

音楽理論 GTTM に基づく木構造を用いた旋律の認知的類似度の導出

～バッハ BWV582 パッサカリアとフーガの分析を例に～

Cognitive Similarity Grounded by Tree Distance based on GTTM – from the Analysis of BWV582

松原 正樹*¹
Masaki Matsubara

東条 敏*²
Satoshi Tojo

平田 圭二*³
Keiji Hirata

*¹ 筑波大学

*² 北陸先端科学技術大学院大学

*³ 公立ほこだて未来大学

Faculty of Library, Information and Media Science
University of Tsukuba

School of Information Science
JAIST

Department of Complex and Intelligent Systems
Future University Hakodate

This paper extends Generative Theory of Tonal Music (GTTM), and investigates cognitive reality through melodic similarity based on a tree representation of the theory. We elaborated the pitch preference rule of GTTM time-span tree and defined computationally theoretical distance between two melodies. In order to verify the proposed theory, we analyzed BWV582 passacaglia parts using the distance.

1. はじめに

本研究は音楽の旋律類似度における認知的リアリティについて計算論的に木構造表現を実現し議論するものである。

人が音楽を聴き二つの旋律が似ているかどうかを感じる事ができるのは、音楽の音響的な側面だけでなく構造的な側面を暗黙のうちに比べているからであろう。特にクラシック音楽などの調性音楽では後者の側面が顕著に現れ、その表現として階層的順序構造があると音楽学者によってこれまで議論がなされてきた(例えば Schenker 理論)。変奏曲の各変奏から共通テーマを見だし形式美が生まれるのもこの構造によるものと考えられる。

本研究のもととなる音楽理論 Generative Theory of Tonal Music (GTTM)[Lerdahl 1983]も Schenker 理論と同じく階層的な構造分析が特徴で、音楽を構成している様々な音を装飾的なものと骨格を形成する構造的なものに分けている。これまでも構造の認知に着目した音楽理論は提案されてきたが[Meyer 1956, Narmour 1996], GTTM はリズム・旋律・和声といった音楽が備える多様な側面を包括的に表象している点の特長である。またタイムスパン木(TS 木)と呼ばれる階層構造の分析方法として一部がボトムアップなルールで記述されており、計算論的に実装可能な点も特長である。

音楽構造理解という認知活動を計算機によりモデル化できれば、人間の聴取メカニズムにもとづく音楽学習支援や音楽を介したコミュニケーション支援、自動作曲、音楽要約など工学的応用が期待でき、また他の時間的構造を持つメディアへの応用も期待できる[Pampalk 2006, Riso-Valero 2010].

こうした目標のもとこれまで我々は GTTM の TS 木をもとに二つの旋律の距離尺度を定義し、被験者聴取実験との比較を行うことで旋律類似度における認知的リアリティの検証を行った[Tojo 2012, 2013, Hirata 2013]. モーツァルト作曲「キラキラ星変奏曲」(KV.265)を対象とした実験結果では、各変奏の理論的類似度と聴取結果を統計分析した分布に相関が示された。一方で人間の感じ方と異なる分布を示したものもあった。

これは GTTM では拍節構造, グルーピング構造, ピッチイベント, 和声進行の 4 つを考慮して TS 木を形成するが、計算論的に実装可能なルールが記述されているのは前者 2 つのみであることが原因として挙げられる。先行研究で定義した距離尺度もリズム情報を用いたものであったため、音高や和声を考慮する必要が示唆されていた。

そこで本論文では GTTM TS 形成におけるピッチイベントや和声進行の優先度に関するルールを提案し、新たにピッチの重みつきタイムスパン木の構築を行う。同時に旋律類似度を計算可能にする距離尺度の定義を行う。バッハ作曲「パッサカリアとフーガ」(BWV582)のパッサカリア変奏部を対象に分析を行う。

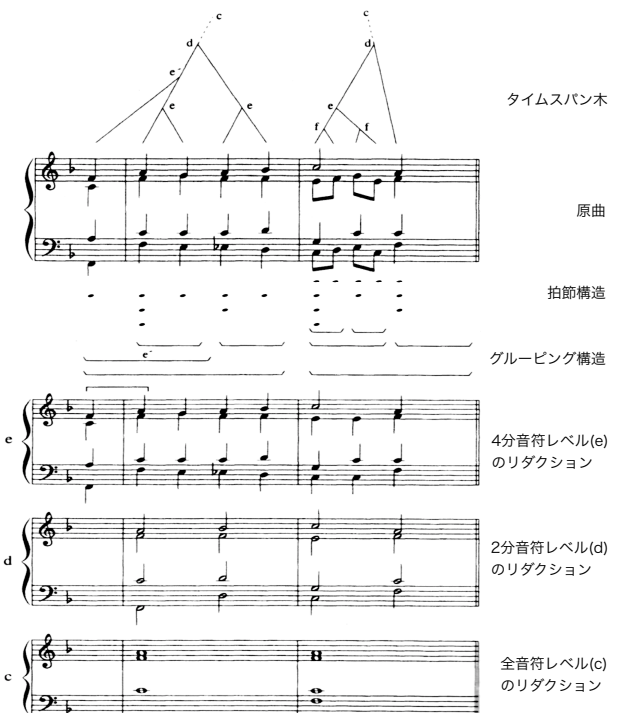


図 1 GTTM によるタイムスパン木の形成とリダクション (バッハのコーラル「Christus, der ist mein Leben」BWV281)

2. 提案手法

2.1 GTTM TS 木形成における問題点

GTTM の TS 木は拍節構造, グルーピング構造, ピッチイベント, 和声進行の 4 つを考慮してボトムアップに形成される階層的な木構造表現である(図 1). ある原曲に対する TS 木の形成手順は, まずルールに従って拍節構造とグルーピング構造を求めフレーズの境界線を階層的に求め, 次に音高と和声を考慮して隣接する音の優先度を決定し TS 木を形成する. TS 木の各階層を切り出すことによって原曲をリダクション(簡約)することができ, 4 分音符レベル, 2 分音符レベル, 全音符レベルの構造上の原型を求めることができる.

ルールには厳密に定義された Well-Formedness Rules (WFR) と優先事項が記された Preference Rules (PR) に分けられる. PR は WFR と違い, それぞれの局所的なルールが競合することもあり全体のバランスや曲の進行を考慮して決定する大局的なルールも存在する¹. すでに拍節構造やグルーピング構造の分析においては PR の競合を計算機上で実装するアルゴリズムが提案されている[浜中 2007]が, 音高や和声を考慮して TS 木を形成する PR (Time-Span Reduction Preference Rules (TSRPR))については判断基準が曖昧なため計算機上で実装が難しいという問題がある.

そこで本研究では, 2.2 節で音高と和声に関する TSRPR の定式化を行い, 計算論的に実装可能な PR を提案する. また 2.3 節で, 音高を考慮したピッチの重みつきタイムスパン木間の距離尺度も定義し, 2 つの旋律の類似度を計算可能にする.

2.2 音高や和声を考慮した PR の拡張

GTTM における TS 木形成の和声を考慮したルールは以下の通りである.

TSRPR2 (Local Harmony):

- (a) 相対的に協和している和音を選ぶ
- (b) 局所的な主和音に近い拍の和音を選ぶ

(a)の相対的な協和度は「IV よりも I」や「I¹ よりも I」といったように第何音を根音とする和音であるかとその転回形で判断することで実現可能であると考え. 五度圏のように I の和音を中心とした優先順位を決め², 機能和声の枠組みを用い同じ優先度においてトニック > ドミナント > サブドミナントとなるよう以下 TSRPR2*に新たに定義する.

TSRPR2* (Local Harmony):

- (a-1) 和音の転回形の優先順位を以下のように定める

$$I > I^1 > I^2$$

- (a-2) 和声の相対的な優先順位を以下のように定める

$$I > V > IV > VII > II > III > VI$$

- (b) 局所的な主和音に近い拍の和音を選ぶ

ピッチイベントごとに和声が変わる曲の場合は上記のルールを考慮することで音高の考慮も同時に行っている. しかし非和声音(経過音, 刺繍音, 倚音, 係留音など)を含む旋律は同じ和声内で多くのピッチイベントが存在するため, 和声音と非和声音の優先度を決定するような PR の策定が必要である. そこで

本研究では GTTM の続編の理論である Tonal Pitch Space [Lerdahl 2001]におけるピッチクラスの階層性の枠組みを用いる.

TSRPR10 (New) (Local Pitch Consonance):

局所的な和音における音高の優先順位を以下のように定める

$$0 > 7 > 4 > \{2, 5, 9, 11\} > \{1, 3, 6, 8, 10\}$$

なお数字は局所的和音の根音を主とするピッチクラスである(ハ長調の V の和音上では音高の優先順位は ソ > レ > シ...となる). また中括弧で括られた音高の優先度は同じとし, その他の PR によりどちらの音符を選ぶか決定する.

2.3 ピッチの重みつきタイムスパン木間の距離尺度

先行研究[Tojo 2013, Hirata 2013]では 2 つの TS 木間の距離尺度を編集距離で定義した. 変奏曲のように同じような和声進行が繰り返される旋律の比較においてはリズムの差が特徴的であるため, 人間の聴取に近い分布を示し認知的リアリティが示唆された. 一方で音高を考慮していなかったために同じリズムでも長調と短調の旋律を区別することができていなかった.

そこで本研究では音高を考慮したピッチの重みつきタイムスパン木(以下 pTS 木)間の距離尺度を定義する.

定義(ピッチの重みつきタイムスパン木間距離):

2 つの TS 木 T_1, T_2 における距離 $D(T_1, T_2)$ は T_1 から T_2 を作る際に音符の追加・削除, 音高のシフトにかかったピッチクラス距離 $L_{n_i}(n_j)$ と音符長 $length(n_j)$ の積の総和に等しい.

$$D(T_1, T_2) = \sum L_{n_i}(n_j) \times length(n_j)$$

$L_{n_i}(n_j)$ は Tonal Pitch Space[Lerdahl 2001]に基づく親となる音符 n_i から子の音符 n_j のピッチクラス(PC)距離(表 1), $length(n_j)$ は音符 n_j の長さである. また,

- (1) T_a が T_b に内包関係にある時, すなわち音符 $n_b \in T_b$ に対し音符 $n_a \in T_a$ を一つ追加 (or 削除) して T_a (or T_b) が得られるときの距離を $L_{n_b}(n_a) \times length(n_a)$ とする(音符の追加・削除)
- (2) 同じ長さの異なる音高 n_a, n_b を要素とする 2 つの木 T_a, T_b の距離 $D(T_a, T_b) = 0$ とする(単音のシフト性)

表 1 ピッチクラス距離(PC0 からの場合)

PC	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
距離	0	5	4	6	3	5	7	2	6	5	6	4

例えば, 図 2 のように旋律 C-F-A と旋律 C-G#-A の pTS 木が定められている時, 2 つの旋律の距離は, C-F-A の F の音を削除し C-A を求めた際の距離(=0.75)と, C-A から G# の音を追加して C-G#-A を求めた時の距離(=0.625)の和となる(合計 1.375).

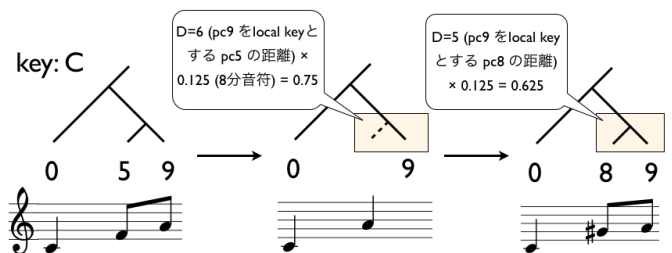


図 2 音高を考慮した 2 つの旋律の pTS 木間の距離

¹ 例えば GPR7(Time-span and prolongation stability)や MPR9(Time-span interaction)など TS 木の形成を考慮するルールが挙げられる

² 5 度上や 5 度下に行くとき優先順位が一つ下がる

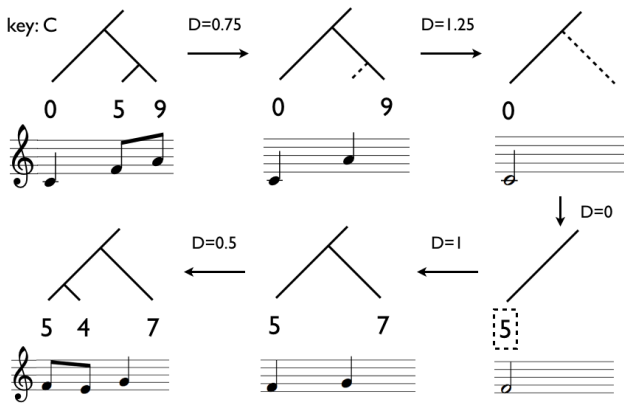


図3 単音のシフトを含む pTS 木間の距離

また図3のように共通部分が一つもない旋律 C-F-A と旋律 F-E-G の場合は単音のシフトを含む距離計算となる(合計 3.5)

3. ピッチの重みつきタイムスパン木の生成

3.1 BWV582 第 1,2,3,10 変奏の分析

本研究では和声構造上の問題と切り分けるために先行研究 [Hirata 2013]と同様に、似たような和声進行を繰り返す変奏曲を用いる。分析対象はバッハ作曲 BWV582 パッサカリアとフーガのバッサカリア部の第 1, 2, 3, 10 変奏である。図4に提案手法による pTS 木生成の結果を示す。なお和声解析は専門家との協力のもと事前に行った。

3.2 各変奏の距離の計測

各変奏を4分音符レベルにリダクションを行い、2.3節の定義にしたがって pTS 木間の距離を求めた(表2)。

表2 各変奏間の距離

	Var. 2	Var. 3	Var. 10
Var. 1	52.5	19.5	30.5
Var. 2	-	43.5	30.5
Var. 3	-	-	30.5

4. 考察

和声進行や音高を考慮した pTS 生成の分析では、本研究で提案した TSRPR2', TSRPR10 の他、TSRPR4(木構造のバランスに関する規則)、TSRPR7, 8, 9 (曲の始まりと終わりに関する規則)が考慮された。4分音符レベル以上の分析は和声の情報を用いてボトムアップに優先度を決定することができた。8分音符レベルや16分音符レベルに関しても和声情報をもとに和声音と非和声音に分けることができた。しかし第3音を残すべきところで音高の優先度で第5音を残すことがあり、和声音の選択の際に他声部で使っている場合は選ばないといったルールを追加する必要がある。

また pTS 木の形成に関して、距離を計算論的に求めることができるよう Fusion, Transformation, Cadential Retention といった木構造を取らない枝の結合方法を用いなかった。今回取りあげなかった第15変奏はアルペジオを多用しており、一つの拍に複数の和声音が含まれるので、今後 Fusion 結合における優先度の取り方等を策定していく必要がある。

表2を見ると pTS 木間の距離は音高を考慮していることが伺える。その理由として、Var. 1 と Var. 2 はリズムが同じであるが

和声進行や音高が大きく違う。先行研究ではリズムが同じであったために似た旋律として分類されるはずだったが、提案手法ではリズムが同じでも音高が違うことが表現できた。リズムが同じ Var. 1 と Var. 2 の組み合わせに比べ、リズムは異なるが和声的に似ている Var. 1 と Var. 3 の距離が近くなったことからそのことが伺える。Var. 10 ほどの Var. とも等しい距離で、本曲における最上位構造(Ursatz)のような役割を担っていると考えられる。

今回はモノフォニーの旋律に対して距離を求めたが、Tonal Pitch Space の和音間距離なども用いて、ポリフォニーのフレーズに対して和音ベースの木の可能性についても議論の余地があるといえる。和声解析については既知の前提で pTS 木を生成したが、提案手法の距離尺度は局所的な音符間の距離を求めるため和声解析を必要としない。そのため pTS 木の生成の際にボトムアップに全ての木の可能性を計算し、最上位構造と該当のフレーズの距離が最小となるよう探索して pTS 木を決定していく方法が考えられる。そうして得られた pTS 木は局所的な和声を表現していると考えられ、部分転調や GTTM における prolongation 木の範囲の発見へと期待できる。

5. おわりに

本研究は GTTM TS 木生成における音高と和声を考慮したルールを計算機上で実装するための拡張を行った。また音高を考慮した pTS 木間の距離尺度の定義を行った。バッハ作曲「パッサカリアとフーガ」(BWV582)のパッサカリア変奏部分を対象に分析を行い認知的リアリティについて検討を行った。

今後は被験者聴取実験と比較を行い、提案した距離尺度の妥当性を検討する。pTS 木に対する join や meet といった演算を定式化することで、旋律のモーフィングや要約を行うことができると考える。

謝辞

北海道教育大学の宮下氏に本研究で用いた楽曲の和声解析の協力いただきました、感謝の意を表します。

参考文献

- [浜中 2007] 浜中雅俊, 平田圭二, 東条敏: 音楽理論 GTTM に基づくグルーピング構造獲得システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 1, pp. 284-299 (2007)
- [Hirata 2013] K. Hirata, S. Tojo and M. Hamanaka: Cognitive Similarity grounded by tree distance from the analysis of K.265/300e, Proceedings of CMMR 2013, pp.415-430 (2013)
- [Lerdahl 1983] F. Lerdahl, R. Jackendoff: A Generative Theory of Tonal Music. MIT Press (1983)
- [Lerdahl 2001] F. Lerdahl: Tonal Pitch Space, Oxford Univ. Press (2001)
- [Narmour 1996] Narmour, E.: The Analysis and Cognition of Melodic Complexity: The Implication-Realization Model. University of Chicago Press (1992)
- [Meyer 1956] Meyer, L. B.: Emotion and Meaning in Music. University of Chicago Press (1956)
- [Pampalk 2006] E. Pampalk: Computational Models of Music Similarity and their Application in Music Information Retrieval. PhD Thesis, Vienna University of Technology (2006)
- [Tojo 2013] S. Tojo and K. Hirata: Distance and Similarity of Time-span Trees, Journal of Information Processing, Vol.21, No.2, pp.256-263 (2013)
- [Tojo 2012] S. Tojo and K. Hirata: Structural Similarity Based on Time-span Tree, Proceedings of CMMR 2012, pp.645-660 (2012)
- [Valero 2010] D. Riso-Valero: Symbolic Music Comparison with Tree Data Structure. Ph.D. Thesis, Universitat d'Alacant, Departamento de Lenguajes y Sistemas Informaticos (2010)

J.S.Bach BWV582

Var. 1

c:I V — I¹ III¹ II¹ V IV¹ — IV₇ V $\forall\frac{3}{2}$ I¹ $\forall\frac{3}{2}$ I IV₇ V₇ — I

Var. 2

c:I V As: V₇ VI
c:IV III¹ IV₆ IV₇ V — $\forall\frac{3}{2}$ I $\forall\frac{3}{2}$ I IV₇ V — I

Var. 3

c:I V As:V VI
c:IV II III¹ IV¹ II¹ V $\forall\frac{3}{2}$ I¹ V₇ I II I² V₇ I

Var. 10

c:I V I¹ IV V VI II¹ V $\forall\frac{3}{2}$ I¹ V₇ I II¹ V — I

図 4 BWV582 の第 1, 2, 3, 10 変奏の和声分析およびピッチの重みつきタイムスパン木
(各変奏をフレーズとして扱うため最後の音符の長さを変更した)