HMMを用いたピアノ運指自動決定アルゴリズム*

◎米林裕一郎** ，亀岡弘和，嵯峨山茂樹 (東大情報理工)

1　はじめに

本稿では、隠れマルコフモデル (HMM) を用いてピアノ譜の運指を自動決定するアルゴリズムを提案する。

本稿は、ピアノ演奏の合理的な手の動きを定式化することを目標とする。ピアノ自習者への模範演奏の提示、曲の難易度判定や難易度をキーとした作品検索などへの利用が考えられるほか、ピアノ演奏ロボットの動作計画と考えればロボット指作業全般への応用も期待できる。

ピアノの運指決定に関する既存研究は片手の単旋律を対象とするものが多く、rule-based な手法 [1]、統計的な手法 [2]、隣り合った音符間の運指コスト関数を定義する手法などが見られる。片手の和音やポリフォニーを取り扱っているものもある [3]。本稿で提案するアルゴリズムは、確率論的手法を用いる点が特徴である。

2　運指の自動決定アルゴリズム

2.1　ピアノ演奏のモデル化

ピアノ演奏者が、楽譜あるいは MIDI データなどの形式で与えられた音符列を演奏する過程を考える。運指 S は、音符系列 N をどの指で弾くかというだけでなく、広義にはどのような手の位置/形で演奏するかという手指の状態遷移系列であり、さらには姿勢や肘の使い方など身体動作すべてを含み得る。一方、音符系列 N はピッチや音符長（IOI）のほか、鍵の押下時間、音の強さ、音色など、楽譜で明示的/暗示的に示される広義の音符情報を含み得る。このような手指の状態遷移系列 S から音符系列 N を生み出す過程が演奏であると考えられる。

2.2　運指決定への HMM 導入

逆に、音符系列 N に対して理想的な演奏者が行なうであろう最も尤もらしい運指 S を推定することを運指決定と考えることができる。ここで、以降の節でのモデル近似の都合上、音符系列 N を音符長の系列 T、ピッチの系列 Y、それ以外の情報の系列 O の三つの系列に分解しておく ($N = (Y, O, T)$)。

運指で最も重要なのは、ある時点までの音符をそれぞれある手指状態で打鍵した後、次の音符を時間内に次の手指状態で無理なく打鍵できる確率と考えられる。各音符 $n_i = (y_i, o_i, t_i)$ での手指状態は直前の音符での手指状態とその音符長にのみ依存すると近似すれば、音符系列 $N = (Y, O, T)$ に対して運指 S が使われる確率は、Bayes の定理により

$$
\begin{aligned}
p(S|(Y,O,T)) &\propto p((Y,O,T)|S)p(S) \\
&\approx \prod p((y_i, o_i, t_{i-1})|(s_i, s_{i-1})) \prod p(s_i|s_{i-1}) \quad (1)
\end{aligned}
$$

と近似できる。

以上のように考えると、運指を定式化するモデルとしては、演奏時の手指状態を「隠れ状態」と考え、その状態遷移の途中に音符推移が「出力文字列」として観測されるという Moore 型 HMM が適合する。

（ある音符から別の音符への）音符推移すべてを表す集合を M とすれば、状態 s_1 から状態 s_2 へ遷移する際の出力確率関数は $b_{s_1,s_2} : M \to [0, \infty)$ で表される。この出力確率関数 b_{s_1,s_2} は、ある音符推移を演奏する上での運指遷移 $s_1 \to s_2$ の尤もらしさの違いを表すものである。

2.3　HMM による運指決定の定式化

HMM を用いれば、運指決定は音符系列の背後に隠れた運指を推定するという、音声認識と同型の確率的な逆問題であると捉えられる。運指決定は、上式中の $p(S|(Y,O,T))$ を最大化する S を HMM の事後確率最大経路の Viterbi 探索により求める問題として定式化できる。

このように HMM を用いる利点として、運指決定のメカニズムを HMM のモデルパラメータの特徴や値により定性的・定量的に述べることができる点が挙げられる。

2.4　運指モデルへの近似導入

以上に述べたモデルは理想的には膨大なモデルパラメータを含み得るが、本稿では最初のステップとして少数のパラメータに絞るため以下のような近似を導入した：

- 打鍵している指の番号（複数指で打鍵している場合はその集合）のみを「隠れ状態」と考え、さらに音符推移において O, T の成分を無視しピッチのみに着目した音符推移 (e.g., F#→ G#) を「出力文字列」とする。つまり、

$$
\begin{aligned}
&p(S|(Y,O,T)) \\
&\propto \prod p((y_i, o_i, t_{i-1})|(s_i, s_{i-1})) \prod p(s_i|s_{i-1}) \\
&\approx \prod p(y_i|(f_i, f_{i-1})) \prod p(f_i|f_{i-1}) \quad (2)
\end{aligned}
$$

のような近似を行なう (f_i は i 番目の音符 (群) を打鍵している指の番号 (の集合) を表す)。2.2 で

---

*Automatic Determination of Piano Fingering Using HMM. by Yuichiro YONEBAYASHI, Hirokazu KAMEOKA, Shigeki SAGAYAMA (Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

**(株) アスケイドに勤務。

述べた集合 M はピッチ推移すべてを表す集合となる。

- 集合 M において、ピッチのオクターブ位置の違いを考慮しない。例えば、鍵盤中央での D → G と、高音部での D → G は運指決定上同等と見なす。
- 集合 M におけるピッチ (鍵) の推移を、ある鍵の打鍵位置から別の鍵の打鍵位置への二次元ベクトル $\vec{d}$ として表す (黒鍵を含む鍵盤上での左右・奥行き方向の指移動を考慮するため)。この連続空間 M 上の出力確率関数 $b_{s_1,s_2} : M \to [0,\infty)$ は二次元 Gauss 分布に従うと仮定する。

3　評価実験

提案する運指決定アルゴリズムの動作確認を行なった。最初のステップとして、片手単旋律の問題を対象にし、モデルパラメータは学習によらず以下のように設定した：

- 出力確率関数の Gauss 分布の左右方向の中心は指間隔に対応する鍵間隔に大体等しくし (例えば中指→小指は白鍵二つ分の間隔)、分散は親指の広がりやすさを反映させた。
- 指の独立性の理由により中指→薬指などの運指が敬遠される傾向は、その遷移確率を (他の遷移に比べ)3 割程度低くすることで表現した。

バッハのインヴェンション第 1, 2 番の右手の単旋律に対する適用例では、以下の図 (Fig. 1) に示すように、多くの箇所で尤もらしい運指決定が行なわれた：

(A) 指間隔と鍵間隔の対応
(B) 適切な指くぐり
(C) 親指の黒鍵打鍵の困難さ

しかし、2.4 節での近似に起因すると考えられる問題箇所も見られた（Fig. 2）：

(D) 音符長によっては同音連打を同じ指で弾きづらい ⇒ 音符系列のモデル (Y, O, T) から音符長の情報 T を除外したことによる
(E) 指間隔と鍵間隔が対応しているものの、手の動きが不安定 ⇒手の動きを表すモデル要素が隠れ状態に不足している

(E) の問題については、2.2 節において手指状態は 2 つ以上前の音符の手指状態には依存しないと近似したことが理由である可能性もある。

4　結論

本稿では、HMM を用いてピアノ譜の運指を自動決定するアルゴリズムを提案した。近似されたモデルで実験を行うことにより、この手法の基本性能を確認

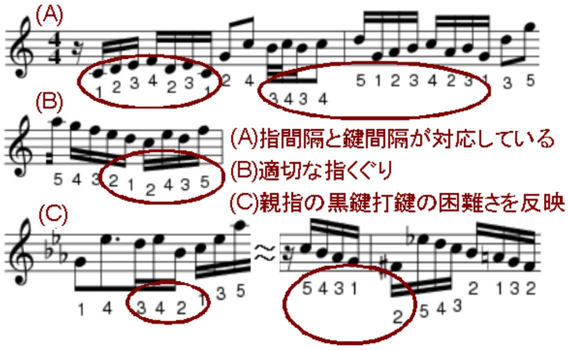

Fig. 1　尤もらしい運指決定結果

Fig. 2　近似に起因する問題箇所

すると共に、近似を軽減したより精密なモデルが必要であることを示した。本稿で示したアルゴリズムの枠組みは以下のような拡張可能性を持つ:

- 片手の単旋律に留まらず、両手の和音やポリフォニーを含む場合、さらに左右の手への振り分けが未知の場合も取り扱える。
- 強拍のスフォルツァンドは親指で叩く、あるいは、楽譜に既存の部分的な指使いのような例外ルールも、探索空間の限定により実現可能である。
- 運指が指定された楽譜によるパラメータ学習、複数の解を求める N-best 探索が可能である。

今後は、より精密なモデルの実装のほか、学習、和音・ポリフォニーを含む場合や両手を含む場合の定式化と実験検証を予定している。

参考文献

[1] 林田教裕 他, “楽曲構造に基づくピアノ運指ルールの論理表現,” 情報処理学会第 65 回全国大会講演論文集, 2003.

[2] 野口賢治 他, “n グラムの手法を用いたピアノ運指の推論,” 情報処理学会第 52 回全国大会講演論文集, Vol. 2, pp. 101–102, 1996.

[3] Alia Al Kasimi *et al.*, “Automatic Fingering System (AFS),” poster presentation at ISMIR, 2005.