

# 単旋律におけるギター押弦運指の最適化

林田 巧

愛知工業大学工学部経営工学科  
〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247  
E-mail: hayashida@toki.ie.aitech.ac.jp

伊藤 雅

愛知工業大学経営情報科学部経営情報学科  
〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247  
E-mail: mitoh@mgt.aitech.ac.jp

## 1 はじめに

ギターは有棹撥弦楽器である。それゆえに、棹のようなネックを有し、その表面の指板上にて弦を押さえ、撥弦することによって音が発せられる。各弦は音域が重なり合うように調律されているため、同じ音の高さが複数のポジションに存在している。このため、音の高さと発音ポジションとが1対1に対応しているピアノ等の鍵盤楽器に比べ、ギターでは運指を見出すのが困難である。なお、発音ポジションを見出す方法については、これまでも多数検討されている [1, 2]。

本研究では、運指割り付けの自動化を目的とし、運指の指定されていない楽譜において最適な押弦運指を求める。対象を単旋律に絞り、最適なギター押弦運指を求める問題をギター運指最適化問題として定式化する。楽譜に並ぶ音符は時系列に沿っているため、ギター運指最適化問題は音符を段階とする多段階決定問題として捉えることができる。多段階決定問題を解くには、動的計画法 (Dynamic Programming: DP) が有力であり、これを本研究の手法として採用する。

## 2 ギター運指最適化問題

### 2.1 問題の定義

運指を考える上で様々な要因が存在するが、本研究では中川 [3] のいう音楽性を考慮しない「弾きやすくするための運指」を考える。「弾きやすくするための運指」とは、音と音とを滑らかに繋げるための好みの入らない絶対の運指である。負荷のない運指動作での演奏において音の途切れている時間 (以下、ロスタイム) が発生する場合、これを滑らかに演奏するには速い運指動作が必要となる。つまり、運指に負荷が生じると考えられる。そこで、最適な運指をロスタイムが最小となる運指と定義する。なお、滑らかな演奏と途切れる演奏は図1の通りである。

本研究では DP のマルコフ性を満たすため、手のポジショ

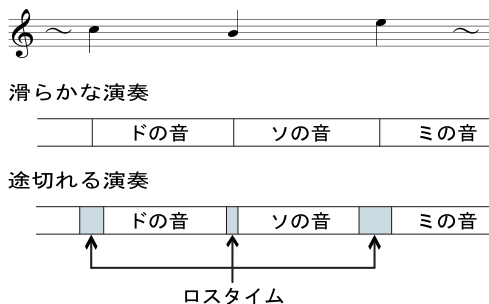


図1: 滑らかな演奏と途切れる演奏

ンが過去の履歴に依存する休符と開放弦は取り扱わない。また、指のポジションが過去の履歴に依存するセーハの使用を禁止する。押弦可能な指は親指を除く4本の指であり、弾弦指での押弦は禁止する。使用する楽器には、レギュラーチューニングに調律された各弦19フレットの6弦ギターを想定する。弦・フレット・指には、図2の通りそれぞれ番号が割り振られている。レギュラーチューニングにおける各弦の調律は、図3の通りである。想定するギターでは、半音区切りで44の音が発音可能である。しかしながら、本研究では開放弦を取り扱わないため実際に使用可能な音は、開放弦でしか発音できない⑥弦の開放音を除外した43音である。取り扱う単旋律は使用可能な43音のみで構成され、各音符には音の高さと長さ以外の情報は含まれないものとする。

### 2.2 押弦運指動作におけるモデル化

押弦運指モデルの動作を押弦・離弦・移動の3つの基本動作で定義し、以下に各動作のモデル化を行なう。まずは、指板を各弦間および各フレット間の幅がすべて1単位距離の完全格子とみなす。指頭は黒点とし、各交点上を動くものとする。指板上での各指の配置については、カルレバロ [4] の提唱する隣り合うフレットに各指が並ぶ縦型配置とする。担当外のフレットを押さえるには、4本の指が揃って動く手のポジション移動を行なう。指のストレッチ動作による押弦は禁止する。手および指は指板に対して平行移動を行ない、手はフレット方向へ指は弦方向へそれぞれ移動する。移動距離の尺度にはマンハッタン距離を適応し、フレット方向への手の移動距離と弦方向への指の移動距離との和として表現す

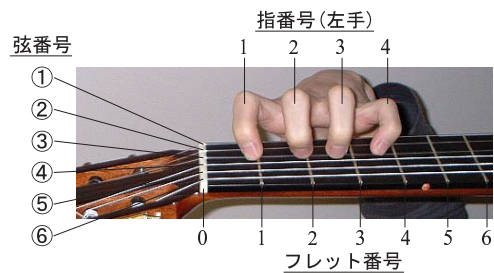


図2: 弦・フレット・指番号



図3: 各弦の調律

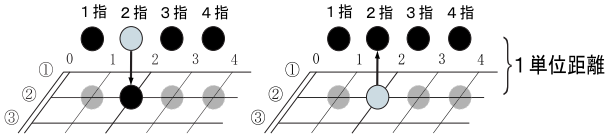


図 4: 押弦および離弦動作

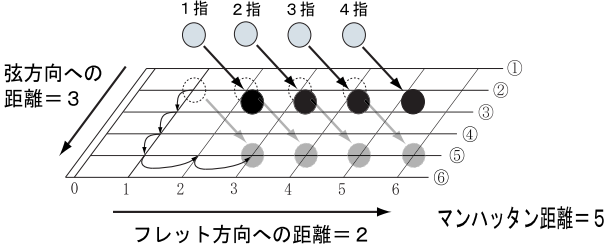


図 5: 移動動作

る。ただし、手のポジションの指標は人差し指のフレット位置とする。また、手および指は等速直線運動を行ない、1 単位距離の移動に 1 単位時間要するものとする。押弦および離弦については指板に対する指の垂直な運動とし、この移動距離はすべて 1 単位距離とする。各指の状態は押弦状態か離弦状態かのいずれかであり、使用中の指以外はすべて離弦状態とする。離弦状態の指は発音中に次の使用弦上に配置できるものとし、ロスタイム間における指の移動時間には含まない。押弦状態の指は、離弦しなければ移動できない。手の移動は、すべての指が離弦状態の場合のみ可能である。モデル化した押弦・離弦・移動動作を図 4 および図 5 に示す。

ここで、ロスタイム間の時間順に現れる 3 つの基本動作を、1) 移動の前段階における離弦、2) 新たなポジション配置のための移動、3) 発音するための押弦および離弦の 3 ステップに分けて定義する。移動の前段階における離弦は、手および指の指板に対する平行移動を可能とするためのステップである。ロスタイム間の移動を必要としない場合は、このステップでの離弦は行なわない。新たなポジション配置のための移動は、次に使用する指を押弦位置上に配置させるステップである。発音するための押弦および離弦は、押弦位置上に配置された指を押弦させ、他の押弦状態の指を離弦させるステップである。すべての指が離弦状態の場合は押弦のみを行ない、押弦状態の指がある状態であつ異指押弦をする場合には押弦と離弦の両動作を行なう。両動作は同時に行なえるものとし、1 単位時間を要することとする。また、押弦状態の指があり同指で押弦を続ける場合には、このステップでは何も行なわない。以上の 3 ステップは互いに独立しており、それぞれのステップに要する時間の合計がロスタイムである。

### 2.3 問題の定式化

DP が適応できるように、ギター運指最適化問題を定式化する。まずは、目的関数  $z$  を定義する。

$$\text{Minimize } z = \sum_{k=1}^{N-1} T_k(X_k, X_{k+1}) \quad (1)$$

式 (1) は、 $N$  個の音符に対して各音符間のロスタイムの総和を最小化することを示している。 $T_k(X_k, X_{k+1})$  は、 $k$  番目の音符を状態  $X_k$  にて発音させてから、 $k+1$  番目の音符

を状態  $X_{k+1}$  にて発音させるまでの間に生じるロスタイムである。 $X_k$  および  $X_{k+1}$  は各音符の演奏状態であり、使用する弦と指の組み合わせである。本研究では 19 フレットギターを想定しており、使用できるのは第 1 フレットから第 19 フレットである。これを満たすように、演奏状態  $X_i$  を式 (2) で表現する。

$$X_i \equiv \{(x_i, y_i) \mid 1 \leq F_i(x_i) \leq 19\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$x_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  は使用する弦であり、 $y_i \in \{1, 2, 3, 4\}$  は使用する指である。それぞれ、弦番号と指番号に対応させて数値化してある。この  $x_i$  および  $y_i$  が、目的関数  $z$  を最小化する上での決定変数である。また、 $F_i(x_i)$  はフレット番号である。各弦においてフレットの番号が 1 増加する毎に、半音ずつ音が高くなるというギターの性質から、

$$F_i(x_i) = a_i - b_{x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

の関係式が成立する。 $a_i \in \{2, 3, \dots, 44\}$  は音の高さであり、低い音から順に半音区切りで数値化する。ただし、開放弦を取り扱わないため、最低音は発音不可能であり除外している。また、 $b_{x_i}$  は  $x_i$  弦の開放音であり、レギュラーチューニングにおける各弦開放音の関係より、

$$b \equiv [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6] \equiv [25 \ 20 \ 16 \ 11 \ 6 \ 1] \quad (4)$$

と定義する。

続いて、ロスタイム  $T_k(X_k, X_{k+1})$  を定式化する。ロスタイム間の時間順に現れる 3 つのステップを考え、各ステップに要する時間の合計がロスタイムであるとする。つまり、移動の前段階における離弦ステップに要する時間を  $T_k^1(X_k, X_{k+1})$ 、新たなポジション配置のための移動ステップに要する時間を  $T_k^2(X_k, X_{k+1})$ 、発音するための押弦および離弦ステップに要する時間を  $T_k^3(X_k, X_{k+1})$  とすれば、

$$T_k(X_k, X_{k+1}) = T_k^1(X_k, X_{k+1}) + T_k^2(X_k, X_{k+1}) + T_k^3(X_k, X_{k+1}) \quad (5)$$

となる。 $T_k^1(X_k, X_{k+1})$ ,  $T_k^2(X_k, X_{k+1})$ ,  $T_k^3(X_k, X_{k+1})$  を以下にそれぞれ定式化する。

まず、 $T_k^1(X_k, X_{k+1})$  について考察する。離弦は指による 1 単位距離の運動であることから、このステップに要する時間は 1 単位時間である。ただし、次のステップでの移動が無い場合には、このステップでの離弦動作は生じない。そこで、制御変数  $\lambda_k^1 \in \{0, 1\}$  を導入すれば、

$$T_k^1(X_k, X_{k+1}) \equiv 1 \times \lambda_k^1 \quad (6)$$

と定式化できる。

次に、 $T_k^2(X_k, X_{k+1})$  について考察する。移動距離については、フレット方向への手の移動距離と弦方向への指の移動距離との和で表現できる。また、手および指は等速直線運動を行ない、1 単位距離を移動するのに 1 単位時間を要するので、移動距離がそのまま移動時間となる。ただし、異指による押弦の場合には、指の移動時間がロスタイムに含まれないとしている。そこで、制御変数  $\lambda_k^2 \in \{0, 1\}$  を導入すれば、

$$T_k^2(X_k, X_{k+1}) \equiv |P_{k+1}(X_{k+1}) - P_k(X_k)| + |x_{k+1} - x_k| \lambda_k^2 \quad (7)$$

と定式化できる。 $P_k(X_k)$  および  $P_{k+1}(X_{k+1})$  は手のポジションであり、人差し指のフレット位置である。各指が隣り合うフレットに並ぶことから、

$$P_i(X_i) = F_i(x_i) - y_i + 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

の関係式が成立している。

最後に、 $T_k^3(X_k, X_{k+1})$  について考察する。押弦は指による1単位距離の運動であり、また、押弦と離弦の両動作は同時に行なえるとしているので、このステップに要する時間は1単位時間である。ただし、押弦状態の指があり同指で押弦を続ける場合、このステップでは何も行なわない。そこで、制御変数  $\lambda_k^3 \in \{0, 1\}$  を導入すれば、

$$T_k^3(X_k, X_{k+1}) \equiv 1 \times \lambda_k^3 \quad (9)$$

と定式化できる。

#### 2.4 DP による解法

第  $n$  段階の状態  $X_n$  に至るまでの最小コストを  $f(n, X_n)$  とするならば、 $n=1, 2, \dots, N-1$  に対して、ギター運指最適化問題のDP漸化式は式(10)となる。

$$f(n+1, X_{n+1}) = \min_{X_n} [f(n, X_n) + T_n(X_n, X_{n+1})] \quad (10)$$

ただし、初期条件  $f(1, X_1) = 0$  である。

本研究ではコストを単純な整数値で表現しているため、目的関数値を最小に導く解は複数あると予想される。最適解を一意に導き出すため、各状態に対してのレベル付けを行なう。想定するギターでは、⑥弦側から①弦側に向かう程に音域が高くなっている。1つ隣の弦における同じ音の高さの発音ポジションは、図6のようにシフトする。一般的に、ギター入門者は低いポジションの音から覚えていくため、同じコストであれば低いポジションでの演奏が望まれる。つまり、弦の優先度は①弦側に向かって高くする。また、各弦を押弦する指については、通常、人差し指、中指、薬指、小指の順に使い易いといわれている。したがって、指の優先度はこの順に高くする。以上より、レベル1からレベル24までを①弦の1指、①弦の2指、...、⑥弦の4指の順に割り当て、レベルの低い演奏状態の優先度を高くする。

DPモデルの状態遷移図を図7に示す。音符と段階は1対1に対応しており、各段階には演奏状態に合わせ24のノードが並んでいる。各ノードには、そのノードに達するまでの最小コストが保存されている。ノード間に引かれている線は状態の遷移を表わしており、遷移コストにはロスタイムが対応している。ここで、1番目の音符であるレの音の発音ポジションは、想定するギターにおいて①弦と⑥弦には存在しない。このため、第1段階の①弦と⑥弦に対応するノードには、状態の遷移を表わす線が引かれていない。黒く塗りつぶされたノードは目的関数値を最小に導いたノードであり、図7の第  $n$  段階では同時に3つ存在している。この場合、優先度の高いレベル1のノードが採択される。

### 3 比較実験および考察

提案法によって得られた運指結果の有効性を検証するため、人の割り付けた運指との比較実験を行なった。実験の対象とする楽譜は、発音可能な43音のみで構成される奏法指

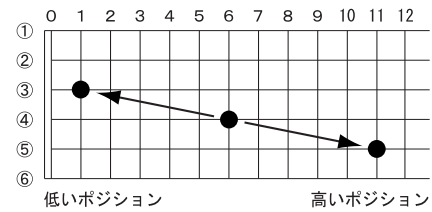


図6: 隣弦同音へのシフト

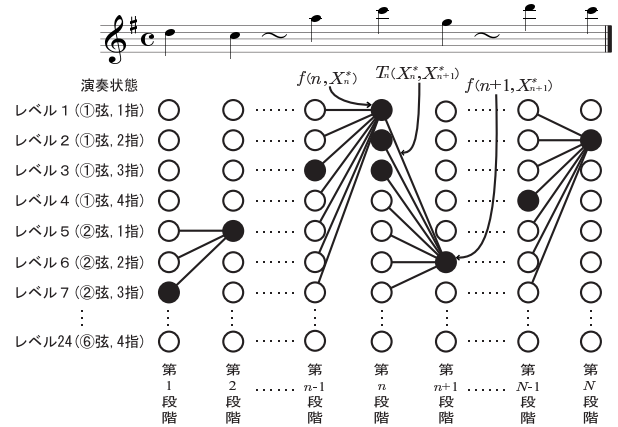


図7: 状態遷移図

表1: 数値結果

| タイトル   | 音符数 | 提案法 | 被験者 |
|--------|-----|-----|-----|
| チューリップ | 38  | 33  | 41  |
| かたつむり  | 39  | 27  | 47  |
| たきび    | 47  | 38  | 59  |
| ドレミの歌  | 56  | 55  | 75  |

示のない単純な単旋律メロディーである。条件に合う曲をピアノ曲集[5]より選曲し、メロディー部分のみ抜き出した楽譜を用意した。被験者としてギター中級者に協力してもらい、セーハ動作と開放弦の使用を禁止するという条件の下、楽譜への運指割り付け作業を行なってもらった。実験は、1オクターブ音域の4曲に対して行なった。各曲における両者の合計コストを表1に示す。全曲に対して提案法の方が低いコストを示していることから、被験者よりも負荷の少ない有効な運指結果を得ることができたといえる。

実験を行なった4曲の内、「たきび」における運指結果を詳細に考察する。運指を割り付けた提案法と被験者の楽譜をそれぞれ図8および図9に示す。ただし、丸で囲まれた数字と普通の数字は、それぞれ弦番号と指番号を表わす。被験者の運指動作については、フレット方向の移動が大きく(図10参照)、随所に強い負荷(図11参照)が見られた。これは、被験者が①弦から③弦の3本の弦しか使用しておらず、負荷のかかるフレット方向への移動を余儀なくしていたことが原因である。一方、提案法での運指動作ではフレット方向への移動が全くな(図12参照)、目立った負荷は第23段階の一箇所のみ(図13参照)であった。これは、提案法が全弦を効率良く使用し、負荷の生じるフレット方向への移動を避ける運指動作をとったためである。ただし、第23段階



図 8: 「たきび」における提案法の運指付き楽譜



図 9: 「たきび」における被験者の運指付き楽譜

の遷移は 7 小節目の 1 拍目裏拍から 2 拍目表拍にかけての遷移であり、異弦同フレットの連続押弦となっている。これには、どの指を使用しても必ず強い負荷がかかるため、第 23 段階の遷移にかかるコストはやむを得ないコストである。同フレット内の発音ポジションが連続しない曲においては、ほとんど負荷のない運指結果が得られると期待できる。

#### 4 おわりに

本研究では、単旋律におけるギター押弦運指の最適化を行った。各音符が時系列に並んでいることから、手法として DP を採用した。DP のマルコフ性の制約から非常にシンプルな運指モデルとしたが、負荷の少ない運指結果を得ることに成功した。提案法の運指結果の有効性については、ギター中級者による運指との比較を行なうことで検証した。提案法を利用することにより運指の割り付け作業は自動化でき、煩わしい読譜作業における負担の軽減が期待される。

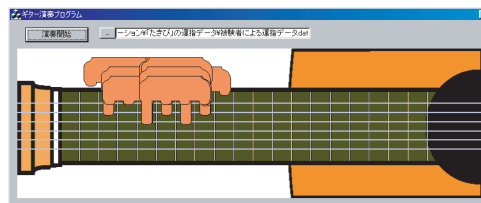


図 10: 「たきび」における被験者の運指動作

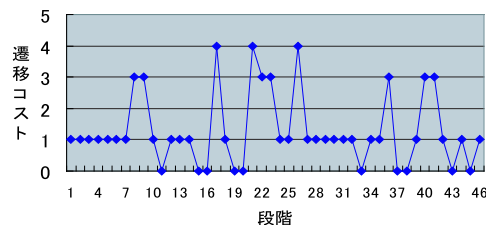


図 11: 「たきび」における被験者の遷移コスト

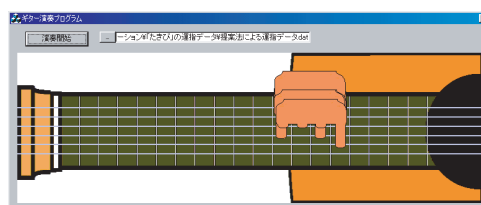


図 12: 「たきび」における提案法の運指動作

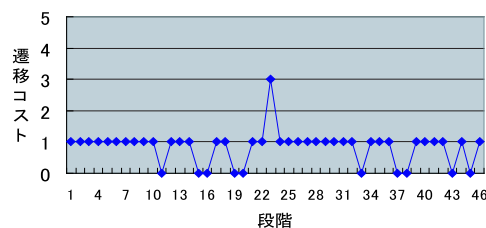


図 13: 「たきび」における提案法の遷移コスト

今後の課題としては、セーハ・開放弦の使用、スラー・スタッカート等の奏法の指示、休符を含んだ曲への対応、和音演奏への対応などが挙げられる。

#### 参考文献

- [1] 青木直史, 青木由直, 山本強, “ギター演奏の学習支援を目的としたタブ譜作成自動化に関する検討”, 信学技報教育工学研究会, Vol.ET2000-43, pp.43-48, 2000-7.
- [2] 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”, 日本音楽知覚認知学会平成 14 年度春季研究発表会, pp.127-132, 2002-5.
- [3] 中川信隆, “運指の 3 原則”, 現代ギター, Vol.288, pp.20-35, 1989-9.
- [4] アベル・カルレバー口, 高田元太郎 訳, 「ギター演奏法の原理」, 現代ギター社, 2001-5.
- [5] 悠木昭宏 編, 「楽しいバイエル併用 こどものポップス・ピアノ連弾 50 曲集」, ドレミ楽譜出版社, 1993-5.