

# バイオリン演奏ロボットの運弓機構と音量制御に関する研究

## Study on Bowing Mechanism and Volume Control of a Violin Playing Robot

○上村 琢哉, 丸山 次人  
○Takuya Uemura, 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), 運弓機構(Bowing mechanism), 音量制御(Volume control)

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@tohotech.ac.jp](mailto:t-maruyama@tohotech.ac.jp)

### 1. はじめに

バイオリン演奏ロボットの研究は、梶谷らが 1986 年から行っており長い歴史がある[1]が、制御工学の観点から考察した論文は見当たらない。また 2007 年にトヨタ自動車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っている[2]が、技術的に詳しい報告はされていない。

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、ヒトが音を創り出す仕組みを制御工学の立場から考察することを目的にしている。音程は指の位置と押さえ力に関係しており、既に筆者らはそれらについて報告を行っている[3][4]。一方、音量は弓速と弓圧に関係しており、本稿では弓圧を一定として弓速を変化させて音量を一定にすることを目的に、運弓機構の製作と制御法の検討・実験を行ったので報告する。

### 2. 運弓機構・運指機構の開発

#### 2.1 設計仕様

バイオリンの演奏をする上で運弓動作の重要な点は音量を一定に保ちつつ、ある程度の音を長く弾くことである。そのためには、一定の弓圧でかつ一定の弓速で、弓を弾くことができなければならない。

これまで、筆者らは運弓機構として、研究用の 6 軸ロボットアーム(デンソー製: VE026A)を用いてきた。このアームの直動範囲は 80 mm と大変短く、一定の音量を奏でる(出せる)時間は大変短かった。また、アームの最大可搬重量は 100 g と小さいため、弓圧センサ等を搭載することが難しいといった問題もあった。

これらの問題点を踏まえて、運弓機構を直進性に優れている 2 台のリニアスライダで構成する構造とした。すなわち、運弓動作を 1 台のメインアクチュエータで行いこれを水平に設置し、その上に直交するように 2 台目の小型サブアクチュエータを配置する構造にした。

Table 1 New bowing mechanism ideal specifications

Maximum payload	500 g
Linear movement range	400 mm
Maximum speed	600 mm/s

Table 2 Main actuator specifications

Maximum payload	4000 g
Reach	400 mm
Maximum speed	665 mm/s
Maximum acceleration	1 G

Table 3 Sub actuator specifications

Total weight	230 g
Maximum payload	1000 g
Reach	25 mm
Maximum speed	50 mm/s
Maximum acceleration	0.3 G

これにより、弓速はメインアクチュエータで、弓圧はサブアクチュエータで各々制御することが可能となり、弓速と弓圧の独立制御を実現した。Table 2 と 3 に、メインアクチュエータとサブアクチュエータの仕様を示す。メインアクチュエータの最大可搬重量は、サブアクチュエータや弓把持機構等を載せるため大きく設定し、直動範囲は現在の 5 倍となる 400 mm とした。また弓速は現在の 2 倍の 600 mm/s、加速度はなるべく大きな値の 1 G に選んだ。サブアクチュエータは、弓と弓圧センサを保持することから、最大可搬重量を 500 g 以上に設定した。ただし、これはメインアクチュエータ上に設置することから、軽量なものを選定した。

## 2.2 運弓機構の構成

前述のアクチュエータを使用して、バイオリン演奏ロボットの運弓機構を構成するために、3D CAD (Design Spark Mechanical 2.0)を使って設計検討を行った。バイオリン演奏ロボットの基本フレーム、運弓機構を Fig.1(a), (b)に示す。

メインアクチュエータは、約 500 g の弓把持部を搭載して最大速度 665 mm/s で往復移動することができる。その上、弓の把持位置は、サブアクチュエータから 250 mm 程離れている。そのため、運弓機構が往復運動の際、振動が発生することが予想され、機構の剛性を確保することが求められる。そこで、Fig.1 (b) に示すように、弓の把持を2点支持にして動作中の剛性を確保した。また弦に対する弓の位置は、様々な条件で実験ができるように、上下左右前後に微調整できる構造に設計した。

さらに、運弓機構は、演奏中、弓を弦に対して一定圧力で弾けるように、バイオリンの傾きに合わせる必要がある。そこで、我々はメインアクチュエータ両端の下のネジを回すことで、弦に対する弓の角度を手動で調整できるようにした。新運弓機構のバイオリン演奏ロボットの外観の 3D CAD 図を Fig.1 (c)に示す。左側のスペースに電源やコントローラを収納する。

## 2.3 運弓機構の基礎評価

今回製作した運弓機構について、基礎評価を行った。まず、直動範囲は 400 mm、最大可搬重量は 600 g となり、目標仕様を満足することができた。

弓速はメインアクチュエータ内臓のエンコーダを読み取ることで測定でき、最大速度である 665 mm/s、最大加速度の 1 G で動作することを確認した。そして、弓速の定速性は、後述(Fig.7)するように、安定に一定速度で動作していることを確認した。

この他、直進性はリニアスライダを用いているため問題無く、また弓圧調整はサブアクチュエータを上下に動かすことで調整可能であることを確認した。以上をまとめると、今回製作した運弓機構の実仕様は、Table.4 のようになった。

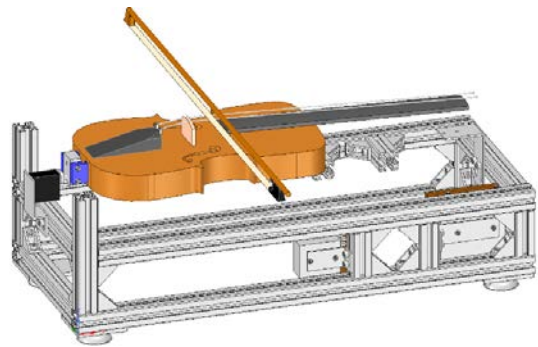
Table 4 New bowing mechanism evaluation

Maximum payload	600 g
Linear movement range	400 mm
Maximum speed	665 mm/s
Maximum acceleration	1 G

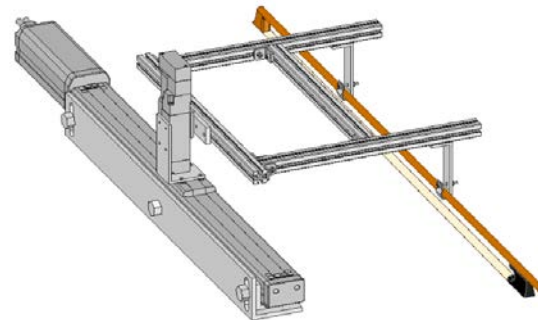
## 2.4 運指機構の構成

弦を押さえる 4 指の運指機構を Fig.3 に示す。運指機構では 4 指を移動させる直動スライダ(RCP3-SA4R)の固定台上に各指を回転させるサーボモータ (RS301CR-F3)、4 台を配置している。

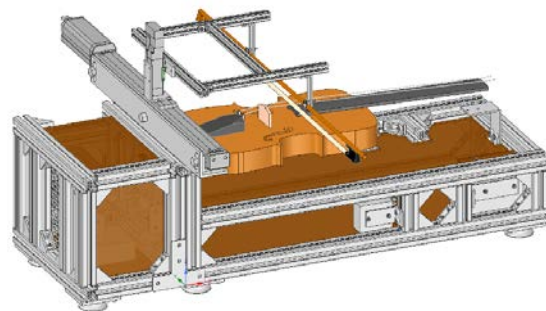
運指機構の指同士の間隔は固定(Fig.3)であり、2 番弦でのイ長調を押さえるための幅とした。1 指をシ(494 Hz)の音に合わせると 2 指はド#(554 Hz)、3 指はレ(587 Hz)、4 指はミ(659 Hz)の音になるように設定した。指はウレタンゴムである。



(a) Violin and basic frame



(b) Bowing mechanism



(c) Overall view of violin playing robot

Fig.1 Figure of 3D CAD

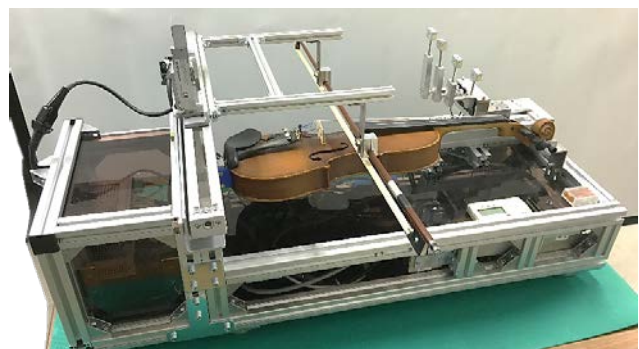


Fig. 2 Violin playing robot

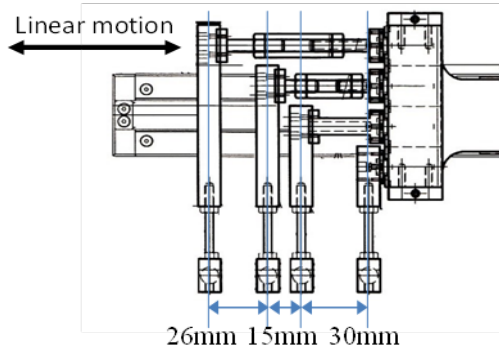


Fig. 3 Fingering mechanism

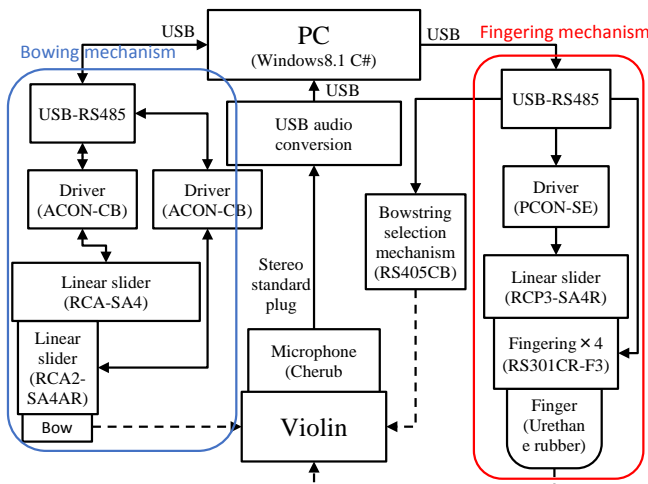


Fig. 4 System Configuration

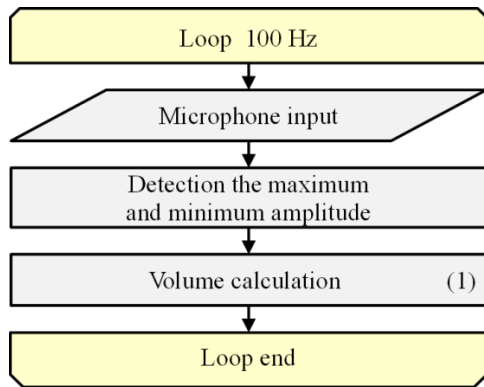


Fig. 5 Volume measurement flow chart

### 3.音量制御システムの構成

音量制御システム構成を Fig.4 に示す. 本システムは, 運弓機構(青線で囲った部分), 運指機構(赤線で囲った部分), およびバイオリンとマイクから構成される. 制御は全体を PC (Windows 8.1)上の C #で作成したプログラムから行っている. 運弓機構のメインおよびサブアクチュエータは, PC から Position Controller (ACON-CB)を介して動作し, メインおよびサブアクチ

ュエータの位置と速度は USB-RS485 を介してモニターすることができる.

運指機構の4指を動かす直動スライダと各指を回転させるサーボモータは, PC から Controller (PCON-SE)を介して動作する. 音程・ビブラートは運指機構の直動スライダを弦に対して平行に動かすことで調整・動作できる.

### 3.1 音量計測処理

音の取り込みは, 外部ノイズやモータ音をできるだけ軽減するためにバイオリン本体の  $f$  字孔にピックアップマイクを取り付け, 振動を直接 PC に取り込んだ. このときのサンプリング周波数は 44.1 kHz, 量子化ビット数は 16 bit である.

ピックアップマイクを用いて取得したバイオリンの音は, PC 内の音量計測プログラム(C#)で計算される. その音量計測処理フローチャートを Fig.5 に示す.音は wave 形式で読み込まれ, 音量は 10 ms ごとに次式で計算される.

$$v(k) = 10 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (1)$$

ここで, 波形の最大値と最小値の差を  $p$  とおき,  $p_0$  は基準となる音量であるが, 今回は 1 として計算した値が音量  $v(k)$  となる.

### 4.音量一定制御

ここでは, 音量に着目する. ヒトは練習を通して, 音を耳で聞きながら, どのように腕と手首を動かして弓を弾けば音量が一定になるかを感覚的に身につけていると推測される. すなわち, ヒトは練習で身につけた腕と手首の動かし方を基に弓を弾き, 耳で聞いた音からそれらの動きを微調整して音量の一定制御を実現していると考えられる.

文献[5][6]によると, 音量は弓速と深い関係があることが分かっている. そこで, 本稿では, 弓速を調整して音量を一定にしているヒトの運弓動作を, 制御工学の立場から考察することを目的とする.

#### 4.1 弓速と音量の静特性

まず, 弓速と音量の関係を調べる. 実験では弓圧を一定とし, 弓速を 50 mm/s から 50 mm/s ごとに 500 mm/s まで増加させた時の音量を計測する. 3.1 節で述べた処理を用いて 10 ms 毎の音量値を計算し, その最頻値として 1 音符分の音量と定義した. その計測結果を Fig.6 に示す. ここで, 縦軸は音量 dB, 横軸は弓速 mm/s である. 点が計測値であり, これを 2 次曲線近似したところ, 弓速と音量の関係は次式で表された.

$$V_{ol} = -0.0001173 \dot{x}^2 + 0.1059 \dot{x} + 66.006 \quad (2)$$

ここで,  $V_{ol}$  は音量 dB で,  $\dot{x}$  が弓速 mm/s である.

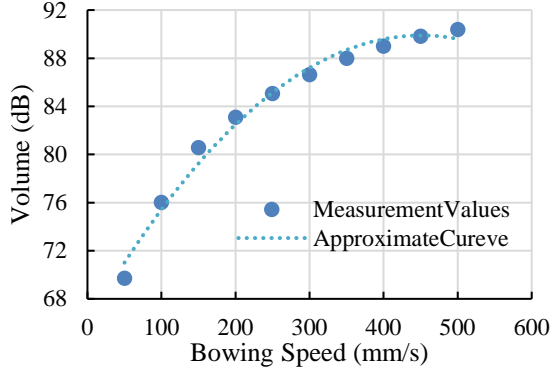
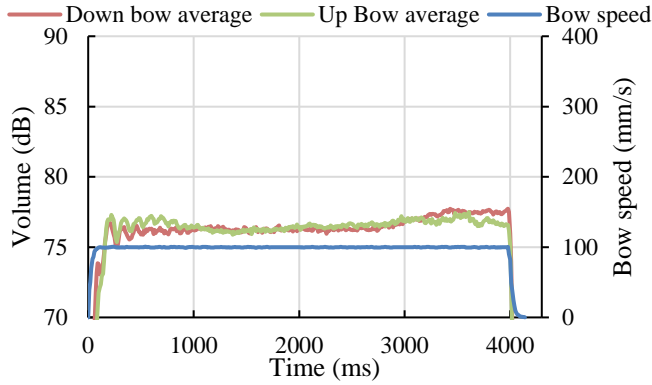
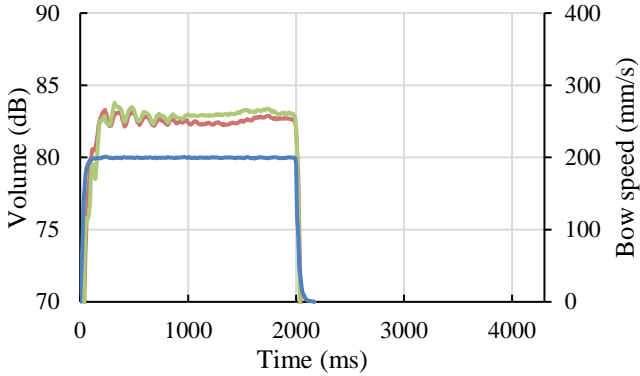


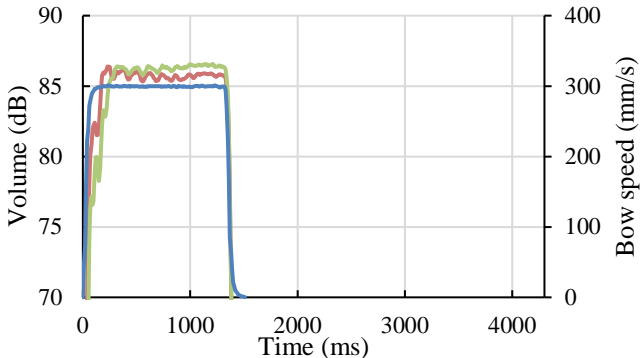
Fig. 6 Static characteristics



(a) Bow speed (100 mm/s)



(b) Bow speed (200 mm/s)



(c) Bow speed (300 mm/s)

Fig. 7 Step response

#### 4.2 弓速と音量の動特性モデリング

つぎに、弓速と音量間の動特性を求めるために、弓速のステップ応答を計測した。実験では、弓速を 0 mm/s から 100, 200, 300 mm/s へ各々ステップ状に変化させ、そのときの音量の応答を計測した。なお、加減速度はすべて 0.7 G、距離は 400 mm である。試行回数は上げ弓と下げ弓で 12 回ずつ行い、平均値を求め、その結果を Fig.7 に示す。ここで、左側縦軸は音量 dB、右側縦軸は弓速 mm/s、横軸は時間 ms である。緑線は上げ弓の音量 dB、赤線は下げ弓時の音量 dB、そして青線は弓速 mm/s を示している。

このグラフでは、弓速が同じ場合でも、上げ弓と下げ弓では多少異なる形となっている。そこで、上げ弓と下げ弓ではモデルが異なると考えて、それぞれでモデルを求めた。

簡単化のために最小二乗モデル[7]を仮定した場合、そのモデルの差分方程式は、

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n u(k-n) = b_1 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) + w(k) \quad (3)$$

で与えられ、このときの離散時間パラメータベクトルは

$$\theta = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]^T \quad (4)$$

となる。データベクトルを

$$\varphi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)]^T \quad (5)$$

と定義すると、出力  $y(k)$  は次式のように表現できる。

$$y(k) = \theta^T \varphi(k) + w(k) \quad (6)$$

いま、2つの多項式

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z) &= b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \quad (7)$$

を導入する。ここで、 $A(z)$  と  $B(z)$  は規約なシフトオペレータ  $z$  の多項式である。式(6)を  $A(z)$  と  $B(z)$  で書き出すと

$$A(z)y(k) = B(z)u(k) + w(k) \quad (8)$$

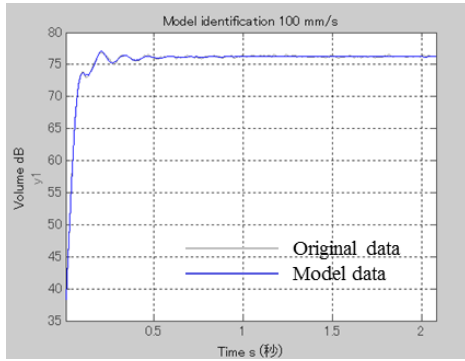
となりシステムの伝達関数は

$$G(z, \theta) = \frac{B(z)}{A(z)} + \frac{1}{A(z)} w(k) \quad (9)$$

となる。システムの入力出力を合わせて表すと

$$y(k) = \frac{B(z)}{A(z)} u(k) + \frac{1}{A(z)} w(k) \quad (10)$$

となる。



Bow speed 100 mm/s (Down bow)  
Fig. 8 Model identification comparison

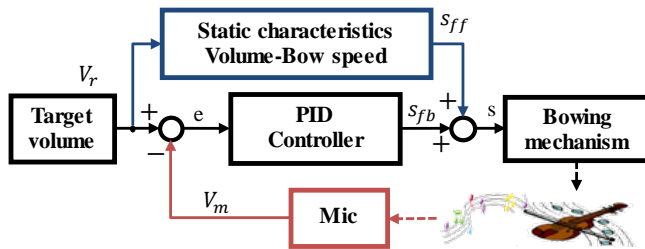


Fig. 9 Control block diagram

Table 5 PID parameter identification results

	P	I	D
100 D	1.559	10.79	-0.001852
200 D	1.853	14.56	-0.01732
300 D	2.392	17.89	-0.1629
100 U	1.437	4.847	-0.4028
200 U	1.736	12.49	-0.05304
300 U	2.391	34.12	-0.06195

モデル化には MATLAB System identification toolbox のモデリング関数 {tfest(), arx(), oe()など} を用いた。モデルの次数  $n$  と  $m$  を 2~10 まで変化させ適合率を評価して、最も適合率が高いものをモデルとして採用した。今回は  $n=m=7$  であった。このモデルの妥当性を確認するために、下げ弓の弓速 100 mm/s の場合の実応答とモデル応答を Fig. 8 に示す。ここで、縦軸は音量 dB、横軸は時間  $s$  である。また、青線がモデル応答、灰色線が実応答である。ただし、適合率は 95~98% で高いため、ほぼ重なっている。弓速を変えた時のモデルの場合も同様で、適合率は 94~98% であった。

#### 4.3 音量フィードバック制御系の構成

Fig.9 は、音量制御系のブロック図である。青線の部分は FF (フィードフォワード) 制御系であり、赤線の部分は FB (フィードバック) 制御系である。

まず、FF 制御系のみで音量制御を行った。このときの弓速は、静特性の(2)式から求めることができ、次式で与えられる。

$$S_{ff} = \frac{-0.1059 + \sqrt{0.1059^2 - 4 \times 0.0001173 \times (66.006 - V_{ol_i})}}{2 \times 0.0001173} \quad (11)$$

ここで、 $S_{ff}$  は、FF 制御時にメインアクチュエータに与える弓速目標値である。

FB 制御では、簡単のため補償器として PID 制御器を用いた。PID 制御の式を次式に示す。

$$S_{fb}(k) = \left( K_p + K_i \frac{Ts}{z-1} + \frac{K_d}{1 + \frac{Ts}{z-1}} \right) \{V_{ol-r}(k) - V_{ol-m}(k)\} \quad (12)$$

ここで、 $S_{fb}(k)$  は、FB 制御時にメインアクチュエータに与える弓速目標値である。 $V_{ol-r}(k)$  は音量目標値であり、 $V_{ol-m}(k)$  は音量の計測値である。PID パラメータは、4.2 節で求めたモデルを基に、MATLAB Simulink Control Design の PID Controller を用いて求めた。さらに、この値を基にステップ応答により、立ち上がりが速く、オーバーシュートしないように手動で立ち上がり動作と整定時間を調整した。

求めた PID パラメータを Table 5 に示す。弓速が 100, 200, 300 mm/s の場合の下げ弓(D)と上げ弓(U)の 6 パターンについて求めた。弓速が速くなるにつれ比例と積分ゲインは大きくなっている。このことは音量が大きくなるため、目標偏差を速くゼロにしようとしているためと考えられる。

FF+FB の制御では、弓速の初期値として、FF の(11)式で求めた値でメインアクチュエータを動作させ、それで残った偏差に対して FB 制御で補償する。

$$S(k) = S_{ff} + S_{fb}(k) \quad (13)$$

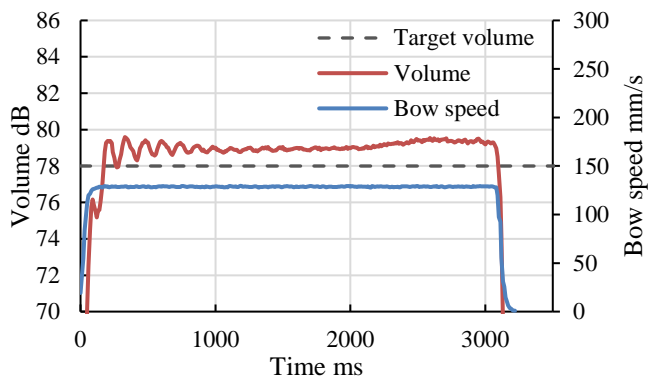
ここで、 $S(k)$  は弓速目標値である。

#### 5. 音量一定制御実験

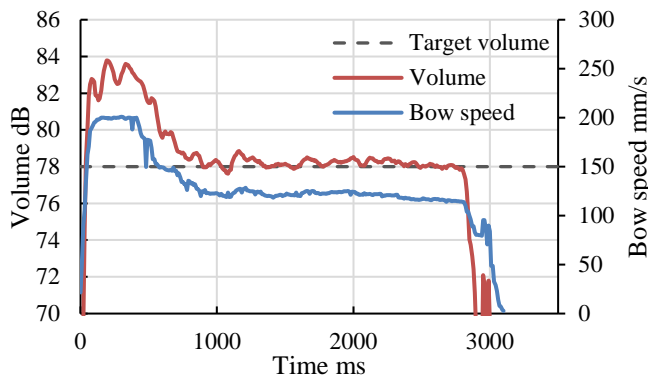
Fig.10 は、制御方式を変えたときの音量制御実験結果のグラフである。実験条件は、目標音量 78 dB で弓の位置を 0 から 400mm まで動作させた。初期弓速は 200 mm/s とした。横軸は時間  $s$ 、左側縦軸は音量 dB、右側縦軸は弓速 mm/s を示している。赤線が音量、青線が弓速である。このときの音量計算は 10 ms 周期で行い、メインアクチュエータの制御周期は 100 ms 周期で実行している。

##### (1) FF(フィードフォワード)制御

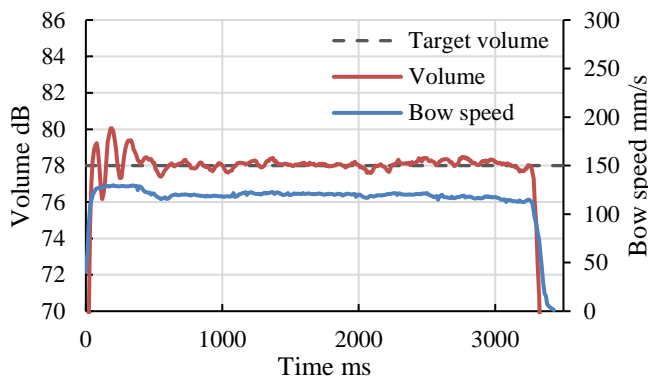
FF 制御だけの場合の結果を Fig.10 (a)に示す。FF 制御は、ヒトでは経験知(練習の積み重ね)に基づいて弓速を決めて弓を弾く動作と同じと考えられる。初めから弓速が計算されて動作しているが、フィードバックが無いので偏差が残ってしまっている。(11)式から目標音量 78 dB にした場合の弓速値 129 mm/s には到達しているのに、この偏差は、2 次近似曲線による近似誤差、および、その日の環境条件の変化(湿度、温度)による誤差と考えられるが、その他の原因については、調査中である。



(a) FF control



(b) FB control



(c) FF + FB control

Fig. 10 Comparison of control methods

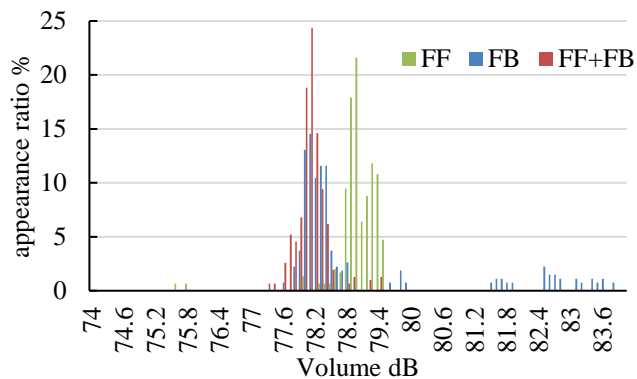


Fig. 11 Histogram of control methods.

## (2) FB(フィードバック)制御

FB 制御だけの場合の結果を Fig.10 (b)に示す. FB 制御は, 経験値のない初級者が一生懸命に練習している状態, すなわち, バイオリンを弾き, その音を耳で聞き, 目標値との差が小さくなるように弓速を調整して弓を弾く動作と同じと考えられる. 初めは 200 mm/s で動作させる. 400 ms 頃から PID の制御系が動作し, 大きい音量を小さくするために弓速を減速し, 1000 ms 付近で目標音量に近づき, 1200 ms を越えた頃から安定に目標音量に収束していることが分かる.

## (3) FF + FB 制御

FF+FB 制御の場合の結果を Fig.10 (c)に示す. FF + FB 制御は, 熟練者が経験知を基にバイオリンを弾き, その音量を耳で聞き, 目標値との差が小さくなるように弓速を調整して弓を弾く動作と同じと考えられる. 初めは 300 ms 付近まで(11)式から求めた弓速目標値で動作し, 偏差が小さいため FB 制御がスムーズに動作して, 700 ms 付近から安定に目標音量に収束していることが分かる.

3 つの制御方式の音量一定制御の性能を定量的に比較するために, まず 2000 ms 間の目標音量に対するヒストグラムを求め, その結果を Fig.11 に示す. ここで, 横軸は音量 dB, 縦軸は出現頻度 % である. 緑色が FF 制御, 青色が FB 制御, 赤色が FF+FB である. グラフから明らかなように, FB, および FF+FB は目標音量に収束している. つぎに, このときの両者の目標音量 78 dB に対する標準偏差  $\sigma$  を求めてバラツキを比較した.  $3\sigma$  は, FB 制御で  $2.18 \times 3$  dB, FF+FB 制御で  $0.703 \times 3$  dB である. このことから FF と FB 制御の組み合わせは目標音量に対するバラツキが小さく, 有効な方法であることが確認できた.

## 5.おわりに

今回, 弓の直動範囲と可搬重量も余裕があり, しかも弓速と弓圧を独立に調整できる新運弓機構を開発した. その機構を用いて, 弓速から音量の間をモデル化して, PID 制御器を設計することで, 音量一定制御を実現した. さらに, FF, FB, FF+FB 制御方式を比較することで, FF+FB 制御の優位性を確認した. これらの結果から, ヒトは練習することで FF を身につけ, FB で精度を上げているのではないかと推測される結果を得ることができた. 今後は, 弓圧も考慮に含めた音量制御や音色調整についても取り組んでいく予定である.

### (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, No. 6 (1986)
- [2] 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(1995)
- [3] 郷内ほか「バイオリン演奏ロボットの運指動作に関する実験検討」 第 50 回計測自動制御学会 287-11
- [4] 上村, ほか「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」 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama 1P1-14b3
- [5] 高原顕, ほか 「バイオリン演奏ロボットにおける音量フィードバックに関する研究」 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集 2P1-I18
- [6] 上村, ほか「バイオリン演奏ロボットの音量制御に関する基礎的研究」 東北地区若手研究者発表会 2016 YS-14-E11
- [7] 足立修一 「システム同定の基礎」 東京電機大学出版