

# 初学者に有用なバイオリン教本運指の自動推定

酒向 慎司<sup>1,a)</sup> 渡邊 樹里<sup>1</sup>

概要：バイオリンは同じ音に対応する運指が複数ある楽器であり、適切な運指習得の手段として、運指が部分的に併記された教本が用いられている。我々はこれまでに統計モデルによるバイオリンの自動運指推定手法を検討し、条件付き確率場を用いた手法を提案してきた。これまでの問題設定では、与えられた楽譜すべてに運指を推定することであったが、運指の習得を支援するシステムという観点では、市販されている教本のような運指の習得を促すような部分的な運指標示が有効ではないかと考えた。本報告ではこのような着眼点の元で、これまでに提案してきた運指推定手法を拡張し、演奏技術の習得に効果的な運指標示の推定手法について検討することとする。楽譜や運指推定結果をもとに運指標示の有無に関する特徴について検討し、楽譜から運指推定を行うとともに運指標示の有無を決定する手法を提案する。市販の教本との比較や、バイオリン演奏者による主観評価実験について報告する。

## 1. はじめに

バイオリンは、左手の指で弦を押さえることにより音高を変化させて演奏する楽器である。この左手の指使いのことを運指という。バイオリンが属する弦楽器では同じ音高を発することができる運指が複数存在するため、演奏を行う場合には音高ごとに複数パターン存在する運指の中から適切な一つを選択する必要がある。同じ音高の音符でも、演奏する条件や曲の場面によって適切な運指が異なるため、演奏のしやすさ、演奏表現、演奏者の習熟度などの要素を考慮した上で運指が選択される。

一般的に、バイオリンの運指は楽譜には記載されていないことが多い。そのため、演奏者は経験則によって、または練習の中で試行錯誤をすることによって、適切な運指を判断して演奏を行っている。しかし、経験の浅い初級者にとってはそれは容易ではなく、時には試行錯誤の末に必要な以上に難しい運指を選択してしまうこともある。このように、難しい運指を選択し続けることによって不自然な運指判断能力が身につけてしまうと、曲の難易度が上がった場合に演奏が困難になってしまう危険性がある。そこで、初級者が運指を含めたバイオリン演奏の基礎を学ぶための入門書として、バイオリン教本が広く用いられている。

バイオリン教本には、初級者が正しい運指を身につけるために運指が記載されている。ただし全ての音符に運指が

標示されているのではなく、部分的に運指が標示されているという形が殆どである。運指が標示されている箇所は、その音符に対して取りうる運指の候補が多く、演奏者が適切な運指を判断することが難しいと考えられる箇所である。反対に運指が標示されていない箇所は、前後の音符の運指や音高などから簡単に運指が判断できると考えられる箇所である。このようにして、演奏者が運指を判断する過程で部分的に適切な運指を示すことによって初級者の運指判断能力を正しく向上させることができるため、バイオリン教本に沿って練習を進めていくことが初級者教育に有効な方法の一つだと考えられる。

楽器の学習支援に関する研究としては、これまでにピアノ [1], [2] などを対象として行われてきた。バイオリンを対象とした研究も行われており、運弓の動作指導を行う研究 [3] や、押弦位置を視覚的に提示する研究 [4] がある。本研究では将来的な展望として運指を提示することによる学習支援に着目する。

その理由として、バイオリン教本に掲載されている曲数は限られており、初級者が演奏技術習得の過程で触れる曲のレパートリーは奏者間で似通っていることが多い。演奏技術が向上すれば様々な楽曲に挑戦することもできるようになるが、演奏技術習得の段階から多くの曲に触れることができれば、初級者のモチベーションや訓練効果を高めることが期待できる。このような観点から任意の楽譜から運指を推定する技術が有望である。

任意の楽曲の楽譜から自動で運指を推定する研究はこれまでも幾つか行われており、初級者に適切な運指を提示することがその目的の一つとしておかれている。運指を自

<sup>1</sup> 名古屋工業大学  
Nagoya Institute of Technology, Gokisocho, Showa-ku, Nagoya, 466-8555, Japan

<sup>a)</sup> s.sako@nitech.ac.jp

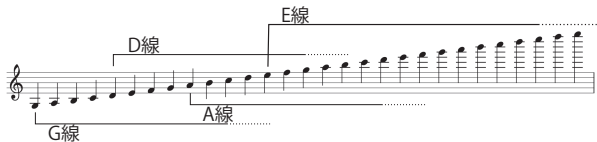


図1 バイオリンの音域

動推定する研究は、バイオリン [5] の他にも、それに先行するものとしてギター [6], [7], [8] やピアノ [9] などを対象として行われてきた。これらの研究に共通して、楽譜情報を入力として運指を推定する際、与えられた全ての音符について適切な運指を推定するという問題設定がなされている。しかし教育支援システムという観点では、推定された運指全てを標示することによって次のような懸念が考えられる。

まず、多数の運指が表示されることによる楽譜の判読性の低下である。この問題は、音符長が短い音符が多く並ぶような箇所ほど顕著に表れると考えられる。次に、初級者の習熟の妨げとなる可能性がある。ある曲について全ての運指が標示された場合、初級者には有用である半面、標示された運指に頼りきって演奏を行ってしまう恐れがある。このような演奏を続けた場合に、適切な運指がどうあるべきかの判断能力の向上は見込めないのではないかと考えた。そこで、バイオリン教本のように推定した運指を部分的に標示できれば、初級者の運指判断能力の向上につながり、教育支援システムとして有用ではないかと考える。

このような考えのもとで本研究では、長田らの手法を拡張することにより、バイオリン教本のように運指を部分的に標示できる新たな自動運指推定手法を検討する。なお、このような技術の対象者として初級者向けのバイオリン教本（各教本の1, 2巻相当）を学ぶ奏者であることを前提とし、それ以降の中級者などへの対応は本研究の範囲外とする。

## 2. バイオリン運指について

### 2.1 バイオリンの音域

バイオリンは、指板と呼ばれる板の上に4本の弦が張られている。それぞれの弦は材質や太さが異なり、それにより異なる音色や音高を奏でることができる。弦は指板を上から見て左側からG線、D線、A線、E線と呼び、特別な指示がない限りはそれぞれG3, D4, A4, E5にチューニングされ、これらが各弦の最低音にあたる。それぞれの弦の音域は1.5オクターブから2オクターブ、全体の音域は約4オクターブほど(G3~G7)だとされている。図1に一般的なバイオリンの音域を示す。

### 2.2 バイオリンの奏法と運指

バイオリンは楽器本体を左顎と左肩の間に挟んで左手で



図2 教本の運指表示の一例

支え、右手に弓を持って演奏する。左手の親指を除いた人差し指から小指までの4本の指の指先で指板を押さえるようにして押弦することにより、音高を変化させることができる。この左手の指使いのことを運指という。本論文では、各音符に対する指使いのことを運指、この運指の並びのことを運指系列と呼ぶこととする。

音高を変化させるためには、押弦する指を変えるだけでなく、左手を弦が張られている方向に移動させる必要がある。このときの左手の位置をポジションという。各弦のチューニング音と2度の音程にあたる音を発する位置に人差し指を置いたときの手の位置を第1ポジションと呼び、そこから2度ずつ左手をずらした位置をそれぞれ第2ポジション、第3ポジション、…、のように呼ぶ。一般に、ポジションの次数が高くなるほど押弦が難しいとされているため、初級者は基本的に第一ポジションから近い位置で運指を選択することになる。また、ポジションの移動だけでなく、左手の各指の間隔を広げて押弦することもあり、これは手の拡張と呼ばれている。

### 2.3 バイオリン教本における運指の標示法

楽譜上に運指を標示する方法には、指番号のみを標示する方法や、使用する弦の名前と指番号を標示する方法、ポジションを標示する方法など様々な方法がある。本研究では、バイオリン教本や出版されている楽譜などで多く用いられている、指番号のみを用いる方法で運指を標示することを前提とすることとする。

指番号のみを標示する場合は、図2に示すように標示したい音符の上または下に番号を記載する。指番号は、押弦を行わない状態である開放弦を0、各指で弦を押さえる状態を親指を除いて人差し指から1, 2, …、のように表す。

また、押弦して音程を変化させる以外に、開放弦の2等分点、3等分点、4等分点に軽く触れてその点を節とする倍音を鳴らすフラジオレット(flageolet)という奏法があり、楽譜上で示す場合は を音符の上または下に標示する。初級者が演奏できる難易度の曲でフラジオレットが用いられることは非常に少ないため、本研究ではフラジオレットは用いずに、全ての音高を開放弦または押弦によって演奏することを前提として運指推定を行うこととする。なお、本論文では、この運指標示法において全運指の中で実際に楽譜上に標示されている運指を教本運指と呼ぶこととする。

## 3. 条件付き確率場に基づく運指推定

バイオリン運指推定の研究として、条件付き確率場(Con-

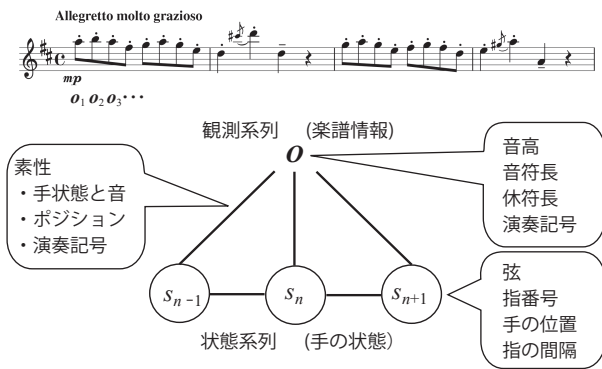


図3 CRFに基づく運指モデルの概要

ditional Random Field; CRF) を用いる手法 [5] が提案されている。この手法では、演奏者の習熟度に対応して異なる運指を推定するために、楽譜情報として音高以外に音符長や演奏記号を考慮して運指推定を行っている。教本に記載された指番号をもとに定めた正解運指との一致率は、初級レベルの曲では90%を超えており、中級レベルの曲でも70%を超える精度で推定ができることが確認されている。

線形連鎖条件付き確率場 (linear-chain CRF) は、観測値の系列  $o$  が与えられた時に、その系列に対するラベル列  $s$  を推測するモデルである。運指推定の問題は、与えられた楽譜情報  $o$  から最適な運指系列  $f$  を求めることであると考えられる。長田らによる CRF 運指モデルを図3に示す。このモデルでは、楽譜情報を観測系列  $o$ 、手の状態を状態系列  $s$  とし、これと習熟度  $L$  から最適な運指系列  $f = \arg \max_s P(s|o; L)$  を求める。

$$\arg \max_s P(s|o; L) = \arg \max_s \frac{1}{z(o)} \exp(\omega \cdot \phi(s, o), L)$$

最適運指系列は、素性  $\phi$  と重み  $\omega$ 、習熟度  $L$  によって表される。運指推定の研究においては隠れマルコフモデル (hidden Markov model; HMM) がよく用いられているが、HMM では楽譜の広範囲にわたって影響を及ぼす演奏記号を考慮したり、多くの特徴を考慮するなどといった課題を扱うことが困難であった。そのため、HMM の運指推定モデルをこの CRF に拡張することによってそれらの課題を解決している。CRF による運指推定における状態定義や素性関数の詳細については、先行研究の文献 [5] を参照されたい。

## 4. 教本運指の推定

### 4.1 教本運指推定手法の概要

バイオリン教本に掲載されている部分的な運指表示されている。この教本運指の位置はランダムに選ばれているのではなく、教本の著者の意図によって運指を標示すべきノートが選ばれている。人間が運指を標示すべきであると判断するには、使用弦や指番号などの様々な要素が考慮されて

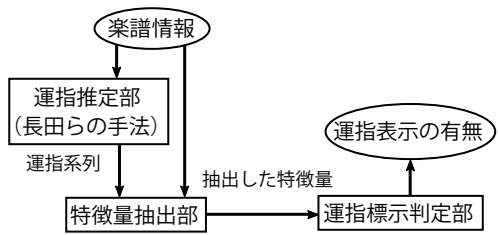


図4 提案法の概要図

いると考えられる。そこで、まず運指標示の条件を明確化し、その条件を特徴として運指標示の有無を判定することを考える。

提案法の概要は図4の通りである。ここでは、運指標示の有無を判断するにあたり、長田らの手法により対象となる音符列について運指が推定できていることを前提とする。従って、楽譜と与えられた運指系列と楽譜情報から特徴量を抽出し、その特徴をもとに標示の有無を音符単位で分類する分類問題を考え、運指標示の有無に有効な特徴量とその分類性能について検討する。

### 4.2 特徴量の抽出

バイオリン教本における運指標示の判断はある程度の一般性が見出せるものの、経験則も含まれると考えられ、詳細な条件は明確化することが難しい。そこで、バイオリン経験者への聞き取りや経験則から運指標示の条件を列挙し、これらの条件に基づいて運指標示の有無に関係のある特徴を検討する。そこで、楽譜に記載された情報から運指標示に関係すると思われる要素を列挙し各条件に該当する場合としない場合の二値を取る特徴量を設計する。

#### 曲頭

曲の冒頭の音符において、第1ポジションでないときに運指を標示すべきであると考えられる。よって特徴量の値は、曲頭の音符においてポジション番号が1でない場合は1、それ以外は0をとる。曲頭以外の音符も全て0となる。

#### 開放弦使用の有無

開放弦の音高 (G3, D4, A4, E5) を演奏する場合、開放弦を使用する (指番号0である) べきか、使用すべきではない (指番号4である) かを明示すべきであると考えられる。ただし、指番号が0または4ではない場合は、前後の運指からその指番号が自明であることが多いため、これは考慮しない。さらに、音高がG3の場合は取りうる運指がG線の開放弦 (指番号が0) 一択であることが自明であるため、この場合も考慮の対処から外すこととする。よって特徴量の値は、ある音符において指番号が0または4かつ、音高がD4, A4, E5のいずれかであるときに1となり、それ以外の場合は0となる。

#### ポジション変更

ポジション変更が行われた場合に運指が標示されると考

える．よって特徴量の値は，前後の音符でポジション番号が異なる場合に 1，それ以外の場合は 0 となる．

#### 手の変形

手の変形があった場合に運指が標示されると考える．よって特徴量の値は，前後の音符で手の形が異なる場合に 1，それ以外の場合は 0 となる．

#### 同音異指

前後の音符で同じ音高であるが，押弦する弦または指が変わる場合に運指を標示すべきであると考え．また，同じ音高で弦と指番号が一致する場合はその運指が自明であるため，標示すべきではない．よって特徴量の値は，前後の音符で音高が同じでかつ弦または指番号が異なる場合に 1，それ以外の場合は 0 となる．

#### 手のスライド

前後の音符で音高が隣り合っているが，指番号が変化しない場合に手がスライドされていると考える．この場合には運指を標示することによってそれを示すべきであると考え．よって特徴量の値は，前後の音符で音高が隣り合っていてかつ，指番号が一致した場合に 1，それ以外の場合は 0 となる．

#### 移弦

前後の音符で使用する弦が異なっているときに移弦が行われていると考え，運指を標示して示すべきであると考え．よって特徴量の値は，前後の音符で弦が異なる場合に 1，それ以外の場合は 0 となる．この運指標示に関する特徴に加えて，当該音符とその直前の音符の手状態パラメータ，さらに各手状態パラメータの変化量も特徴量として取り入れることとする．ここで用いる手状態パラメータは長田らの手法で用いられる CRF の状態に対応したものである．ただし，直前の手状態パラメータは，曲頭の音符では -1 とする．

## 5. 実験 1: 教本との比較実験

### 5.1 使用データ

実験で用いるデータセットは表 1 の通りである．また，これらの運指データは表 2 に掲載されている広く用いられていると考えられるバイオリン教本から部分的に抽出したものである．なお，習熟度については，各曲に明確な難易度の設定がなされていないため，先行研究にならぬ各教本 1, 2 巻に掲載されている曲を初級相当の楽曲，3 巻以降に掲載されている曲を中級相当の楽曲として扱うこととする．

また，本研究における教育支援の対象者はバイオリン初級者であることを仮定しているため，本研究では初級者が多く演奏すると考えられる初級の楽曲で評価を行う．また，初級の曲数が少ないこと，中級における教本運指標示の条件は初級における条件を包含し得ると考えられることから学習データとして中級の楽曲を用いることとする．

手動補完運指データは，全音符についてバイオリン経験

表 1 使用データの内訳

	習熟度	曲数	音符数	教本運指数
学習	中級	27	9,638	1,989
評価	初級	13	1,906	189

表 2 使用曲集と習熟度

習熟度	教本名
初級	鈴木バイオリン指導曲集 2
	篠崎バイオリン教本 2
中級	鈴木バイオリン指導曲集 4
	鈴木バイオリン指導曲集 5
	篠崎バイオリン教本 3
	新しいバイオリン教本 3

表 3 使用する特徴量セットの一覧

パターン	特徴量	次元数
A	運指標示に関する特徴	7
B	パターン a + 手状態 (当該音符)	26
C	パターン b + 手状態 (直前)	49
D	パターン c + 手状態の変化量	53

者が教本に記載された運指をもとに運指を付与したものである．このとき付与した運指は，各音符についてそれぞれ 1 種類である．運指には多義性があるため，場面や音符によっては取りうる運指が複数存在することもある．実際に，教本運指の中にも 1 つの音符に 2 種類の異なる運指が標示されているものがある．本来であれば取りうる全ての運指を対象とするべきであるが，本実験の学習においてはこの運指の多義性は考慮せず，1 つの音符につき 1 種類の運指を付与することとする．

### 5.2 実験条件

バイオリン教本における標示の有無 (標示あり: 1, 標示なし: 0) を正解ラベルとし，推定結果を評価する．推定に用いる運指系列は手動補完運指データ，分類器はランダムフォレストとする．特徴量は表 3 の 4 パターンで実験を行う．分類閾値は 0 から 1 の値をとり，値が大きくなるほど標示ありのラベル (1) を出力しやすくなるものであり，特に記述がない場合は全て 0.5 とする．

本研究では，分類器の学習と評価には scikit-learn[10] を用いた．

### 5.3 評価方法

推定結果をもとに，下記の数値を算出し評価を行う．

- 正解率 (運指標示の有無が教本と一致した割合)，
- 適合率 (運指標示の有無について，標示ありと推定した音符のうち教本運指であった音符の割合)
- 再現率 (運指標示の有無について，教本運指のうち標示ありと推定された音符の割合)
- $F$  値 (適合率と再現率の調和平均)



表 4 特徴量の違いによる実験結果

特徴量	正解率 [%]	適合率 [%]	再現率 [%]	F 値
A	90.71	80.00	8.47	0.1531
B	91.71	79.25	22.22	0.3471
C	91.40	62.63	32.80	0.4306
D	91.71	65.35	34.92	0.4552

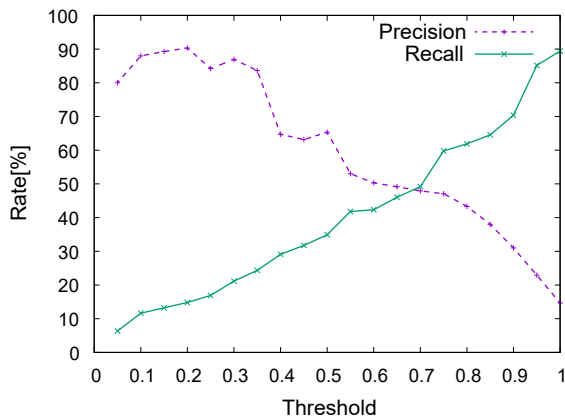


図 5 分類閾値変化による適合率と再現率の変化

#### 5.4 推定結果と考察

特徴量の次元数を変化させながら推定を行った結果を表 4 に示す。再現率と  $F$  値に注目すると、特徴量が増えるにしたがって値が大きくなっていることが分かる。これより、運指標示に関する特徴以外にも手状態などの特徴を考慮することが、教本運指を分類する上で有効であると考えられる。またバイオリン奏者への聞き取りから、教本運指以外の標示の有無よりも、教本運指が標示されることが重要であることが分かっているため、再現率を高めるための適合率の低下はある程度許容されると考えられる。

よって、再現率や  $F$  値が高いものが結果としてふさわしいと考えられるため、最も特徴量の多いパターン D が分類結果として最も良い結果であると考えられる。次に、最も再現率と  $F$  値が高くなった特徴量パターン D おいて、二値分類の閾値を変化させたときに適合率と再現率がどのように変化するかを調べ、その結果を図 5 に示す。

分類閾値を変化させることによって運指の標示数を変化させることができるため、適度な閾値を定めることによって、より適切な数の運指を標示できると考えられる。ただし、閾値を大きくしすぎることによって標示数が増えすぎてしまうことは避けるべきである。そこで、再現率と適合率のバランスを  $F$  値によって確認し、この値が大きくなる閾値が適切な値であると考えられる。本実験において  $F$  値が最も大きくなった分類閾値は 0.75 で、このとき適合率は 47.08%、再現率は 59.79% であり、この分類閾値が標示数が多すぎない程度に教本運指を推定できるものであると考えられる。

## 6. 実験 2: バイオリン経験者による主観評価

バイオリン教本における運指の表示は著者の意図による部分が大きいので、教本との一致率のみでは推定実験の評価としては不十分であると考えられる。そこで、バイオリン経験者による主観評価を行うことで、教本との一致率からは得られない、初級者教育への有用性に着目した評価を実施する。

### 6.1 実験条件と評価方法

被験者は大学オケ所属のバイオリン経験者 4 名（経験歴 9～23 年）であり、独学ではなくバイオリン指導者による教育を受けている。評価対象とする運指とその標示の有無は、実験規模を考慮して限定し、前述した結果のうち特徴量パターン D、分類閾値 0.75 の推定結果を用いる。

評価に用いる楽曲は前節で述べた評価データから、正解データに教本運指が 1 つも存在しない例外的な 1 曲を除いた 12 曲である。

被験者に 1 曲について 2 つの楽譜を見せ、各楽譜について 4 つの評価項目について評価するよう求めた。また、標示数や標示箇所の評価の根拠となった箇所の詳細や、その他に 2 つの楽譜を見比べて気づいた点を文章で記述するよう求めた。ただし評価の前提として、提示する楽譜を使用するのはバイオリン初級者（目安: バイオリン教本の 1,2 巻を学んでいる奏者）であるとする。なお、楽譜は教本と推定結果の 2 種類を被験者にはどちらが教本であるかは分からないように提示する。2 種類の楽譜の相違点は標示された運指のみである。

評価項目は次の 3 つであり、それぞれを 5 段階で回答する。

- 標示数として楽譜上に標示されている運指の個数は適切か（1 少ない - 3 丁度良い - 5 多い）
- 標示箇所として運指標示が必要な音符に指番号が標示されているか（1 不適切 - 3 どちらでもない - 5 適切）
- 適応度として提示された楽譜は初級者が使用するのに適切であるか（1 不適切 - 3 どちらでもない - 5 適切）

### 6.2 実験結果と考察

まず、段階評価の結果から教本と推定結果を比較し、考察する。各評価項目の段階評価について、教本と推定結果それぞれの評価平均を図 6 に示す。被験者ごとの評価平均と楽曲ごとの評価平均については割愛するが、いずれの評価項目においても教本と推定結果に有意な差は確認されていない。

前節の実験結果より推定結果の再現率はおよそ 6 割に留まっていることが分かっているが、評価結果が教本に近いものであったことから、教本運指の中でも標示する重要性

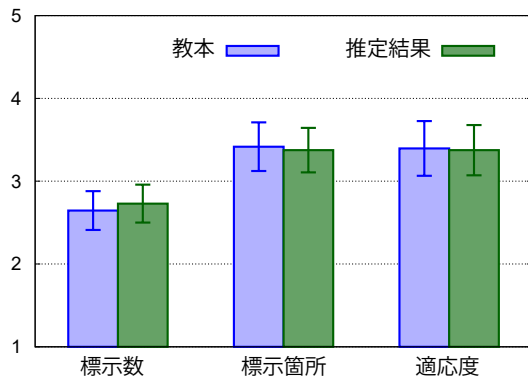


図6 主観評価結果（エラーバーは95%信頼区間）

が高いものがこの約6割の中に含まれていたのではないかと考えられる。また、教本の評価結果が全体的に低くなっているが、これは各曲における標示数や標示箇所が、その曲における練習項目（移弦やポジションなど）に多少の影響を受けていることが原因であると考えられる。

標示数については、教本、推定結果ともに評価平均が3を下回っていることが分かる。これより、初級者が練習で用いる楽譜では運指はもう少し多く標示すべきであると考えられる。標示箇所や適応度については各被験者ごとの評価傾向にやや差異があることが分かった。これは各被験者の考え方や立場の違いが表れていると考えられる。

全楽曲の評価平均より、推定結果は教本に近い初級者への適応度を持つという結果が得られた。楽曲別にみた結果から評価楽曲の中で運指が比較的複雑な一部の楽曲では教本の評価が高い楽曲が多いことが示唆されている。これより、運指が複雑な楽曲は運指標示に関する特徴も複雑であり、提案法の特徴がまだ不十分であったために推定できなかった箇所があったのだと考えられる。

## 7. むすび

本研究では、バイオリン初級者の教育支援を目的とし、任意の楽譜からバイオリン教本のように運指を部分的に標示する運指推定手法を提案した。教本運指の自動推定実験では、運指標示の有無を分類することにおいて運指標示に関する特徴量や手状態パラメータに関する特徴量が有効であることを確認した。また、バイオリン経験者による主観評価では、推定結果が教本に近い初級者への適応度を持つことが確認されたが、より複雑な判定を可能にするために、さらに考慮すべき特徴があることが示唆された。

今後の課題として、運指標示に関する特徴のさらなる検討が挙げられる。本研究で設計した特徴以外に、主観評価実験の特記事項から得られた意見などをもとに新たな特徴を設計し加えることで、推定精度を上げることができると考えられる。また、提案法を標示数の調節ができるようなものに拡張することで、奏者の習熟度や好みの違いにも対応することができるようになると考えられる。

また、本研究ではバイオリン経験者に対する主観評価を行ったが、バイオリン初級者への教育面での効果も検証する必要があると考えられる。初級者が実際に生成譜面を使用したときに教本運指から適切な運指を推定できること、さらに様々な曲からの生成譜面を長期間にわたって使用したときに身についた運指判断能力が妥当なものであるかを調査することで、初級者教育への有効性に関する評価をさらに得られると考えられる。

## 参考文献

- [1] 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 運指認識技術を活用したピアノ演奏学習支援システムの構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 917–927 (2011).
- [2] 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: リズム学習を考慮したピアノ演奏学習支援システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1383–1392 (2013).
- [3] 竹本拓真, 馬場 隆, 片寄晴弘: B-ヴァイオリン: ヴァイオリン演奏初心者のポウイングスキル習得のための支援システム, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2013 論文集, pp. 242–243 (2013).
- [4] 熊本万莉母, 竹川佳成, 平田圭二: 虚偽情報および曖昧情報教示機能をもつバイオリン学習支援システムの提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp. 540–542 (2015).
- [5] 長田若奈, 酒向慎司, 北村 正: 演奏記号を考慮したバイオリン運指の推定, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-MUS-106-8, pp. 1–6 (2015).
- [6] 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, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. 86, No. 6, pp. 755–763 (2003).
- [7] 藤井創太, 浜中雅俊, 長谷川晶一: Fingering Simulator: ギター単旋律の運指推定, 情報処理学会研究報告, Vol. 2008-MUS-076-28, pp. 167–172 (2008).
- [8] 吉永悠真, 堀 玄, 深山 覚, 嵯峨山茂樹: 隠れマルコフモデルによるギターのための運指決定及び自動編曲, 日本音響学会 2012 年春季研究発表会講演集, pp. 1011–1014 (2012).
- [9] 米林裕一郎, 亀岡弘和, 嵯峨山茂樹: 手の自然な動きを考慮した隠れ変数付き隠れマルコフモデルに基づくピアノ運指決定, 情報処理学会研究報告, Vol. 2007-MUS-71-29, pp. 179–184 (2007).
- [10] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. and Duchesnay, E.: Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 12, pp. 2825–2830 (2011).