

練習意欲維持のためのスケール練習用楽譜生成システム

大川 真由子^{1,a)} 北原 鉄朗^{1,b)}

概要：本稿では、楽器の練習意欲維持を目的として、入力された任意のポピュラー楽曲の MIDI ファイルからコードを推定し、その楽曲に合うスケール楽譜を作成するシステムを提案する。スケール練習は楽器の基礎練習として重要であるにも関わらず、その単調さにより必ずしも練習意欲を維持しながら行うのは簡単ではない。本システムを使用することで、ユーザは自分の好きな楽曲の伴奏合わせてスケール練習をすることができる。本システムを1名のピアノ経験者に使ってもらったところ、生成されたスケール楽譜は、過度に演奏が難しいことはなく、スケール練習として有用である可能性が示唆された。

1. はじめに

楽器の演奏技術を向上させるにあたって欠かせないのが、基礎練習と呼ばれる練習である。人や楽器、練習メニューによって基礎練習の目的は異なるが、音色を作ったり、指をスムーズに動かしたり、鍵盤感覚を把握したりするためなど、基礎練習を行うことで基本的な技術の習得、向上が可能になる。基礎練習には様々なメニューがあり、例としてスケールやリズム練習、ハノンが挙げられる。しかし、基礎練習の楽譜は譜面が単調であり、バリエーションが少ない傾向にあるため、長い時間継続的に練習をすることが困難である。

練習意欲維持を目的とした研究や、新たに練習用楽譜を生成する研究は数多く行われている。例えば加藤らは、楽曲のピアノロール画像と練習パターンのピアノロール画像を学習してモデルを作ることで、ユーザが入力する MIDI データを練習パターンの楽譜画像へ変換することを実現した [1]。村井らは、練習意欲維持を目的として、選択した練習曲と MIDI データで入力した伴奏曲を作成した規則に従って編曲することで、好きな曲と合わせて練習することができるシステムを開発した [2]。大島らは、ピアノ初心者の子供の練習意欲維持のために、親とピアノデュオを簡単に行うことのできるシステムを開発した [3]。LN Casey らは、経済的理由で個別指導が受けられない音楽初心者から中級者に向けて、レベルに応じた練習曲を生成するシステムを考案した [4]。米田らは、練習者の技術習得に応じて演奏補助を減算可能とすることで、練習者のモチベーションを維持しながら無理なく演奏技術を身に付けていくことができる

ギター演奏練習システムを作成した [5]。Hadjeres らは、ヨハン・セバスティアン・バッハの楽曲を入力し、その和声部分を生成するモデルを作成した [6]。Rao らは、隠れマルコフモデルを用い、楽譜の追跡と演奏者のパフォーマンスに合わせて自動的に伴奏を生成するシステムを作成した [7]。

練習意欲維持のためには、自分の好きな楽曲で練習することが有用であると考えられる。それに向けて我々は、コード進行とキーを与えると、そのコードとキーに合うスケール楽譜を生成するシステムを作成した [11]。しかし、そのシステムではコードとキーを手動で与えなければいけないという問題点があった。

本稿では、任意のポピュラー楽曲の MIDI ファイルを入力できるように本システムを拡張する。ポピュラー楽曲の MIDI ファイルが与えられたら、コード進行を推定する。その後、そのコード進行に沿ったスケール楽譜を生成する。

2. システム概要

本システムは、ユーザが指定した MIDI ファイルに基づいてスケール練習用の旋律を生成し、その楽譜を画面表示する Web アプリである (図 1)。

まず、ユーザは好きなポピュラー楽曲の MIDI ファイルをアップロードする。MIDI ファイルは、4 分の 4 拍子であることを前提としている。楽曲の一部のみを使用したい場合も考えられることから、この MIDI ファイルを試聴し、スケール練習に使う区間の始点と終点を指定できるようになっている。ただし、指定された始点と終点は、小節線上の時刻に自動的にクオンタイズされる。

次に、MIDI データからクロマベクトルの系列を求め、コード進行を推定する。なお、キー (調) は MIDI データに書き込まれているものとする。その後、ユーザが選択し

¹ 日本大学 文理学部 情報科学科

^{a)} okawa@kthrlab.jp

^{b)} kitahara@kthrlab.jp

た進行パターン（順次進行のみのパターンまたは3度跳躍を含むパターン）に基づいてスケール練習用の旋律を生成する。生成された旋律は、ブラウザ内に五線譜として表示される。五線譜の近くに伴奏 MIDI ファイルの再生ボタンが表示されるので、ユーザがこの五線譜を見ながら伴奏に合わせて、スケールの練習を行うことができる。再生の際には、テンポを自由に設定することができる。

スケールスタジオ



図 1 ページ画面

3. システム詳細

本システムの根幹となる処理は、MIDI データからのコード推定およびコード進行からのスケール練習用旋律の生成である。以下、この2つの処理の詳細を述べる。

3.1 コード推定方法

音響信号からコード進行を求める手法は数多く提案されている [8], [9], [10] もの、MIDI データを対象とするものは極めて少ない。音響信号からのコード進行では、特徴量としてクロマベクトルが多用されるため、本手法では、MIDI データから直接クロマベクトルを求めて、次のようにしてコード推定を行う。なお、推定対象のコードは、12 個のメジャーコード、12 個のマイナーコードの計 24 個である。また、キーの情報は、MIDI データに書き込まれていることを前提とする。

- (1) 2 拍ごとにクロマベクトルを取得する。以下、2 拍ごとに処理を行う。
- (2) クロマベクトルの値が大きい順に音名を取得する。
- (3) コードを次の方法で決定する。

- 上位 3 つを構成音とするコードが存在するとき、そのコードを推定結果とする。
- 上位 3 つを構成音とするコードが存在しないが、上位 4 つのうち 3 つを構成音とするコードが存在するとき、それが 1 つのときは、そのコードを推定結果とする。複数ある場合、各コードの構成音を表すバイナリーベクトル^{*1}とクロマベクトルとの内積を求め、これが最大になるコードを推定結果とする。ただし、キーと一致するコードがあるときは、それを推定結果とする。
- 上の 2 つに当てはまらないとき、上位 3 つのうち 2 つを構成音とするコードを探索し、キーと一致するコードがあれば、それを推定結果とする。一致するコードがない場合は、各コードの構成音を表すバイナリーベクトルを作成し、それとクロマベクトルの内積が最大のコードを推定結果とする。

3.2 旋律生成方法

確率モデルを利用して、楽曲のキーと推定したコードに合うスケールの音符列を生成する。音符列には具体的に次の制約がある。

- 生成される音符列は、奇数小節目は上昇、偶数小節目は下降するスケールとする。
- 音符の長さはすべて 8 分音符とし、休符はないものとする（つまり、常に 8 つの音符で 1 小節である）。
- スケールはメジャースケール、ナチュラルマイナースケール、ハーモニックマイナースケールの 3 種類を対象とする。

キーの情報を MIDI データから取得しているので、スケール練習の楽譜を生成する最も簡単な方法は、取得したキーのダイアトニックスケールをそのまま当てはめることである。しかし、ノンダイアトニックコードがあったときにそのままダイアトニックスケールを当てはめると、不協和音の原因となる。そこで、コードに合わせてスケールを変えつつ、確率モデルを用いて音符間の遷移を制限することで、コード進行にあったスケール練習用の楽譜を作成する。

3.3 小節ごとの最初の音高の決定

各小節の最初の音高は、当該小節のコードの構成音の中から、1 つ前の音符との音高差がなるべく少なくなるように選ぶ。

^{*1} 構成音の音名を 1、非構成音の音名を 0 とした 12 次元ベクトル。

3.4 スケールの決定

2 拍ごとに、次の方法でスケールを決定する。

- 当該 2 拍のコードの構成音がすべて、楽曲のキーのダイアトニックスケールに含まれる場合、そのキーのダイアトニックスケールを採用する（キーがマイナーの場合はナチュラルマイナー、ハーモニックマイナーの順で照合する）。
- 当該 2 拍のコードの構成音のいずれかが、キーのダイアトニックスケールに含まれない場合
 - (1) 当該 2 拍の構成音のすべてを含むダイアトニックスケールを 12 種のキーから探索し、列挙する。この際、平行調の関係にある調はスケールの構成音が一致するため、12 種のキーのみ探索対象とするので構わない。
 - (2) (1) にて列挙したスケールから、キーのダイアトニックスケールと最も共通音が多いものを探す。
 - (3) (2) にて得られたスケールを採用する。

3.5 遷移確率の定義

求める音符列 $q_1, q_2, \dots, q_N$ に対し、二重マルコフモデルを考える。つまり、遷移確率として $P(q_{n+1}|q_n, q_{n-1})$ を定義する。遷移確率は、進行パターン（後述）の制約から定まる確率とスケールから定まる確率の積として定義する。前者を $P_1(q_{n+1}|q_n, q_{n-1})$ 、後者を $P_2(q_{n+1})$ とすれば、遷移確率は、次式により定義される。

$$P(q_{n+1}|q_n, q_{n-1}) = \alpha P_1(q_{n+1}|q_n, q_{n-1}) P_2(q_{n+1})$$

ここで、 α は確率の総和を 1 にするための正規化係数である。

3.5.1 進行パターンから定まる遷移確率

進行パターンとは、「ドレミファ…」 「ドミレファ…」 のように音の進行に対する制約のパターンである。現在の実装では、次の 2 つのパターンを定義している。

3.5.1.1 進行パターン 1（順次進行のみのパターン）

「ドレミファ…」 のように、スケールの構成音をそのまま上昇または下降する進行パターンである。原則として、1 つ前の音に対して短 2 度または長 2 度の関係にある音高への遷移確率を高く設定し、それ以外は十分に低く設定する。ただし、選ばれたスケールがハーモニックマイナーのときは、短 3 度も許容する。具体的な遷移確率の定義式を以下に示す。

$$P_1(q_{n+1}|q_n, q_{n-1}) = \begin{cases} 0.9 & (\text{条件 1 または 2 を満たす場合}) \\ 0.3 & (\text{選ばれたスケールがハーモニックマイナーかつ条件 3~6 のどれかを満たす場合}) \\ 0.1 & (\text{条件 7 または 8 を満たす場合}) \\ 0.0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

上における条件 1~8 は次の表のとおりである。

条件	$q_n - q_{n-1}$	$q_{n+1} - q_n$
1	1 または 2	1 または 2
2	-1 または -2	-1 または -2
3	1 または 2	3
4	-1 または -2	-3
5	3	1 または 2
6	-3	-1 または -2
7	1 または 2	-1 または -2
8	-1 または -2	1 または 2

3.5.1.2 進行パターン 2（3 度跳躍を含むパターン）

「ドミレファ…」 のように、3 度跳躍の後に反行する順次進行が続くパターンである。 q_{n-1} から q_n が 3 度上昇の場合には、 q_n から q_{n+1} は 2 度下降のみを許容することになるため、条件分岐が複雑になる。具体的な式を以下に示す。

$$P_1(q_{n+1}|q_n, q_{n-1}) = \begin{cases} 0.95 & (\text{条件 1~4 のどれかを満たす場合}) \\ 0.85 & (\text{条件 5~8 のどれかを満たす場合}) \\ 0.15 & (\text{条件 9 または 10 を満たす場合}) \\ 0.1 & (\text{条件 11 または 12 を満たす場合}) \\ 0.0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

条件 1~12 は、以下の通りである。

条件	$q_n - q_{n-1}$	$q_{n+1} - q_n$
1	3 または 4	-1
2	-1 または -2	3
3	-3 または -4	1
4	1 または 2	-3
5	3 または 4	-2
6	-1 または -2	4
7	-3 または -4	2
8	1 または 2	-4
9	-1 または -2	-3
10	1 または 2	3
11	-1 または -2	-4
12	1 または 2	4

3.5.2 スケールから定まる確率

q_{n-1}, q_n からの遷移先は、3.4 節の処理で決めたスケール

の構成音に限定する．そこで、遷移先に関する確率として次のものを定義する．

$$P_2(q_{n+1}) = \begin{cases} 1.0 & (q_{n+1} \text{ がスケール内の音}) \\ 0.0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

3.6 音符列の生成

上で定義した遷移確率を用いて、各小節の最初と最後の音符に対して、最も確率が高くなる残りの音符の列をビタビアルゴリズムで求める．

4. 実験

4.1 目的

生成したスケール楽譜はコードによってスケールが変わるため、通常の楽譜よりも難しくなることが予想される．そこで、生成したスケール楽譜の難易度調査を目的とした実験を実施した．

4.2 実験手順

実験参加者はピアノ経験がある大学生 1 名である．事前に実験参加者から好きなポピュラー楽曲を 3 曲ずつ調査する（曲 A、曲 B、曲 C とする）．それぞれの曲のサビを練習したい範囲に設定し、8 小節分のスケール楽譜を実験前に提案システムを使用して生成する．実験参加者の手順は次のとおりである．

- (1) 曲 A 用のスケール楽譜を 10 分間練習してもらう．伴奏はいつでも再生でき、伴奏の使用は自由とする．
- (2) 練習終了後、あらためて伴奏に合わせて演奏する．
- (3) 曲 B に関して、(1)～(2) を同様に行う．
- (4) 曲 C に関して、(1)～(2) を同様に行う．
- (5) 演奏終了後、アンケートに回答してもらう．

演奏には、電子ピアノ（ヤマハ、P-255）を用いる．実験中は電子ピアノで弾いた音を MIDI データとして記録し、パソコンから流した音と電子ピアノの音を合わせたものをオーディオデータとして記録する．実験参加者が選ぶ曲は、4 分の 4 拍子であり、かつ市販の MIDI データ販売サイトにて MIDI データが手に入るものに限定する．

5. 結果と考察

実験参加者 1 名が選んだ 3 楽曲は、星野源の不思議（曲 A）、日食なつこの水流のロック（曲 B）、King Gnu の飛行艇（曲 C）である．進行パターンはすべて順次進行とした．システムを使って生成した楽譜は図 2 から図 4 である．

5.1 出力された楽譜内容

『不思議』のサビ 8 小節用にできたスケール練習楽譜を図 2 に示す．この図からわかる通り、この楽譜は Eb メ



図 2 不思議の楽譜



図 3 水流のロックの楽譜



図 4 飛行艇の楽譜

ジャーのスケールが基本となっていることがわかる．実際、この曲の調は Eb (D♯) であるため、曲の調にあった旋律となっているといえる．この区間のコード進行は、本システムによって次のように推定された．

| Eb Eb | D Bb | C Eb | Ab Gb |
| Bb Dm | Eb D | Bb Gm | Bb Bb |

そのため、このコード進行に基づいてスケールが選ばれている．たとえば、2 小節目の 1～2 拍は、コードが D であるため、G に ♭ と E に ♯ がついたスケールが選ばれた．他にも、3 小節目の 1～2 拍目では A に ♯ が付いている．この区間のコードが C であり、C は構成音として E を含むため、Eb メジャースケールではないスケールが探索され、F メジャースケールが採用されたからである．同様に、6 小節目の 3～4 拍目では、A に ♯ がつくとともに、F に ♯、E に ♯ が付いている（楽譜上は F♯ではなく G♯で表記されているが）．これは D メジャースケールが選ばれたからである．

『水流のロック』のサビ 8 小節用にできたスケール練習楽譜を図 3 に示す．この図をみると、この楽譜は B メジャーのスケールが基本となっていることがわかる．実際、この曲の調は B であるため、曲の調にあった旋律となっている．この区間のコード進行は、本システムによって次のように推定された．

| B B | F♯ B | E B | B F |
| E B | B C♯ | B B | C♯ B |

このコード進行に基づいてスケールが選ばれている．たとえば、4 小節目の 3～4 拍目は、A、G、F に ♯ がついたスケールが選ばれている．この区間はコードが F であり、F のコード構成音 F、A、C はすべて B メジャーのダイアトニックスケールに含まれないため、C メジャースケールが採用されたからである．他にも、8 小節目の 1～2 拍目では F に ♯

表 1 実験結果

	挿入	欠落	置換
曲 A	0	0	3
曲 B	0	0	1
曲 C	0	0	0

表 2 IOI の標準偏差 (秒)

	IOI の標準偏差
曲 A	0.0129
曲 B	0.0243
曲 C	0.0180

がついている。これは、この区間のコードが C $\sharp$ で、F $\sharp$ メジャースケールが選ばれたからである。

『飛行艇』のサビ 8 小節用にできたスケール練習楽譜を図 4 に示す。この図から、この楽譜は F $\sharp$ マイナーのスケールが基本となっていることがわかる。実際、この曲の調は F $\sharp$ m であるため、曲の調にあった旋律となっているといえる。この区間のコード進行は、本システムによって次のように推定された。

| F $\sharp$ m F $\sharp$ m | F $\sharp$ m E | D Bm | F $\sharp$ m F $\sharp$ m |
 | F $\sharp$ m F $\sharp$ m | F $\sharp$ m E | D Bm | F $\sharp$ m F $\sharp$ m |

そのため、このコード進行に基づいてスケールが選ばれている。このコードはすべて F $\sharp$ m のダイアトニックコードのため、F $\sharp$ m のスケールが選ばれている。

このように、コード推定結果に基づき、そのコードの構成音にあったスケールが半小節ごとに選ばれていることが確認された。ただし、コード推定結果が正確かどうかについては未検証であるため、今度の課題である。

5.2 実験結果

実験対象者が、最後に伴奏に合わせて弾いたピアノの MIDI データの分析結果は表 1 のようになった。表での「挿入」は楽譜にない音符を弾いた回数、「欠落」は楽譜にある音符を弾かなかった回数、「置換」は楽譜にあるものが異なる音符を弾いた回数である。表 1 の結果、3 曲を通して挿入、欠落は 0 であり、置換は 0~3 であった。これにより、被験者にとっての楽譜の難易度は高くなかったことがわかる。

また、曲ごとの IOI (Inter-Onset Interval) の標準偏差は表 2 のようになった。数値は有効数字 3 桁として四捨五入している。どの曲でも標準偏差は小さく、テンポは安定して弾けているといえる。

そして、アンケート結果は表 3 の通りである。7 段階評価で 7 が非常にあてはまる、1 が全くあてはまらないとする。アンケート結果からも、楽譜の難易度は比較的易しめであることがわかった。また、伴奏に合わせて練習することが楽しいという項目の評価が高く、このシステムが有用である可能性が示唆された。

表 3 アンケート結果

項目	評価
譜読みの練習になる	5
従来のスケール練習と同等もしくはそれ以上の効果が得られそう	6
練習に対するモチベーションが上がった	6
伴奏と合わせるのが楽しい	7
調号や記譜法が複雑で理解しづらい	5
楽譜の内容が自分の技術的に難しい	2
伴奏と合わせるのが難しい	2

6. おわりに

本稿では、スケール練習を継続的に行うことを目的として、入力された任意のポピュラー楽曲の MIDI ファイルからコードを推定し、その楽曲に合うスケール楽譜を生成するシステムを作成した。これによって、自分の好きな楽曲を伴奏として練習することができるようになった。

しかしながら、このシステムには多くの課題が残されている。まず、現在は被験者が 1 名のため、システムの有用性を示すためにはより多くの被験者のデータが必要だと考える。また、このシステムを使用することで継続的に練習ができるようになるかは、未検証である。今後は被験者を増やしてデータを集めることで、正確なシステムの効果を検証したい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 23K24966, 24H00748 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 加藤綾規, 陶山晴南, 廣瀬友亮, 堀之内陽介, 久野文菜, 濱川礼. 深層学習を用いたコルトー式ピアノ練習パターン自動生成システム手法と実装「Artificial Cortot」. 情報処理学会研究報告, Vol. 2020-MUS-127, No. 11 (2020).
- [2] 村井孝明, 西本一志. 楽器の練習意欲維持のために練習曲を他楽曲の伴奏に編曲するシステム. 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-HCI-162, No. 11 (2015).
- [3] Chika Oshima, Kazushi Nishimoto and Norihiro Hagita. A Piano Duo Support System for Parents to Lead Children to Practice Musical Performances. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, Vol. 3, Issue 2, Article 9 (2007).
- [4] Lauren N. Casey and Benjamin T. Fine. Understanding the Language of Music: From an Etude Generation Perspective. *Celebration of Excellence in Research and Creative Activity (CERCA)* (2022).
- [5] 米田圭志, 横山裕基, 小倉加奈代, 西本一志. Guitar Training Wheel: 減算的な演奏補助で練習継続意欲を保つギター演奏習得補助システム. 情報処理学会研究報告, 2013-HCI-155, 10, 1-8 (2013).
- [6] Gaetan Hadjeres, François, Pachet Frank Nielsen. Deep-Bach: a Steerable Model for Bach Chorales Generation. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, PMLR 70:1362-1371* (2017).

- [7] Anyi Rao, Francis Lau. Automatic Music Accompanist. arXiv, 1803.09033 (2018).
- [8] Kyogu Lee, Malcolm Slaney. Automatic Chord Recognition from Audio Using an HMM with Supervised Learning. AMCMM '06: Proceedings of the 1st ACM Workshop on Audio and Music Computing Multimedia, 11–20 (2022).
- [9] 黒川奈桜子, 藤博昭. スペクトルディップとクロマベクトルの併用による和音推定. 情報科学技術フォーラム講演論文集 11 (2), 165-170 (2012).
- [10] 納庄貴大, 西村竜一, 入野俊夫. 敵対的生成ネットワークを用いた楽曲の自動コード推定法の検討. 情報処理学会研究報告, Vol.2018-MUS-120, No.6, 1-6 (2018).
- [11] 大川真由子, 姜楊禹辰, 北原鉄朗. スケール練習のための楽譜生成システムの試作. インタラクシオン 2024 論文集, 2B-46, 828-830 (2024).