

クラスタリングと機械学習を用いた 音楽理論 GTTM に基づく楽曲構造分析システム

金森光平^{†1} 星野准一^{†2} 浜中雅俊^{†3}

概要: 本稿では、クラスタリングと機械学習を用いて、音楽理論 GTTM の階層的なグルーピング構造を、半自動的に検出する方法を提案する。音楽理論 GTTM は、他の音楽理論より定義が比較的厳密であり、計算機上で音楽の深層構造を分析できる理論として期待されているが、分析に使う複数のルール間で競合が生じるという問題がある。従来手法では、パラメータ化や機械学習によって、ルールの優先順位を決定していたが、楽曲により適切なパラメータの値や適切な優先順位が異なるという問題があった。そこで本システムでは、学習曲をルールの優先順位が似ている楽曲ごとにクラスタリングし、クラスタごとに機械学習を行うことで、各楽曲に適した分析器を構築した。本手法により、GTTM の階層的なグルーピング構造を簡単かつ性能良く検出できることを確認した。

System to Analyze Music Structure Based on Music Theory GTTM Using Clustering and Machine Learning

KOUHEI KANAMORI^{†1} JUNICHI HOSHINO^{†2}
MASATOSHI HAMANAKA^{†3}

1. はじめに

近年、コンピュータの登場により、音楽理論をコンピュータ上に実装することで音楽を扱うという考え方が登場してきた。音楽理論をコンピュータ上に実装することができれば、人が音楽を操作する際の負担が減り、最終的には、音楽的な知識が乏しい人でも簡単に作曲などの操作が可能になることが期待される。中でも 1983 年に提唱された音楽理論 GTTM は、他の音楽理論に比べ比較的厳密な定義がされており、多少の曖昧さを補うことで、コンピュータ上への実装が最も期待された理論であった。また、GTTM の分析の結果得られるタイムスパン木は、旋律の各音符の重要度を木構造で表すことができ、音符の重要度を元に旋律を簡約するなど、楽曲の深層的な構造の操作を可能にするものであった。

これまで音楽家が手動で分析した GTTM のタイムスパン木を用いて、音楽の深層構造の分析を可能とするシステム [2][3] や、演奏の表情づけを可能とするシステム [4][5][6][7] や、音楽要約を可能とするシステム [8][9] があり、応用の範囲が広い理論であったが、いずれも事前に GTTM の曖昧なルールを手動による分析で補う必要があった。

そこで、GTTM の分析そのものをコンピュータ上に実装するために、これまで主に 2 種類のアプローチを採用した研究があった。1 つ目は曖昧なルールをパラメータ化し、重み付けを行うことで構造を獲得する方法である。この方

法を実装した浜中らによるシステム ATTA[10]により、GTTM の分析全体をコンピュータ上に実装した。しかし ATTA はパラメータの数が多くかつ設定に専門知識が必要であり、調節が困難であるという問題がある。

2 つ目は機械学習を用いて自動的に構造を獲得する方法である。三浦らは、音楽家が GTTM を用いて分析した 100 曲の楽曲分析データを用いて、機械学習手法のひとつである決定木学習を用いて曖昧なルールの優先順位を学習した。そして、GTTM の最初の分析である局所的なグルーピング構造を自動的に検出するシステム σ GTTM を提案した [11]。しかし三浦らのシステムでは、機械学習によって学習されたルールの優先順位が 1 通りしかなかったために、分析する楽曲によっては間違えの多い分析結果となる問題がある。

これに対し、浜中らによる確率文脈自由文法による方法では、音楽家が GTTM を用いて分析した楽曲分析データを学習し、タイムスパン木を獲得するシステム σ GTTM III [12] を構築したが、1 曲の分析に時間がかかり、かつ学習過程がブラックボックスであるため、音楽家が分析に用いる際に、GTTM のどのようなルールに基づいて得られた分析結果なのか判断が難しいという問題がある。

そこで本研究では、分析時にユーザがルールの優先順位を何通りか切り替えるという簡易な調整を適切に行うことで、GTTM のグルーピング構造を半自動的に検出する方法を提案する。具体的には、クラスタリングと機械学習を反復することで、楽曲を曖昧なルールの優先順位の差異ごとに分類し、それぞれのクラスタ毎に分析器を作り、よりそれぞれの楽曲に適した分析が行えるシステムを構築した。本稿の提案システム σ GTTM II を実装し性能評価を行った結果、適切なクラスタの決定木を用いることにより、グル

^{†1} 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
Graduate School of Information and Engineering, University of Tsukuba
^{†2} 筑波大学
University of Tsukuba
^{†3} 京都大学
Kyoto University

ーピング構造を半自動的に簡単かつ性能よく獲得できることを確認した。

以下、2章で音楽理論 GTTM の概要とその問題点、3章でグルーピング構造を獲得するシステムの全体像について、4-5章で局所的なグルーピングと階層的なグルーピングそれぞれの獲得手法について、6章で実験結果、7章で結論と今後の課題について述べる。

2. 音楽理論 GTTM とその問題点

音楽理論 GTTM は、F.Lerdahl と R.Jackendoff によって1983年に提唱された音楽理論である。GTTMの楽曲分析方法は他の音楽理論に比べルールが比較的厳密に定義されているが、計算機へ実装する上では、曖昧さが残されている点が問題となっていた。

本章では、2.1節で GTTM の楽曲分析方法について説明した上で、2.2節で GTTM の問題点について述べる。

2.1 音楽理論 GTTM の楽曲分析方法

GTTMは以下の4つの分析を順に行うことで楽曲の構造を分析する。1つ目のグルーピング構造分析は、旋律をいくつかのグループに分割する分析である。2つ目の拍節構造分析は、強拍や弱拍などの、楽曲のリズム構造を同定する分析である。3つ目のタイムスパン簡約は、旋律の各音符に対し重要度をつけ、重要度の関係を木構造で表す分析である。4つ目のプロロンゲーション簡約は、旋律の緊張、弛緩構造を木構造で表す分析である。Figure 1に GTTM によるタイムスパン簡約までの楽曲構造の分析の例を示す。

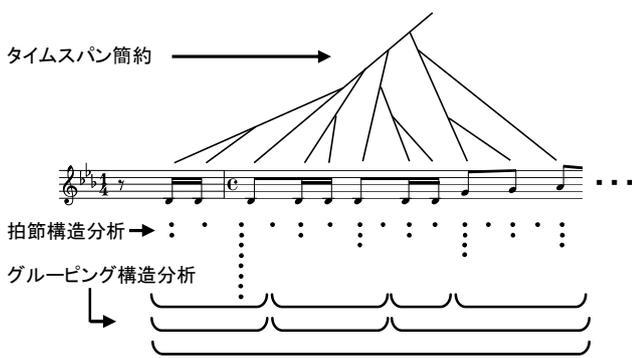


Figure 1 Example of music structure analysis by GTTM.

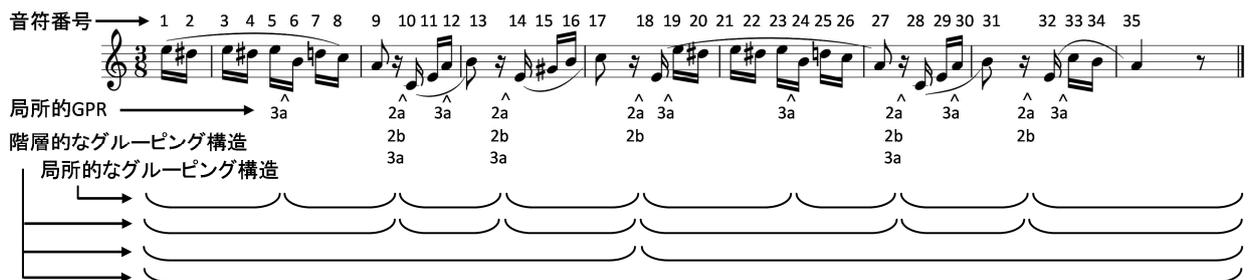


Figure 2 Example of analyzing grouping structure.

この4つの構造分析はそれぞれ構成ルールと選好ルールから成っている。構成ルールとは構造が成り立つために必要な条件を示したルールであり、選好ルールとは複数の構造が構成ルールを満たした場合、どれがより好ましい構造かを求めるためのルールである。またそれぞれの構造は階層構造を成している。これら4つの分析のうち、我々が本稿で扱うのは1つ目のグルーピング構造分析である。

グルーピング構造の構成ルールと選好ルールはそれぞれ GWFR(Grouping Well-Formedness Rules), GPR(Grouping Preference Rules)と呼ばれる。GPRはさらに最も低次である局所的なグルーピングに対応するルール(GPR 1,2,3)と、局所的なグルーピングより大きい階層的なグルーピングに対応するルール(GPR 4,5,6)の2種類に分けられる。局所的なGPRが適用された音符間は、旋律のグルーピングの境界となる可能性があることを示している。グルーピング構造を決定する際は、適用されたGPRの中からグルーピング構造の境界となる優先順位が高いと思われるものを、分析者が選択して構造を決定する。Figure2にグルーピング構造分析の例を示す。

2.2 音楽理論 GTTM の曖昧性

GTTMを用いて分析を行う際に問題となるのは、より好ましい構造を決定するための選好ルールに優先順位が存在しないことである。そのため、グルーピング構造の境界を決定する際にどの選好ルールをもって境界とするかの基準がなく、選好ルール間で競合が起きてしまう。この選好ルール間の競合は、計算機上に実装するにあたりいくつかの問題が生ずる。以下、2.2.1節で局所的なグルーピング選好ルールの曖昧性について、2.2.2節で階層的なグルーピング選好ルールの曖昧性についてそれぞれ述べる。

2.2.1 局所的なグルーピング選好ルールの曖昧性

Figure2の分析例では、様々な箇所でも局所的な選好ルールの競合が生じている。例えば、17番目の音符と18番目の音符の間(以下、17-18音符間などとする)にGPR2aとGPR2bが適用され、18-19音符間にGPR3aが適用されているが、この両方を境界とすることは、GPR1により禁止されているため、どちらかを境界として選択しなくてはならない。

分析例では 17-18 音符間が境界となっているが、どちらの音符間を境界とするかを選ぶ方法は GTTM では規定されていない。また、ある音符間に同じ GPR が適用されていても、その音符間が必ずしもグルーピング境界となるわけではないという点も問題である。局所的なグルーピング選好ルールの概要を Table1 に示す。

Table 1 Outline of local Grouping Preference Rules.

局所的なグルーピング構造の選好ルールの種類とその概要	
GPR1	極端に短いグルーピングは避ける
GPR2a	休符やスラーの後に適用される
GPR2b	比較的長い音符の後に適用される
GPR3a	比較的音高差の大きい音符間に適用される
GPR3b	ダイナミクスの変化がある音符間に適用される
GPR3c	アーティキュレーションの変化がある音符間に適用される
GPR3d	比較的音符の長さに変化がある音符間に適用される

2.2.2 階層的なグルーピング選好ルールの曖昧性

GTTM の階層的なグルーピング選好ルールは、主に優先順位が存在しないという問題と、選好ルールの定義自体が曖昧であるという問題がある。前者は、階層的なグルーピング選好ルールのどれを採用してグルーピングの境界とするのが曖昧であるという問題であり、後者は、選好ルールを楽譜にどのように適用するかが曖昧であるという問題である。例えば、GPR6 は楽曲に平行性がある場合に適用されるルールであるが、楽曲の並行性を定義することは難しく、コンピュータ上で実装することは難しい。また、グルーピング構造の階層の数には明確な規則が無く、同様に計算機上に実装する際に問題となる。Table 2 に階層的なグルーピング選好ルールの種類とその概要を示す。

Table 2 Outline of hierarchical Grouping Preference Rules.

階層的なグルーピング構造の選好ルールの種類とその概要	
GPR4	比較的強い局所的GPRがある音符間に適用される
GPR5	グルーピングがなるべく等しくなる音符間に適用される
GPR6	旋律に並行性がある場合に適用される

3. グルーピング構造の獲得方法

本研究では、機械学習により選好ルールの優先順位を求め、さらに優先順位の差異ごとに楽曲をクラスタリングすることで、グルーピング構造を獲得する方法を提案する。これにより選好ルールの優先順位の差異ごとに構造決定のための分析器を分け、より楽曲に適した構造分析を行うことを試みた。

本章では、3.1 節でクラスタリングと機械学習の適用について、3.2 節でシステムの使用法についてそれぞれ述べる。

3.1 クラスタリングと機械学習の適用

音楽家は、楽譜の情報を元にどの選好ルールが境界となるのかを概ね一意に定めることができる。そこで、音楽家が手作業で分析した楽曲のグルーピング構造を大量に用意し、それを正解データとして、機械学習を用いてグルーピングの境界となる選好ルールの優先順位をつける手法が考えられる。また、選考ルールの優先順位を 1 通りに限定した従来研究である三浦らのシステム σ GTTM[11]では、ある楽曲では性能が良くても、別の楽曲では大きく性能が落ちることがあることから、楽曲ごとにグルーピングの境界となる選好ルールの優先順位は異なることが考えられる。

そこで本稿では、GTTM の選好ルールの優先順位は楽曲ごとに異なり、かつ 1 つの楽曲内では優先順位は一定であるという考えの元、独自に考えたクラスタリング手法を用いて、楽曲を選好ルールの優先順位が似ている楽曲ごとに分類し、それぞれについて機械学習を行う手法を考案した。これにより、それぞれの楽曲により適したグルーピング構造の分析が行えることが期待できる。

3.2 システムの使用法

本稿で提案するシステム σ GTTM II は、入力として楽譜 (MusicXML) を用い、10 種類の階層的なグルーピング構造を出力する。局所的な選好ルールは文献[10]で用いられている方法で楽譜に適用している。階層的な選好ルールに関しては、独自の方法で楽譜に適用したが(5.3 節)、階層的な選好ルールである GPR6 に関しては機械的に楽譜に適用することが難しいため、今回は正解データのものを使用することにした。出力のグルーピング構造の数はクラスタの数だけ出力するが、ユーザの使いやすさと性能(F 値)を考慮した結果、クラスタの数を 10 個にすることにした。本システムのユーザは、最終的に出力された 10 種類の楽曲構造の内、最適であると思われる構造を任意に選択することができる。Figure3 に提案システムである σ GTTM II の使用法を示す。

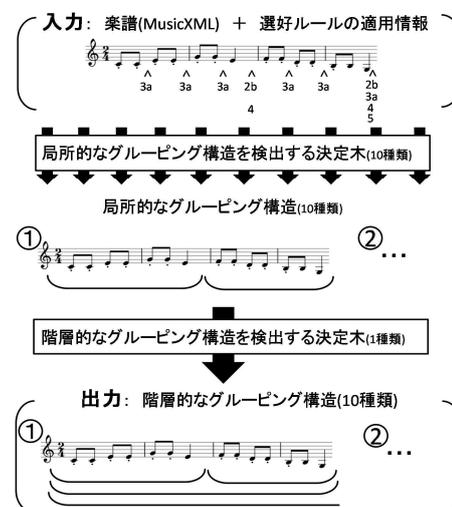


Figure 3 Usage of system σ GTTM II.

4. 局所的なグルーピング構造の獲得手法

局所的な選好ルールの優先順位の違いごとに楽曲をクラスタリングする際、どのように優先順位を決定し、優先順位にどの程度の違いがあるのかを調べる必要がある。そこで本研究では、クラスタリングと機械学習を反復して行うことで、次第にルールの優先順位の違いごとに楽曲をクラスタリングし、局所的なグルーピング構造を検出するための決定木を作り分ける手法を考えた。

本章では、4.1 節で局所的なグルーピング構造獲得のためのシステムの概要、4.2 節で学習データ、4.3 節で機械学習による選好ルールの優先順位決定、4.4 節でクラスタリング手法についてそれぞれ述べる。

4.1 局所的なグルーピング構造獲得システムの概要

本稿で構築した、局所的なグルーピング構造を獲得するシステムは、クラスタリングと機械学習を反復して行う過程で、局所的な選好ルールの優先順位が似ている楽曲を次第に同じクラスタにまとめることができる。Figure4に局所的なグルーピング構造を検出するシステムの概要図を示す。本システムの特徴は、クラスタリングと機械学習を反復して行うことにある。クラスタリングには独自の方法を採用した。クラスタリングの方法については4.4 節で詳しく述べる。

ユーザが本システムを使用する際には、入力として GTTM のルールが適用された楽譜(MusicXML)を使用し、出力として GTTM の局所的なグルーピング構造の候補が複数出力される方法にしている。MusicXML とは、楽譜を XML 形式で表現したデータのことである。この方法により、楽曲の構造に対するユーザの解釈を反映させることを可能にした。

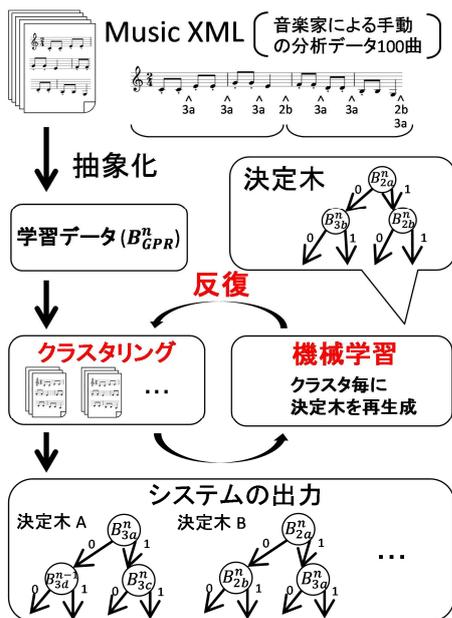


Figure 4 System to detect local grouping structure.

4.2 学習データ

学習データには、浜中らによるシステム ATTA を評価する際に用いた正解データを採用する。この正解データは、GTTM をよく理解している 1 人の音楽家が、クラシックの曲から 8 小節の長さで切り出した 100 曲の単旋律の楽譜データを、GTTM に基づき手作業でグルーピング構造分析したものである。さらに、この正解データが明らかに間違っ了解釈でないことを 3 人の GTTM の専門家がクロスチェックしている。

4.3 機械学習による選好ルールの優先順位決定

本研究では、局所的な選好ルールの優先順位決定の方法に、三浦らによるシステム σ GTTM で用いられた決定木を用いた手法を採用する。決定木は学習結果が視覚的に分かりやすく、グループの境界の有無という二値問題に適していたので採用した。以下、4.3.1 節で σ GTTM の方法による学習データの抽象化方法、4.3.2 節で決定木の構築方法についてそれぞれ述べる。

4.3.1 局所的なグルーピング構造の学習データ抽象化

本研究では、選好ルールの有無と前後の音符間の選好ルールの適用状況の関係を考慮して、データの種別を B_{GPR}^n という形で定義する。上付き文字によって注目している音符間を表し、下付き文字によって局所的な選好ルールの種類を表している。考慮する局所的な選好ルールは GPR2a, GPR2b, GPR3a, GPR3b, GPR3c, GPR3d の 6 種類なので、前後の音符間も含めデータの種別は計 18 個である。この計 18 種類のルールの有無により、目的の値である局所的なグルーピング境界の有無を決定木学習によって獲得する。

4.3.2 決定木の構築

決定木の構築には、J.R.Quinlan が開発した C4.5 という決定木生成アルゴリズムを用いる[13]。Figure5 に生成された決定木の一例を示す。この木構造による各データの組み合わせから、境界の有無($b=1,0$)の条件付き確率を求めることができる。この条件付き確率が 0.5 以上の場合には、局所的なグルーピング境界が存在する($b=1$)と判定し、0.5 未満の場合は、局所的なグルーピング境界が存在しない($b=0$)と判定した。

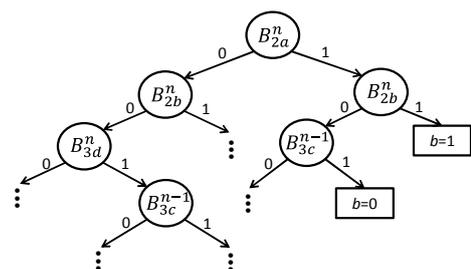


Figure 5 Example of constructed decision tree.

4.4 クラスタリング手法

本システムのクラスタリング手法は、機械学習との反復により、選好ルールの優先順位の違いごとに学習曲を分類し、決定木を作り分けることを目的として設計している。

Figure6にクラスタリング手法の詳細を示す。

システムの流れを順に説明する。まず始めに、100曲の学習曲をランダムに複数のクラスタに分類し、クラスタ内の楽曲を用いて決定木学習を行う。そして、生成された決定木群を用いて楽曲の局所的なグルーピング構造を検出する。

その後、得られた構造と音楽家の分析による正解データの構造を100曲分比較してF値を算出する。そして、得られたF値が最大となる決定木を作ったクラスタに楽曲を再分類する。F値が大きいほど、選好ルールの優先順位をよりよく反映した決定木であり、そのクラスタへ再分類することで、選好ルールの優先順位が似ている楽曲を集めていく。そして、再分類した後、再分類前と再分類後でクラスタ内の楽曲がどの程度一致しているかを比較する。

このクラスタ内の楽曲比較の結果、クラスタ間で再分類された楽曲の合計が二曲以上の場合、まだ十分にクラスタリングされていないと判断し、再分類後のクラスタで再び決定木学習を行う。そして、クラスタ間で再分類された楽曲の合計が1曲以下または、ループが150回に達した時点で各クラスタ内の楽曲と決定木群を出力して終了させた。このシステムにより、局所的な選好ルールの優先順位がクラスタ内の楽曲全てにより良く当てはまる分析器を構築した。

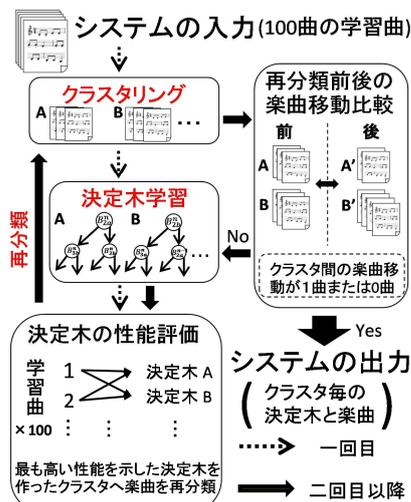


Figure 6 Detail of clustering system.

5. 階層的なグルーピング構造の獲得手法

局所的なグルーピング構造から、GTTMの次の段階の分析である、階層的なグルーピング構造を獲得するためには、グルーピング選好ルールのうち、新たに階層的な選好ル

ルの適用を考えなければならない。また、グルーピング構造の階層の数もGTTMでは特に規定が無く、実装する際に問題となる。

本章では、5.1節で階層的なグルーピング構造獲得のためのシステムの概要、5.2節で学習データの抽象化方法、5.3節で階層的な選好ルールの取り扱いについてそれぞれ述べる。

5.1 階層的なグルーピング構造獲得システムの概要

本システムでは、階層的な選好ルールに関しても、局所的な選好ルールのように音符間に適用することを考え、決定木を用いて優先順位をつけることにした。また、階層的な選好ルールは数が少なく、十数曲の例を確認した結果、局所的な選好ルールほど楽曲による優先順位に違いが見られなかった。そのため、階層的な選好ルールに関しては学習曲100曲で同一の優先順位であるとみなして学習を行い、決定木を1つ生成した。階層構造の作り方については、計算機で実装できるように、最高次の階層から徐々に低次の階層をトップダウンに決定する獲得手法を考えた。Figure7に階層的なグルーピング構造を検出するシステムの概要図を示す。

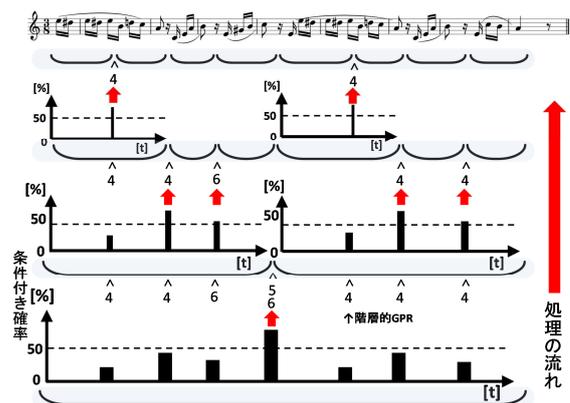


Figure 7 System to detect hierarchical grouping structure.

5.2 階層的なグルーピング構造の学習データ抽象化

階層的なグルーピング構造を獲得する際のデータも、局所的なグルーピング構造のデータの種類と同様に B_{GPR}^n という形で定義する。また、階層的な選好ルールを学習するにあたり、境界を決定する際に参照する楽曲の範囲が広がるため、注目する境界の位置の範囲である n の参照幅を $n-3$ から $n+3$ とした。階層的な選好ルールの種類は GPR4, GPR5, GPR6 の3種類なので、参照する n の範囲より合計21種類のデータを用意した。

5.3 階層的な選好ルールの取り扱い

階層的な選好ルールは、入力曲の楽譜上での適用箇所を機械的に判別することが難しい。そこで今回は、GPR4は局所的なグルーピングを求めるための決定木で一番条件付

き確率が高かった音符間に適用することにした。また、GPR5 はグルーピングを二等分する個所に適用することにした。また、GPR6 に関しては適用箇所を判別するのが特に難しいので、今回は正解データを使うことにした。また、階層的な選好ルールを学習する際、最高次の階層から次第に低次の階層をトップダウンに決定するというシステムの性質上、最高次から1つ低次のグルーピング構造を求める際の選好ルールの優先順位を学習した。

6. 評価実験

提案システムを用いて、従来システムである ATTA との比較実験を行った。本稿では、システムの性能を適合率と再現率の調和平均である F 値で評価する。適合率 P とは、(システムの出力の内正解データと一致したもの)/(システムの出力)で表される値で、再現率 R は(システムの出力の内正解データと一致したもの)/(正解データ)で表される値である。 F 値の式は、

$$F_{\text{値}} = 2 \times \frac{P \times R}{P + R} \quad (1)$$

で表され、 F 値が高いほどシステムの性能は高いと言える。比較実験では、ATTA の F 値は最も高い性能となるようにパラメータを手作業で調節した値を採用し、本システム(σ GTTM II)の F 値は10種類の出力の内最も性能が高かったものを採用した。Table 3 に学習に用いていないオープンデータに対する実験結果を示す。

実験の結果、従来システムである ATTA とほぼ同等の性能を得ることが確認できた。また、ATTA の分析方法は大量のパラメータを手作業で調節する方法であるのに対し、本システムは10個の中から1つ選択するという簡潔な方法であることから、本システムは従来法より簡単な分析が可能である有用なシステムであると考えられる。

Table 3 Experimental result (open).

メロディ	ATTA	σ GTTM II
1.ロマンス第2番	0.83	0.26
2.軍隊ポロネーズ	0.83	0.28
3.ハバネラ	0.53	0.92
4.結婚行進曲	0.52	0.36
⋮	⋮	⋮
平均(100曲のメロディ)	0.73	0.72

7. おわりに

本稿では、クラスタリングと機械学習を用いて、音楽理論 GTTM のグルーピング構造を半自動で簡単かつ性能よく検出する方法について述べた。本手法では、音楽家が手

作業で分析した楽曲構造分析データ100曲を学習データとして、GTTM の楽曲構造分析のためのルールの優先順位が似ている楽曲ごとにクラスタリングし、クラスタごとに決定木学習を行い決定木を生成した。そして、生成された決定木を用いることで、楽曲により適した楽曲構造分析を行うことを試みた。評価実験の結果、性能は従来研究である ATTA より若干下回るものの、半自動で簡単に構造を獲得できることを確認した。

今後の課題として、階層的な選好ルールの1つである GPR6 を自動推定することで、全ての楽譜データに対応したシステムにする必要がある。また、より簡潔な分析を行うために、10種類のシステムの出力の中から尤もらしい候補順に出力する方法を検討する必要がある。さらに、今後性能を向上させるためには、階層構造をトップダウンに求める戦略によってグルーピング構造の階層が多くなりがちな点を改善する必要がある。

参考文献

- [1] Lerdaahl, F. and Jackendoff, R.: A Generative Theory of Tonal Music. MIT Press, Cambridge, 1983.
- [2] 平田圭二, 青柳龍也, 音楽理論 GTTM に基づく多声音楽の表現手法と基本演算, 情報処理学会論文誌 Vol.43, No.2, 2002.
- [3] K. Hirata, and T. Aoyagi. "Computational Music Representation on the Generative Theory of Tonal Music and the Deductive Object-Oriented Database." Computer Music Journal 27(3), 73-89, 2003.
- [4] N. Todd. A Model of Expressive Timing in Tonal Music. Musical Perception, 3:1, 33-58, 1985.
- [5] Widmer, G. "Understanding and Learning Musical Expression", Proceedings of International Computer Music Conference, pp. 268-275, 1993.
- [6] Hirata, K., and Hiraga, R. "Ha-Hi-Hun plays Chopin's Etude", Working Notes of IJCAI-03 Workshop on Methods for Automatic Music Performance and their Applications in a Public Rendering Contest, pp. 72-73, 2003.
- [7] Hamanaka, M., Hirata, K., Tojo, S.: Melody Morphing Method Based on GTTM, Proceedings of International Computer Music Conference, pp.155-158, 2008.
- [8] 平田圭二, 松田周, パピプーーン: GTTM に基づく音楽要約システム, 情報処理学会研究報告 2002-MUS-46, pp.29-36, 2002.
- [9] K.Hirata, and S. Matsuda. "Interactive Music Summarization based on Generative Theory of Tonal Music." Journal of New Music Research, 32:2, 165-177, 2003.
- [10] Hamanaka, M., Hirata, K. and Tojo, S.: Implementing "A Generative Theory of Tonal Music", Journal of New Music Research, Vol.35, No.4, pp.249-277, 2007.
- [11] Yuji Miura, Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata, Satoshi Tojo: Use of Decision Tree to Detect GTTM Group Boundaries, Proceedings of International Computer Music Conference, pp.125-128, 2009.
- [12] Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata and Satoshi Tojo: "σ GTTMIII: Learning based Time-span Tree Generator based on PCFG", Proceedings of the 11th International Symposium on CMMR, Plymouth, UK, June, 16-19, 2015.
- [13] J.R. Quinlan, C4.5: Programs for Machine Learning. Morgan Kaufman Publishers, 1993.