単旋律におけるギター運指の最適化

正 員 伊藤 雅* 非会員 林田 巧**

Optimization for Guitar Fingering on Single Notes

Masaru Itoh*, Member, Takumi Hayashida**, Non-member

This paper presents an optimization method for guitar fingering. The fingering is to determine a unique combination of string, fret and finger corresponding to the note. The method aims to generate the best fingering pattern for guitar robots rather than beginners. Furthermore, it can be applied to any musical score on single notes. A fingering action can be decomposed into three motions, that is, a motion of press string, release string and move fretting hand. The cost for moving the hand is estimated on the basis of Manhattan distance which is the sum of distances along fret and string directions. The objective is to minimize the total fingering costs, subject to fret, string and finger constraints. As a sequence of notes on the score forms a line on time series, the optimization for guitar fingering can be resolved into a multistage decision problem. Dynamic programming is exceedingly effective to solve such a problem. A level concept is introduced into rendering states so as to make multiple DP solutions lead a unique one among the DP backward processes. For example, if two fingerings have the same value of cost at different states on a stage, then the low position would be taken precedence over the high position, and the index finger would be over the middle finger.

キーワード：ギター，運指，単旋律，マンハッタン距離，動的計画法，ロー・ハイポジション

Keywords: guitar, fingering, single notes, Manhattan distance, dynamic programming, low/high position

1. はじめに

弦楽器であるギターの各弦は音域が重なり合うように調律されているため、同じ音の高さが指板 (fretboard) 上の複数のポジションに存在する。このため、ギター演奏では鍵盤楽器以上に運指 (fingering) の決定が複雑となる。

童謡や民謡といった比較的単純な単旋律の楽曲でさえ、ギター運指を併記してある楽譜はそれほど多くない。ギター演奏の中・上級者ともなると、任意の楽譜に対して自分で運指を決定することもある。ギターロボットに楽曲を演奏させる場合には、その楽譜の運指を決定してはじめて演奏が可能となる。このような背景から本論文では、運指指定のない任意の単旋律楽譜に対して運指を一意に決定する方法について提案する。対象は初心者よりもむしろ中・上級者あるいはギターロボットである。

運指には押弦運指 (fretting fingering) と弾弦運指 (plucking fingering) がある。単旋律の運指に限れば、弾弦指の決定は特に必要ないので、運指という用語をここでは押弦運指の意味で限定的に用いる。結局、運指の決定とは、押弦する弦・フレット・押弦指を決定することである。

楽譜の音符は時系列に並ぶため、運指を決定する問題は音符を段階とする多段決定問題と捉えることができる。よって動的計画法 (Dynamic Programming: DP) ⁽¹⁾ が極めて有効である。以下、本問題をギター運指最適化問題と呼ぶ。

運指の決定には様々なアプローチがある。例えば、Sayegh ら ⁽²⁾⁽³⁾ は楽譜のフレーズから階層型ニューラルネットワークを構成し、教師信号をもたない Hebbian 学習と Dijkstra 法を発展させた Viterbi アルゴリズムを用いた運指決定法を提案している。手法は興味深い、すべての可能な音符列と運指の組合せに対し、結合係数を決定する必要がある。結果、数音からなるフレーズには適用できても楽曲への適用には不向きである。

青木ら ⁽⁴⁾ は指番号付き五線譜からタブ譜 (tablature) を自動生成するアルゴリズムを提案している。手法としてはバックトラック法を使用している。指番号の指定なしにタブ譜生成を実現しているのが三浦ら ⁽⁵⁾ の S2T (Score-to-Tablature) システムである。S2T は単旋律をフレーズ分解

* 愛知工業大学

〒 470-0392 豊田市八草町八千草 1247

Aichi Institute of Technology

1247 Yachikusa, Yakusa-cho, Toyota 470-0392

** 日本システム開発株式会社

〒 450-0002 名古屋市中村区名駅 3 丁目 9 番地 13 号

Nihon System Kaihatsu Inc.

9-13, 3-chome, Meieki, Nakamura-ku, Nagoya 450-0002

し、押弦手の移動を最小限にしつつ、押弦指のストレッチを最大限に利用した、ギター初心者向けの押弦運指決定システムである。フレット方向の手の移動のみに重点を置き、指の離弦や押弦動作あるいは弦方向の指の移動にはほとんど言及していない。

Traube と Smith⁽⁶⁾ は運指に関して全く別のアプローチを試みている。彼らの研究は音質や音色の違いを利用して、実際の録音データから振幅スペクトルに最も近い弦を推定し、その弦上にある押弦位置を決定する方法を提案している。当然であるが、押弦指の決定はしていない。

提案する運指モデルは、1) 運指動作を離弦・移動・押弦の3つの基本動作に分解し、2) 運指コストの概念にマンハッタン距離を導入することで、手の移動と指の移動を同時に考慮する、といった2つの特長を有する。この運指モデルに基づく提案法の実用的意義または有用性を以下の4つにまとめる。1) フレーズ分解なしに、任意の単旋律楽譜に対して運指が決定できる。2) 演奏状態にレベルの概念を導入することにより、DP 後退代入で必ず一意解が生成できる。3) 指板上での広域最適化が可能のため、ギター中・上級者に参考となる運指を提示できる。4) 離弦や押弦を含め、最小運指コストですべての音符を押弦できるので、ギターロボットに適した運指割り付けを得ることができる。

本来、音符とは音の高さと長さの両方を意味するが、本論文ではこれを音の高さの意味で用いる。運指の押弦位置は音の高さにのみ依存するからである。ギターあるいは音楽特有の用語に関しては文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾などを参照されたい。

2. 最適なギター運指とは

まず、最適な運指の基準について考察する。運指の決定基準には、1) ネックに近いローポジション側に誘導する初心者型運指、2) 綺麗な音を追求する音色重視型運指、3) 手と指の移動を極力押さえるロボット型運指、など様々な基準が考えられる。本論文では中川⁽⁹⁾の主張する音楽性を考慮しない「弾き易くするための運指」を中心に議論を展開する。これは音と音を滑らかに繋げる運指である。上述した基準に従えば、ロボット型運指である。ギター演奏において、音の途切れている時間（以下、ロスタイム）を極力少なくすることは重要である。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。滑らかな演奏と途切れる演奏を図1に例示する。ここで、手および指の移動は等速運動で、1単位距離の移動に1単位時間を要すると仮定すれば「ロスタイムを最小にする運指」は「移動距離を最小にする運指」と等価と見做すことができる。さらに、運指コストという概念を導入する。1運指コストとは、「1単位距離の手または指の移動、あるいはその動作に要する1単位時間のロスタイム」と定義する。

次に、マルコフ性と演奏条件について考察する。運指の決定にDPを適用する場合、マルコフ性を満たす必要がある。この観点から、手のポジションが過去の履歴に依存する休符やセーハ(ceja)の使用を除外し、開放弦(open string)

を運指の対象から外すことにする。開放弦は音色の関係上、使用を避けるという議論が文献⁽⁵⁾に紹介されている。セーハとは1本の指で2本以上の弦を同時に押弦するギター奏法である。単旋律の演奏ではセーハを使用せずとも特に不都合はない。

押弦指とギターの制約について記す。押弦可能な指は親指を除く4本の指に限定し、ギターはレギュラーチューニングに調律された6弦19フレットギターを想定する。通常のクラシックギターである。弦・フレット・指には図2のようにそれぞれ番号が付与されている。レギュラーチューニングされた各弦の調律は、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(E2~B5)が発音可能であるが、演奏条件から⑥弦開放音を除くと結局、43音が発音可能である。運指決定には楽譜の音符に対する音の高さだけが必要となる。シミュレータを開発する場合には、さらに音の長さも必要である。指板上のすべての音を図4に示す。この図のスタンダード・ピッチはA4=440Hzで、E2=1と設定した場合の半音区切りの音の高さを括弧書きで併記してある。音の高さは定式化の際に使用する指標となる。

図1 滑らかな演奏と途切れる演奏

Fig. 1. Legato and non-legato rendering.

図2 弦・フレット・指番号

Fig. 2. String, fret and finger No.

図3 各弦の調律

Fig. 3. Tuning of every string.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
①	E4 (25)	F4 (26)	F4# (27)	G4 (28)	G4# (29)	A4 (30)	A4# (31)	B4 (32)	C5 (33)	C5# (34)	D5 (35)	D5# (36)	E5 (37)	F5 (38)	F5# (39)	G5 (40)	G5# (41)	A5 (42)	A5# (43)	B5 (44)
②	B3 (20)	C4 (21)	C4# (22)	D4 (23)	D4# (24)	E4 (25)	F4 (26)	F4# (27)	G4 (28)	G4# (29)	A4 (30)	A4# (31)	B4 (32)	C5 (33)	C5# (34)	D5 (35)	D5# (36)	E5 (37)	F5 (38)	F5# (39)
③	G3 (16)	G3# (17)	A3 (18)	A3# (19)	B3 (20)	C4 (21)	C4# (22)	D4 (23)	D4# (24)	E4 (25)	F4 (26)	F4# (27)	G4 (28)	G4# (29)	A4 (30)	A4# (31)	B4 (32)	C5 (33)	C5# (34)	D5 (35)
④	D3 (11)	D3# (12)	E3 (13)	F3 (14)	F3# (15)	G3 (16)	G3# (17)	A3 (18)	A3# (19)	B3 (20)	C4 (21)	C4# (22)	D4 (23)	D4# (24)	E4 (25)	F4 (26)	F4# (27)	G4 (28)	G4# (29)	A4 (30)
⑤	A2 (6)	A2# (7)	B2 (8)	C3 (9)	C3# (10)	D3 (11)	D3# (12)	E3 (13)	F3 (14)	F3# (15)	G3 (16)	G3# (17)	A3 (18)	A3# (19)	B3 (20)	C4 (21)	C4# (22)	D4 (23)	D4# (24)	E4 (25)
⑥	E2 (1)	F2 (2)	F2# (3)	G2 (4)	G2# (5)	A2 (6)	A2# (7)	B2 (8)	C3 (9)	C3# (10)	D3 (11)	D3# (12)	E3 (13)	F3 (14)	F3# (15)	G3 (16)	G3# (17)	A3 (18)	A3# (19)	B3 (20)

standard pitch A4=440Hz (a semitone higher step by step based on E2=1)

図 4 指板上の音

Fig. 4. Tone letters on a fretboard.

3. 運指動作のモデル化

運指動作を押弦・離弦・移動の3つの基本動作だけでモデル化する。指板上のフレット間の距離は実際には等差関係でなく等比関係にある。しかし、ここでは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仮定する。指頭は黒点で表し、各交点上を動く。指板上での指の配置については、Carlevaro⁽¹⁰⁾の提唱する隣り合うフレットに各指が並ぶ縦型配置 (presentacion longitudinal) を想定する (図2参照)。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が必要となる。指のストレッチ動作は考慮しない。この前提はロボット型運指には妥当である。手はフレット方向のみ、指は弦方向のみ移動が可能である。

移動距離の尺度にはマンハッタン距離 (Manhattan distance) の概念を応用する。つまり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の和で評価する。ユークリッド距離を採用しない理由は、小数点演算による誤差の排除とロボット型運指を目指しているためである。

押弦および離弦は指板に対する指の垂直運動と見做し、これらの動作にも1単位の運指コストを割り当てる。押弦指以外はすべて離弦状態にある。離弦状態の指は発音中に次音符の弦上に配置できるので、運指コストは発生しない。この指の移動は弦間の移動であって、フレット間の移動ではないことに注意されたい。押弦状態の指は、必ず離弦しなければ移動できない。手のポジション移動は、4本の指すべてが離弦状態のときのみ可能である。押弦・離弦・移動の運指動作を図5と図6に示す。

運指コストを決定する基本動作を時間順に整理すると、1) 手と指の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、以上の3ステップとなる。「手と指の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にするためのステップである。「新たなポジション配置のための移動」は、次ステップで使用する指を押弦位置上に配置するステップである。「発音するための押弦および離弦」は、

図 5 押弦および離弦動作

Fig. 5. Motions of press string and release string.

図 6 移動動作

Fig. 6. Motion of move fretting hand.

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。押弦状態の指があり、かつ異指押弦をする場合は、押弦と離弦の両動作を同時に行う。両動作が同時なので、これに伴う運指コストは1単位である。また、同じ押弦位置を同指で押弦し続けて発音する場合には、何も行わない。つまり運指コストは発生しない。

楽譜の各音符を発音するのに要する運指コストの合計がその楽譜を演奏するのに必要な総運指コストである。この総運指コストを最小化する運指をDPで探索する。

4. ギター運指最適化問題の定式化

楽譜の第 n 音符の音の高さを a_n , $n = 1, 2, \dots, N$ で与える。 N は楽譜の音符数である。運指モデルより、 $a_n \in \{2, 3, 4, \dots, 44\}$ である。図4の音名で書けば、 $a_n \in \{F2, F2#, G2, \dots, B5\}$ となる。開放弦は押弦の対象外なので、最低音のE2(1)は除外している。

決定変数は x_n, y_n の2つあり、これを $X_n \equiv (x_n, y_n)$ と書く。 $x_n \in \{\textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{4}, \textcircled{5}, \textcircled{6}\}$ は第 n 音符を発音す

るのに使用する弦番号であり, $y_n \in \{1, 2, 3, 4\}$ は押弦する指番号である。したがって, X_n は第 n 音符の演奏状態と捉えることができる。

レギュラーチューニングにおける①～⑥弦の開放音の高さを $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ なる定数で表現するならば, 図 4 の指標より,

$$[b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6] = [25 \ 20 \ 16 \ 11 \ 6 \ 1] \cdots \cdots (1)$$

を得る。⑥弦の開放音の高さが 1 であり, 徐々に音が高くなり, ①弦の開放音の高さが 25 となる。以上の準備のもと, ギター運指最適化問題を以下のように定式化する。

$$\text{Minimize } z = \sum_{n=1}^{N-1} C_n(X_n, X_{n+1}) \cdots \cdots (2)$$

subject to

$$X_n \equiv (x_n, y_n), \quad n = 1, 2, \dots, N \cdots \cdots (3)$$

$$b_{x_n} < a_n \leq b_{x_n} + 19 \cdots \cdots (4)$$

$$x_n \in \{\textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{4}, \textcircled{5}, \textcircled{6}\} \cdots \cdots (5)$$

$$y_n \in \{1, 2, 3, 4\} \cdots \cdots (6)$$

ここで, 目的関数 (2) を構成する $C_n(X_n, X_{n+1})$ が運指コストである。第 n 音符 a_n を演奏状態 X_n で発音してから, 第 $n+1$ 音符 a_{n+1} を状態 X_{n+1} で発音するまでの推移コストである。目的は楽譜を構成する N 個の音符に対する運指コストの総和を最小化することである。制約には, フレット制約 (4), 弦制約 (5), 指制約 (6) の 3 つがある。

フレット制約を満たす弦番号 x_n が決まれば, 音符 a_n を発音可能な押弦フレット番号 $F_n(x_n)$ は式 (7) により一意に決定することができる。これは, 図 4 から分かるように, ギターではフレット番号が 1 増加する毎に, 各弦の音が半音ずつ高くなるように調律されているからである。

$$F_n(x_n) = a_n - b_{x_n} \cdots \cdots (7)$$

もうひとつ, X_n によって自動的に決定されるものがある。手のポジション位置である。これは人差し指のフレット位置で表せる。これを記号 $P_n(X_n)$ で表記すれば, 従属変数 $P_n(X_n)$ の値は式 (8) で得られる。 $F_n(x_n)$ が押弦フレット番号, y_n が指番号, かつ 4 本の指が連続するフレットに配置される縦型配置を仮定しているからである。

$$P_n(X_n) = F_n(x_n) - y_n + 1 \cdots \cdots (8)$$

運指コスト $C_n(X_n, X_{n+1})$ の設定について説明する。3 節の議論より, 運指コストは 1) 離弦コスト, 2) 移動コスト, 3) 押弦コストの和で計算できる。第 n 音符から第 $n+1$ 音符への推移に伴うそれぞれのコストを $C_n^1(X_n, X_{n+1})$, $C_n^2(X_n, X_{n+1})$, $C_n^3(X_n, X_{n+1})$ と書けば,

$$C_n(X_n, X_{n+1}) = C_n^1(X_n, X_{n+1}) + C_n^2(X_n, X_{n+1}) + C_n^3(X_n, X_{n+1}) \cdots \cdots (9)$$

となる。各コストを決定変数 $X_n = (x_n, y_n)$ および従属変数 $P_n(X_n)$, $F_n(x_n)$ で定義してみる。

まず, 離弦コスト $C_n^1(X_n, X_{n+1})$ について考察する。離弦動作が必要になるのは, 手または指のポジション移動が発生する直前だけである。離弦は指による垂直上方向への 1 単位距離の動作であるから, 離弦コストは次式で得られる。

$$C_n^1(X_n, X_{n+1}) = \begin{cases} 0 & \text{if } C_n^2(X_n, X_{n+1}) = 0 \\ 1 & \text{if otherwise} \end{cases} \cdots \cdots (10)$$

ポジション配置のための移動コスト $C_n^2(X_n, X_{n+1})$ は, 手のフレット方向への移動距離と指の弦方向への移動距離の和をマンハッタン距離で評価する。記号 $|\cdot|$ は絶対値である。式 (11) の関数 u はユニット関数であり, 異指押弦の場合は 0, 同指押弦の場合は 1 となる。

$$C_n^2(X_n, X_{n+1}) \equiv |P_n(X_n) - P_{n+1}(X_{n+1})| + |x_n - x_{n+1}| \cdot u(y_n, y_{n+1}) \cdots \cdots (11)$$

$$u(y_n, y_{n+1}) = \begin{cases} 0 & \text{if } y_n \neq y_{n+1} \\ 1 & \text{if } y_n = y_{n+1} \end{cases} \cdots \cdots (12)$$

最後の押弦コスト $C_n^3(X_n, X_{n+1})$ は同弦・同指・同フレットを押弦し続けるとき以外は, 指の垂直下方向への 1 単位距離の動作が必要なので,

$$C_n^3(X_n, X_{n+1}) \equiv \begin{cases} 0 & \text{if } |F_n(x_n) - F_{n+1}(x_{n+1})| + \|X_n - X_{n+1}\| = 0 \\ 1 & \text{if otherwise} \end{cases} \cdots \cdots (13)$$

と定式化できる。記号 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムである。ここで, ポジション移動を伴わない異指押弦は押弦と離弦の両動作を同時に行える。同時動作のコストは押弦コストに吸収され, 2 ではなく 1 になることに注意されたい。

以上, 式 (7)～(13) により, 運指コスト $C_n(X_n, X_{n+1})$ が決定変数 X_n と X_{n+1} だけで定義できることがわかる。

5. 動的計画法による解法

ギター運指最適化問題の制約式 (3)～(6) に着目する。第 n 段階の x_n と y_n の組合せ数は最大で 24 通り。この組合せの中に音符 a_n を発音可能なフレットが必ず存在する。よって, 演奏状態 $X_n = (x_n, y_n)$ の満たすべき制約を

$$X_n \in X \equiv \{(\textcircled{1}, 1), \dots, (\textcircled{6}, 4)\}, |X| = 24 \cdots \cdots (14)$$

と考え, すべての組合せを考慮しながら第 1 音符から第 N 音符まで順に決定できれば, 目的関数 z を最小にする運指が決定できる。第 n 段階の状態 X_n に至るまでの最小コストを $f(n, X_n)$ と書けば, $n = 1, 2, \dots, N-1$ に対する, ギ

ター運指最適化問題の目的関数 z は次の DP 漸化式で記述し直すことができる。

$$z = f(N, X_N)$$

$$f(n+1, X_{n+1}) = \min_{X_n} \{f(n, X_n) + C_n(X_n, X_{n+1})\}$$

$$\dots\dots\dots (15)$$

ただし、初期条件は $f(1, X_1) = 0$ である。つまり、第 1 音符はどの指でも演奏可能であり、演奏前の運指コストは零であると仮定している。

漸化式 (15) を各段階の各演奏状態に適用することにより DP の前進代入が可能となる。遷移のない演奏状態への運指コストは ∞ を割り当てる。各段階の運指コストはすべて正整数で表現しているため、最適解は複数存在する。最適解を一意に誘導するため、各状態に対しレベル付けを行う。レベルの概念を導入することによって、DP の後退代入で遷移を一意に決定できるようになる。

ギターは、⑥弦側から①弦側に向かう程、音域が高くなる。隣り合う弦で同じ音の高さの発音ポジションを得るには、図 7 のように弦番号とフレット番号をシフトするしかない。一般に、ギター初心者ローポジションの音から徐々に覚えていくため、同じコストであるならばローポジション側での演奏が望まれる。よって、弦の優先度は①弦側に向かって高く設定しておく。弦を押弦する指については、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設定する。以上により、レベル 1 からレベル 24 までを①弦 1 指、①弦 2 指、...、⑥弦 3 指、⑥弦 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。

これを演奏状態 X_n に当てはめれば、DP の状態遷移図 (図 8) が示すように、level 1=(①,1), ..., level 4=(①,4), level 5=(②,1), ..., level 8=(②,4), ..., level 23=(⑥,3), level 24=(⑥,4) となり、優先順位は level 24 < level 23 < ... < level 1 と設定する。つまり、level 1 が最も採択し易いようにする。音符と DP の段階は 1 対 1 に対応しており、各段階には演奏状態に合せ、計 24 のノードが縦に並ぶことになる。各ノードには、そのノードに到達するまでの最小コストが保持されることになる。ノード間に引かれている線は状態遷移を表わしており、遷移コストには運指コストが対応する。

図 8 の黒点ノードは目的関数を最小に導いたノード群であり、第 n 段階では同時に 3 つが存在する。この場合、優先度の最も高い level 1 のノードが DP 後退代入では採択されることになる。式 (15) の DP 漸化式の特長は、弦・フレット・指の探索空間を弦・指の探索空間に縮約していることである。これにより演奏状態の組合せ数を制限している。

提案法の計算量について述べる。図 8 の演奏状態の数、つまりレベル数は式 (14) より $|X| = 24$ 。楽譜の音符数は N だから DP 前進代入の計算量は初期化処理を含めても $O(|X|N + |X| + |X|^2N)$ 。一方の後退代入は最終段階で最

図 7 隣弦同音へのシフト

Fig. 7. Shift to the same tones nearby a position.

図 8 状態遷移図

Fig. 8. State transition diagram.

小値を求め、第 1 段階まで遡るだけなので $O(|X| + N)$ である。よって、 $|X| \ll N$ を仮定すれば、提案法の計算量は $O(|X|N + |X| + |X|^2N) + O(|X| + N) = O(N)$ である。

6. 実験結果

提案法の性能評価のため、人の割り付けた運指と比較した。実験に用いた楽譜はギター教本⁽⁷⁾に掲載されている 4 曲の単旋律メロディーである。被験者としてギター中・上級者 3 名 (被験者 A, B, C と記す) の協力を得た。セーハと開放弦の使用を禁止して運指割り付け作業を行った。

楽譜からみた 4 つの楽曲の特徴を表 1 にまとめる。楽譜の長さは小節数ではなく音符数で評価している。1 曲目 “When the Saints Go Marching In” 「聖者の行進」はアメリカ民謡で、9 小節 38 音符からなるが、5 つの異なる音しか使用していない。19 世紀 G.R.Poulton 作曲 “Aura Lea” は日本語タイトル「オー・リー」で知られ、16 小節 7 音 48 音符で構成される。3 曲目 “Ode to Joy” はベートーベン作曲の交響曲第 9 番「歓喜の歌」である。16 小節 6 音 62 音符からなる。最後の “Greensleeves” は 16 世紀イングランド民謡「グリーンスリーブス」のことである。楽譜は 1 オクターブ音域を超える 12 の異なる音で書かれ、33 小節 73 音符から構成されている。

提案法と被験者 A, B, C の総運指コストを表 2 に示す。すべての楽曲で提案法が最小コストを算出している。第 12 フレット以降におけるボディの制約はあるが、音楽性を

表 1 4つの楽譜の仕様

Table 1. Specifications of four musical scores.

No.	Title of musical score	Notes	Different tones
1	When the Saints Go Marching In	38	5
2	Aura Lea	48	7
3	Ode to Joy	62	6
4	Greensleeves	73	12

表 2 総運指コスト

Table 2. Total fingering costs.

Score No.	Proposed DP	Testee-A	Testee-B	Testee-C
1	28	28	28	28
2	56	56	63	56
3	47	55	68	67
4	74	100	90	90

考慮しないロボット型運指の生成という意味では、初期の目的を達成したと判断できる。

楽譜 No.1 と No.2 で提案法と被験者の両者が同じ運指となるケースがあった。特に No.1「聖者の行進」では提案法とすべての被験者 A, B, C で運指結果が等しくなった。理由は楽譜 No.1 が 5 音 (G4, A4, B4, C5, D5) しか使用していないことに起因する。手のポジション移動なしに全音符を連続異指押弦のみで演奏できる領域は図 4 の指板上に 2 箇所存在する。指板を (x, y) 座標で書けば, (1,7)-(2,10) と (3,16)-(4,19) の矩形領域である。DP の後退代入ではレベルの低い演奏状態に誘導されるので前者の領域が選択されることになる。被験者も同様に判断したものと推測される。No.2「オーラ・リー」を構成する 7 音 (G2, A2, B2, C3, D3, E3, F3) の押弦位置は提案法と全被験者で全く同じであった。矩形領域で示せば, (4,2)-(6,5) である。提案法と被験者 A, C は第 1 小節と第 5 小節の第 1 拍目 (G2) と第 2 拍目 (C3) をそれぞれ人差し指と中指の順で演奏した。一方、被験者 B はこの部分の中指 → 薬指の順に演奏した。これが全体で 7 単位分の運指コストの差を生じさせる理由であった。

No.3「歓喜の歌」は提案法、被験者ともに 6 音 (G3, C4, D4, E4, F4, G4) に 6 箇所の押弦位置を使用した。提案法は (3,9)-(5,12) のハイポジション側を使用し、結果 47 単位コストで演奏を終了している。一方、被験者 A, B, C は (2,5)-(4,8) のローポジション側を使用し、最高でも 55 単位までしか総運指コストを減少できていない。被験者間の運指コストは No.2「オーラ・リー」同様、完全に指番号の違いに依存していた。ハイポジション側とローポジション側の顕著な相違が現れたのが No.4「グリーンスリーブス」である。これについて被験者 A を対象に、詳細な検討と考察を与える。

運指を割り付けた提案法と被験者 A の楽譜を図 9 と図 10 に示す。丸付き数字と普通の数字は、それぞれ弦番号と指番号である。五線第 2 間の位置が A4=440Hz (図 4 参照)

図 9 提案法の運指付き楽譜

Fig. 9. Score with fingering by the proposed DP.

図 10 被験者 A の運指付き楽譜

Fig. 10. Score with fingering by the testee-A.

図 11 提案法の押弦位置

Fig. 11. Fretting positions of the proposed DP.

図 12 提案法の運指コスト

Fig. 12. Fingering costs for the proposed DP.

の音名「ラ」である。

提案法の押弦位置を矩形領域で示せば、(③,16)-(⑥,19)となる(図 11 参照)。図 11 と図 12 を見ると、演奏開始時はコスト零であるが、その後計 7 回も運指コストが零になっている。これは連続押弦のためである。つまり同音の連続出現を意味している。

DP 解で手のポジション移動は 2 回発生している。第 56 段階 (B3→D5) でブリッジ側に 1 フレット移動、第 59 段階 (C5#→B4) でナット側に 1 フレット移動の計 2 回である。1 回の移動につき運指コストは離弦 → 移動 → 押弦で計 3 コストを要する。これが、図 12 の第 56 段階と 59 段階で運指コストが 3 に跳ね上がっている理由である。

第 19 段階 (B3→E4) と第 39 段階 (E4→D5) で運指コストがそれぞれ 3 と 4 に上昇する理由は上記考察とは別の要因による。これは同一フレット上の異なる弦を同じ指で押弦する際に発生する指の離弦 → 移動 → 押弦の動作のためである。B3→E4 間のマンハッタン距離は 1, E4→D5 間のそれは 2 であるから、それらに離弦コスト (1) と押弦コスト (1) を加算すれば、それぞれ 3 と 4 の運指コストとなる。これら以外は各段階ともすべて連続異指押弦で演奏されているため運指コストは 1 となっている。結果、総運指コストが 74 となり非常に効率的な運指を実現している。

一方の被験者 A の押弦位置と運指コストを図 13 と図 14 に示す。被験者 A は 15 箇所運指コストが 3 以上に上昇している。これは図 13 の押弦位置から説明できる。被験者 A は 12 音をローポジション側 7 フレット間にわたる 3 本

図 13 被験者 A の押弦位置

Fig. 13. Fretting positions of the testee-A.

図 14 被験者 A の運指コスト

Fig. 14. Fingering costs for the testee-A.

図 15 被験者 B, C の押弦位置

Fig. 15. Fretting positions of the testee-B, C.

Limited string No.①~③ and fret No.1~12.

図 16 限定版 DP の押弦位置

Fig. 16. Fretting positions of the limited DP.

の弦で演奏をしている。提案法は同 12 音をハイポジション側 4 フレット間にわたる弦 4 本で演奏を完結させている。ローポジション側で演奏するには手のフレット方向の移動が余儀なくされる。被験者 A が図 13 の押弦位置を用い、図 10 の運指を採択した根拠は以下の 4 つの理由に集約できる。1) 手の位置を基本的にローポジション側第 5 フレット目に置いて演奏する。2) ①~③弦を好んで使用する。3) 同フレット内の異弦同指での押弦を嫌う。4) 大きな手のポジション移動を伴う押弦では人差し指を使用する傾向がある。

この4点で被験者Aの運指コストの上昇を説明できる。被験者Aの総運指コストは100であった。

楽曲「グリーンスリーブス」には特徴がある。曲の前半と後半で曲調が変化しているのである。前半部は第1~17小節であり、後半部は第18~33小節である。被験者BとCは曲の前半をローポジション側で、後半をハイポジション側で演奏している。指板上の押弦位置は被験者BとCは全く同じで、図15の計15箇所を使用している。1つの音を複数のポジションで柔軟に対応しているため、総運指コストを90まで減少させることに成功している。

興味深い実験をした。提案法で使用弦を①~③弦の3本に限定し、かつ使用フレットを第1~12フレットに限定してDPで最適解を求解した。つまりローポジション側に押弦位置を誘導したわけである。押弦位置は被験者BやCとほとんど同じになった。この限定版DPの押弦位置を図16に示す。異なるのはB3の音だけである。④弦を除外したから当然の結果である。総運指コストは86となり、被験者B、Cに対する提案法の顕著な優位性は消失している。

本運指モデルでは第1フレットも第19フレットもすべて同じ重みである。①弦~⑥弦、第1指~第4指についても同様である。このモデルだからこそ、ローポジションだけでなく極端なハイポジションも視野に入れた、広域的最適運指探索が可能となっているのである。それがこの実験により確認できた。

7. おわりに

単旋律におけるギター運指の最適化を提案した。音符が時系列に並ぶことから、手法として動的計画法を適用した。運指コストという概念を導入し、マンハッタン距離を手および指の移動尺度とした。DPのマルコフ性の制約から単純な運指モデルを採用せざるを得なかったが、ロスタイムまたは移動距離を最小にする運指結果を得ることができた。ギターの特長を活かしたレベル付けによって、DPの後退代入で遷移をローポジション側に誘導することにも成功した。

提案法の性能は、複数の楽曲に対しギター中・上級者の運指と比較することで検証した。概ね良好な結果が得られた。少ない異音符で構成される短い楽譜ならば、提案法の利用だけで運指割り付けができることを実験により確かめた。また、単純な運指動作でモデル化したため、ギターロボットへの応用も可能である。

今後の課題としては、音色の問題はあるにせよ、開放弦への対応が急務である。ローポジション側での演奏のし易さを運指基準に取り入れる検討も必要である。休符やセーハへの対応もさらなる課題として挙げられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、愛知県立芸術大学音楽学部音楽科の福本泰之先生には弦楽器関連資料のご提供を頂いた。また、岡山大学教育学部音楽教育講座の長岡功先生には音楽用語に関する的確なご教示を頂いた。両先生に対し、

ここに謝意を表する次第である。

(平成15年10月23日受付,平成16年3月30日再受付)

文 献

- (1) P. Brucker: Scheduling Algorithms 3rd Edition, Springer Verlag (2001-8)
- (2) S.I. Sayegh and M.F. Tenorio: "Inverse Viterbi Algorithm as Learning Procedure and Application to Optimization in the String Instrument Fingering Problem", *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Vol.2, pp.491-497 (1988-7)
- (3) S.I. Sayegh: "Fingering for String Instruments with the Optimum Path Paradigm", *Computer Music Journal*, Vol.13, No.3, pp.76-84 (Fall 1989)
- (4) N. Aoki, Y. Aoki, and T. Yamamoto: "A Study of Automated Tablature Generation for Assisting Learning Playing the Guitar", *Technical Report of IEICE*, Vol.ET2000-43, pp.43-48 (2000-7) (in Japanese)
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資, Vol.ET2000-43, pp.43-48 (2000-7)
- (5) M. Miura, I. Hirota, N. Hama, and M. Yanagida: "Constructing a System for Finger-Position Determination and Tablature Generation for Playing Melodies on Guitars", *IEICE Trans. on Info. Syst.*, PT.2, Vol.J86-D-II, No.6, pp.755-763 (2003-6) (in Japanese)
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」, 信学論 D-II, J86-D-II, 6, pp.755-763 (2003-6)
- (6) C. Traube and J.O. Smith III: "Extracting the Fingering and the Plucking Points on a Guitar String from a Recording", *Proc. 2001 IEEE Workshop on the Appl. of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp.7-10 (2001-10)
- (7) M.J. Disler: *Guitar QuickStart - A Guide to Playing and Understanding Music Reading and Chord Techniques*, Lyra House Music Publications (1994-12)
- (8) 鈴木静哉・竹内ふみ子: 明解・音楽用語辞典, ドレミ楽譜出版社 (1993-2)
- (9) 中川信隆:「運指の3原則」, 現代ギター, Vol.288, No.9, pp.20-23 (1989-9)
- (10) A. Carlevaro: *School of Guitar - Exposition of Instrument Theory*, Boosey & Hawkes (1984-6)
高田元太郎 訳: ギター演奏法の原理 - 新時代のための合理的なアプローチ -, 現代ギター社 (2001-5)

伊 藤 雅 (正員) 1962年1月12日生。1989年広島大学大学院工学研究科博士課程後期システム工学専攻修了。工学博士。同年広島県立大学経営学部講師。1993年愛知工業大学工学部講師。1998年同助教授, 2000年改組により同経営情報科学部助教授, 現在に至る。主として数理計画, 特に離散型最適化問題に関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本経営工学会, IEEE 各会員。

林 田 巧 (非会員) 1981年1月16日生。2003年愛知工業大学工学部経営工学科卒業。同年4月日本システム開発株式会社入社。現在, システム部にてJava言語によるWeb開発に従事。2001年から2002年まで名古屋新堀ギター音楽院および名古屋市民ギターオーケストラに在籍。