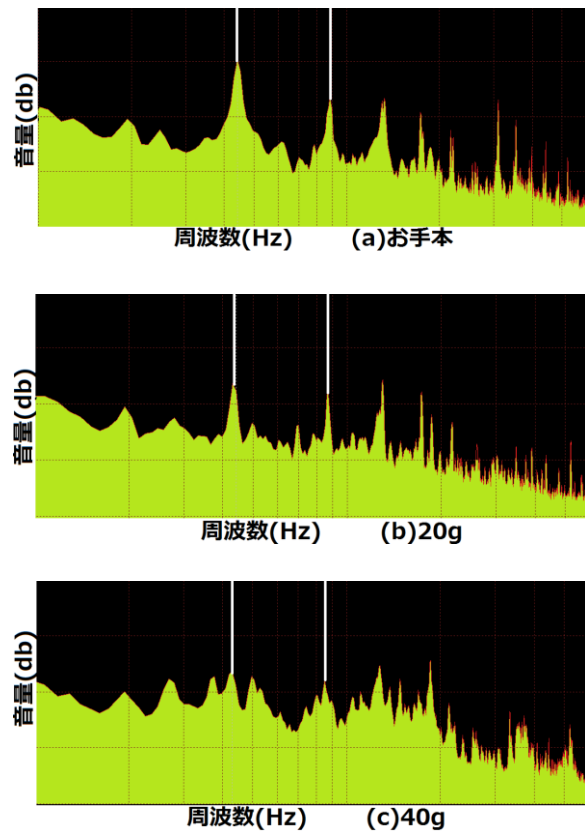
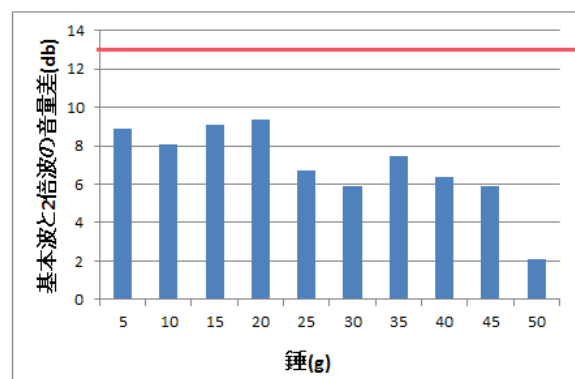
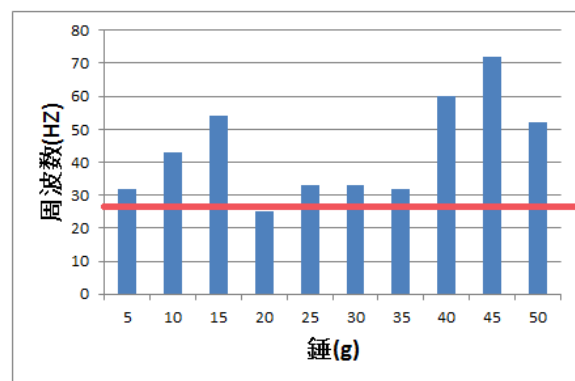


図 6 錘の重さの違いによる音の周波数特性



(a) 基本波と 2 倍波の音量の差



(b) 半値幅

図 7 弓圧の影響評価

(※赤線はお手本の値を示す)

ポジション(495Hz)とし、ロボットの運弓軌跡をダイレクトティーチングで教えて動作を再生させた。押える素材の硬さはウレタン

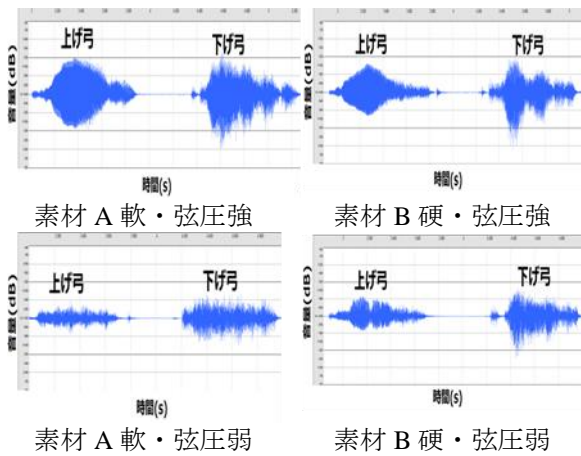


図 8 硬さ・弦圧の違いによる時間波形形

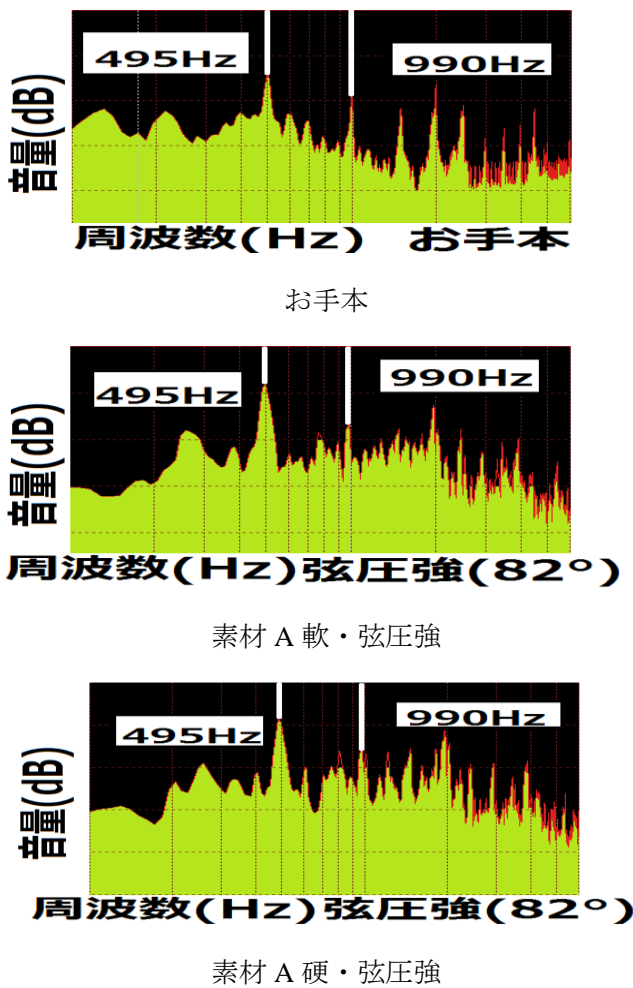


図 9 素材の違いによる音の周波数特性

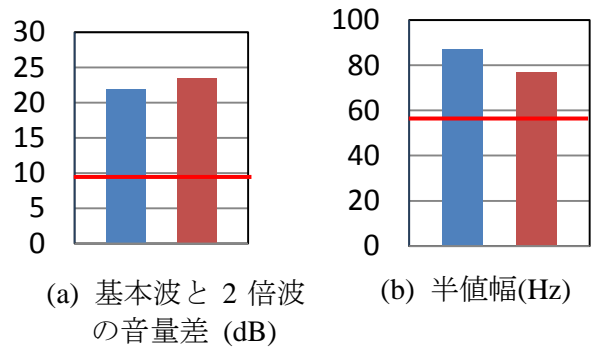


図 10 弦圧の評価指標  
(※赤線はお手本の値を示す)

ゴムで硬いものと柔らかいものの 2 種類を用意した。この時の弦を押える力については、強いと弱い の 2 ケースを設定して、音の時間波形と周波数特性を調べ、お手本と比較した。なお、弓圧は弓先端で 20g とした。

## 2) 実験結果

図 8 にお手本と、弦押え時の素材 (硬い/柔らかい) と弦圧: 押付け力 (強い/弱い) を変えた時の時間波形を示す。図 8 から明らかのように、弦圧が弱い場合は、振幅、すなわち音量が大きく取れないことが分かった。つぎに、音量の取れる弦圧強の場合について、周波数特性の観点から調べた。図 9 にその特性を、図 10 に評価指標を示す。その結果、お手本に近いのは基本波と 2 倍波の音量差では素材 A、半値幅では素材 B であり、ウレタンゴムの素材の顕著な差はみられなかった。

## 6. おわりに

今回の実験により、弓圧の一定制御が重要であること、また運弓動作において弓圧のかけ方を変えることでお手本に近い音を出せることを確認した。この時の最適な弓圧は、弓先端で 20g が良いこと、また運指動作において、弦の押し付け力は強い方が良いことが分かった。

今後は、弓速の影響について明らかにするとともに、弓圧一定制御の実現を図っていく予定である。

(参考文献)

- [1] 梶谷 「楽器演奏ロボット」 日本ロボット学会誌 Vol. 4 (1986) No. 6
- [2] トヨタ企業サイト、パートナーロボット [http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner\\_robot/](http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/)
- [3] 渋谷ほか「バイオリン演奏の弓圧調整における上肢各関節の役割分担」 人間工学 Vol.31, No.5('95)