

# 隠れマルコフモデルによる 習熟度に対応したバイオリン運指推定

長田 若奈<sup>1,a)</sup> 酒向 慎司<sup>1,b)</sup> 北村 正<sup>1,c)</sup>

概要：バイオリンの運指は演奏者の習熟度によって異なる事が多い。本研究では、そのような運指の違いは、運指の容易さと演奏表現の適切さの優先度が習熟度により変化した結果であると考えられる。運指推定は、隠れマルコフモデルの内部状態を手の形や位置に見立て、出力シンボルを音符として運指をモデル化する。演奏表現は音符長の影響を受けると考え、遷移確率、出力確率に音符長を考慮する事で優先度に対応した運指を推定する。実験により習熟度に対応した運指が推定されていることを確認した。

## 1. はじめに

バイオリンは1つの楽譜に複数の運指（指使い）が対応する楽器である。この為、演奏者は楽曲を演奏する際に運指を決定しなければならない。通常、演奏者は演奏しながら現在の少し先の楽譜を読み、経験を元に随時運指を決定している。その為、経験が少ない初級者は運指を決定することは困難であり、経験を積むことで徐々に運指を決定できるようになる。

習熟度の向上に伴い、運指決定が出来るようになるだけでなく、最適な運指も変化する。初級者は最も演奏が容易な運指が最適であり、容易な運指でしか演奏できない。しかし、習熟度の向上に伴い演奏可能な運指は増える為、演奏表現も考慮できるようになると考えられる。一般に、容易な運指と表現を考慮した運指はトレードオフの関係であることが多い為、これが習熟度による運指の違いであると考えられる。このように、中級者以上の運指を推定するには演奏表現の考慮が必要であると考えられる。

幅広い習熟度の演奏者に対応した運指推定技術は、自ら運指を決定できない初級者を支援するだけでなく、運指が決定できる演奏者にも役立つ。なぜなら、奏者が先読みできる量に限界がある事や、経験的に決定できない場合があり、1度の試行で最適運指を決定することは困難であるからである。この為、中級者以上でも運指決定は試行錯誤が必要な作業であり、幅広い習熟度の奏者に運指推定は必要

である。

従来の運指推定の研究では、主に初級者を対象とし、最も演奏の容易な運指を推定することを目的としていた。バイオリンと同じ弦楽器であるギターでは、三浦ら [1] は左手首の移動量が最小な運指、伊藤ら [2] は指の動作量が最小の運指を最適運指として運指を推定した。藤井ら [3] は物理シミュレータ上で手のモデルを動かし計算した負荷量や移動距離を最小化した。堀ら [4] は左手の移動とフォームの難易度を最小化した。演奏表現の適切さを与えることに比べ、運指の容易さを与えることは比較的容易であり、これらの研究では運指の適切さを経験的に定めている。一方で、運指の適切さを運指例から学習する研究もされている。Radisavljevic ら [5] はギター、澤井ら [6] はフルート、若松ら [7] はピアノについて、運指の適切さをいくつかの要素の評価値の重み付け和で表し、それぞれの要素の重みを運指ラベル付き楽譜データを用いて学習した。また、米林ら [8] はピアノ運指を隠れマルコフモデル (HMM) でモデル化し、運指ラベル付き楽譜データを用いてパラメータ推定を行った。以上の研究は全て運指の容易さに着目した手法であり、習熟度に対応した研究例はない。

本研究では、習熟度による運指の変化をモデルに反映させることによって、1つのモデルで様々な習熟度の運指を推定できるようにすることを目指す。初級者以外にも対応させるため、演奏の容易さだけでなく、演奏表現も考慮する。演奏表現には強弱やスラーのような多くの楽譜情報が関わっていると考えられるが、本研究では最も運指に影響があると考えられる音符長のみを扱う。一般に、音符長が長い場合は太い弦を用いることが多く、またビブラートをかける事が多い。

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

a) nagata@mmsp.nitech.ac.jp

b) sako@mmsp.nitech.ac.jp

c) kitamura@mmsp.nitech.ac.jp

演奏表現を考慮するにあたり、次の2つの問題点がある。1つ目は、トレードオフの関係である演奏の容易さと演奏表現の適切さをどのように扱うのかという問題である。これは、両者の優先する度合いを考える事で解決する。前述のように、演奏者の習熟度の向上に伴い演奏表現の適切さが優先されるようになるが、同じ奏者でも、音符長が短い場合は演奏が困難な為、演奏の容易さが優先されやすい。このような関係を利用して、演奏表現の優先度合いを考える。2つ目は、演奏表現を考慮した運指は適切さを与えるのが困難であるという問題である。これは、適切さを教本運指から学習することで解決する。

本研究では、HMMを用いて運指をモデル化することで運指推定を行う。習熟度に対応させる為、音符長と習熟度から各音の表現の優先度を考え、出力確率に反映させる。また、音符長は運指の連続性にも影響を与えられ、音符長と運指の変化の起こり易さの関係性を考え、遷移確率に反映させる。また、これらの出力確率、遷移確率に内在するパラメータを経験的に与えるのは困難な為、教本運指から推定する。

## 2. バイオリン運指

### 2.1 弦による違い

バイオリンでは、特に指定がない限り演奏者から見て左から順に G3, D4, A4, E5 にチューニングし、それぞれ G 線, D 線, A 線, E 線と呼ぶ。各弦は材質や太さが異なる為、異なる音色を持つ。各弦の最低音はそれぞれチューニングした音であり、最高音は理論上際限なく出せると考えられるが、特殊奏法を除くと、実際に使われるのは E 線で約 2 オクターブ、他の 3 弦では 1 オクターブ半ほどである。各弦の音域は図 1 のように重なっており、1 つの音高を複数の弦で発することができる。

### 2.2 使用される指

バイオリンは左手の指先で弦を押さえる。押弦に使用する指は親指以外の 4 本であり、人差し指から順に 1, 2, 3, 4 という指番号が付けられている。指番号 4 (小指) は力が弱く押弦が困難である為、やや難しい指とされている。

また、押さえていない状態を開放と呼び、指番号 0 が与えられている。バイオリンはギターのようにフレットがない為、正しい音高の位置を押さえるのが困難な楽器である。開放は押さえる必要がないので容易とされているが、後述

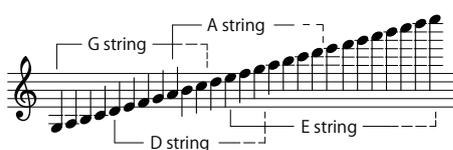


図 1 各弦の音域  
 Fig. 1 Pitch range of each string

のようにビブラートを使用することができず、また、指による振動の吸収がない為押弦した場合と音色が異なる。この為、なめらかなフレーズや長い音で避けられる傾向がある。

### 2.3 ビブラート

指を押さえた状態で腕、手首、指の関節を動かし、弦に対する指の角度を変えることで、微妙な音程の変化が発生する。これを利用した音程の微細振動をビブラートと呼ぶ。弦を押さえる動作以外に手を揺らす動作が必要であり、初級者には困難な演奏技法である。ビブラートは振動の速さや振幅を変えることにより音に様々な表情を持たせる事が可能であり、使用できる場合は使用することが多い。しかし、音符長が短い場合は使用することが困難であり、開放の場合も使用することができない。ビブラートの使用は楽譜上で示されておらず、演奏者の判断によって使用の有無や速さ等が決定される。

## 3. 習熟度に応じた運指推定

### 3.1 HMM によるモデル化

隠れマルコフモデル (HMM) の内部状態  $S$  を手の状態、出力  $O$  を楽譜の音符列としてバイオリン演奏の左手を図 2 のようにモデル化する。手の状態は音符毎に遷移していくとし、その適切さは 1 つ前の手の状態と楽譜のみに依存するとする。ここで、手の状態は運指表現よりも詳細な状態を考える。また、楽譜からは音高  $P$  だけでなく音符長  $L$  と休符長  $R$  を用い、運指の変化の起こりやすさ (可変度  $C$ ) と表現の優先度 (表現度  $E$ ) を考える。

### 3.2 手の状態

通常、運指は弦と指番号で表される。本研究ではより詳細に手の状態を定義する為、手の位置と指の間隔も要素に取り入れる。

- 弦 String Position (SP) : 太い弦から順に 0, 1, 2, 3 とする。
- 指番号 Finger Number (FN) : 通常の指番号通り、開放を 0, 人差し指から順に 1, 2, 3, 4 とする。
- 手の位置 Hand Position (HP) : 仮想的にフレットがあるとした場合の人差し指の位置のフレット番号とする。フレット番号は開放の半音上から 0, 1, 2, ... とし、

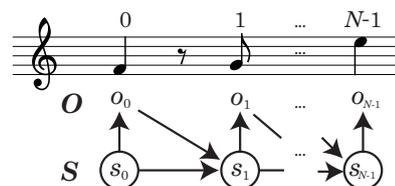


図 2 HMM を用いたバイオリン運指のモデル  
 Fig. 2 Model of the violin fingering using HMM

本研究では上限を 23 とする。

- 指の間隔 Finger Interval (FI) : 各指の間は全音か半音とし、4 指の間隔の組み合わせで  $2^3$  通りを考える。

これらの要素から音高は一意に決定できる。音符番号  $n$  の時の手の状態  $s_n$  を式 (1) で表す。

$$s_n = \{SP_n, FN_n, HP_n, FI_n\} \quad (1)$$

### 3.3 可変度と表現度

フレーズ内では、音色の統一や音符間の滑らかな指の移動が必要であり、大きな手の状態の変化は起こりにくい。音符長が長い場合や休符がある場合は、音楽的なフレーズの終端である可能性が高く、また、技術的にも次の音への遷移が容易になる。この為、手の状態の変化が起こりやすい。このような考えを連指に反映させる為、次の音への手の状態の変化の起こりやすさを表した可変度  $C$  を導入する。現在の音符長  $L_n$  や次の音までの休符長  $R_n$  が現在の可変度  $C_n$  に影響を与えると考えられるが、音符長と休符長の可変度への影響度合いは均等ではないと考えられるので、重みを付けて  $C$  を式 (2) のように定義する。一般的には休符を重視する ( $w_r > 1$ ) 方が良いと考えられる。

$$C_n = L_n + w_r R_n \quad (2)$$

一方、1 つの音符について考えると、音符長は演奏表現の優先のされやすさに影響を与えると考えられ、演奏表現の優先のされやすさを表した表現度  $E$  を導入する。表現度は音符長だけでなく習熟度からも影響を受けると考えられる。なぜなら、同じ音符長であっても、習熟度が高い奏者の方が容易に感じられ、演奏表現が優先されやすい (表現度が高い) からである。このように、音符長と習熟度の 2 つの観点から表現度を考えると、習熟度が高くても音符長が短ければ表現度は小さくなり、逆に習熟度が低くても音符長が長ければ表現度は大きくなる。この結果、習熟度が異なっても音符長によっては同じ表現度になると考えられ、この関係を用いて 1 つの枠組みで任意の習熟度に対応させる。

音符長のみを考えると、一般に、音符長が長いほど演奏の容易さよりも演奏表現が優先されやすくなると考えられる。しかし、音符長と表現度の関係は線形ではなく、音符長が長い場合は演奏の容易さの変化は少なくなり、表現度の変化も少なくなると考えられる。この為、本研究では音符長  $L$  と表現度  $E$  の関係を対数を用いて表す。習熟度のみを考えると、習熟度が低いほど演奏表現は優先されにくい。このような関係を考え、表現度  $E$  を式 (3) のように定義する。

$$E_n = w_l \log(1 + L_n) \quad (3)$$

$w_l$  は大きいほど高い習熟度に対応している。習熟度が高い ( $w_l$  が大きい) 場合でも音符長  $L$  が小さい場合は表現度  $E$

は小さくなり、これは習熟度が低い ( $w_l$  が小さい) 場合の値に近づく。このように習熟度と音符長から表現度を考えることで、1 つの枠組みで任意の習熟度に対応することができる。

$w_r$  と  $w_l$  が決定されると  $C$  と  $E$  は楽譜から一意に決まる。この為、音符番号  $n$  の時の出力  $o_n$  は式 (4) のようになる。

$$o_n = \{P_n, L_n, R_n\} = \{P_n, C_n, E_n\} \quad (4)$$

### 3.4 初期確率

音符番号 0 で状態  $s_i$  である確率  $\pi_i$  を考える。SP は音域や音符長の影響を除けば出現確率は一様とし、式 (5) とする。

$$\pi_i = \frac{1}{4} P(FN_i) P(HP_i) P(FI_i) \quad (5)$$

### 3.5 遷移確率

音符番号  $n$  から  $n+1$  の時に状態  $s_i$  から  $s_j$  へ遷移する確率  $a_{i,j}(o_n)$  を考える。

- SP : 一般的に、数音は同じ弦に留まる事が多く、時間方向に階段関数のような動きをすると考えられる為、ラプラス分布で近似する。ここで、可変度が大きい場合は弦の移動が発生しやすい為、分散は可変度に依存するとし、SP についての遷移の確率を式 (6) のように定める。

$$P(SP_j | SP_i, C_n) \sim f_{Lap}(SP_j; SP_i, k_{SP} C_n) \quad (6)$$

ここで  $f_{Lap}$  はラプラス分布の確率密度関数であり、式 (7) のように定める。

$$f_{Lap}(x; \mu, \phi) = \frac{1}{2\phi} \exp\left(-\frac{|x - \mu|}{\phi}\right) \quad (7)$$

- FN : 遷移後の指番号のみに依存すると考えられるので、式 (8) のように定める。

$$P(FN_j | FN_i) = P(FN_j) \quad (8)$$

- HP : 手の位置の移動については SP と同様の理由からラプラス分布を用いる。可変度が大きい時だけでなく、遷移前の指番号が開放である場合も移動が容易であると考えられる為、遷移前の指番号が 0 であるかどうかで場合分けし、式 (9), (10) とする

$$k_{HP} = \begin{cases} k_{HP0} & (FN_i = 0) \\ k_{HP1} & (FN_i \neq 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{Lap} \sim f_{Lap}(HP_j; HP_i, k_{HP} C_n) \quad (10)$$

また、遷移前の HP に依存せず、押弦が容易な HP も存在する。この為、手の位置の移動量だけでなく、遷移後の HP にも依存すると考えられ、HP についての

遷移の適切さを式 (11) とする。

$$P(HP_j|HP_i, C_n, FN_i) \sim P_{Lap}^{w_{HP}} P(HP_j)^{(1-w_{HP})} \quad (11)$$

- FI: FI は HP の移動がある場合は前後の繋がりがなくなると考えられる為、 $HP_i \neq HP_j$  の場合は一様分布とする。 $HP_i = HP_j$  の場合は HP と同様に FI の移動量と遷移後の FI に依存して適切さは決まると考えられる。FI の移動量  $M(FI_i, FI_j)$  は各指の動いたフレット数の和とし、移動量に対する確率を指数分布を用いて近似する。HP と同様に可変度  $C$  と  $FN_i$  が 0 かどうかに依存する為、式 (12), (13), (14) とする

$$k_{FI} = \begin{cases} k_{FI0} & (FN_i = 0) \\ k_{FI1} & (FN_i \neq 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{Exp} \sim \frac{1}{k_{FI} C_n} \exp\left(-\frac{M(FI_i, FI_j)}{k_{FI} C_n}\right) \quad (13)$$

$$P(FI_j|FI_i, C_n, FN_i, HP_i, HP_j) \sim \begin{cases} 1/2^3 & (HP_i \neq HP_j) \\ P_{Exp}^{w_{FI}} P(FI_j)^{(1-w_{FI})} & (HP_i = HP_j) \end{cases} \quad (14)$$

以上の 4 つの要素から、遷移確率  $a_{i,j}(o_n)$  は式 (15) となる。

$$a_{i,j}(o_n) \sim P(SP_j|SP_i, C_n) \times P(FN_j|FN_i) \times P(HP_j|HP_i, C_n, FN_i) \times P(FI_j|FI_i, C_n, FN, HP_i, HP_j) \quad (15)$$

### 3.6 出力確率

音符番号  $n$  の時に状態  $s_i$  から音符  $o_n$  が出力する確率  $b_i(o_n)$  を考える。表現度  $E$  は SP と FN のみに依存する為、式 (16) となる

$$b_i(o_n) = P(P_n|s_i)P(E_n|SP_i, FN_i) \quad (16)$$

$P(P_n|s_i)$  は状態  $s_i$  から発せられる音高が  $P_n$  と等しければ 1, そうでなければ 0 である。状態から発せられる音高は 1 つである。

$P(E_n|SP_i, FN_i)$  は SP と FN で独立と仮定し、式 (17) とする。

$$P(E_n|SP_i, FN_i) = \frac{P(E_n|SP_i)P(E_n|FN_i)}{P(E_n)} \quad (17)$$

$P(E_n)$  は  $S$  による確率の最大化に関与しない為、分子のみ計算すれば良い。 $P(E_n|SP_i)$  と  $P(E_n|FN_i)$  の分布は図 3 のようになる為、対数正規分布  $f_{ND}(x; \mu, \sigma^2) = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma x) \exp\{-\ln x - \mu)^2/(2\sigma^2)\}$  で近似し、式 (18), (19) とする。

$$P(E_n|SP_i) \sim f_{ND}(E_n; \mu_{SP_i}, \sigma_{SP_i}^2) \quad (18)$$

$$P(E_n|FN_i) \sim f_{ND}(E_n; \mu_{FN_i}, \sigma_{FN_i}^2) \quad (19)$$

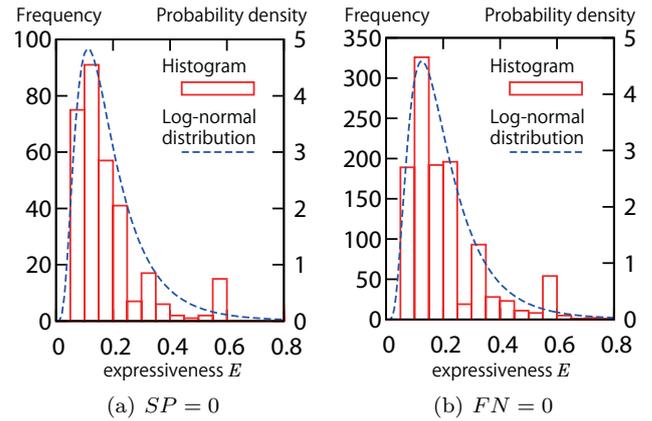


図 3 表現度  $E$  のヒストグラムと最尤推定された対数正規分布  
Fig. 3 Examples of histogram and estimated log-normal distribution of expressiveness  $E$

### 3.7 最適運指の推定

最適運指は、楽譜から考えられる最尤状態系列であると考えると、最適運指  $\hat{q}$  は式 (20) で求められる。

$$\hat{q} = \arg \max_q \left\{ \pi_{q_0} \prod_{n=0}^{N-1} b_{q_n}(o_n) \prod_{n=1}^{N-1} a_{q_{n-1}, q_n}(o_{n-1}) \right\} \quad (20)$$

ここで  $q$  は状態列である。 $\hat{q}$  は Viterbi アルゴリズムによって効率良く探索可能である。

## 4. パラメータの推定

### 4.1 遷移確率

$P(FN)$ ,  $P(HP)$ ,  $P(FI)$  については学習データの出現確率を用いる。 $FN = 0$  については開放で発せられる音高は 4 つしか存在せず、出現確率が低くなってしまふ為、開放で発することができる音高の出現確率の逆数で重み付けする。

$k_{SP}$  は式 (7) のラプラス分布の分散が  $2\phi^2$  である事を利用し、式 (21) を満たすような  $k_{SP}$  をパラメータとする。

$$\sigma_{SP}^2 = 2\phi^2 = 2(k_{SP}\bar{C})^2 \quad (21)$$

ここで  $\sigma_{SP}^2$  は学習データの  $SP_n - SP_{n-1}$  の分散、 $\bar{C}$  は学習データの  $C$  の平均である。 $k_{HP0}$ ,  $k_{HP1}$  も同様に、それぞれ  $FN_{n-1} = 0$  の場合と  $FN_{n-1} \neq 0$  の場合のデータを用いて導出する。

$k_{FI0}$ ,  $k_{FI1}$  は指数分布で同様に考え、式 (22) を満たすような  $k$  をパラメータとする。

$$\sigma_{FI}^2 = (k\bar{C})^2 \quad (22)$$

### 4.2 出力確率

$\mu$ ,  $\sigma^2$  は最尤推定によって求める。 $\mathbf{E}_{SP_i} = \{E_n|SP_n = SP_i\}$  とすると  $\mu_{SP_i}$ ,  $\sigma_{SP_i}^2$  は式 (23), (24) となる。

$$\mu_{SP_i} = \frac{1}{|\mathbf{E}_{SP_i}|} \sum_{E_j \in \mathbf{E}_{SP_i}} \log E_j \quad (23)$$

$$\sigma_{SP_i}^2 = \frac{1}{|E_{SP_i}|} \sum_{E_j \in E_{SP_i}} (\mu_{SP_i} - \log E_j)^2 \quad (24)$$

ここで、 $|E_{SP_i}|$  は集合  $E_{SP_i}$  の要素数である。

## 5. 評価実験

### 5.1 教本運指との一致率

教本運指と比較することにより、推定運指を評価する。教本運指と推定運指で弦と指番号が共に同じものを一致とし、一致率を算出する。

#### 5.1.1 実験条件

学習データとして中級者用教本 [9], [10], [11], [12] から 17 曲 (音符 4,862 個) を用いた。学習時の  $w_l$  は 1.0 とし、 $w_r$  は 4.0 とした。  $w_{HP}$  と  $w_{FI}$  は、学習データの推定運指と教本運指との一致率が最大となる値をグリッドサーチした。それぞれを 0, 0.1, 0.2, ..., 1.0 として 121 通りで探索したところ、 $w_{HP} = 0.6$ ,  $w_{FI} = 0.1$  で一致率最大となった為、実験ではこの値を用いた。

テストデータには初級テストデータと中級テストデータを用意した。初級テストデータは初級者用教本 [13], [14] から 14 曲 (音符 2,265 個) を用いた。中級テストデータは学習データと同じ教本から学習データと重複しない 14 曲 (音符 5,086 個) を用いた。

#### 5.1.2 実験結果

それぞれのテストデータで一致率を調べた結果を図 4 に示す。初級テストデータでは  $w_l = 0.2$  で一致率最大となり、中級テストデータでは  $w_l = 1.5$  で最大となった。  $w_l = 0.2$  と  $w_l = 1.5$  について McNemer 検定を行ったところ、初級テストデータでは有意水準 5% で有意差があったが、中級テストデータではなかった。

初級テストデータでは高い一致率であり、初級者用運指が正しく推定されていると考えられる。また、学習データは中級の為、 $w_l$  を変化させることで、学習データの習熟度とは異なる習熟度の運指も推定可能であることが確認で

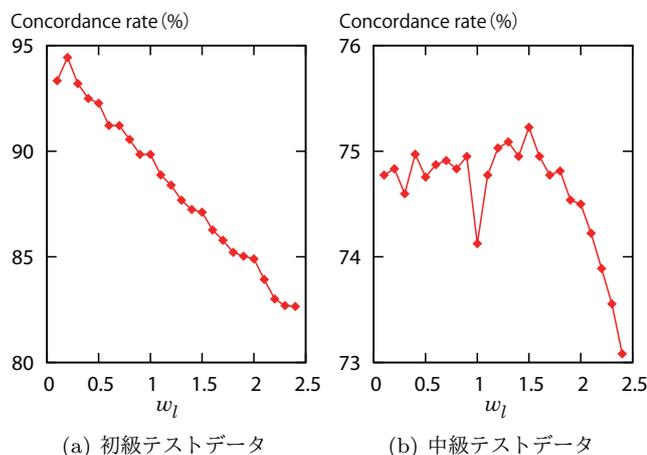


図 4 教本との一致率

Fig. 4 Rate of concordance with the textbook

きる。

一方、中級テストデータでは、初級テストデータよりも一致率が低く、また、 $w_l = 0.2$  と  $w_l = 1.5$  で一致率の有意差は確認されなかった。これは、演奏表現を考慮した運指は自由度が高く、適切な運指は複数考えられることが原因であると考えられる。また、奏者に依存して変化する為、定量的な評価には限界がある。中級データの  $w_l = 0.2$  と  $w_l = 1.5$  では音符 720 個 (約 14%) で異なる運指が推定されており、一致率に有意差は無かったが、運指自体は別のものが推定されている。

### 5.2 バイオリン経験者による主観評価

教本との一致率のみで運指を評価することは困難な為、バイオリン経験者が教本と異なる推定運指をどの程度正しい運指とみなすかという観点で主観評価実験を行った。

#### 5.2.1 実験条件

被験者はバイオリン経験者 4 名 (経験歴: 6 年, 14 年, 16 年, 16 年) である。評価運指はテストデータの各曲冒頭 8 小節の  $w_l = 0.2$ ,  $w_l = 1.5$ , 教本運指の 3 つで行った。初級テストデータのうち 3 曲は 3 つの運指が同じであった。また、教本運指のみ異なる運指の曲が初級テストデータで 1 曲、中級テストデータで 4 曲あった。  $w_l = 1.5$  の運指のみ異なる曲が初級テストデータで 2 曲あった。 3 つとも異なる運指である曲は、初級テストデータで 8 曲、中級テストデータで 10 曲である。楽譜は運指の連続性を考慮して 10 小節目まで示した。また、被験者には教本運指か推定運指か分からない状態で評価させた。評価する項目は次の 3 つであり、各 5 段階である。

- 楽譜上の演奏の容易さ: 演奏表現を意識せず、楽譜上の音符の演奏が容易であるかどうか (難しい 1 - 容易 5)
- 演奏表現の適切さ: 演奏表現を意識した場合、表現が適切であるかどうか (不適切 1 - 適切 5)
- 運指の自然さ: この運指で演奏する奏者が居そうかどうか (いない 1 - いる 5)

#### 5.2.2 実験結果

各テストデータの評価平均を図 5 に示す。それぞれの習熟度の教本運指の評価を見ると、初級テストデータでは演奏の容易さの方が評価が高く、中級テストデータでは演奏表現の適切さの方が評価が高い。この為、習熟度による運指の傾向は演奏の容易さと演奏表現の適切さの優先度であることが確認できた。  $w_l = 0.2$  と  $w_l = 1.5$  を比べると、  $w_l = 0.2$  では演奏の容易さ、  $w_l = 1.5$  では演奏表現の適切さの評価が高くなっており、  $w_l$  によって異なる傾向の運指が推定されていることが確認できる。この為、本研究で習熟度に合わせた運指の推定が可能であることが示唆される。

教本運指と推定運指を比較すると、初級テストデータでは  $w_l = 0.2$  で教本と同等以上の評価である為、初級者向

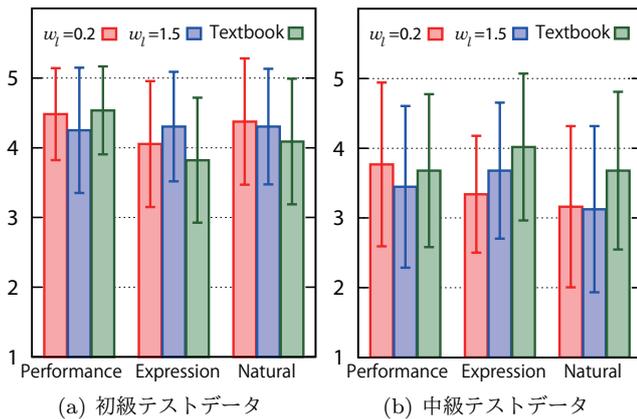


図 5 主観評価の評価平均 (エラーバーは標準偏差を示す)

Fig. 5 Evaluation average of the subjectivity evaluation  
(The error bar means standard deviation)

きの運指は適切に推定できていると考えられる。一方、中級テストデータでは推定運指の表現の適切さが不十分である。これは、演奏表現について音符長以外を考慮していないことが主な原因であると考えられる。

また、運指の自然さを見ると、初級テストデータでは教本運指より推定運指の方が高い評価であるのに対し、中級テストデータでは低い評価である。初級テストデータで教本運指よりも良い評価であることから、異なる著者による複数の教本から学習したことで、より一般的な運指になったと考えられる。中級テストデータで運指の自然さが低い曲を見てみると、♯と♭が混在している曲が多い。このような曲は初級テストデータでは少ない。♯と♭が混在している場合はFIの推定が重要であるが、1次マルコフではモデルが単純すぎて出現確率の低いFIが推定されにくい。実際、出現確率の低いFIは1音も推定されていない。この事が原因で不自然な運指が推定されていると考えられる。

## 6. むすび

本研究では、音符長と習熟度から演奏表現の優先度を考えることで、習熟度に対応した運指を推定する方法を提案した。運指モデルにはHMMを用い、パラメータは教本運指から推定した。

教本運指との一致率やバイオリン経験者による主観評価によって、演奏表現の優先度が推定運指に反映されていること、また、それが習熟度に応じていることを確認した。主観評価の結果や推定運指の分析により、音符長以外の演奏表現を考慮していない事によって演奏表現が不十分である事や、1次マルコフ性によって不自然な運指が推定される事が分かった。

今後は、スラー等も考慮することでより詳細に演奏表現を捉えることや、運指の連続性について2音以上前も考慮することでより自然な運指を目指すことが課題である。また、現在は任意の習熟度における一般的な運指を推定する

ことを目的としているが、より奏者に合わせた運指を推定するには個人性について検討する必要もある。

## 参考文献

- [1] 三浦雅展, 廣田勲, 浜将彦, 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, 電気情報通信学会論文誌, D-II, Vol. 86, No.6, pp. 755-763(2003).
- [2] 伊藤雅, 林田巧: 単旋律におけるギター運指の最適化, 電気学会論文誌 C, Vol. 124, No. 7, pp. 1396-1403(2004).
- [3] 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, 2008-MUS-076-28, pp. 167-172(2008).
- [4] Gen Hori, Hirokazu Kameoka, and Shigeki Sagayama: Input-Output HMM Applied to Automatic Arrangement for Guitars, Journal of Information Processing, Vol. 21, No. 2, pp. 264-271(2013).
- [5] Aleksander Radisavljevic and Peter Driessen: Path difference learning for guitar fingering problem, Proceedings of the International Computer Music Conference(2004).
- [6] 澤井賢一, 黒木裕介, 松井知己: フルートの運指最適化と逆最適化を用いたパラメータチューニング, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学 53(1), pp. 39-46(2008).
- [7] 若松万紗子, 松井知己: 和音に対するピアノ運指決定法, 数理解析研究所講究録 1773, pp.87-95(2012).
- [8] 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, 2007-MUS-71-29, pp. 179-184(2007).
- [9] 篠崎弘嗣: 篠崎バイオリン教本 3, 全音楽譜出版社 (1987).
- [10] 鈴木鎮一: 鈴木バイオリン教本 4, 全音楽譜出版社 (1970).
- [11] 鈴木鎮一: 鈴木バイオリン教本 5, 全音楽譜出版社 (1971).
- [12] 兎束龍夫, 篠崎弘嗣, 鷲見三郎: 新しいバイオリン教本 3, 音楽之友社 (2008).
- [13] 篠崎弘嗣: 篠崎バイオリン教本 2, 全音楽譜出版社 (1955).
- [14] 鈴木鎮一: 鈴木バイオリン教本 2, 全音楽譜出版社 (1970).