

隠れマルコフモデルによるギターのための運指決定および自動編曲*

吉永悠真¹, 堀玄², 深山覚³, 嵯峨山茂樹³

(¹ 東大・工, ² 亜大・経営, ³ 東大院・情報理工)

1 はじめに

国内におけるギターの演奏者人口はピアノの3倍近く、また楽器自体の販売台数においてもギターはピアノを大きく上回っている。しかし楽譜の出版状況を比べると、ピアノ用には様々なジャンルの優れた作品が存在し、楽譜も多数出版されているのに対し、ギター用の作品も楽譜もピアノ用ほど豊富に存在しない。ピアノ用の楽譜しか入手できない楽曲をギターで演奏する場合、ギター演奏者は運指決定と編曲を自分で行う必要がある。ここで運指決定とは、ギターで演奏可能な楽曲の各音符に対してフレット上の押弦位置を決定する作業であり、編曲とは、音域や同時発音数の関係からギターで演奏することが不可能な部分を含む楽曲に対して、最小限の変更を加えてギターで演奏可能とした上で、各音符に対してフレット上の押弦位置を決定する作業を指す。ピアノの3倍近いギターの演奏者人口を考慮すると、このような作業を自動的に行う技術には大きな需要があると考えられる。

このような背景に基づき、本稿では楽曲の楽譜が与えられるとその楽曲の運指決定および編曲を自動で行う手法を提案する。弦楽器の運指決定問題については、動的計画法を用いる方法 [1][2] や、遺伝的アルゴリズムに基づく方法が提案されてきた [3]。本研究では従来から取り組まれてきた運指決定に加えて編曲の問題まで扱い、この2つの問題が隠れマルコフモデルに基づく共通の枠組みで扱えることを示す。はじめに運指決定が提案法によって解けることを議論したのち(2節)、次に編曲の問題をも扱えることを示す(3節)。

2 隠れマルコフモデルによるギターの運指決定

2.1 運指決定の問題設定

ギター演奏者が左手で弦を押さえ右手で弦をはじくとギターから楽音が発せられる。このような左手による押弦と右手による撥弦の系列が運指であり、ギターの演奏とは運指から音符の系列が生じる過程と考えられる。逆にギターで演奏可能な音符系列が与えられたとき、これを演奏するための運指を決定する作業が運指決定である。ギターは各弦の音域が重なり合うようにチューニングされているため、単音

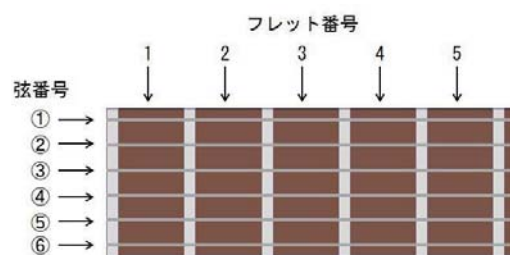


Fig. 1 ギターの弦番号とフレット番号; 左側にネック、右側にボディがあり、通常の演奏状態では図の上側が下にくる。

弦番号: ⑥ ⑤ ④ ③ ② ①
音階: E3 A3 D4 G4 B4 E5



Fig. 2 本研究で用いる標準的なギターのチューニング

の場合でもひとつの音符に対して左手の押弦位置が一意に定まらない。このため一般にひとつの音符系列に対して複数の運指が対応する。このときいかにギターの弾きやすさを考慮して運指を決定するかが、運指決定において解くべき問題である。ここで言う弾きやすさとは、自動編曲技術の主な利用者と考えられる初級者にとっての弾きやすさを考慮すると良いと考えられる。

本稿を通じて Fig. 1 のような弦番号とフレット番号を用いてギターの運指を表す。開放弦(左手で押弦せずに右手の撥弦のみで音を発すること)の押弦位置はフレット番号0で表す。また対象とするギターは、Fig. 2 のような標準的なチューニングの、各弦19フレットの6弦ギターとする。

2.2 隠れマルコフモデルによる運指決定の定式化

楽譜上の音一つ一つは、フレットの押弦と撥弦の組合せにより発音される。この押弦と撥弦の組合せを一つの状態として扱うと、ギターの楽曲はこの状態が遷移した結果として得られたものと見ることができる。運指を決定する際に考慮すべき運指の容易さは、(1) 押弦する手の移動距離、(2) 押さえる指の配置の2点に依存していると考えられる。このような運指の困難さに応じて状態の遷移の起こりやすさには偏りがある。例として初級者においては遠く離れたフレットへの移動をするような状態の遷移や、手を

* "Fingering determination and automatic arrangement for guitars using hidden Markov model" by Yuma Yoshinaga[†], Gen Hori[‡], Satoru Fukayama[†] and Shigeki Sagayama[†] ([†]The University of Tokyo, [‡]Asia University)

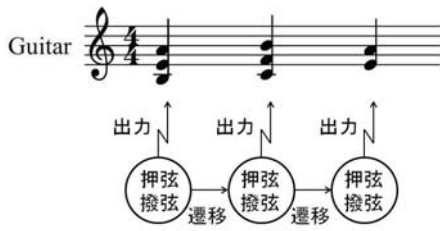


Fig. 3 ギター曲と運指の関係; 音符系列は背後で確率的に遷移する左手の押弦と右手の撥弦の系列から確率的に出力される。

大きく広げる必要のある状態を用いることは少ない。これらはギター奏者が実際にどのような状態の遷移によって楽曲を演奏するかというデータに基づいて、これらの遷移の偏りを確率によって扱うことができる。ここで運指の容易さが現在と一つ前の状態のみに依って記述できると仮定すると、ギター運指の状態遷移は1次のマルコフ過程として記述できる。ギターで演奏される楽音は状態が与えられると一意に決まるが、これについても状態が与えられた際の楽音が鳴らされる確率として扱うことができる¹。このような確率的なギター楽曲の音符の生成過程のモデルを Fig. 3 に示す。このような確率モデルは一般に隠れマルコフモデル (Hidden Markov Model, HMM) と呼ばれる。運指決定はギター楽曲を出力するような尤度最大の運指状態系列を求める復号化問題として定式化でき、この問題は Viterbi アルゴリズムにより効率的に解くことができる。

以上の定式化で現実的な計算時間で問題を解くためには、問題の単純化が2点必要である。第一に演奏される音符系列は和音の系列であるとする。ここで和音とは、同時に発音を開始し同時に発音を終了する音符の集合である。実際のギター曲では、同時に発音を開始した複数の音符のうち、一部の発音を継続したまま残りの発音を終了したり他の音符に移行することがあるが、このようなケースまで含めるとモデルの状態数が膨大になり計算量が多くなってしまふ。第二に状態間の遷移確率は各状態が出力する音符の時間間隔に依存しないとした。時間間隔に依る遷移確率の変化は、同じ運指の時間間隔毎の別状態を定義し、それらの状態遷移を考えることで扱うことができるが、第一の仮定の理由と同様に計算量が増大してしまう。本研究は運指決定と編曲が共通の枠組みで行えることの検証が主題であるため、運指決定においてこれらの単純化を行っても差し支えないと考えられる。

HMM の応用においては、遷移確率と出力確率を学習データから EM アルゴリズムなどを用いて推定することが多いが、本研究の HMM の膨大な数のパラメータを学習するために十分な量の運指データを用意することは容易でない。そのため、次節で HMM の遷移確率と出力確率の設定方法について議論する。

¹後述の編曲の定式化では一意に決まらないことに注意

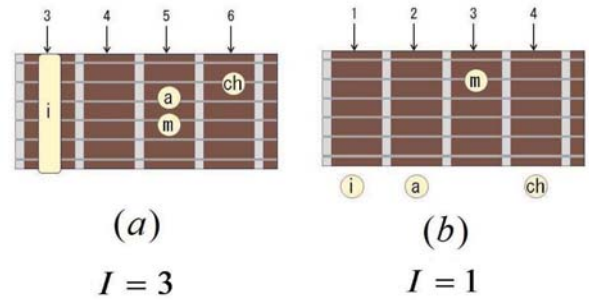


Fig. 4 各押弦に対するポジション I の値; ポジション I は人差し指が配置されているフレット番号を表す。ここで、i、m、a、ch はそれぞれ人差し指、中指、薬指、小指を表す。

2.3 ギター運指の状態遷移確率

左手の移動のしやすさに対応する状態遷移確率は、運指に伴う左手の移動が少ない場合に演奏が簡単であるという事実から、遷移による左手の移動距離が大きいほど確率が小さくなるような設定が必要である。よって運指の状態 q_i から状態 q_j への遷移確率 a_{ij} を今回は、

$$a_{ij} \sim \frac{1}{1 + |I_i - I_j|} \quad (1)$$

と設定することでこの傾向を反映した。ここで I_i は押弦の「ポジション」であり、人差し指が押さえるフレット番号を指す。人差し指を使わない押弦のときには、フレットを押さえない指がフレットを押さえる指から連続するフレットに配置されていると考え、人差し指が配置されるフレット番号をポジションとする。Fig. 4 に二つの押弦状態とそのポジションの例を示す。(a) の押弦では人差し指は3フレットにあるので $I = 3$ である。(b) の押弦は薬指のみで押さえられており、押弦に用いられていない指は図のように指の順番 (左より人差し指、中指、薬指、小指) で配置されると考えられ、このとき人差し指は1フレットにあると見なせるので、 $I = 1$ である。

2.4 ギター運指からの音符の出力確率

押弦が決定されたときに鳴る楽音は一意に決まっているが、押弦が困難な場合には楽音が鳴らされる確率を低く設定する必要がある。ここで押さえにくさについては、押弦する指の数、ポジション、押弦しているフレットの幅を考慮するとよい。押弦する指の数 N_i が押弦の難度のひとつであることは明らかであり、ポジション I_i の値が大きいほど同じ型の押弦であっても難度が高くなる。また押弦のフレット方向の広がりを表す押弦の幅 F_i を考えると、一般に押弦は5フレット以内に収まるものがほとんどであり、6フレット以上にまたがるものはほぼ現れないことがわかる。多くのフレットにまたがる押弦では左手の各指に十分な力をかけるのが難しくなるため、押弦の幅も難度のひとつと考えられる。よって押弦の幅 F を $F = F_{\max} - F_{\min} + 1$ と定義できる。ここで F_{\max} は押弦している最大のフレット番号、 F_{\min} は最小のフ

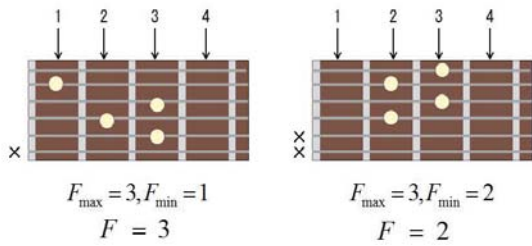


Fig. 5 各押弦に対する押弦の幅 F ; 押弦の幅は押さえているフレット番号の最大値と最小値をもとに決定される。

フレット番号である。開放弦のみで発音している場合は $F = 0$ と定義した。Fig. 5 に押弦の幅の具体例を 2 つ示す。

この議論に基づき出力確率 b_{ik} は、状態 q_i の押弦状態と撥弦状態から発せられる和音が時刻 t の出力記号 $o_k(t)$ の和音と一致しない場合は $b_{ik} = 0$ とし、一致する場合はフレットの押さえにくさを考慮して状態 q_i での押弦の幅 F_i 、押弦する指の数 N_i とポジション I_i をもとに今回は、

$$b_{ik} \sim \frac{1}{1 + F_i} + \frac{1}{1 + N_i} + \frac{1}{1 + I_i} \quad (2)$$

と設定した。

2.5 運指決定の評価実験

本節で提案した HMM による運指決定の動作を確認する実験を行った。Fig. 6 は、C5 から始まる 1 オクターブの音階に対する運指決定例である。上段の楽譜を出力記号列として与えたところ、下段のタブ譜が生成された。結果として人差し指を 5 フレットに固定し、残りの指で押さえていく自然な運指が得られた。これは上段の楽譜が与えられた場合に人間のギター演奏者が行う自然な運指であり、左手の移動を抑えた運指が得られたのは、ポジション移動に基づき設定した遷移確率のためと考えられる。Fig. 7 は、あらかじめギター用に編曲された楽曲「もろびとこぞりて」に対する運指決定例である。多重音を多く含むギター曲についても、左手の移動を抑えた現実的に演奏可能な運指が得られた。各和音に対する運指を観察すると、押弦の幅やポジションに基づいて設定した出力確率の効果が現れていることが分かった。

3 隠れマルコフモデルによる ギターのための自動編曲

次に他の楽器の曲からギター曲への自動編曲を考え、これが運指決定と同様の枠組みで扱えることを議論する。編曲前の演奏楽器としては主にピアノが想定される。

3.1 ギターのための自動編曲の問題設定

本研究ではギター曲への編曲を、元の曲に含まれる音をできるだけ残しつつギターで演奏できるように曲に変更を加えるものとする。「編曲」という語には

Fig. 6 C5 から始まる 1 オクターブの音階のギター楽譜と出力されたギタータブ譜; 人差し指が 5 フレットに固定され、左手の移動が生じない運指であり、遷移確率の設定が反映されている。

Fig. 7 「もろびとこぞりて」のギター楽譜と出力されたギタータブ譜; 押弦の幅が小さく、かつ開放弦が多用され、押弦する指の数が抑えられており、出力確率の設定が反映されている。

積極的に原曲の曲想を変化させる作業と、原曲の曲想を保ちつつ他の楽器用に変更する作業の二つの意味があるが、本研究では後者の意味でこの語を用いる。

編曲では弾きやすい運指の決定に加えて、音域や同時発音数の関係からギターで演奏することが不可能な部分を含む楽曲をいかにギターで演奏可能にするかが問題である。具体的には、(1) ピアノの音域が A0 ~ C8 であるのに対してギターの音域は E3 ~ B6 であり、ギターの音域外の音を含む和音については、音域外の音を含まないように変更する必要があること、(2) ピアノの最大同時発音数が両手の指の数の 10 音程度であるのに対してギターの最大同時発音数は弦の数の 6 音であり、7 音以上の和音については、6 音以下になるように変更する必要があること、(3) 音域と同時発音数について以上の条件を満たしているピアノでは演奏可能な和音でも、その構成音すべてをギターのフレット上に左手の指 4 本で押弦可能な形に配置できない場合があること、を考慮する必要がある。

このような必要性から迫られる操作は、和音から構成音を省略または追加することによって行える。このときメロディと和音の根音を構成する音を省略すると曲想が大きく変化してしまうことに注意する必要がある。具体的には、(1) 各和音の最高音は和音系列の中でメロディラインを構成することが多いため、曲想を保つため省略しない、(2) 各和音の最低音は和音の根音であることが多く、変化が加わると曲想が変わってしまうことがあるため可能な限り省略しない、またそのために楽曲に含まれるギターの音域より低

い音については、ギターの音域に収まるようにオクターブ変更する、調を適切に設定することが必要である。また構成音を省略した後新たに構成音を追加することで聴感上原曲に近い和音にできる可能性がある。しかしどの音を加えるかの基準の設定が困難であるため本研究では扱わない。したがってギターのための自動編曲は、与えられた楽曲に含まれるギターでは演奏不可能な和音について、(1) 構成音の省略、(2) 構成音のオクターブ変更、の2つの変更を施しながら運指決定を行うことで実現できると考えられる。

3.2 隠れマルコフモデルによる自動編曲の定式化

同一楽曲に対するギター用譜面とピアノ用譜面の対が与えられたとき、ギター譜とピアノ譜の対応関係を観察すると、前節で議論したような音の変更が多く、曲想を損なうような変更は少ない。このことからギターの運指から得られる音と編曲を施したい対象の楽曲との違いは運指の状態から音が出力される確率の偏りによって扱うことができると考えられる。自動編曲の問題においても運指決定が必要であることから、運指決定は自動編曲の部分問題としてとらえることができる。

運指決定を解く HMM においては、運指の状態 q_i から発せられる和音が楽曲の時刻 t の和音 $o_k(t)$ と一致しない場合に出力確率を $b_{ik} = 0$ と設定していた。これに対して、前節で述べた構成音の省略とオクターブ変更を行ったものと、状態 q_i から発せられる和音 $o_k(t)$ が楽曲の和音が一致する場合は、出力確率 b_{ik} に 0 でない値を与えることで自動編曲を同じく HMM を用いて行うことが可能であると考えられる。出力確率は編曲操作によって変更される項目が多いほど低い値となる必要があるため、楽曲の時刻 t の和音を状態 q_i が発する和音に一致させるために要する構成音の省略とオクターブ変更の回数 C_{ik} に基づき、今回は

$$b_{ik} \sim \frac{1}{1 + F_i} + \frac{1}{1 + N_i} + \frac{1}{1 + I_i} + \frac{1}{1 + C_{ik}} \quad (3)$$

と定めた。

3.3 ギターのための自動編曲の評価実験

本節で提案した HMM による自動編曲の動作を確認する実験を行った。Fig. 8 はショパンの「幻想曲へ短調作品 49」の 29–30 小節部分に対する編曲結果例である。上段の楽譜を出力記号列として与えたところ、中段の楽譜と下段のタブ譜が生成された。ただし上段に対してあらかじめ和音の系列になるように音の長さを調整し編曲を行った。なお、中段のギター譜は実音よりも 1 オクターブ上げて表記されている。

上段の楽譜はピアノ用であり、ギターの音域外の音を含むため、そのままの状態ではギターによる演奏が不可能である。Fig. 8 の上段の楽譜で変更された音を四角形と丸で示す。四角形で囲まれた音は編曲

The image shows a musical score for Piano and Guitar. The Piano part is in the top staff, and the Guitar part is in the bottom staff. The guitar part includes a tablature below it. The tablature shows fingerings for strings T, A, B. Some notes in the piano part are circled, and some in the guitar part are boxed.

Fig. 8 ショパン作曲: 幻想曲へ短調作品 49 のピアノ楽譜と自動ギター編曲結果のタブ譜; 四角形で囲まれた音が省略され、また丸で囲まれた音は 1 オクターブ上の音に変更され、ギターで演奏可能なタブ譜が得られた。

の結果省略され、丸で囲まれた音は 1 オクターブ上げられたことが示されている。丸で囲んだ音のうち、2 番目と 3 番目の音については元々あった音と重なったため、音の省略として扱われた。以上の変更により、演奏可能な運指が得られた。この結果から、音の変更の制約を出力確率を用いて表現することにより、自動編曲も運指決定と同じく HMM の枠組みで扱えることが分かった。

4 おわりに

本稿ではギターの運指決定および自動編曲の問題に対して、運指の容易さとギターで演奏可能とするための音の変更の度合いが確率で扱えることを議論し、これを HMM の復号化問題として定式化し、Viterbi アルゴリズムで解く手法を提案した。運指決定では左手の人差し指の位置によって遷移確率を定め、また押弦の難度をもとに出力確率を定めることでギター演奏者が行う自然な運指が得られた。また自動編曲においては、他の楽器の曲からどの程度変更されたかをもとに出力確率を定めることで、ギターで演奏可能な編曲結果が得られた。すべての移調の可能性を探索することで、最高音がギターの音域に収まり、開放弦を多用するなど運指が容易になるような移調を自動決定することも可能であり、本研究の次の段階として検討したい。

参考文献

- [1] Sayegh et al., *Computer Music Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 76–83, 1989.
- [2] 伊藤 他, 電気学会論文誌 C, Vol. 124, No. 7, pp. 1396–1403, 2004.
- [3] Tuohy et al., *Proc. of ICMC'05*, pp. 499–502, 2005.