

演奏ルールを用いたウッドベースのための実時間運指取得システム

澤 光映[†] 竹川佳成^{††} 寺田 努[†] 塚本昌彦[†]

[†] 神戸大学大学院工学研究科

^{††} 神戸大学自然科学系先端融合研究環

弦楽器演奏において運指は演奏に影響する重要な要素であるが、同じ楽曲であっても演奏家の身体的特徴や音楽の表現方法によってさまざまな運指が考えられるため、楽曲から運指を一意に決定することは難しい。一方、実際に演奏を聞きながらリアルタイムで演奏者の運指情報を得られれば、誤った運指を認識し、修正するなどの効率的な演奏学習が可能となる。そこで、本論文では、カメラベースのシンプルな画像処理と、ウッドベース（コントラバス）の演奏特性をもとに定義したルールを組み合わせることで、実時間で高精度にウッドベース演奏の運指を取得するシステムの構築を目的とする。提案システムは、指に貼り付けた小型のカラーマーカをカメラで読み取り、ウッドベースの演奏特性から定義したルールを用いて検出結果を補正することで高精度な運指検出を行う。評価実験として、ウッドベース習熟者に3つの楽曲を演奏させた結果、提案手法を用いた場合、96%の正答率で運指が取得できることを確認した。

A Real-Time Fingering Detection System for Contrabass Using Musical Rules

Mitsuteru SAWA[†] Yoshinari TAKEGAWA^{††} Tsutomu TERADA[†] Masahiko TSUKAMOTO[†]

[†] Graduate School of Engineering Faculty of Engineering, Kobe University

^{††} Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

Fingering is one of the important aspects in contrabass performances because it affects contrabass players' musicality. If contrabass players share the real-time fingering of the performer, it helps them for learning professional contrabass performances. In response to these requirements, the goal of our study is to construct a real-time fingering detection system for contrabass players. Our system achieves the real-time fingering detection by integrating a simple camera-based image detection and musical rules. We have developed a prototype system, and evaluated its effectiveness by actual use of the system. The evaluation results confirmed that our system detects fingerings in 96% accuracy.

1 はじめに

演奏家は、望む音楽表現を実現するために、さまざまな演奏技術を駆使する。その1つに運指（指使い）がある。運指の違いは、ウッドベース（コントラバス）において、音程の良し悪し、フレーズ自体の弾きやすさ、音色などの音楽表現に大きく影響するため、演奏家は、弾きやすさや効率より作品の意図を考えた音楽的な指使いを選ぶ。意図する音楽表現は演奏家各々で異なるため、優れた運指は数多く存在する。

一方、我々が得られる運指情報は、作曲家や演奏家、教育者によって書き入れられた楽譜や教則本など数少ないため、レッスンなど教育の現場では、指導者は生徒の演奏を実際に見ながら適した運指の指導を行っている。しかし、地理的に離れた教師と生徒がレッスンを行う遠隔レッスン [1] では、質の高いテレビ会議システムの構築はコスト面で難しく、指導者は生徒の演奏状況を十分に確認できない。したがって、リアルタイムに演奏者の運指を取得する技術が求められている。リアルタイムに運指情報が取得できれば、遠隔レッスン以外にも、誤った運指を認識し、修正するなどの独習支援や、演奏と運指を同時に見ながらの効率的な演奏学習が可能となる。

これまでに筆者らの研究グループでは、カメラベースのシンプルな画像処理と、鍵盤の演奏特性をもとに定義した演奏ルールを組み合わせることで、実時間で高精度にピアノ演奏の運指を取得するシステムを構築した [2]。しかし、このシステムは運指取得を鍵盤楽器に限定しており、ウッドベースのように、同一の音高を発音する方法が複数通り存在し、音高指定と撥弦が異なる位置で行われる [3]、といった特性をもつ楽器にそのままでは適用できない。そこで本論文では、ウッドベースを対象とした実時間運指取得システムの構築を目的とする。

提案システムでは、指に貼り付けた小型のカラーマーカをカメラで読み取り、さらにウッドベースによる演奏特性をルールとして定義し、カメラによる検出結果を補正することで高精度な運指検出を行う。

以下、2章でシステムの設計や演奏ルールについての詳細を述べ、3章でシステムの実装を説明する。4章では評価について述べ、5章で考察を行い、最後に6章で本論文のまとめを行う。

2 システムの設計

本論文で構築する運指取得システムは、以下の方針をもとに設計した。



図 1: 指先に付けたカラーマーカー

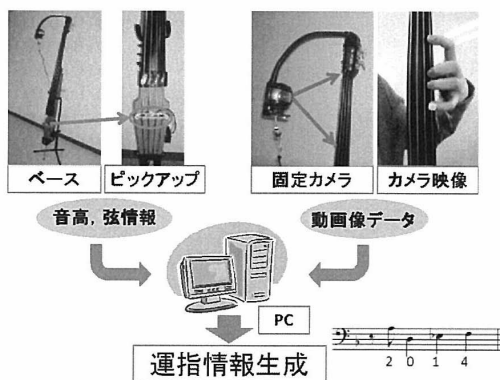


図 2: システム構成

1. 演奏を妨げない運指取得
2. 演奏ルールを用いた補正処理

1. に関しては、コンサートやレッスンなど演奏者が演奏に集中していても利用できるような出来る限り演奏を妨げない、つまり指に余計なデバイスをつけずにシステムを実現することを目指した。提案システムではカメラを用い、図 1 に示すように各指の爪に貼り付けたカラーマーカーの画像処理から運指取得を行う。カラーマーカーは薄いシールであり、装着に違和感が少ない。

2. に関しては、演奏や弦の配列、手の特性をもとに定義したルールにより運指を補正する。提案システムは実時間処理を実現するため、画像処理をシンプルにしており、正確な運指の取得は困難である。また、演奏時には指が見えにくくなることもあるため、画像処理だけで正確に指の位置を特定することは難しい。そこで、本システムでは目的をウッドベース演奏に特化し、ウッドベースのピックアップから生成される押弦イベント（ノートオン）や離弦イベント（ノートオフ）の発生と画像処理を連携させることで押弦位置を特定し、さらに、ウッドベースの運

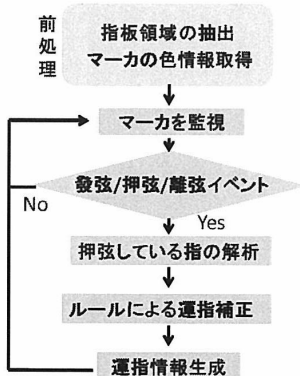


図 3: 運指解析処理のフローチャート

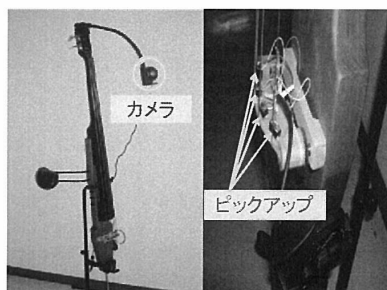


図 4: カメラの固定位置

指特性や特徴的なパターンをルールとしてもつことで運指情報の修正を行う。

2.1 システム構成

提案する運指取得システムの構成を図 2 に示す。カメラを用いて取得した指板領域とマーカーの動画データ及び、ピックアップから得られる MIDI 情報（音高、弦番号）をもとに PC 上で運指を特定する。以下、PC 上での運指解析処理について説明する。

運指解析処理の流れを図 3 に示す。カメラは図 4 に示すように、ベース本体に固定し、前処理としてカメラ画像から指板領域を抽出する。以降の処理は、指板領域に対してのみ行われる。また、カラーマーカーの色抽出は、カメラ画像から得られた RGB 値を輝度変換に強い HSV 値に変換し、認識させる。

撥弦操作を行う右手は、ピッチカート奏法（弦を指ではじくことによって音を出す演奏技法）の場合、基本的に人差指を使用するため、右手の運指解析を行わない。押弦していない指の状態は、運指特定において重要であるため、システムは撥弦操作時だけでなく常にカラーマーカーを監視しておき、押弦（離弦）が生じたときは押弦（離弦）した指を解析する。ま

表 1: 運指ルール

ルール番号	項目
1	第1フレットは人差指で押弦する。
2	運指ポジションが検出できれば、運指は一意に決まる。
3	ローポジションでは親指、薬指で押弦しない。
4	ハイポジションでは小指で押弦しない。
5	指の交差は生じない。
6	開放弦は押弦しない。

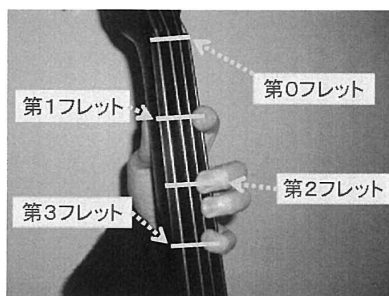


図 5: ウッドベースのフレットの位置

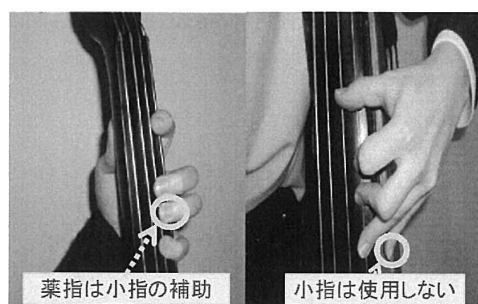


図 6: ローポジション (左), ハイポジション (右) における左手のフォーム

た、ルールによる運指補正は、撥弦操作時を含めて常に実行される。

2.2 ルールによる運指補正

本研究ではシンプルな画像処理を用いてマーカの位置検出を行っているため、マーカや運指の認識ミスが生じる。一般に、認識精度を上げるためには特別な画像変換や複雑なパターン認識を用いるが、それらを適用すると計算コストが高くなり、リアルタイム処理が難しくなる。また、押弦している指が他の指に隠れるなどそもそも画像処理では指を認識できない状況も起こりうる。そこで、ウッドベース演奏の特徴を活かし、演奏や弦の配列をもとに定義したルールを用い、運指の修正や運指が認識できなかったときの予測を行う。表 1 に本システムで適用した運指ルールを示す。

ルール 1

第1フレットは人差し指で押弦する。フレットとは、図 5 に示すように、楽音を発音するための指板上の位置を表す。ウッドベースでは、ヘッド側から順に第0フレットから第24フレットとナンバリングされ、フレット間の音程は半音である。本ルールは、楽器の構造上、第1フレットは人差し指で押さえることが合理的であり、ウッドベース演奏では一般的であることを利用したものである。また、検出したマーカの位置に依存せず、MIDI ノートナンバーと弦番号で運指が一意に定まるため、第1フレットの運指を正確に検出できる。

ルール 2

ウッドベース演奏者は、図 5 に示すように、指板に仮想的にフレットがあると見立て、3つの連続するフレット上に押弦に使用する指を順番に配置することが一般的である。本ルールを用いることで、例えばローポジションで実際の運指が中指とし、その運指が未検出の場合、未検出の運指の上下のフレット上のマーカを探索し、どちらか一方のマーカが検出できればその運指を中指に決定できる。

ルール 3

本論文では、ローポジションを第0フレットから第11フレットまでのポジションの総称とする。ローポジションでは、図 6(左) に示すように、人差し指、中指、小指を押弦に使用する。親指はネックの後ろ側から押弦する指を支える。薬指は小指が押弦する時の負荷を軽減するための補助的な役割を担っている。本ルールを用いることで、ローポジションで発弦が発生した場合、親指、薬指が運指として認識されたときの誤認識を検出できる。薬指が検出された場合、薬指に隣接している中指および小指を運指候補とし、マーカの検出率が高いほうを運指として採用する。一方、中指、小指の両方とも検出されない場合、薬指の検出された1つ上のフレット上で人差し指が検出されれば、薬指は中指に隣接しているとみなし、中指を運指候補として採用する。2つ上のフレット上で人差し指が検出されれば、薬指は小指に隣

接しているとみなし、小指を運指候補として採用する。また、薬指のみ検出された場合、押弦する左手のフォームより、中指を運指候補とする。

ルール 4

本論文では、ハイポジションを第 12 フレットから第 24 フレットまでのポジションの総称とする。図 6(右)に示すように、ハイポジションでは、親指、人差し指、中指、薬指を押弦に使用し、小指は使用しない。そのため、小指を運指の候補から除外できる。本ルールでは小指が検出された場合、小指に最も隣接している薬指を運指とする。

ルール 5

ルール 2 で述べたように、ウッドベースには運指ポジションを基にした構え方が存在するので、人差し指が小指をまたいで押弦する、というようなことはない。

ルール 6

楽器の特性上、開放弦では押弦しないため、開放弦に運指は存在しない。

3 システムの実装

2章で述べた運指取得システムのプロトタイプを実装した。PC としては、ASUS 社の P5B-VM(CPU Core2 Duo 2.13GHz, RAM 3GB)を使用し、カメラは、Creative 社の WebCam Live!Motion(解像度 320 × 240, フレームレート 最大 30fps)を用いた。使用楽器はウッドベースとほぼ同じスケール(弦長)をもつ ARIA 社のアップライトベース SWB-LITE sp を使用した(図 4)。撥弦された音を MIDI 情報として取得するために、ベースにアクティブピックアップである Roland 社の GK-3B を装着し、MIDI インターフェースとして Roland 社の GI-20 を用いた。マークは 3M 社のスコッチライトと、kinsem 社の蛍光テープから判別しやすい色を選定し、親指から小指にかけて赤、緑、青、ピンク、黄の 5 色を各爪に貼り付けた。カメラはベース頭部にステンレス管を用いて固定し、爪に貼ってあるマークがよく見える位置に調節した。1 台のカメラで処理する指板領域が広くなると相対的にマークが小さくなり認識率が低下するため、今回のプロトタイプでは 1 台のカメラによる認識範囲を、各弦開放弦の位置から 5 フレットまでとした。PC 上のソフトウェアの開発は、Windows XP 上で Visual C++ .NET2005 と Intel 社の OpenCV ライブラリを用いて行った。なお、各カラーマークの色抽出は、サンブル HSV 値をあらかじめ取得しておき、それぞれの値から一定範囲内に入っている色を抽出する方法で行った。

4 評価と考察

実装したプロトタイプの有効性を示すために、ウッドベース習熟者 3 名に 3 つの曲目を演奏させ、運指認識の正答率を調査した。また、ルールを適用した

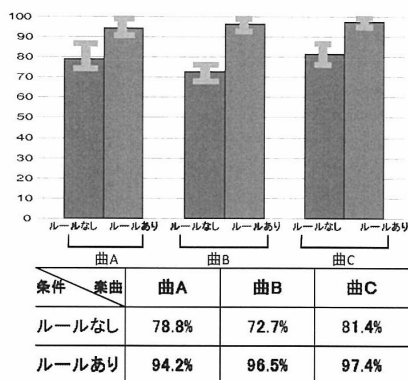


図 7: 認識正答率

場合とそうでない場合とで比較しルールの有効性について検証した。以下に、実験の詳細を述べる。

4.1 実験の手続き

課題曲

表 2 に実験で演奏した課題曲とプロフィールを示す。また、実験では、曲 A はそのコード進行をもとにしたウォーキング・ライン 16 小節。曲 B は A メロディー 8 小節、B メロディー 8 小節の計 16 小節。曲 C は最初から 16 小節目までを譜面どおり演奏してもらった。

曲 A はほぼ 4 分音符のみで構成され、Jazz ではメロディーを歌う楽器の伴奏として演奏される一般的なベースラインである。また、曲 B は課題曲の中でもっともテンポが遅い楽曲であるが、A 曲と比べて 8 分音符主体でよりメロディアスな楽曲である。曲 C は課題曲の中でもっともテンポが速く、8 分音符や 2 拍 3 連符などリズムミカルで音の跳躍も多い。

被験者

課題曲を楽譜に指定されたテンポで十分に弾きこなせるウッドベース歴 7 年の大学生 1 名、ウッドベース歴 4 年の大学生 1 名と、ウッドベース歴 4 年の筆者の 3 名で実験した。

システム構成

プロトタイプシステムを用い、MIDI 情報(音高と弦情報)、撥弦のタイミング、ルールを適用したときの運指とルールを適用しなかったときの運指、運指の上下のフレット上にあるマークを認識した。また、被験者の手元をデジタルビデオカメラで撮影することで正解運指列を得た。

実験の手続き

被験者は曲 A から C の順にすべての曲を 3 回づつ弾き、弾きやすい運指で楽譜に指示されたテンポで演奏してもらった。指板領域は開放弦の位置から第 5 フレットまでとした。

表 2: 課題曲

楽曲名	作者名	テンポ	略称
THE DAYS OF WINE AND ROSES	Henry Mancini	4 分音符 = 120	曲 A
FOUR	Miles Davis	4 分音符 = 100	曲 B
LULLABY OF BIRDLAND	George Shering	4 分音符 = 140	曲 C

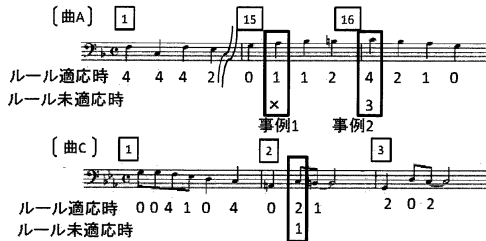


図 8: 認識結果の詳細

4.2 評価結果

図 7 に各楽曲のルール適応時と未適応時の運指認識正解率を示す。ルール適応時の運指認識正答率は平均して 96% と高く、同音異弦の識別ができ、高速で複雑な演奏の追従を高い精度で行えた。

以下、3.3 節で定義したルールを適用することで、どのように誤認識が解決されたかについて事例をもとに述べる。また、今回の実験では指板領域を開放弦の位置から第 5 フレットまでとしたため、ハイポジションで適用されるルール 4 は除外した。

事例 1

マーカ認識の不安定さから、運指を認識できない場合がある。しかし、図 8 に示す「曲 A の 15 小節目の Ab 音」のような第 1 フレット上に運指の音高がある場合、ルール 1 を用いることで人差し指を運指とした。

事例 2

図 8 に示す「曲 A の 16 小節目の 1 拍目の C 音」はローポジションであるが、ルール未適応時、薬指で押弦していると誤認識していた。ルール 3 を適用することで薬指は運指候補から除外され、小指を運指とした。

ルール適用時にうまく認識できなかった箇所

図 8 に示す「曲 C の 2 小節目の 2 拍目の C 音」では、実際には中指で押弦していたが人差し指で押弦していると誤認識してしまった。これは事例 2 においてルール 2 がうまく機能しなかった例である。ルール 2 では左手が正しいフォームで押弦されることを想定しているが、この押弦されたときの左手のフォームをビデオ映像で確認したところ、人差し指

が運指認識するフレット近傍にあり、マーカの検出率が人差し指のほうが中指よりも高かったため誤認識してしまった。

5 考察

運指の予測

本論文で使用したルールは、いずれも指板領域内でマーカが必ず検出されることを前提に考えた。そのため、マーカが 1 つも検出されない場合は運指を特定できない。この問題を解決する方法として、MIDI 情報のみを利用し、前後の音列の構造パターンから運指を推測する方法が考えられる。例えば、楽曲中の同じフレーズは高い確率で同じ運指を使うことが多い。したがって、運指履歴から運指を推測できる。

ピックアップの誤認識

図 4(右) に示すように、プロトタイプでのピックアップは、ウッドベース専用の MIDI 出力可能なピックアップがなかったため、Roland 社の GK-3B を使用した。このピックアップは、エレキベースでの利用を前提としている。したがって、実験では本来発音されていないはずの MIDI ノートが何度か検出された。そこで、この問題は、ウッドベース用の MIDI 出力可能なピックアップが開発されれば解決できる。評価では、ありえない MIDI ノートは除外した。

処理速度

1 フレームあたりの処理時間は平均 20msec とカメラのフレームレート内で画像処理を完了できた。今後は、1 台の PC でより広い音域を認識するために複数台のカメラの使用を考えている。また、状況に合わせて適用するルールを動的に選択し処理の軽減を行う予定である。

関連研究

弦楽器の運指取得を主目的とした研究事例は少ない。データグループ [4] や Lightlove[5] から出力されるデータを用いれば運指を取得することが可能であるが、これらのデバイスはウッドベース演奏を使用目的として考えていないため、指にまわりつくセンサや手首に設置する回路、配線などで演奏を妨げてしまう。

また、想定楽器は異なるが、バーチャルキーボード [6] は本研究と同様のアプローチでカメラを用いて実時間指先検出を実現している。しかし、画像処理ベースで認識を行い、用途は PC 用キーボードで

あり、画像処理のみを用いているため、手や指の形状が複雑に変化するウッドベース演奏の運指認識に適用できない。

サイバーギター [7] は、フォトトリフレクタ方式による撮像システムをギター本体に組み込み、楽器側から運指を認識している。しかし、サイバーギターは楽器本体に特別な装置を埋め込む必要があり、個人が所有している楽器をそのまま使用して運指を認識できない。

筆者らの研究グループでは、カメラベースのシブ的な画像処理と、鍵盤の演奏特性をもとに定義した演奏ルールを組み合わせることで、実時間で高精度に鍵盤演奏の運指を取得するシステムを構築してきた [2]。このシステムは運指取得を鍵盤楽器に限定しており、ウッドベースのように、同一の音高を発音する方法が複数通り存在し、音高指定と撥弦が異なる位置で行われる、といった特性をもつ楽器にそのままでは適用できない。

一方、あらかじめ入力しておいた楽曲データをもとに運指を自動生成する試みは多数存在する。鍵盤運指生成のアプローチとして、光と振動を活用した演奏者に合う指使いを学習できるシステム [8] などがあり、弦楽器では、単旋律のギター演奏における最適な押弦位置を決定するシステム [9] などがある。これらは、手や指に負担をかけない模範的な運指を生成することを目的としており、実際に演奏者が弾いている楽曲の運指をリアルタイムで取得することを目的としている本研究とは異なる。また、これらの方式では 1 章で述べたような音楽的な指使いを生成することは難しく、実用性に問題がある。ただし、これらの研究はいくつかの運指ルールを含んでおりこれらのルールを取り込むことで提案方式の精度を高められる可能性がある。

6 おわりに

本論文では、爪に貼り付けたカラーマーカをカメラで認識することで実時間でウッドベースの運指を取得するシステムを設計し、プロトタイプを実装した。提案システムは実時間処理を実現するために複雑な画像処理は行わず、演奏やポジションの変化により変化する左手のフォーム等、ウッドベースの特徴をもとに定義したルールから運指認識率の向上を図った。プロトタイプシステムの評価結果より、運指を高い精度で取得できることがわかった。今後の課題としては、これまでの章で述べたもの以外に、ウッドベース上の全音域での運指検出や、本システムを活用したアプリケーションの開発、右手の運指取得、他の弦楽器への応用、さまざまなレベルのウッドベース習熟者による評価実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、中山隼雄科学技術文化財団研究助成の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 遠隔レッスンシステムのホームページ:
<http://www.yamaha-mf.or.jp/onken/soft/theme5.html>.
- [2] 竹川佳成, 寺田 努, 西尾章治郎: 鍵盤楽器のための実時間運指取得システムの構築, コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学会論文誌), Vol. 23, No. 4, pp. 51-59, 2006.
- [3] F. Simandl: *New Method for the Double Bass/Book 1*, Carl Fischer Music Dist, 1984.
- [4] データグローブのホームページ:
<http://www.vrealities.com/glove.html>.
- [5] B. Howard and S. Howard: Lightglove: Wrist-Worn Virtual Typing and Pointing, *Proc. of the Fifth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '01)*, pp. 172-173, 2001.
- [6] 松井 望, 山本喜一: バーチャルキーボード: ビデオ画像からの頑健な実時間指先検出の実現, 第3回プログラミングおよび応用のシステムに関するワークショップ (SPA '00) 論文集, 2000.
- [7] 青木直史, 桶橋 真, 岸本英一, 安田星季, 岩越睦郎: 画像処理によるギター運指動作のキャプチャリング, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p. 110, 2005.
- [8] 大河原正憲, 武田正之: 演奏者に合う指使いを学習できる光と振動を活用したピアノ独習支援システム, 第15回日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS '07), pp. 153-154, 2007.
- [9] 三浦雅展, 柳田益造: 単旋律ギター演奏における最適押弦位置決定システムの構築, 情報処理学会研究報告, pp. 127-132, 2002.