

# バイオリンの運弓動作計測による初心者と経験者の差異分析

瑞穂 ゆりな<sup>1</sup> 杉浦 裕太<sup>1</sup>

**概要：**バイオリンは有名で人気の高い楽器の1つだが、習得は難しく時間がかかる。特に右手の運弓動作は音色を決定づける重要な要素であるが、複雑で練習や再現、指導が困難である。そこで、練習支援や記録を目的として、バイオリンの運弓動作の測定や分析が多く研究されてきた。本研究では運弓動作のうち弓圧に着目する。初心者と経験者の運弓動作を計測し、比較することにより、初心者への適切なフィードバック方法を検討する。

## 1. はじめに

バイオリンは最も有名で人気のある弦楽器の一つである。左手で弦を押さえて音程を決め、右手に持った弓で弦を擦り音を出すことから、バイオリンやビオラ、チェロなどの楽器を擦弦楽器と呼ぶ。これらの楽器において、特に右手の運弓動作は音色に強く影響し、バイオリンにおいては弓の速度、弓と駒との距離、弦にかかる弓圧の3つのパラメータのバランスにより決定されると言われている [1], [2], [3]。他にも運弓動作には、弓の位置、角度、傾きなどの要素がある。音色をコントロールするためには、このように多くのパラメータを演奏者が瞬時に細かく調整する必要がある。しかし多くの演奏者は、その経験や感覚に基づいて演奏動作を調整している。そのため現状、バイオリンで多様な音色を自由に奏でるためには、長い練習時間と経験が必要となる。またピアノやギターなど他の弦楽器と異なり、擦弦楽器を弾く運弓動作は非日常的な動きであるため、すぐに綺麗な音を出すのが難しく、初心者にとって非常にハードルが高い。

そこで練習支援を目的として、バイオリンの運弓動作を定量的に計測し分析する研究 [4], [5], [6], [7] や、計測したデータを提示するインタフェースの開発 [8], [9] が行われてきた。表1に、運弓動作の練習支援に関連する研究とそれに対する本研究の位置づけをまとめた。榊原ら [10] は磁気ヘッドと磁気テープを用いて弓の速度を一定に保つための音声フィードバック方法を検討した。宮里ら [11] は慣性センサにより弓と弦の角度を90°に保つシステムを構築し、リアルタイムに角度を視覚的にフィードバックした。Blancoら [12] は、バイオリン演奏の音声分析により音の安定性のスコアを算出し、演奏直後にそれをグラフ化し提



図1 モーションキャプチャと力覚センサによるバイオリンの演奏動作計測

示した際の練習への効果を検証した。Musicjacket [13] はセンサ付きのジャケットを用いてモーションキャプチャによりバイオリンの演奏姿勢を追跡した。正しい弓の軌道から外れると触覚フィードバックを与え、初心者と経験者に対する練習効果を検証した。これらは視覚的にわかりやすい弓の角度や速度に着目しているが、視覚的にわかりにくい弓圧については検討していない。また Tanjo ら [9] は弓圧や右肘の角度を定量的に提示するユーザインタフェースを構築しているが、演奏を改善するためのフィードバック方法の検討や練習効果の検証は行っていない。

自身の先行研究では、音色に影響する3つのパラメータのうち弓圧に着目し、弓圧の定量的測定を試みた [14]。弓の棒部分に反射型光センサを取り付け、弓の棒と毛の間の距離の変化と弓圧の関係をランダムフォレストで回帰し、弓圧を定量的に推定した。応用として、バイオリンを弾きながらリアルタイムに弓圧を推定し、グラフに表示するアプリケーションを開発した。しかし、ユーザは弓圧が定量的に表示されたグラフを見ても、どのようにすれば自分の演奏や弓動作、弓圧を改善できるかがわからないという課

<sup>1</sup> 慶應義塾大学

表 1 関連研究と比較した本研究の位置づけ

関連研究	演奏動作	計測	提示	フィードバック
榊原ら [10]	弓速度	×	×	○
宮里ら [11]	弓の角度	○	○	○
Musicjacket [13]	演奏姿勢	○	×	○
Askenfelt ら [4], [5]	弓圧	○	×	×
Fujisaki ら [7]	弓圧	○	×	×
Tanjo ら [9]	弓圧	○	○	×
自身の先行研究 [14]	弓圧	○	○	×
本研究の目標	弓圧	○	○	○

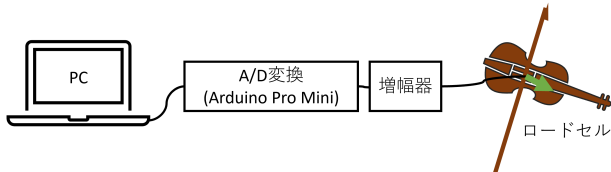


図 2 弓圧計測におけるハードウェア構成

題があった。そのため、運弓動作を改善するための適切なフィードバック方法の検討が必要である。

そこで本研究では、バイオリンの初心者と経験者の演奏動作を計測し、その差異を明確にすることを目的とする。具体的には、モーションキャプチャと力覚センサを用いて初心者と経験者の演奏動作（弓圧、弓位置、弓速度）を計測する（図 1）。取得したデータを比較し、経験者特有の演奏動作の特徴や初心者に足りない要素を考察する。最後に、運弓動作の改善に適切な弓圧のフィードバック方法について検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 弓圧の計測

弓圧計測におけるハードウェア構成を図 2 に示す。実験にはヤマハのサイレントバイオリン (SV250) と弓 (CBB101) を用いた。まず弦にかかる弓の圧力を計測するため、図 3 のように駒の下にロードセル（テック技販社、USL06-H5-50N）を設置した。このロードセルは  $x, y, z$  の 3 方向の力を計測できる力覚センサであるが、実験では  $z$  軸方向（ロードセルの面に対して垂直方向）の力を弓圧とした。駒を本体と垂直に固定しやすくするため、ロードセルの上に  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  の白い板を設置した。ロードセルの電圧信号は増幅器（テック技販社、DSA-03A）で増幅され、マイクロコントローラ（Arduino Pro Mini, 3.3 V）に送信された。Arduino は信号を 0–1023 のセンサ値に変換し、ロードセル固有の校正係数をかけてニュートン単位の力を算出した。Arduino をコンピュータに USB で接続し、python でシリアル通信により算出した値を取得した。

### 2.2 弓位置の計測

弓位置計測には光学式モーションキャプチャ（Optitrack

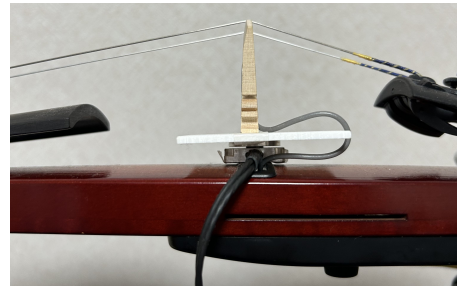


図 3 駒の下に設置したロードセル



図 4 楽器に貼り付けた光学マーカの位置

V120: Trio) を用いた。マーカは図 4 の位置に、本体に 5 つ、弓に 5 つ貼り付けた。この配置は Schoonderwaldt らの研究を参考にした [15]。マーカの座標を取得するソフトウェアとして Motive を使い、バイオリン本体と弓をそれぞれ剛体として登録し認識させた。これにより腕や手でマーカを遮ってしまっても、トラッキングが外れにくくなる。各マーカの座標は python でソケット通信により、リアルタイムにストリーミングした。

弓位置は、図 4 中の水色の矢印で示した 3 つのマーカの座標から算出した。弓位置とは、弓の長さ方向における、弓の毛と弦の接する位置である。弓の全長を 1 として、弓元が 0、弓先が 1 になるように弓位置を数値で表した。

### 2.3 実験プロトコル

実験プロトコルについて説明する。まず楽器経験や参加者自身の情報に関するインタビューを行い、次に初心者に対してのみ、楽器の持ち方や演奏姿勢、弓と腕の基本的な動かし方について、5 分程度説明した。次に実験内容に関して 5 分程度説明した。その後練習時間を設け、その間にモーションキャプチャのカメラの位置や高さ、画角を、参加者の身長や楽器の持ち方に合わせて調整した。その後

実験を開始した。まず練習として1セッションを計測し、データが保存できているか、カメラの配置に問題がないか確認した後、本番のセッションを3回繰り返した。

1つのセッションでは、まず弦に触れない状態でのロードセルの値を記録した。これは弦を張っているときに駒にかかる圧力であるため、これを初期値として実際の計測したデータから引いたものを弓圧として記録した。次に、75 bpm のテンポでメトロノームを鳴らした。合図をしてから、4カウントで弓元から弓先まで、次の4カウントで弓先から弓元まで、というように、終了の合図をするまで弓を往復させ続けてもらった。弦は開放弦のA線を弾いてもらった。弓を弓元に乗せたところから始め、弓元と弓先に設定した印の区間までを往復させるように指示した。弓圧と弓位置のデータは60 fpsで取得し、1セッションで1500フレームを取得した。

## 2.4 参加者

実験には5名のバイオリン経験者（男性3名、女性2名、平均23.8±1.17歳）と5人の初心者（男性2名、女性3名、23.6±1.85歳）が参加した。経験者のうち、15年以上レッスン経験のある参加者が2名、6年から9年のレッスン経験のある参加者が3名であった。初心者のうち、ピアノや管楽器など他の楽器の経験がある参加者が3名いたが、擦弦楽器の経験のある参加者はいなかった。

## 3. 結果と考察

図5に、各参加者の本番1回分の時系列データを示した。各グラフの横軸はフレーム数、左の縦軸が弓圧、右の縦軸が弓位置を表し、それぞれ青とオレンジのグラフで示されている。左側に経験者、右側に初心者のデータを示す。user5やuser6のグラフで一部データが抜けているのは、実験中オクルージョンの発生によりモーションキャプチャのトラッキングが外れ、弓位置を計算できなかったからである。

### 3.1 弓圧

まず弓圧について、その大きさや範囲は参加者によって個人差があった。経験者間でも、user1では弓圧の範囲が1.5 N程度であるが、user4では範囲が0.5 Nよりも小さかった。今回は実験時に音や弓圧の大きさについて特に指定しなかったため、ばらついたと考えられる。次に経験者と初心者を比較すると、経験者は弓圧の下限が初心者に比べて大きく、一番小さい場合でも0.5 N程度の弓圧を常にかけていることがわかった。一般的に弓の重さは60 g前後であり、ニュートン単位に換算すると約0.59 Nとなる。このことから経験者は弓自体の重さを利用して演奏していると考えられる。

図5において、経験者の弓圧は、一回の往復で弓位置に

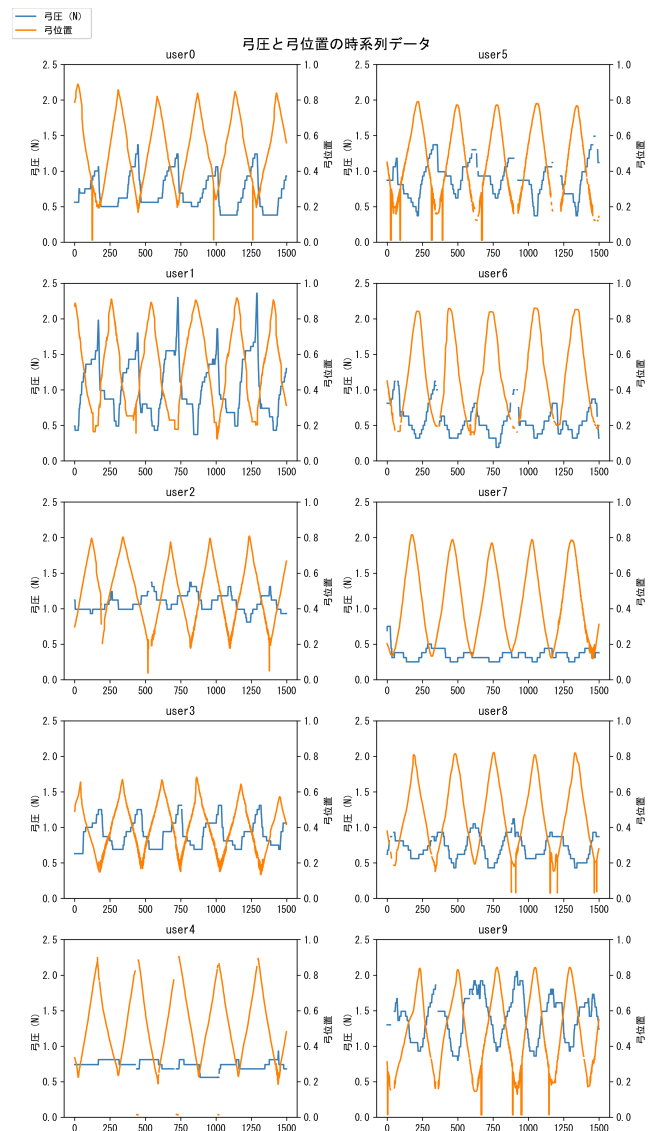


図5 弓圧と弓位置の時系列データ（左側：経験者、右側：初心者）

応じて周期的に変化しているように見えた。そこで経験者と初心者の弓圧の周期性を比較するため、弓先から弓先に戻るまでを1周期として重ね合わせ、各周期の相関を調べた（表2）。各周期ごとにデータ数の偏りがあったため、時系列順に等間隔にデータをサンプリングし、データ数を揃えて、各周期同士の相関係数の平均を求めた。その結果、有意水準5%でWelchのt検定をしたところ、経験者と初心者間に有意差はなかった。10名中8名の参加者は各周期の相関係数の平均が0.8以上と相関が高かったため、弓位置に対して毎往復同じように変化する弓圧をかけていたことがわかった。また、各周期における弓圧の最大値、最小値、範囲（最大値-最小値）について、それぞれ平均と標準偏差を求めた。また平均値に対するデータのばらつきを評価するために、標準偏差を平均値で割った変動係数（CV）を算出した。図6より、各周期の弓圧の最大値・最小値・範囲の平均からのばらつきは、経験者よりも初心者の方が大きくなった。しかしいずれも経験者と初心者間に有意

経験者	相関係数	初心者	相関係数
0	0.88	5	0.92
1	0.81	6	0.88
2	0.67	7	0.77
3	0.88	8	0.80
4	0.83	9	0.86
平均	0.81	平均	0.85

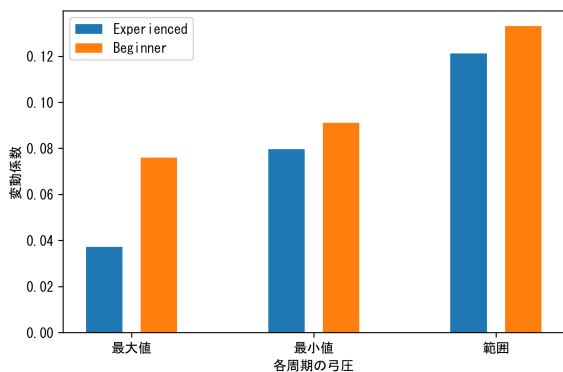


図 6 各周期ごとの弓圧の最大値・最小値・範囲（最大値-最小値）の変動係数の比較

差はなかった。

また経験者のうち、特に user0, 2, 3 はアップの方向（弓先から弓元）に弓を動かす際、弓圧が徐々に増加し、ダウンの方向（弓元から弓先）に切り替わる際に急激に弓圧が減少した。その後、弓先まで動かす間に弓圧の変化が少なかった。一方で初心者は、弓の方向に関わらず、弓先に近づくにつれて弓圧が減少し、弓元に近づくにつれて弓圧が増加した。これを検証するため、弓位置を 10 等分にわけ、各方向における各区間の弓圧の平均と標準偏差を算出した。図 7 に経験者と初心者の結果を示す。弓圧は 0-1 の値に正規化し、経験者と初心者の参加者間でそれぞれで平均した。初心者は弓の方向に関わらず、弓位置に対して弓圧がほぼ線形に変化した。弓先は持ち手から離れているため、弓元に比べて圧力が弱まったと考えられる。経験者はダウン方向の際、弓元で高い弓圧がかかった後急激に弓圧が減少し、その後一定の弓圧を保っていた。経験者はまず弓を動かし始めるのに必要な、弓と弦の間の最大静止摩擦力を越える圧力をかけ、その後弓が動き始めると動摩擦力とつり合う最低限の圧力になるように弓圧を抑えていると考えられる。これに対して初心者は、弓が動き始めてからも動摩擦力とつり合う以上の余分な圧力をかけていたと考えられる。この結果から、経験者はダウン方向ではできるだけ最小限の力で弓に圧力をかけ、弓先でも弓圧を一定に保とうとすることがわかった。経験者のアップ方向の弓動作では同様の傾向は見られなかったが、弓元に近づくにつれて弦に手や腕の重さがかかりやすくなり、弓圧が線形に増加してしまっただと考えられる。

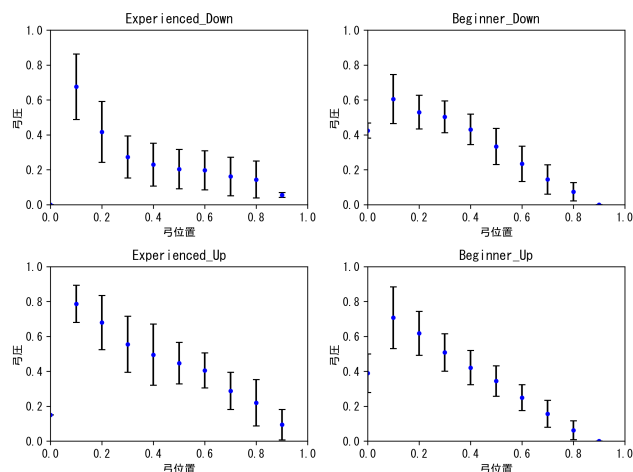


図 7 各弓方向における各弓位置区間の弓圧の平均（左側：経験者，右側：初心者）

経験者	弓速度 (/s)	CV	初心者	弓速度 (/s)	CV
0	0.204±0.086	0.422	5	0.621±1.86	3.00
1	-	-	6	0.295±0.493	1.67
2	0.245±0.276	1.13	7	0.266±0.367	1.38
3	0.482±0.739	1.53	8	0.272±0.793	2.92
4	0.250±0.275	1.1	9	0.446±1.24	2.78
平均		1.05	平均		2.35

### 3.2 弓位置と弓速度

図 5 の弓位置のグラフに着目する。初心者と比較して、経験者のグラフは弓の方向の転換が急激であった。これは、初心者が弓方向の転換をスムーズにできておらず、時間がかかったためと考えられる。

また、データを取得した時間のタイムスタンプと弓位置の変化から、各フレーム間の弓速度の平均と標準偏差を算出し、ばらつきを評価する変動係数を求めた（表 3）。user1 については実験時にタイムスタンプを取得していなかったため、算出していない。経験者と初心者の変動係数はそれぞれ 1.05 と 2.35 となり、有意水準 5% で Welch の t 検定を行ったところ、経験者と初心者間で有意差があった。よって、経験者は初心者と比較して、弓の速度が安定していたことがわかった。

## 4. 議論と今後の課題

### 4.1 実験装置について

実験中、特に弓元に向かって弓を動かしている際に、手や腕によってカメラからマーカが遮蔽され、マーカの座標取得に失敗した。実験では 3 つのカメラが一体となったモーションキャプチャカメラを用いたが、これはカメラのキャリブレーションが不要なため簡単に扱える一方、オクルージョンが発生しやすくなるという欠点がある。そのため、別々のカメラを用いたり、カメラの画角や位置を調整したり、マーカの取り付け位置を増やしたりすることで、

トラッキングが外れにくくなると考えている。また、特に初心者は弓を動かす角度や演奏姿勢が不安定で、オクルージョンが多く発生した。そのため初心者が直線的に弓を動かせるようサポートするレールなどを設置する必要がある。

弓圧計測ではロードセルの電圧値を Arduino により A/D 変換し、センサ値を取得した。この時、電圧値が 0-1023 の離散的な値に変換され、分解能が 0.06 N 程度であった。弓圧の変化の小さかった user4 や user7 ではより細かく弓圧を計測する必要がある。また、ロードセルを駒の下に設置したため、弓の弦方向の位置が駒に近いほど、測定された圧力が大きくなるという問題があった。そのため、より正確に弓圧を計測するためには、同じ位置で弓を動かせるようサポートする器具が必要である。

## 4.2 フィードバック方法の検討

実験の結果から、経験者に特有の特徴として、一定以上の弓圧の大きさを維持すること、ダウンの際に弾き始めてからすぐに弓圧を抑え、弓先まで弓圧の大きさを保つこと、弓の返しがスムーズであること、弓の速度が安定していることがわかった。1 つめの特徴に関しては、弓圧が一定の閾値を下回った場合に、弓圧を大きくするようにフィードバックできる。しかしその場合、弓が弦に触れているかを判定する必要がある。2 つめの特徴は、弓位置と弓圧を同時に計測することで、ある弓位置での弓圧の大きさの評価や他の位置との比較によりフィードバックできる。例えば弓の中央あたりの弓圧を基準として、弓位置によらずその値に近づくようにする。しかし先行研究のデバイスでは現状弓圧しか推定できないため、既存のセンサや他の追加機器によって弓位置を同時に推定できるように実装する必要がある。特徴の 3 つめと 4 つめは、弓位置の計測から弓の速度を算出できるため、弓位置を推定する方法を確立する必要がある。

またフィードバックの方法について、関連研究において視覚を用いるフィードバックは楽器と画面を交互に見る必要があるため、注意が分散し認知的負荷が高くなるという指摘があった [13]。一方触覚フィードバックの場合、認知負荷は低いが演奏に支障をきたす場合がある。本研究で着目している弓圧は、Musicjacket [13] で扱っている弓の軌道や角度のように、必ずしも正しい値が存在するわけではない。そのため、触覚よりも視覚的にフィードバックする方が強制力が低く、かつ演奏に支障をきたさないため適していると考えられる。その上で認知負荷が少なくなるように表示方法やインタフェースを工夫する必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、バイオリンの初心者と経験者の演奏動作を計測し、その差異を分析した。その結果、経験者は一定以上の弓圧の大きさを維持し、特にダウンの弓で、弾き始め

のみ大きな弓圧をかけ、それ以降はすぐに弓圧を抑えて弓先まで弓圧を保とうとすることがわかった。弓位置に関しては、経験者の方が弓の方向転換がスムーズであり、弓速度も安定していることがわかった。

これらの特徴を満たすように初心者にフィードバックすることで、演奏動作を改善することができる。そのために今後は、弓圧と弓位置を同時に計測する手法の確立や、認知負荷の少ない視覚的フィードバックのインタフェースの検討をする。最終的には初心者にもフィードバックシステムを利用してもらい、練習への効果を検証する。

## 参考文献

- [1] Fischer, S.: *The violin lesson: A manual for teaching and self-teaching the violin*, Peters (2013).
- [2] Galamian, I.: *Principles of violin playing and teaching*, Prentice Hall (1962).
- [3] Cremer, L.: *The Physics of the Violin*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1984).
- [4] Askenfelt, A.: Measurement of bow motion and bow force in violin playing, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 80, No. 4, pp. 1007-1015 (online), DOI: 10.1121/1.393841 (1986).
- [5] Askenfelt, A.: Measurement of the bowing parameters in violin playing. II: Bow-bridge distance, dynamic range, and limits of bow force, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 86, No. 2, pp. 503-516 (online), DOI: 10.1121/1.398230 (1989).
- [6] Young, D.: Wireless sensor system for measurement of violin bowing parameters, *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, SMAC'03*, pp. 111-114 (online), available from (<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:8456506>) (2003).
- [7] Fujisaki, K. and Katsura, S.: In-tool motion sensing for evaluation of violin performance, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 291-298 (online), DOI: 10.1541/ieejia.21005498 (2022).
- [8] Yin, J., Wang, Y. and Hsu, D.: Digital Violin Tutor: An Integrated System for Beginning Violin Learners, *Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Multimedia*, MULTIMEDIA '05, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 976-985 (online), DOI: 10.1145/1101149.1101353 (2005).
- [9] Tanjo, Y., Ogawa, J., Ito, S., Sakamoto, R., Umata, I. and Ando, H.: Training support system for violin bowing, *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference, AH '11*, New York, NY, USA, ACM Press, (online), DOI: 10.1145/1959826.1959863 (2011).
- [10] 榎原絵里, 宮下芳明: 磁気ヘッドと磁気テープを用いたヴァイオリン運弓練習支援システム, *インタラクティブ 2013 論文集*, pp. 709-714 (2013).
- [11] 宮里洗司, 大城聖也, 野口健太郎, 神里志穂子: 慣性センサによるバイオリンの運弓動作指導の検討, *FIT2011 論文集*, Vol. 10, No. 3, pp. 783-784 (2011).
- [12] Blanco, A. and Ramirez, R.: Evaluation of audio-based feedback technologies for bow learning technique in violin beginners, *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI International Workshop on Multimodal Interaction for Education*, MIE 2017, New York, NY, USA, ACM Press, p. 41-43 (online), DOI: 10.1145/3139513.3139520 (2017).
- [13] van der Linden, J., Schoonderwaldt, E., Bird, J. and

Johnson, R.: MusicJacket—Combining motion capture and vibrotactile feedback to teach violin bowing, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 1, pp. 104–113 (オンライン), DOI: 10.1109/TIM.2010.2065770 (2011).

- [14] Mizuho, Y., Kitamura, R. and Sugiura, Y.: Estimation of Violin Bow Pressure Using Photo-Reflective Sensors, ICMI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 216–223 (online), DOI: 10.1145/3577190.3614172 (2023).
- [15] Schoonderwaldt, E. and Demoucron, M.: Extraction of bowing parameters from violin performance combining motion capture and sensors, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 126, No. 5, pp. 2695–2708 (online), DOI: 10.1121/1.3227640 (2009).