

ヴァイオリン指板圧計測システムの構築

濱本 聖紀[†] 阪口 豊[‡]

[†] 電気通信大学 情報理工学域

[‡] 電気通信大学 大学院情報理工学研究科, 技能情報学研究ステーション

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†] h1910532@gl.cc.uec.ac.jp, [‡] yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

あらまし 道具を伴う身体技能メカニズムの理解を進めるうえで身体が道具に加える力の時空間的特性を計測・分析することは重要である。本研究では、ヴァイオリン演奏技能の理解を目的として、演奏中に楽器の指板（音高を調整するために弦を指で押す板）に加わる3次元力を計測するシステムを構築した。同様の試みは Kinoshita and Obata (2009) の先行研究で行われているが、本研究で構築したシステムは、①指板上の広い範囲（第1-2ポジションでの演奏範囲）で押弦力を計測できる点、②無線通信を利用し配線ケーブルをなくすことにより演奏動作を制約せずに計測できる点に特長がある。本報告では構築したシステムの構成と計測特性について報告する。

キーワード 身体技能, ヴァイオリン, 指板, 力計測

A System for Measuring Force onto Finger Board of a Violin

Seiki HAMAMOTO[†] Yutaka SAKAGUCHI[‡]

[†] Faculty of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

[‡] Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

E-mail: [†] h1910532@gl.cc.uec.ac.jp, [‡] yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

Abstract It is important to analyze the spatiotemporal characteristics of forces applied to tools in order to better understand the mechanism of sensorimotor skills using the tools. In the present study, we built a system for measuring the force applied onto the finger board (i.e., the wooden board under the four strings) of a violin, aiming to investigate the mechanism of violin performance. Kinoshita and Obata (2009) developed a similar measurement system, and the present study tries to make improvements in two points: 1) cable of measuring the finger force over a greater area on the finger board (specifically, the region used in the first and second positions), and 2) reducing physical constraints on the player thanks to wireless signal communication. Here, we report measurement characteristics of the implemented system.

Keyword Sensorimotor Skill, Violin, Finger Board, Force Measurement

1. はじめに

楽器演奏に関わる身体技能は時空間的に高精度な感覚運動能力によって実現されている。例えば、ヴァイオリンの演奏には左右の手指の精密な触知覚と制御が欠かせない。すなわち、ヴァイオリン奏者は、左肩・腕で楽器を支えながら左手指で指板（弦の下にあり弦を押さえる際に土台となる板）に適度な力を加えて押弦することで音高を定めることに加え、ヴィブラートによる音の響きの調整や演奏音にあわせたポジション移動（指板上で手を移動させて弦を押さえる範囲を変えること）などを行わなければならない。また、右腕・手は、弦と弓のなす角度をほぼ垂直に保ちつつ、音量や音色に応じて弦にかける圧や弓を動かす速さを微妙な調整をしなければならない[1]。

楽器演奏の身体技能に関する研究は演奏者の姿勢や動作を計測・分析するものがこれまでに数多く行われてきたが[2-6]、演奏者が楽器に加える力の大きさや向きを計測・分析する研究はあまり行われてこなかった。数少ない試みの例をあげれば、ピアノ演奏に関して、Parlitzら[7]は鍵盤と鍵盤床の間に薄い力センサーフォイルを設置し、演奏者が鍵盤を押さえている際に鍵盤にかける力の大きさを測定している。また、Kinoshitaら[8]は歪みゲージ式の力センサを鍵盤に組み込み、打鍵時に鍵盤にかかる力と演奏音の音量の関係調べている。また、ヴァイオリン演奏については、指板の一部を取り外して力センサを装着し弦を押さえる左手指の力を計測するシステムが構築されている[9,10]。この研究では、指板上の一定位置（A線弦でD5

(レ)を演奏する際の押弦位置)に設置した3軸力センサを用いて、この位置で押弦する際に作用する力をさまざまな条件下で計測している。これにより、初心者と熟練者の押弦力の違い、ヴィブラート時の力の作用の仕方など、押弦にかかわるさまざまな特性が明らかにされている。

本研究の狙いは、これらの先行研究を踏まえ、指板上のより広い範囲で指板にかかる力を計測できるシステムを構築することである。特に、先行研究[9,10]の計測系では歪みゲージを用いた20mm角サイズの3軸力センサデバイス1個を用いていたのに対し、本研究では、MEMS技術を用いた8mm角の6軸(力3軸トルク3軸)力センサデバイス4個を指板下に組み込むことにより、計測できる押弦範囲を第1,第2ポジションでの演奏範囲に拡張したシステムの実現を目指した。これにより、メロディなどの音系列の演奏やポジション移動を伴う演奏において左手指と指板のあいだで作用する力の様相を明らかにすることができる。

これに加え、本システムは、無線チャンネルを介してセンサ出力を送出することにより楽器から配線ケーブルをなくし、演奏動作への物理的制約をなくした点にも特長がある。後述するように、本稿執筆時点では当初想定した機能を完全には実現できていないが、本システムは、演奏者の演奏技能を楽器に作用する力(演奏者の力発揮の特性)の観点から分析するうえでの有用なツールとなることが期待できる。

2. システムの設計と実装

2.1. システムの目標仕様

本システムの目的は、ヴァイオリン奏者の演奏技能の物理的メカニズムの理解に加え、演奏技能習得を支援するうえで有効な手がかりを得ることである。このことから、本システムを設計・構築するにあたり以下の条件を満たすべき仕様として定めた。

①指板上の広い範囲で押弦力が測定可能であること:

音系列の演奏、ポジション移動など指板上での移動を伴う押弦時の力の作用を計測可能にする。

②演奏中に連続的に計測可能であること:

楽曲演奏中に指板に作用する力の時間変化を追跡できる。

③演奏者の演奏動作を可能な限り妨げないこと:

楽器の形状や質量を極力変化させないことに加え、楽器からの配線ケーブルをなくすことにより、演奏動作に制約を与えないようにする。

以下では、これらの条件を満たすべく定めたシステムの構成と実装方法について説明する。

2.2. システムの構成

図1にシステム全体の構成を示す。本システムは指板上で力を計測する力センサ4個のほか、センサ出力

信号をサンプルして無線チャンネル(Bluetooth)を介して送出するマイコンシステム、および、送出されたデータを受信してデータを保存、表示するPCから構成される。サンプリング周波数は200Hzである。

図2は力センサの配置を示したものである。センサは独自設計したプリント基板上に配置され、その出力はフラットケーブルにより楽器のペグボックスに置かれたマイコンに送られる。これらのセンサのうへに指板を接着することにより、通常の楽器と同じ形状の楽器として組み立てられる。

2.3. 計測の原理

本システムの計測原理は床反力計の原理と同一であり、これにより指板に付加された力とその位置(圧力中心CoP: Center of Pressure)を推定する。この計算には、6軸力センサの力出力のみを用いトルク出力は利用しない。

推定の原理は以下のとおりである。指板下に布置した4つのセンサにかかる力をそれぞれ $F_i(i=1, \dots, 4)$ とすると、指板にかかる力はこれらの総和として表される。

$$F = \sum_{i=1}^4 F_i \quad (1)$$

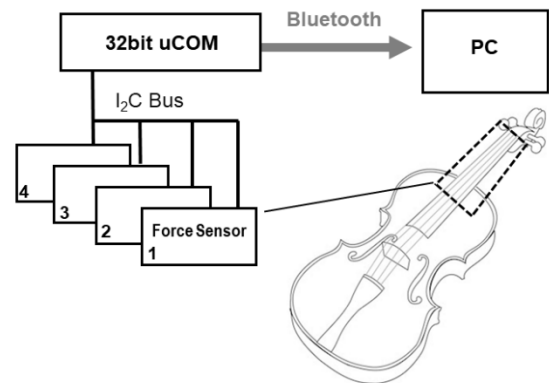


図1 システム全体の構成

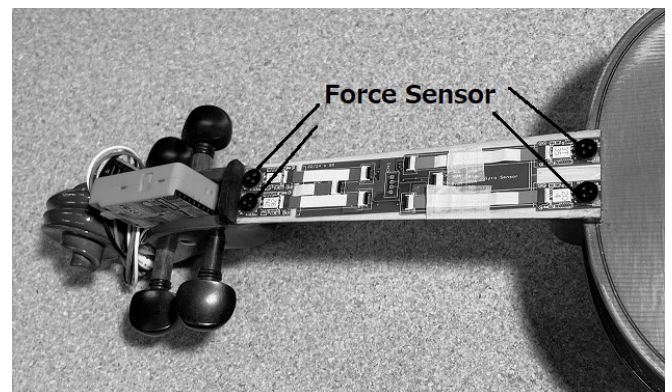


図2 力センサの配置

また、指板に加わる力のモーメントは、計測系の原点から見た力センサの位置ベクトル r_i を用いて次式により求められる。

$$M = \sum_{i=1}^4 r_i \times F_i \quad (2)$$

なお、力、モーメントはいずれも 3 次元ベクトルであり、それぞれの成分は x, y, z の添字をもって表す (x, y 軸は指板表面に図 3 に示したようにとり、 z 軸は指板に垂直な方向にとる)。なお、実際の指板表面はかまぼこ型に湾曲しているが、ここでは近似的に平面として取り扱う。

以上の準備の下で、圧力中心位置 (x, y) は次式により求められる。

$$x = \frac{-M_y + cF_z}{F_z} \quad (3)$$

$$y = \frac{-M_x + cF_y}{F_z} \quad (4)$$

ここで、 c はセンサ面と指板面との z 方向距離である。

2.4. システムの制約

前節で述べた力や圧力中心位置の推定方法はあくまで理想的な状況で成立する理論式であり、現実のシステムはこの式どおりに動作するわけではない。実際、木製部品で組み立てられたヴァイオリンは剛性が十分でないため、実装したシステムに計測・推定誤差が生じることは避けられない。したがって、他の計測器での測定値とシステム出力値との関係を調べ、その関係性を利用して計測・推定値を補正する必要がある。

本システムでは計測範囲が第 1、第 2 ポジション演奏範囲に限定されているが、この制限は「力の鉛直成分が負になってはならない」という力センサデバイス固有の制約によるものである。また、このデバイスの計測分解能は歪みゲージを用いた力センサデバイスに比べて低いため、得られる力計測値の絶対的精度は先行研究[9,10]のシステムと比較して劣る。

なお、上記方法で推定される圧力中心は指板上に付加された力の平均位置であるため、指板に触れている指が 1 本だけであれば押弦位置を正しく推定できるが、複数の指が同時に触れている場合には押弦位置を正しく推定することは原理的に不可能である。

3. システムの評価

3.1. 評価の方法

弦を張っていない状態で指板上のさまざまな位置に力を付加してセンサ出力を取得し、その結果をもとにシステムの特性を評価した。

具体的には、楽器を固定したうえでフォースゲージを介して指板上部から垂直方向に一定の力を加えた。力を加えた位置は、図 3 に示すとおり、ヴァイオリン

の 4 本の弦の直下で演奏中に押弦する位置 (半音ごとの音高に対応する位置) 9 か所、合計 36 か所である。ただし、図中の 1 番の位置は指板先端から 1 mm 程度内側で通常演奏中には押さえる位置ではない。付加する力の大きさはフォースゲージ上で 5.0 N と表示されるように定めた。ただし、ゲージ画面で表示される数値は一定ではなく 0.1 N 程度の振幅で変動していた。

3.2. 鉛直力の計測値

図 4 は、図 3 に示した 36 か所の位置に 5N の力を加えた際にシステムが出力した力の鉛直方向成分 F_z の値を示したものである。図の横軸は指板の y 方向の 9 か所の位置 (図 3 の 1 から 9) であり、グラフは弦ごとに出力値を表している。図からわかるように、E 線以外の 3 弦直下位置では、システムの出力量は望ましい出力値 5N と比べて 5—10 % 程度低い値となった。また、全体的傾向としてシステムの出力量は G 線から A 線に向けて次第に大きくなった。

一方、E 線下での計測値は力の付加位置に依存して大きく変化し、望ましい出力値から大きく外れた値をとった。これは E 線上で力を付加したときに指板にかかる力がセンサデバイスに適切に伝達されていないためと推測されるが、現時点では原因不明である。この問題を解決することで他の弦の直下の計測値の誤差も減少することが考えられる。

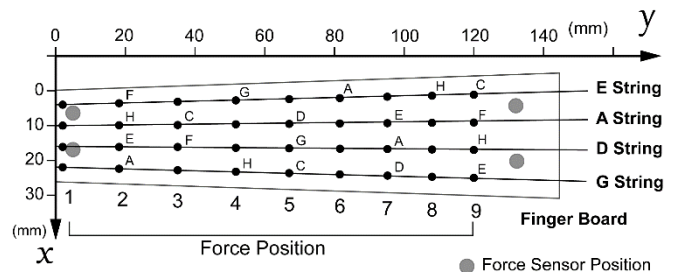


図 3 力を付加した位置

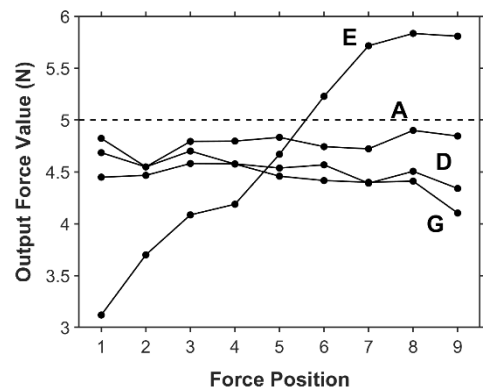


図 4 鉛直方向成分の計測特性

3.3. 圧力中心位置の計算

図5は式(3)(4)に基づいて計算した圧力中心位置を示したもので、点線上のマーカは力を加えた真の位置、実線上のマーカは対応する圧力中心位置を表す。誤差はx方向に最大5.5 mm, 平均2.3 mm, y方向に最大9.7 mm, 平均4.3 mmであった。全体的傾向として、y方向には座標値が小さくなる方向に誤差が生じ、その大きさは弦によらず一定であったのに対し、x方向には座標値が大きくなる方向に誤差が生じ、その大きさはG線からE線に向かうにつれて増加していた。

この結果に基づき、力を加えた真の位置と式(3)(4)に基づいて計算した圧力中心位置の関係を表す線形回帰モデルを作成した。具体的には、x方向の圧力中心位置をx, y方向の真の位置を用いて説明する回帰モデルと、y方向の圧力中心位置をy方向の真の位置を用いて説明する回帰モデルを作成した。そのうえで、作成した回帰モデルを逆方向に用いることにより、式(3)(4)により得られた圧力中心位置を補正する処理を行った。具体的には、まずy方向の回帰モデルを用いてy方向の力付加位置を推定し、次に、得られたy方向推定位置を利用してx方向の回帰モデルを用いることによりx方向の力付加位置を推定した。

図6はこの方法を用いて補正した圧力中心位置を示したものである。この補正処理により、誤差はx方向に最大2.0 mm, 平均0.5 mm, y方向に最大4.4 mm, 平均2.1 mmまで減少した。ただ、この位置精度では演奏中の押弦位置を計測する目的には未だ十分でなく、精度向上に向けた改良が必要である。

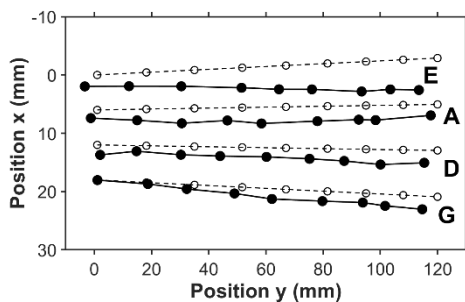


図5 理論式から計算した圧力中心位置

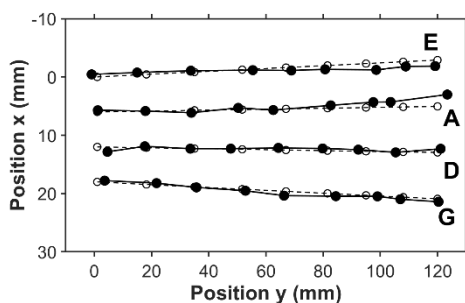


図6 回帰モデルで補正した圧力中心位置

4. まとめと考察

本研究では、ヴァイオリンの指板上の広い範囲で指板を押さえる力を計測できるシステムを構築した。現時点では望ましい出力が得られていないが、3.3節で示したように圧力中心位置の推定では理論計算と概ね対応する結果が得られていることから、3.2節で述べた力計測値の問題が解消されれば、より高い精度で計測値・推定値が得られるものと考えている。

2.4節で述べたように本システムには計測値の絶対的精度という点で限界があるが、以上の問題が解決できれば、演奏条件間の比較、熟練者と初心者の比較といった相対的な違いの分析には十分な特性を有しており、ヴァイオリン楽曲演奏における身体技能メカニズムの理解に役立てることができると考えている。

本研究は科学研究費補助金・基盤研究(B)22H03674の補助を受けて行われた。また、楽器の加工にあたってはヴァイオリン職人の岩下誠治氏の多大なる協力を得た。この場を借りて謝意を表す。

文 献

- [1] 藤原：「ヴァイオリンとヴィオラの小百科[付]ヴィオラ・ダモレ。増補版」, 春秋社, 2008.
- [2] Schoonderwaldt, E. and Demoucron, M.: Extraction of bowing parameters from violin performance combining motion capture and sensors, *Journal of the Acoustical Society of America*, 126, 2695–2708, 2009.
- [3] Rahman, M.M., Mitobe, K., Suzuki, M., Takano, C., and Yoshimura, N.: Analysis of dexterous finger movement for piano education using motion capture system, *International Journal of Science and Technology Education Research*, 2(2), 22–31, 2011.
- [4] Furuya, S., Nakamura, A. and Nagata, N.: Acquisition of individuated finger movements through musical practice. *Neuroscience*, 275, 444–454, 2014.
- [5] D’Amato, V., Volta, E., Oneto, L., Volpe, G., Camurri, A. and Anguita, D.: Understanding Violin Players’ Skill Level Based on Motion Capture: a Data-Driven Perspective. *Cognitive Computation*, 12(6), 1356–1369, 2020.
- [6] Allingham, E., Burger, B. and Wöllner, C.: Motor performance in violin bowing: Effects of attentional focus on acoustical, physiological and physical parameters of a sound-producing action. *Journal of New Music Research*, 1–19, 2021.
- [7] Parlitz, D., Peschel, T. and Altenuller, E.: Assessment of dynamic finger forces in pianists: Effects of training and expertise, *Journal of Biomechanics*, 31, 1063–1067, 1998.
- [8] Kinoshita, H., Furuya S. and T. Aoki, T.: Loudness control in pianists as exemplified in keystroke force measurements on different touches, *Journal of the Acoustical Society of America*, 121, 2959–2969, 2007.
- [9] Kinoshita, H. and Obata, S.: Left hand finger force in violin playing: tempo, loudness, and finger differences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(1), 388–395, 2009.
- [10] 小幡, 木下：バイオリン演奏時の左手指板力の計測と解析, *バイオメカニズム*, 22, 37–47, 2014.