

自動演奏への表情付けのための 生成音楽理論に基づくフレーズ情報の生成法

後藤 円香^{2,†1,a)} 酒井 正彦^{1,b)} 東条 敏^{3,c)}

概要：自動演奏への表情付けのため、生成音楽理論（GTTM）の解析木から自動演奏システム Director Musices (DM) で用いるフレーズアーチを取得する手法を提案する。リズムの安定性を表すタイムスパン木と和声の安定性を表す延長的簡約木そのままでは、フレーズアーチとしては情報が多すぎて利用できないため、情報の切り出しの手法について提案する。実際にこの手法により生成したフレーズアーチを利用して DM により演奏を自動生成し、アンケートによりそれらの比較を行った。本論文ではこれらの結果について述べる。また、電子楽譜と GTTM 解析情報から DM に入力可能なファイルを生成するツールを試作したので、そのツールについても紹介する。

1. はじめに

演奏への表情付けは興味深い課題であり [1]、音楽演奏システムによる演奏表情付けコンテスト ICMPC-Rencon 2008 が開催されるなど盛んに研究が行われている。演奏における表情としてテンポと強弱の変化は最も重要な要素と考えられており、非学習タイプの自動演奏への表情付けとして有名な自動演奏システム Director Musices (DM)[2] においては、テンポや強弱の変化は主に音符を階層的にグループ化した情報であるフレーズアーチ (phrase arch) に基づいて表情付けを行うことで抑揚のついた演奏を容易に生成可能である。しかしながら DM においてはフレーズ情報は自動的に得られず、人手などによる入力が必要があるという問題点がある。

本研究では、生成音楽理論 (GTTM) [3], [4] に基づく楽譜の解析結果からフレーズアーチを取得する手法を提案する。GTTM 解析においては、リズムの安定性を表すタイムスパン木と和声の安定性を表す延長的簡約木という音符を葉にもつ二種類の 2 分木がフレーズアーチの生成に利用可能と考えられる。それらの木情報そのままではフレーズアーチとしては情報が多すぎて利用できないため、情報の切り出しの手法について提案し、DM から出力された演奏の比較実験をアンケートにより実施した。本論文ではこれ

らの結果について述べる。また、電子楽譜と GTTM 解析情報から DM に入力可能なファイルを生成するために試作したツールについて説明する。

2. Director Musices とフレーズアーチ

DM [2] は演奏を構成する要素をモデル化するパフォーマンスルール [5], [6] の適用によって、電子楽譜から表情付けされた演奏を生成するソフトウェアである。DM は入力として MIDI ファイルもしくは独自の電子楽譜である mus 形式を受け付ける。さらに、pal 形式のルールパレットに与えられたパフォーマンスルールを適用することで生成された演奏はその場で再生するか、あるいは、MIDI ファイルとして出力することができる。

パフォーマンスルールの多くにはそれぞれに k 値 (k -value) と呼ばれる固有のパラメータが設定されており、それらの値を変更することによって演奏への影響が変化する。それらの中でフレーズアーチ (Phrase Arch) と呼ばれる、楽曲のフレーズ (楽句) をモデル化した重要なルールが存在する。このルールは、演奏の際に各音符の音量および音の立ち上がりから終わりまでの時間間隔 (duration) に影響を与える。具体的には、フレーズの最初の方はアツチェランド (テンポを段々早く) が、最後の方はリタルダンド (テンポを段々遅く) がかかる。また、音量はアツチェランドに伴って大きく、リタルダンドに伴って小さくする。

例えば、図 1 は mus 形式の電子楽譜を読み込んだ際に DM に表示される楽譜の一例である。ここでは、フレーズアーチが 3 階層あり、それぞれの階層に対して異なる k 値を与えることができ、演奏への影響を制御できるよう

¹ 名古屋大学 情報学研究所

² 名古屋大学 情報学部

³ 北陸先端科学技術大学院大学

^{†1} 現在、株式会社日立製作所

a) madoka@trs.css.i.nagoya-u.ac.jp

b) sakai@i.nagoya-u.ac.jp

c) tojo@jaist.ac.jp



図 1 フレーズアーチの例：G. ホルスト/組曲『惑星』より「木星」

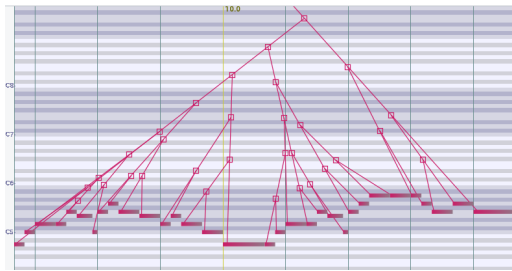


図 2 「木星」のタイムスパン木

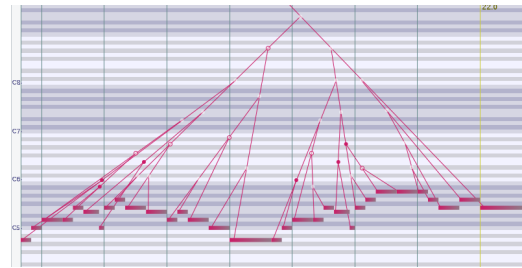


図 3 「木星」の延長的簡約木

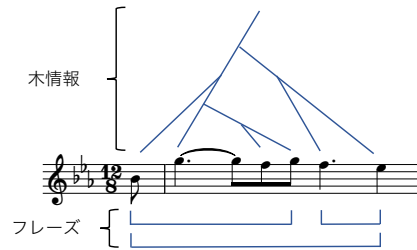


図 4 木情報とフレーズの対応

になっている。ただし、MIDI ファイルを入力した場合には mus 形式に自動変換して利用されるものの、フレーズアーチ情報は自動的に付加されることはなく、DM 画面上でユーザーが手作業で与えることになる。このことは、演奏への自動的な表情付けには障害となる。実際にフレーズアーチ情報なしで DM に演奏させてみると、表情の乏しい演奏になることが実感できる。

3. GTTM 解析木からのフレーズアーチの生成

前節で述べたように、DM による表情が付加された演奏の生成のためには、フレーズアーチ情報の付加が欠かせない。本節では、生成的音楽理論 GTTM の解析木からのフレーズアーチの生成方法について議論する。

3.1 生成的音楽理論 GTTM

生成的音楽理論 (GTTM: Generative Theory of Tonal Music) [3], [4] は、楽曲は段階的に重要でない音を削除し重要な音を残すことで簡約化される骨組みの構造が楽曲の音楽的な意味を表すという、シェンカー理論に基づいた音楽の階層的な構造解析によりその階層関係を木構造により形式的に記述するものである。GTTM はグループ解析、拍節解析、タイムスパン分析、延長解析の四つのサブ理論から構成され、さらに各々のサブ理論は、解析上満たすべき規則である構文規則と、一般的な傾向を記述した蓋然性を含む規則である選好規則で構成される。

以下では本論文で利用するサブ理論であるタイムスパン分析、および、延長解析のみを簡潔に説明する。

(1) タイムスパン分析 (time-span analysis)

グループ解析と拍節解析によって隣接する音の重要度を比較し、主にボトムアップで音の勝ち抜き戦を行い、負けた枝が勝った枝に吸収されるように描くことでリズムの安定性を表すタイムスパン木が得られる。図 1 で用いた「木星」のタイムスパン木を図 2 に示す。この木において根に伸びる線は最後の音符に伸びてお

り、このことはこの最後の音符が最も重要であることを表している。このように各頂点に対して上から来る枝と同方向の下側の枝を主枝、そうでない側の枝を副枝と呼ぶことにする。なお、この図のタイムスパン木は、GTTM データベース [7] から取得し、GTTM エディタ [8] を用いて表示したものである。

(2) 延長解析 (prolongational analysis)

タイムスパン木では、人間が音楽の安定性と不安定性から受ける心理的な緊張、緊張の維持、弛緩といった感覚を正しく反映する事が出来ない。このような心理的な構造を反映するため、音程や和声を考察しタイムスパン木の枝を付け替える事で和声的な安定性を表す延長的簡約木を得る。「木星」の延長的簡約木を図 3 に示す。延長的簡約木においては木のノードから右上に伸びる右分岐によって緊張を表し、その反対の左分岐によって弛緩を表している。

3.2 フレーズアーチの構成手法

GTTM の解析木は 2 分木であり、図 1 で見たようなフレーズアーチの階層と非常に似た構造をしている。本論文では図 4 に例示するように、GTTM 解析木のフレーズアーチへの自然な対応付けを与えることにする。このように木の各頂点に対してその頂点が覆う範囲を一つのグループとみなしてフレーズを渡すことが可能である。

以上の対応付けにより構成されるフレーズアーチは木の高さに相当する階層を持つことになる。ここで、以下の理由から木の葉に近いフレーズを考慮する必要性が低いと考える。

- フレーズが短くなり、その間で演奏を変化させても人間の耳には捉えられない。

入力: 木 t , 重みの初期値 w_0 , 分配比 γ , 述語 $P(w, \#_N, \#_B)$
 出力: 再帰手続き呼び出し $\text{phGen}(\text{root}(t), w_0)$ で構成されるフレーズ
 手続き $\text{phGen}(v, w)$:
Stp.1 $P(w, \#_N(v), \#_B(v))$ を満たすならば次のステップに進む。そうでないなら終了。
Stp.2 t の葉全体にフレーズを生成する。
Stp.3 $\text{phGen}(\text{prim}(v), \gamma w)$ および $\text{phGen}(\text{snd}(v), (1 - \gamma)w)$ を呼び出して終了する

図 5 フレーズ構成の基本アルゴリズム

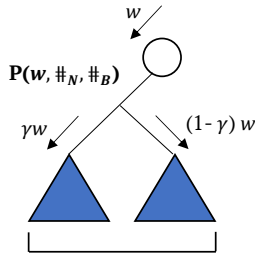


図 6 フレーズ生成の基本アルゴリズム

- フレーズが多く重なるため、Director Musices による演奏が抑揚を付け過ぎた不自然なものになる可能性が高い。

このことから、フレーズ構成の対象となる木の頂点を定めるため、深い位置にある頂点を除外する機構を導入する。ここで、木の葉に近いフレーズと同様に、木の根に近いフレーズも除外対象とするべきと予想されるが、本論文においては考慮しないこととした。

木 t の根頂点を $\text{root}(t)$ で表し、頂点 v の二つの子供のうち主枝の子頂点および副枝の子頂点をそれぞれ $\text{prim}(v)$, $\text{snd}(v)$ と表記する。また、木の頂点 v に対して以下の二つの記法を定める。

$\#_N(v)$: 頂点 v の下にある葉の数 (対応する音符のうちでスラーの先にかかるものを除いた音符の総数)

$\#_B(v)$: 頂点 v に対応するグループに含まれる拍の総数
 フレーズ構成手続きを図 6 のように定める。ここで再帰手続き $\text{phGen}(v, w)$ においては、述語 P が成り立つ限り頂点 v に対応する部分にフレーズを構成し、重み w を子供に分配するようになっている。したがって、述語 P をある一定以下の重みにおいて偽となるように設計しておけば、フレーズの階層を制限することが可能になる。

3.3 フレーズアーチ構成アルゴリズムの具体例

フレーズ構成の基本アルゴリズムにおいては、与えられた入力の GTTM 解析木 t , 重みの初期値 w_0 , 分配比 γ , 述語 P に応じてフレーズアーチが構成される。対象の楽曲と利用する GTTM 解析木を固定して考えた場合でも、重み, 分配比, 述語を変化させることにより具体的なアルゴリズムが構成でき、それによって構成されるフレーズアーチが変化する。本研究においては予備実験を重ねながら、図??

	w_0	γ	$P(w, n, b)$
Alg.0	2^3	1/2	$w > 1 \wedge b \geq 2$
Alg.1	b_0	2/3	$w \geq 4 \wedge n \geq 2$
Alg.2	$(b_0)^2/n_0$	1/2	$w \geq 3.75 \wedge n \geq 2$
Alg.3	$(b_0)^2/n_0$	3/5	$w \geq 5.9 \wedge n \geq 2$
Alg.4	unused	unused	$b/n \geq 0.6 \wedge b > 4 \wedge n \geq 2$

b_0 は総拍数 $\#_B(\text{root}(t))$
 n_0 は総音符数 $\#_N(\text{root}(t))$

図 7 具体的なアルゴリズムを定めるパラメータ

表 1 得票数

	Alg.0	Alg.1
白鳥	8	5
愛の挨拶	9	4
合計	17	9

に示すパラメータを定めることで Alg.0 から Alg.4 の具体的なアルゴリズムを提案する。

まず、Alg.0 と Alg.1 を以下の方針に基づいて定め、予備実験を行った。その設計方針は以下のとおりである。

Alg.0: フレーズをおおよそ 3 段まで構成する。

Alg.1: (1) Alg.0 では長い曲のフレーズは広い範囲のみになるため、曲の長さに合わせてフレーズの段数を増やす。

(2) GTTM 木情報の主枝は副枝よりも重要と考え、主枝の子頂点の方がよりフレーズの段数が増えやすくする。

$w = \frac{\#_B}{\#_N}, P(w, \#_N, \#_B) = w \geq 0.6 \wedge \#_B > 4 \wedge \#_N \geq 2, w_0, \gamma = \text{定義なし}$

Alg.0 と Alg.1 を比較する予備実験を行った。実験に用いた曲は、(1) サン＝サーンス/白鳥 (GTTM データベース No.28), (2) エルガー/愛の挨拶 (GTTM データベース No.76) の二曲であり、それぞれの曲の延長的簡約木から Alg.0 および Alg.1 によって生成した 2 種類のフレーズを DM で自動演奏したものを参加者に聞いてもらい、どちらを良いと感じるかのアンケートを取った。参加者数 13 人による実験結果を次の表 1 に示す。結果から Alg.0 の方がどちらかといえば良い評価となった事が分かる。このとき、「Alg.1 での演奏はテンポ変化が不自然に聞こえた」という意見が多く寄せられた。その理由として、Alg.1 では重みの分配比を $\gamma = 2/3$ としたことが、極端なフレーズの段数の偏りを生んだからと考えられる。

Alg.0 と Alg.1 の比較実験を踏まえて、次の Alg.2 と Alg.3 を提案した。それらの設計方針は以下のとおりである。

(1) 予備実験の結果より、重みの分配比をより均等な値 ($1/2 \leq \gamma < 2/3$) とする。

(2) 音符の数が曲の長さに対して少ないような曲は表情をより強く付けるようにすると良く聞こえたと感じたため、拍の数に対して音符の数が少ない曲ほどフレーズの段数を多くする。

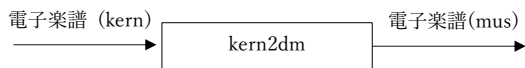


図 8 Humextra オリジナルの kern2dm



図 9 拡張後の kern2dm

さらに、重みを上の階層から下の階層へと渡していく方法では、頂点に対応するグループに含まれる音符の数に偏りがあった場合に、フレーズが偏って付くことで不自然な演奏に繋がると考えられたため、以下の方針のもとで Alg.4 も試みた。

- (1) 各頂点に属する拍の数と音符の数によってフレーズを生成するか決定する。
- (2) 拍数に対して音符の数が多い頂点にはあまり細かく表情を付けないようにすると良く聞こえたと感じたため、頂点に属する拍数に対して音符の数が多いほど、フレーズに分かれにくくする。

4. システム実装

DM の入力形式 .mus の仕様が見つからず実装は難しそうに思われたが、電子音楽解析ツール Humdrum Toolkit [9] の楽譜形式 .kern を操作するプログラム群 Humdrum Extras [10] に、.kern 形式の電子楽譜を DM で入力可能な .mus 形式に変換するプログラム kern2dm が存在することが分かった。そこで、kern2dm 拡張し、入力に GTTM の木情報を与えることで、出力される .mus 形式にフレーズ情報も織り込むようにした (図 8, 9)。開発したソフトウェアは、リポジトリ [11] で公開している。ただし原稿執時点においては、未実装箇所があるため Alg.4 は所期の動作をしない。

5. 評価実験

5.1 実験と結果

評価はアンケート形式で行った。具体的には、本論文の手法により自動的に構成したフレーズアーチに基づいて DM により生成した二つの自動演奏を聴き比べた上で、「どちらによる演奏をより良いと感じたか」を回答者に答えてもらった。評価項目は以下の二つである。

- (1) タイムスパン木と延長的簡約木の比較
- (2) Alg.2 と Alg.3 の比較

実験に用いた電子楽譜および GTTM 解析情報は、GTTM データベース [7] で公開されている曲の中から 4 つの曲を選んでそのデータを用いた。DM で自動演奏して得られた MIDI ファイルを音楽制作ソフトウェア GarageBand で読

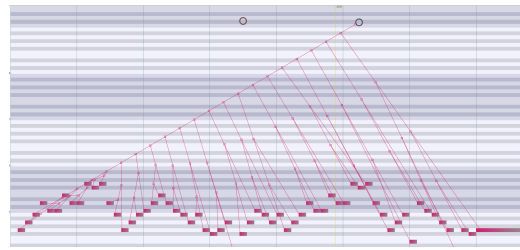


図 10 「主よ人の望みの喜びよ」のタイムスパン木

み込み、mp3 形式に書き出して利用した。それぞれの曲に対し、Alg.2 の基で評価項目 (1) を回答後、より良いと回答した木について評価項目 (2) を回答してもらう形式とした。また、それぞれの演奏の比較において任意形式の感想欄を設けた。回答者数は 17 人であった。

実験に使用した本手法で生成したフレーズ付きの楽譜、および、DM での自動演奏の際に用いたルールパレットは付録を参照されたい。

実験結果をまとめると表 2 のようになる。感想欄に寄せられたコメントは、二つの演奏のうち悪い評価をしたものについては「テンポ変化が急すぎる」「演奏が走りすぎている」「演奏を遅くしすぎている」といった内容のものが多かった。また、良い評価をしたものについては「テンポ変化が滑らか」「表情が豊か」といった内容のものがあ、全体的にテンポの変化についてのコメントが多く見受けられた。

5.2 考察

評価項目 (2) の Alg.2 と Alg.3 の比較において、延長的簡約木では 26 票/9 票、タイムスパン木では 19 票/14 票、合計でも 45 票 (約 66%) 対 23 票 (約 34%) と、木の種類に関わらず Alg.3 よりも Alg.2 の方が良いという評価を受けた。曲別に見ても、Alg.3 への票数が Alg.2 への票数を上回っている例は無い。よって、一般にフレーズ付けの階層に偏りが無い方が良いと考えられる。

評価項目 (1) の延長的簡約木とタイムスパン木の比較においては 35 票対 33 票と、4 曲の合計ではほとんど評価に違いが見られなかった。しかし、曲によって評価が分かれていることから、その二つの効果が同等であるという結論は出せない。ここで、2 番目の「主よ人の望みの喜びよ」で用いた図 10 に示すタイムスパン木は枝が片側に偏ったバランスの悪い形をしていた。一方で、延長的簡約木は図 11 のようにバランスの取れた形であった。GTTM での解析では、和声情報に基づいてタイムスパン木の枝を付け替える事により延長的簡約木を得るため、このようにバランスの悪いタイムスパン木から木の形が大きく異なる延長的簡約木が得られたとは考えにくい。この事から、GTTM 解析に誤りがあったのではなく、誤ったタイムスパン木がデータベースに掲載されている可能性がある。

表 2 獲得した票数 (pr:延長的簡約木, ts:タイムスパン木)

評価項目		(1)		(2)					
固定した条件		Alg.2		pr		ts		pr と ts の合計	
順番	曲名	pr	ts	Alg.2	Alg.3	Alg.2	Alg.3	Alg.2	Alg.3
1	組曲「惑星」より木星	5	12	4	1	9	3	13	4
2	主よ人の望みの喜びよ	15	2	10	5	1	1	11	6
3	「白鳥の湖」よりワルツ	6	11	6	0	5	6	11	6
4	亡き王女のためのパヴァーヌ	9	8	6	3	4	4	10	7
計		35	33	26	9	19	14	45	23

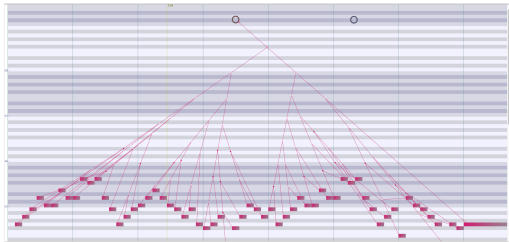


図 11 「主よ人の望みの喜びよ」の延長的簡約木

この曲を除いた 3 曲の合計では、延長的簡約木が 20 票 (約 39%), タイムスパン木が 31 票 (約 61%) となるため、3 曲のみに基づいた結果ではあるが、延長的簡約木よりタイムスパン木のほうがフレーズ生成に適すると考えられる。この「主よ人の望みの喜びよ」の極端にバランスの崩れたタイムスパン木から生成されたフレーズは相対的に悪い評価を受けており、良いバランスの木から生成される偏りの少ないフレーズの方が良いと考えられる。

評価実験でより良いと回答されなかった演奏はテンポ変化が不自然であるという理由によったものであった。この事は多階層にフレーズが付いている場合や階層数に偏りがある場合に、DM のフレーズアーチに関するパフォーマンス規則の k 値を調整するなどにより不自然さを改善する事も可能であろう。

DM では、演奏のテンポが指定可能な仕様にはなっているが、実際にはうまく動作しなかったため、初期値のテンポ^{*1}で演奏して実験した。そのため、GTTM データベース上に公開されている曲を DM で自動演奏すると、一般的な演奏のテンポとは大きく異なるテンポになってしまう例がある。評価実験の対象とした曲はそのような問題が起きないものを選んだが、問題が該当する曲についてはフレーズの生成法を評価しようとしても、テンポが速すぎる、遅すぎるといった違和感により必然的に悪い評価を受ける事や、そのような「聞きにくい」テンポでは上手く評価出来ない事が予想される。

より良い自動演奏を生成するためには曲の作られた時代やジャンルを考慮して DM のルールやパラメータを変更する必要があるだろう。例えばロマン派の音楽はテンポを

*1 おそらく四分音符=120 だと思われる。

大きく揺らしながら演奏する事が多いが、バロック音楽は基本的に一定のテンポで演奏し曲の終わりのみにリタルダンドをかける例が多いため、フレーズアーチ規則はロマン派の曲で強く影響させるべきだと言える。また、DM ではバロック音楽の特徴をモデル化し、曲の終わりを遅くするルール FINAL RITARD も提供されている [6]。

最後に、今回行った評価実験は 4 曲のみを対象とし、回答人数が 17 人と小規模なものであったため、結果の精度は高いとは言えない。そのため、評価には更なる検証が必要である。

6. おわりに

本研究では、DM による表情のある自動演奏を目的として、GTTM 木情報からフレーズを生成する手法を提案し、実装と評価実験を行った。

今後の課題として、フレーズ生成アルゴリズムの更なる検証などが挙げられる。また、GTTM の延長的簡約木に含まれる延長の情報もより良いフレーズ生成に活用できるかもしれない。本研究では人手によりなされた GTTM 楽曲解析の結果を利用したが、その解析の自動化も今後の課題の一つである。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20H04302 の助成による。

参考文献

- [1] Kirke, A. and Miranda, E. R., *A Survey of Computer Systems for Expressive Music Performance*, *ACM Computing Surveys*, 42(1), 3:1–3:41, 2009.
- [2] Friberg A., Colombo, V., Fryden, L. and Sundberg, J., *Generating Musical Performances with Director Musices*, *Computer Music Journal*, 24(3), 23–29, 2000. Director Musices software available from (<https://odysomay.github.io/clj-dm/>).
- [3] Lerdahl, F. and Jackendoff, R., *A Generative Theory of Tonal Music*, MIT Press, 1983.
- [4] Hamanaka, M., Hirata, K. and Tojo, S., *Implementing "A Generative Theory of Tonal Music"*, *Journal of New Music Research*, 35(4), 249–277, 2006.
- [5] Friberg A., *A Quantitative Rule System for Musical Performance*, PHD dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 1995.
- [6] Friberg, A., Bresin, R. and Sundberg, J., *Overview of the KTH rule system for musical performance*, *Advances in*

cognitive psychology, 2(2-3), 145-161, 2006.

- [7] HAMANAKA, M., *GTTM Dabase*, available from <https://gttm.jp/gttm/ja/database/>
- [8] Hamanaka, M., *Interactive GTTM Analyzer*, available from <https://gttm.jp/hamanaka/gttmeditor/>.
- [9] Huron, D., *Design principles in computer-based music representation., Computer Representations and Models in Music*, Academic Press, pp.5-59, 1992. Codes are available from <https://www.humdrum.org/>
- [10] Sapp, C., *Humdrum Extras*, Codes are available from <http://extras.humdrum.org/>
- [11] Goto, M., Sakai, M., *Extended kern2dm*, Codes are available from <https://git.trs.css.i.nagoya-u.ac.jp/transcription/humextra/-/tree/kern2dm>

付 録

A.1 実験データ

図 A.2 から図 A.5 に、実験に使用したフレーズアーチ付きの楽譜を、図 A.1 には DM で自動演奏する際に用いたルールパレットを示す。ここで、PHRASE-ARCH の各行の phllevel 1 から 4 は、楽譜上のフレーズ上位から順に対応している。また 1.4 は k 値でありその影響度を指示するものである。詳細は文献 [2] の表 1 などを参照されたい。

```
(in-package "DM")
(set-dm-var 'all-rules '(
  (Melodic-charge 1.0 )
  (HIGH-LOUD 1.0 )
  (MELODIC-CHARGE 1.0 :amp 1 :dur 1 :vibamp 1)
  (HARMONIC-CHARGE 1.0 :amp 1 :dur 1 :vibfreq 1)
  (DURATION-CONTRAST 1.0 :amp 1 :dur 1)
  (DOUBLE-DURATION 1.0 )
  (PUNCTUATION 1.1 :dur 1 :duroff 1 :markphlevel7 nil)
  (PHRASE-ARCH 1.4 :phlevel 1 :turn 0.5 :last 0.2 :amp 2)
  (PHRASE-ARCH 1.4 :phlevel 2 :turn 0.5 :last 0.2 :amp 5)
  (PHRASE-ARCH 1.4 :phlevel 3 :turn 0.5 :last 0.2 :amp 3)
  (PHRASE-ARCH 1.4 :phlevel 4 :turn 0.5 :last 0.2 :amp 2)
))
(set-dm-var 'sync-rule-list
  '((NO-SYNC NIL) (MELODIC-SYNC T)))
```

図 A.1 評価実験に使用したルールパレット

延長的簡約木, Alg.2

延長的簡約木, Alg.3

タイムスパン木, Alg.2

タイムスパン木, Alg.3

図 A.2 G. ホルスト/組曲「惑星」より木星
(GTTM DB No.49, 総拍数 24)

延長的簡約木, Alg.2

延長的簡約木, Alg.3

タイムスパン木, Alg.2

タイムスパン木, Alg.3

図 A.3 J.S バッハ/主よ人の望みの喜びよ
(GTTM DB No.70, 総拍数を 36 として計算したもの)

延長的簡約木, Alg.2

延長的簡約木, Alg.3

タイムスパン木, Alg.2

タイムスパン木, Alg.3

図 A.4 P. チャイコフスキー/「白鳥の湖」よりワルツ
(GTTM DB No.33, 総拍数 32)

延長的簡約木, Alg.2

延長的簡約木, Alg.3

タイムスパン木, Alg.2

タイムスパン木, Alg.3

図 A.5 M. ラヴェル/亡き王女のためのパヴァーヌ
(GTTM DB No.73, 総拍数 28)