

初学者の練習に適した楽譜追跡システム ～演奏状況を把握するための新しいパラメータの導入法

能登 楓^{1,a)} 竹川 佳成^{1,b)} 平田 圭二^{1,c)}

概要：本研究の目的は、ピアノ非熟達者を対象とした楽譜追跡システムの開発である。非熟達者の演奏や練習は、熟達者が楽譜を左から右に読んで演奏する状況とは大きく異なることが多い。例えば、ミス打鍵による弾き直し、練習のための複数回の繰り返し、弾くべき音高のみの確認作業や運指の確認作業などである。従来の楽譜追跡システムでは、連続したミス打鍵を多く含むような演奏において、追跡精度が低下しがちである。そのため、演奏における不確定要素を多く含むような非熟達者を対象とすることが難しい。そこで、本研究では、打鍵情報、視線情報、譜面情報といった複数の確率変数によるガウス混合分布を作成し、現在演奏音の確率分布とした。得られた確率分布において、最も高い確率が得られた音を現在の演奏箇所と推定した。提案方式の有用性を測るために、追跡までの打鍵数、ミス打鍵に対する頑健さに対する評価実験を行った。実験の結果より、平均1音で演奏箇所の推定が可能であった。しかし、提案手法では楽譜追跡がうまくいかない例も見られた。

Construction of Score-Following System for Beginners

KAEDE NOTO^{1,a)} YOSHINARI TAKEGAWA^{1,b)} KEIJI HIRATA^{1,c)}

1. はじめに

作曲者の意図を読み取った演奏をするためには、演奏音や演奏記号などが記載されている譜面を見ながら演奏する必要がある。しかし、演奏中に譜めくりをするためには、一旦、演奏行為を中断しなくてはならない。タブレット端末の普及により、演奏者の代わりに譜めくりを行うアプリとして、Air Turn や Pia Score などが使用されている [1][10]。これらのアプリでは、演奏者がジェスチャやコントローラの操作による命令を送ることによって、譜めくりを行うことができる。このように、現状のアプリケーションは、演奏行為を中断する必要はないが、演奏者は何らかの方法でシステムに命令を送らなくてはならない。そのため、演奏者が負荷なく演奏するためには、演奏箇所推定の精度向上が不可欠である。

従来、演奏箇所推定システムの多くは、音響信号や MIDI などの打鍵情報をもとに、演奏箇所を推定する。打鍵情報を用いた場合には、楽譜に記述されている音符と演奏音のマッチングを行って、演奏箇所を推定する。そのため、ミス打鍵や演奏箇所の大幅な跳躍が生じた際には、楽譜追跡に遅延や誤りが発生するという問題がある。このような問題から、非熟達者の演奏に多く見られる連続して誤った打鍵をする、複数回の弾き戻りといった、特徴に対して従来方式を適用することは困難である。

本研究では、視線情報や打鍵情報といった複数のパラメータを適切に組み合わせた楽譜追跡システムの実現を目指す。個人の演奏技能に応じて、重要さが異なるパラメータの例として、視線情報や打鍵情報がある。例えば、熟達者は、自身の音楽的経験から、連続した音符をチャンクとしてまとめて知覚する [7]。熟達者は大きなチャンクを形成するため、譜面の先読み幅が大きくなる。そのため、1音単位で評価を行う楽譜追跡という問題において、熟達者の視線情報は打鍵情報に比べ重要ではない。一方、非熟達者は、連続して誤った打鍵、複数回の弾き戻りが多く発生する。ミス打

¹ 公立はこだて未来大学大学院
Graduate School of Future University Hakodate

a) g2118030@fun.ac.jp

b) yoshi@fun.ac.jp

c) hirata@fun.ac.jp

鍵が増えると打鍵情報を用いた推定精度は低下してしまう。そのため、非熟達者の打鍵情報は、楽譜追跡において重要ではない。このように、複数のパラメータを用いて楽譜追跡を行うためには、個人の演奏技能に応じたモデルを作成する必要がある。

2. 関連研究

2.1 演奏者の熟達度に応じた視線特徴

演奏者はチャンク(音符列をまとまりやパターンとして認識する単位)を形成しながら楽曲を知覚する。Weaver は、ピアノ熟達者は譜面上に配置された音を水平、垂直方向にまとめて知覚しているということを明らかにしている [14]。また、S. Furneaux らはピアノ非熟達者と熟達者の譜読みに関する実験を行っており、両者の譜面の先読み幅 (EHS: Eye-Hand-Span) について調査した [11]。実験の結果から、熟達者の EHS は非熟達者に比べ大きいことが確認されている。また、熟達者の EHS はいずれの被験者においても、ほぼ同様の時間感覚であった。また、熟達者の EHS の大きさは、演奏時のテンポに影響されるということが報告されている。

また、Kobori, S. と Takahashi は、非熟達者、熟達者が単旋律を演奏した際の眼球運動について比較している [8]。実験から、熟達者に比べ、非熟達者の譜面注視時間は長いことが確認された。また、譜面の難しさによっても、譜面注視時間は変化し、難しい譜面の方が、簡単な譜面に比べ長いことも確認されている。これらより、EHS の大きさは演奏者の音楽的なチャンクの大きさに影響されていることが推測される。そのため、同一のシステムを用いて一様に演奏箇所推定することは不可能である。

2.2 演奏箇所推定システム

自動伴奏システムを始めとして、確率モデルを用いて演奏箇所推定を行う研究がある。中村らは、人間の演奏を確率モデル化することによって、弾き直し、弾き飛ばしに頑健な楽譜追跡システムを開発した [9]。確率モデルは HMM を用いており、各音符を隠れ状態、演奏音の遷移を状態遷移確率、譜面上の音符を出力記号としている。演奏された音符に対して、改良 Viterbi アルゴリズム ($\alpha\beta\gamma$ 法) を用いて、演奏音を推定している。実際の練習における楽譜追跡の性能を評価したところ、演奏音が 1000 音だと約 10msec 程度で推定が可能であり、実時間内での推定ができる。また、平均約 3 音で任意箇所への弾き飛ばしに追従が可能である。しかし、複数回のミス打鍵や演奏箇所の大幅な弾き戻りが発生するような場合を想定していない。

寺崎らは、打鍵情報に視線情報を反映させることによって演奏箇所推定を行った [13]。打鍵情報を用いた推定は、Dannenberg の提案した並列 DP マッチングを使用し、候補音を検出した。並列 DP マッチングでは複数の候補に対

し、ベストマッチ数を求め算出されたベストマッチ数をコストとする。得られたコスト表に視線尤度を掛け合わせることで演奏箇所推定を行った。視線尤度は HMM によって出力される分布であり、各音符を演奏する際の視線分布を学習している。得られた視線分布とコスト表を掛け合わせる際、視線分布に対し重み 0.6、コスト表に対し重み 0.4 を与えてから、掛け合わせを行なった結果 85.2% の正解率であった。重みは事前に決定する必要があるが、打鍵情報と視線情報の優先度はトレードオフの関係にあり、一意に優先順位を決定することは難しい。

Grubb らは歌唱に対する自動伴奏システムを開発するために、ベイズ推定を利用した [6]。まず、ベイズ推定の枠組みで自動伴奏を行うために、音符番号 i を確率変数とした確率分布を作成した。音符番号 i は、譜面上の音符に対して先頭から順につけられる番号である。作成した確率分布は、データを観測すると以下の条件付き確率によって更新される。

$$f_{I|D,V,J}(i|d,v,j)$$

パラメータ d は事前の観測された演奏時の位置、 v は直前に観測された演奏箇所、 J は推定テンポと直前の観測からの経過時間を用いたテンポに関するパラメータである。条件付き確率に対して、ベイズ推定を行うことによって演奏箇所を推定する。録音されたデータ、リアルタイム歌唱それぞれで評価を行なった結果、平均して 159ms のずれがあった。人間の知覚タイミングの誤差は、一般に 10~100ms の範囲で報告されている [5]。このことから、Grubb らの提案した手法を用いた自動伴奏は、違和感のない演奏を行うことは不可能ではあるが、演奏を中断することはない。

3. 演奏者モデルの作成

3.1 システム概要

図 1 に提案する演奏箇所推定手法の構成を示す。システム構成では、パラメータとして視線情報、打鍵情報のみしか

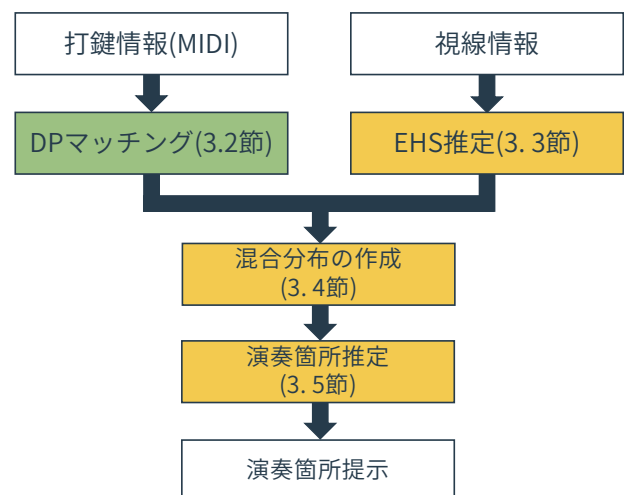


図 1 提案手法の構成図

記載していないが、新たに他のパラメータを追加することは容易である。システムは主に混合分布の作成、演奏箇所推定の2つの要素からなる。

個人の演奏技能の違いに応じた楽譜追跡システムを実現するための要件として、少ないデータを用いて学習ができる手法を用いる点、ミス打鍵に対して頑健である点の2点が必要である。まず、多くの楽譜追跡システムでは、事前に教師付きデータを用いて確率的遷移モデルを作成する方法が一般的である。このような手法を用いて個人の演奏技能を考慮するには、個人のデータを大量に集める必要がある。これは、現実的に厳しいため、少ない学習データでも十分なパラメータ推定が可能な手法を用いるべきである。そこで、本研究ではベイズ推定を用いたパラメータ推定を行う。ベイズ推定は、事前分布と事後分布が共役な分布であれば、解析的に解くことができるという特徴がある。次にミス打鍵に対する頑健さについて考える。多くの確率的遷移モデルを用いた方法では、譜面上の音符の発生タイミングを隠れ状態、実際に演奏した音を観測記号、音符発生タイミング上の音符の出現確率を記号出力確率とする。しかし、実際の演奏では、演奏者の技能的な面から弾き飛ばし、弾き戻りといったミス打鍵が発生する。ミス打鍵が発生する際には、出力記号として想定されていない音を演奏してしまうため楽譜追跡が正確に動作しない。そのため、本研究では打鍵情報だけではなく、複数のパラメータを使用することで問題の解決を試みる。

提案手法に用いる変数の説明を述べる。まず、楽譜追跡において譜面上の音符と入力された音を区別するために、変数を用いる。譜面上の音符を $i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ と表す。 i は楽譜の先頭からのインデックスである。これらの音符 i の座標を i_x, i_y と表現する。譜面上の音符に対して、演奏者の入力したイベントを $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ と表す。これらの入力イベントから、システムが推定した音符を $e_m \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ とする。

3.2 打鍵分布の作成

演奏箇所推定において重要な要素である打鍵情報を提案手法で扱う方法について述べる。打鍵情報は Dannenberg によって提案された DP マッチングによる演奏箇所推定を元に得られるものである。Dannenberg の自動伴奏システムでは、演奏音と譜面との一致した音数 (ベストマッチ数) をコスト関数とした DP マッチングを行うことによって、単旋律演奏の楽譜追跡を実現している [3][4]。ベストマッチ数をコスト関数としているため、僅かなミス打鍵、弾き飛ばしに対応した楽譜追跡ができる。また、Dannenberg は複数の候補に対し、並列に DP マッチングを行うことも提案しており、並列 DP マッチングは大幅な跳躍、演奏箇所の弾き戻りに対応できる。本研究では、Dannenberg によって提案された並列 DP マッチングを用いることによって演奏音

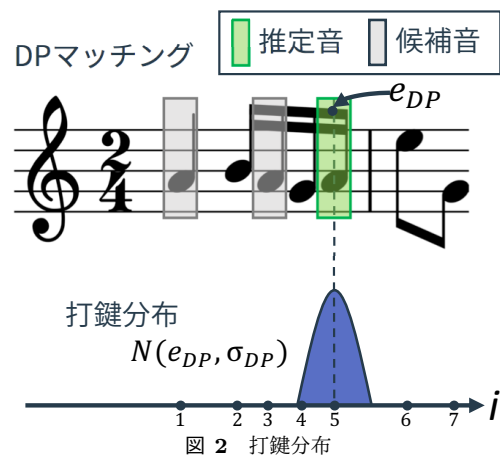


図2 打鍵分布

m から DP マッチングによる推定音 $e_{DP} \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ を出力する。並列 DP マッチングによって得られた推定音 e_{DP} をもとに打鍵分布を作成する (図2)。打鍵分布は、 e_{DP}, σ_{DP} からなる正規分布である。

$$P_{DP}(i) \sim N(\mu_{DP}, \sigma_{DP}) \quad (1)$$

パラメータ μ_{DP} は並列 DP マッチングによって得られた e_{DP} の x 座標 DP_{mx} 、 σ_{DP} は各音符 i 間の距離の平均である ($\sum_i^{I-1} |i_x - (i+1)_x| / I$) とした。

3.3 視線分布の作成

視線情報を提案手法で扱う方法について述べる。本研究では、演奏者の思考、意図、心理状態などが信頼度高く表出される視線の動き [5] に着目する。演奏者は一度に複数の音符を知覚し演奏している。一度に知覚できる音数は、演奏者の熟達度に依存しており、それに伴い EHS の大きさが変化する [9]。そこで、演奏者の熟達度を考慮するために、EHS を正規分布で近似する。EHS は、実際に演奏された音の x 座標 1_x 、 y 座標 1_y に対する譜面上の視線 g_x, g_y の距離である EHS が正規分布に従うと仮定し、以下の式で近似する。

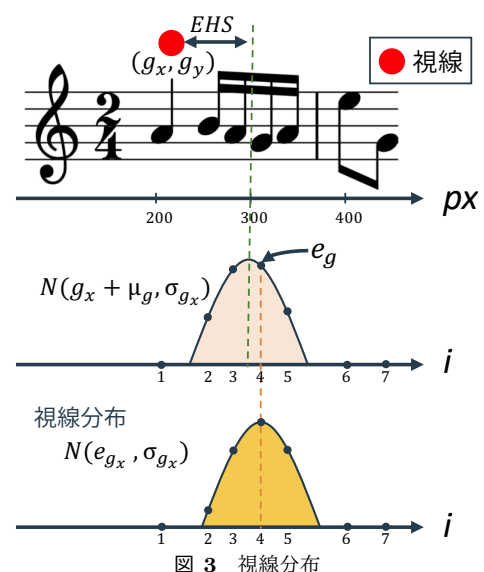


図3 視線分布

$$P_x(i_x - g_x) \sim \mathcal{N}(i_x - g_x | \mu_{g_x}, \sigma_{g_x})$$

$$P_y(i_y - g_y) \sim \mathcal{N}(i_y - g_y | \mu_{g_y}, \sigma_{g_y})$$

μ_g, σ_g はガウス・ガンマ分布を事前分布として仮定したベイズ推論を行うことで、解析的に求めることができる。得られた分布における確率変数を譜面上の音符番号に変換すると x 軸, y 軸それぞれの確率分布を以下のように定義できる。

$$P_x(i) \sim \mathcal{N}(i | g_x + \mu_{g_x}, \sigma_{g_x})$$

$$P_y(i) \sim \mathcal{N}(i | g_y + \mu_{g_y}, \sigma_{g_y})$$

これらの分布の積が最大となる地点を視線による推定音 e_g とする。

$$e_g = \arg \max_i [P_x(i)P_y(i)]$$

得られた推定音 e_g の x 座標 e_{g_x} を用いて視線分布 $P_g(i)$ を作成する。

$$P_g(i) \sim \mathcal{N}(i | e_{g_x}, \sigma_{g_x}) \quad (2)$$

3.4 パラメータの統合

3.1, 3.2 節で作成したパラメータの分布を GMM (Gaussian Mixture Model) によって統合する。GMM を用いて複数のパラメータから作成した正規分布を重ね合わせることで、演奏位置を近似できる。

GMM は $\mu_k = [e_{DP}, e_{g_x}]$, $\sigma_k = [\sigma_{DP}, \sigma_g]$, 混合比 π_k , を用いて次式で表される。

$$P_{GMM}(i) = \sum_{k=0}^K \pi_k \mathcal{N}(i | \mu_k, \sigma_k) \quad (3)$$

$$\sum_{k=0}^K \pi_k = 1$$

事前に得られた分布のパラメータ μ_k, σ_k を考慮するために、GMM のパラメータ π_k のみ更新する。

$$r(Z_{nk}) = \frac{\pi_k \mathcal{N}(i | \mu_k, \sigma_k)}{\sum_{j=1}^2 \pi_j \mathcal{N}(i | \mu_j, \sigma_j)}$$

$$\pi_k^* = \frac{\sum_{n=1}^N r(Z_{nk})}{N}$$

パラメータ更新に用いるデータには $\mu = i_x, \sigma_g = (\sum_{i=1}^{I-1} |i_x - (i+1)_x|) / I$ とした正規分布から生成したデータを用いる。図 4 に混合分布作成までの流れを示す。譜面の横軸は pixel を表す px , そのほか分布の横軸は譜面上の音符番号を表す i である。各 i と px は一意に対応している。演奏音 m , 視線 g_x, g_y が得られた際に、3.2, 3.3 節で説明した打鍵分布, 視線分布を作成する。作成した分布を線形結合し、混合分布を作成する。

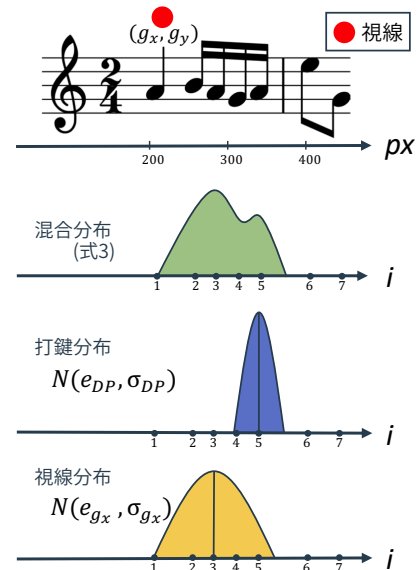


図 4 パラメータの統合

3.5 ベイズ推定による演奏箇所推定

パラメータの混合分布と尤度関数から演奏箇所を一意に定める。演奏音が生起する確率を $P(i)$, 打鍵, 視線に関するパラメータをまとめたものを θ とし, これらのパラメータが生起する確率を $P(\theta)$ とすると, これらの関係はベイズの定理より, 以下の式で表せる。

$$P(i|\theta) \propto P(\theta|i)P(i)$$

ベイズの定理を用いて $P(i|\theta)$ を推定するためには, $P(i)$, $P(\theta|i)$ を把握する必要がある。しかし, 楽譜には同一の音, 音形の出現, 演奏においては, ミス打鍵や跳躍が生じるため $P(i)$ を一意に把握するのは困難である。そのため, 本研究では $P(i)$ を 3.4 節で求めた混合分布 (式 3) として代用することで演奏箇所推定を行う。対して $P(\theta|i)$ は事前の学習データから音符 i が発生する際に, パラメータ θ が発生する分布として求めれば良い。また, パラメータ θ は DP マッチングによる推定音 e_{DP} と視線 g_x の同時分布である。視線 g_x は譜面の横幅だけの pixel 数を表す整数値だけ存在するが, 考えうるすべての視線に対して推定を行うと出現の頻度に極端な差が生じる。そこで, 本研究では, 譜面を x 軸方向に 10 分割することによって, 学習の偏りを避けた。これにより, パラメータ θ は譜面に記載されている音符数 \times 分割数 (10 通り) だけ求めれば良い。DP マッチングによる推定音 e_{DP} と 10 分割した視線をパラメータとした尤度関数 $P(\theta|i)$ を作成した。得られた混合分布, 尤度関数を掛け合わせたもののうち, 最大の値をとる音符 i を現在演奏音 e_m として推定した。

$$e_m = \arg \max_i [P(\theta|i)P_{GMM}(i)] \quad (4)$$

4. 実験

実験では, 提案システムが個人の演奏技能に応じて頑健

な動作をするか確かめるために弾き飛ばし、弾き戻りといったミス打鍵に対して評価を行った。実験に参加した被験者は A から G の 7 名 (男性 5 名, 女性 2 名) で, そのうち 4 名はピアノを習っていた経験がある大学生, 3 名は他の楽器を演奏したことがあり, 楽譜を読める大学生である。

4.1 提案手法の実装

提案システムは表示画面, データ入力部分は Processing, アルゴリズム部分は Python を用いて実装した。Processing を利用した理由として, 演奏者への譜面の提示や演奏箇所への提示など GUI を要するためである。打鍵情報はキーボードによる MIDI データ, 視線情報は視線計測装置を用いて譜面上の x, y 座標を取得した。視線計測装置は EyeTribe を用いる [12]。EyeTribe は小型かつ据え置き型の視線計測装置であるため, 演奏者の演奏を妨げない。また, EyeTribe は 30Hz で視線情報のサンプリングを行うことができる。Processing で得られた入力データは OSC (OpenSound control) 通信を用いて Python へと送信した。OSC 通信は音楽演奏データをネットワーク経由でリアルタイムに共有するための通信プロトコルである。送受信用のポート計 2 つで Processing と Python を接続した。Python は受け取ったデータを用いてパラメータ推定を行なったのち, 演奏箇所を Processing へ送信する。

課題曲として採用した楽曲はヤマハ音楽能力検定 (グレード 5 級) 初見演奏・即興演奏 範例曲集に収録されている a-moll より冒頭 27 小節 (103 音) の右手譜面を使用した [2]。実験の結果に影響がないよう, 被験者の事前の知識によらない楽譜を採用した。課題曲は, 同一のフレーズが 3 組存在し, 同音の連続が 9 箇所存在する。そのため, 演奏箇所推定は困難である。実験を行う上で, 譜面に記載されている音符すべての x, y 座標, MIDI 番号を用いて楽譜を Processing 上で作成した。

4.2 実験の流れ

実験では被験者には学習モード行なった後に, 指示箇所を演奏させ評価実験を行なった。学習モードとは, 3 章で述べた演奏者モデル構築のためのパラメータを推定するモードである。パラメータを推定するために被験者は事前に一度, 課題曲を演奏する。この際, 被験者は, 先頭から末尾まで順にシステムが指示した音を演奏する。ミス打鍵が発生した場合もシステムは次の音符を指示する。これは, 演奏者が意図して弾いた音符を正確に把握するための工夫である。得られた視線情報, 打鍵情報から演奏者モデルを作成し, 被験者には演奏指示箇所を演奏させた。実験では, 被験者に演奏指示 (図 5) を与え, 課題曲を演奏させた。演奏指示は, 弾き直し, 弾き飛ばしに対する頑健さに対する評価のために行った。正順に演奏した場合には, 正しくマッチングする可能性が高くなってしまいうため, 全く同じ音形を逆

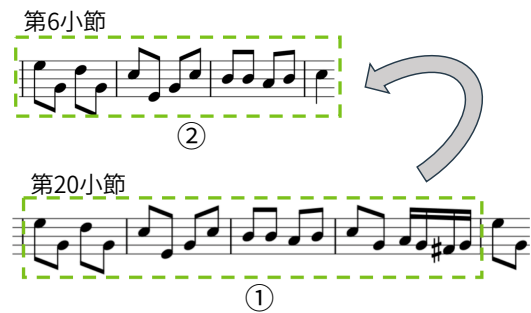


図 5 演奏指示

順に演奏させる。課題曲では, 第 20 小節から第 24 小節を演奏した後に, 第 6 小節から第 9 小節を演奏させた。

4.3 結果と考察

提案手法で演奏指示を与えた場合の弾き飛ばし数, ミス打鍵数, 跳躍時の到達までの音数を表 1 に示す。跳躍時の到達までの音数は, 第 24 小節の最後の音を推定した後に第 6 小節の最初の音を推定するまでにかかった音数である。結果について分析するために, まず視線追跡装置の追跡精度と楽譜追跡の精度について考察する。被験者には実験前, 実験後に譜面上の 1 点を注視するよう指示した。表 2 は, 演奏前に注視していた視線に対する演奏後の視線のずれを表している。 x 軸, y 軸ともに最もずれの大きかった被験者 E の演奏前, 演奏後の視点を比べると, 左に 85.8px 上に 146.4px ずれていたことがわかる。これは, x 軸方向に対して約半小節, y 軸方向に対して, 約 1 段ずれた値である (図 4)。

次に, 学習によって推定された混合比について考察する。表 3 は混合分布を作成する際の視線, DP の重みを表している。これは, 3.1 節で述べた方法を用いて推定した結果である。学習においてミス打鍵が多いほど視線の分布の重み

表 1 課題曲における提案手法の正解率

演奏者	弾き飛ばし	ミス打鍵	到達音数	正解率 (%)
A	1	0	1	93.3
B	1	2	0	96.6
C	0	0	1	70.0
D	0	0	2	93.3
E	0	2	-	0.0
F	0	0	0	90.0
G	0	0	2	93.3

表 2 演奏終了時の計測された視線のずれ

演奏者	x 軸におけるずれ (px)	y 軸におけるずれ (px)
A	1.9	-0.7
B	23.2	-143.7
C	-12.9	19.0
D	-56.0	-70.9
E	-85.8	-146.4
F	-27.0	-104.7
G	29.8	-1.6

表 3 混合分布の重み

演奏者	視線の重み	DP の重み
A	0.13	0.87
B	0.48	0.52
C	0.24	0.76
D	0.15	0.85
E	0.76	0.14
F	0.26	0.74
G	0.13	0.87

は小さくなる。ここで視線のずれ、混合分布の混合比をそれぞれを考慮すると、y 軸のずれが大きな被験者 B, E, F の推定結果が大きく異なるのは、混合比の違いによるものであると考えられる。視線の重みが 0.48 である被験者 B、重みが 0.26 である被験者 F に対し、被験者 E の視線の重みは 0.74 であった。このことより、被験者 E の演奏箇所推定では、視線の値が重視されていることがわかる。しかし、ずれが大きいため推定がうまくいかず、追跡精度が著しく低くなってしまったと考えられる。視線のずれが発生する原因として、姿勢の変化が考えられる。演奏技能が未熟であれば、鍵盤の位置を覚えていないため、演奏中に譜面と鍵盤どちらも目視で確認しなくてはならない。確認の際、首を動かすため顔の位置がずれてしまう。顔の位置がずれてしまうと視線計測装置は十分な視線追跡ができないため、演奏箇所推定が不可能であった。

5. おわりに

本稿では、演奏技能の差異に対して頑健な推定をするために、ベイズ推定に基づく楽譜追跡システムを提案した。技術的な問題点として、少ないデータで学習が可能かつ、ミス打鍵に対して頑健である手法の検討がある。この問題点に対し、視線、打鍵に関するパラメータの確率分布を作成し、これらの確率分布の混合分布を用いたベイズ推定を行うことによって、問題の解決を試みた。個人の演奏技能に応じて、頑健な動作するか評価実験を行ったところ到達音数の平均が 1 音となった。このことより、複数パラメータを用いたベイズ推定に基づく楽譜追跡が有効であることを示した。

しかし、実験では提案で用いたパラメータでは楽譜追跡が不可能である例も見られた。具体的には演奏技能が未熟かつ、視線計測が上手くできない場合である。これは、打鍵

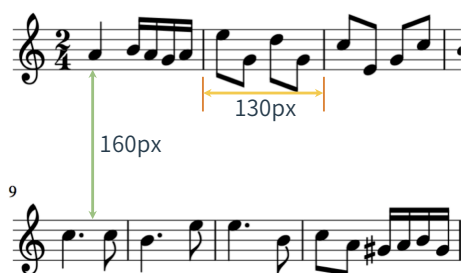


図 6 譜面における小節間の幅

情報よりも視線情報が大きく優先されていて、かつ視線計測が上手くいかない場合に発生する。視線計測装置による追跡精度の低下は、鍵盤上の音の位置を確認する際に顔の位置がずれてしまうことによって起きると考えられる。提案した手法は GMM を用いてパラメータの統合を行うため、新たなパラメータの追加が容易である。そのため、今後の展望として音価や調号など譜面から得られるパラメータ、演奏難易度に基づくパラメータの追加が考えられる。

謝辞 研究を通じて、議論をしていただいた寺井あすか准教授(公立はこだて未来大学)に感謝いたします。平田・竹川研究室卒業生の寺崎さんより貴重な情報を提供して頂いた。本研究は JSPS 科研費 16H01744 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] AIR TURN, available from <https://www.airturn.com> (accessed 2018-10-20).
- [2] 浅野 義弘, 『ピアノ演奏グレード 5 級 初見演奏・即興演奏 範例曲集 ('90 年度改訂版)』(1997), 財団法人ヤマハ音楽振興会.
- [3] Dannenberg, R.B.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, Proc. 1984 International Computer Music Conference (ICMC), pp.193-198 (1984).
- [4] Dannenberg, R.B., Mukaino, H.: New Techniques for Enhanced Quality of Computer Accompaniment, Proc. International Computer Music Conference (ICMC), pp.243-249 (1988).
- [5] Desain P., Honing H., (1992). "Tempo Curves Considered Harmful. In Music Mind and Machine", pp.25-40. Amsterdam: Thesis Publishers.
- [6] Grubb L., Dannenberg R., (1998), "Enhanced Vocal Performance Tracking Using Multiple Information Sources," Proceedings of the ICMC, pp.37-44, (1998).
- [7] 川崎智子:ピアノ演奏時における読譜の為の眼球運動, 三重大学教育学部研究紀要教育科学, Vol.33, pp.49-66 (1982).
- [8] Kobori, S. and Takahashi, K. : Cognitive Processes During Piano and Guitar Performance: An Eye Movement Study, Proc. International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC), pp.748-751 (2008).
- [9] 中村栄太, 武田晴登, 山本龍一, 齋藤康之, 酒向慎司, 嵯峨山秀樹:任意箇所への弾き直し・弾き飛ばしを含む演奏に追従可能な楽譜追跡と自動伴奏, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1338-1349 (2013).
- [10] Piascore, available from <http://piascore.com/ja/> (accessed 2018-10-20).
- [11] S. Furneaux, M. F. Land, The effects of skill on the eye-hand span during musical sight-reading.
- [12] The Eye Tribe, available from <https://theeyetribe.com/> (accessed 2018-10-20).
- [13] 寺崎, 竹川佳成, "DP マッチングのコストに視線情報を反映させた楽譜追跡システムの構築", 情報処理学会論文誌, Vol.59, No.3, pp.894-903 (2018).
- [14] Weaver, H. E. , "Studies of Ocular Behavior in Music Reading", Psychological Mono-graphs, 55(1), pp.129 (1943).