

アゴギックルールのパラメータ値の自動決定システムの構築

小池宏幸†, 平賀瑠美‡, 五十嵐滋§, 水谷哲也§, 塩雅之§
†筑波大学 工学研究科 ‡筑波技術短期大学 §筑波大学電子・情報工学系

要約: 本研究は、当研究室において進められている音楽情報研究プロジェクト“PSYCHE”の一環であり、アゴギックに関する演奏ルールを楽曲に適用することによりクラシック音楽の芸術的演奏を自動生成することを目的とする。本稿では、ルールを楽曲に適用する際に必要なパラメータ値を自動決定するシステムについて述べる。また、人間の演奏からパラメータ値を計算する手法を3つ提案する。そして、ある楽曲の演奏から計算、決定したパラメータ値を他の楽曲に適用し、人間の演奏と比較することでそれぞれの手法についての考察を行った。

Automatic Decision System of Parameter Values for Agogic Rules

Hiroyuki KOIKE†, Rumi HIRAGA‡, Shigeru IGARASHI§,
Tetsuya MIZUTANI§, Masayuki Shio§
† Doctoral Program in Eng., Univ. of Tsukuba
‡ Tsukuba College of Technology
§ Institute of Information Science, University of TSUKUBA

Abstract: This study belongs to a computer music project PSYCHE and our purpose is generating artistic performance of classical music automatically by applying agogic rules to a musical piece. We describe about an automatic decision system of parameter values for agogic rules where three techniques of calculating parameter values from a performance by a human player are proposed. We also give consideration to each technique by comparing performances by human and a generated one by applying rules to a musical piece using parameter values that are decided from the performance by human.

1. はじめに

計算機による自動演奏を実現するための演奏の表情付けの研究には、ルールを用いて演奏生成を行う研究[1][2][3]や、ニューラルネットワークを用いて演奏生成を行う研究[4]がある。

筑波大学人工知能(音楽)研究室で行われている音楽情報処理研究プロジェクト“PSYCHE”は、ピアノなどのアコースティック楽器による、芸術的な自動演奏を目指してきた[5][6][7]。その一環である本研究は、楽曲構造に基いたアゴギック(agogic、テンポの緩急)に関する演奏ルールを用いた演奏生成を行っている。本研究において、既に導出されている演奏ルール[8]は、例えば「楽曲構造内部は緩やかに始まり、中心に向かって次第に速くなり、終端付近に向かって遅くなる」といったように、音楽的な言葉で楽曲構造内部におけるテンポの変化を表現し、適用位置は、対象楽曲の楽曲構造によって決定される。しかし、この中でどのように速くなるのかといったことや、どのくらい速いのかといったことについては明示されていない。そこで、各演奏ルールには、速度変化の形を決める表情基本関数と、具体的な速度を決定する為のパラメータ値が必要である。その為には、例えば人間の演奏からパラメータ値を定量化し、各ルール固有のパラメータ値を決定すること等が必要である。

本研究では、計算、決定の手法について研究を進めている。

本稿において、2章でルールを用いた演奏生成について述べ、3章では開発中のパラメータ値を自動決定するシステムと、システムが持つパラメータ値の計算、決定の手法について述べる。このパラメータ値決定の手法においては、楽譜情報をMIDIに変換したデータに対しルールを表情付け関数として適用することで、人間の演奏に近似した演奏を作り出す。演奏の自動生成に、この時得られるパラメータ値が用いられる。4章では各ルールのパラメータ値の獲得について述べ、5章では、計算、決定の手法を用いた実験結果を述べる。6章でその決定したパラメータ値を他の楽曲に用いることで人工的に演奏を生成し、人間の演奏と比較することで考察を行う。7章では、まとめと今後の課題を述べる。

2. 演奏ルールの適用による演奏生成

ルールを用いた演奏生成について述べる。

2.1. 概要

本研究の演奏ルールの適用による演奏生成において、入力には楽譜情報や人間の演奏等であり、その出力は演奏となる。図1に演奏ルールの適用による演奏生成の処理の流れについて示す。

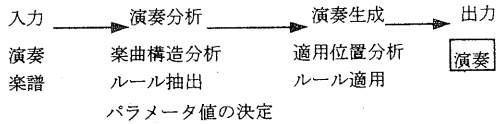


図1 演奏ルールの適用による演奏生成の処理の流れ

演奏分析とは、演奏生成の前処理であり、ここでは楽曲構造分析、ルール抽出、パラメータ値の決定が行われる。楽曲構造分析とは、楽譜を構造に分けることであり、ルール抽出とは楽曲構造に基いた定性的なテンポや大きさの変化を導出することである。パラメータ値の決定とは、ルールの適用に必要な定量化の為のパラメータ値を人間の演奏から計算し、各ルール固有のパラメータ値を決定することである。

演奏生成では、適用位置分析とルールの適用が行われる。適用位置分析とは、楽曲分析から得られた結果と楽譜情報、そして演奏ルールを基に、楽譜データ上におけるルール適用位置を決定することである。ルールの適用とは、適用位置分析の結果を基に、決定されたパラメータ値と表情基本関数を用いて、表情付けを行うことである。

本研究において、研究対象となる楽曲をロマン派時代に作曲されたピアノ曲のポロネーズと呼ばれるジャンルに限定する。ポロネーズとは民族舞踊の一つであり、4分の3拍子で中庸かゆるやかな速度を持つ。主として図2のようなリズムで、2拍目にアクセントがあり、図3のような女性終止形¹をとる。以下に、本研究において用いられる *agogic* に関するルールを挙げる。これらのルールは、音楽全般のものとポロネーズ特有のものがあり、経験的知識を基に導出されたものである [8]。

- Rule A. 楽曲構造内部は緩やかに始まり、中心に向かって次第に速くなり、終端付近に向かって遅くなる
- Rule B. 主導および、ポロネーズの2拍目のアクセントの位置の音は長めに弾かれる
- Rule C. 短音価で同音価の音列は次第に短く弾かれる
- Rule D. 周りの音に比べて、相対的に小さい音価の音は、より一層短く弾かれる
- Rule E. 1拍目の裏は短く弾かれる
- Rule F. 裏拍の内声は一貫して一層短く、あるいは一層長く弾かれる

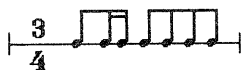


図2: ポロネーズの典型的リズム

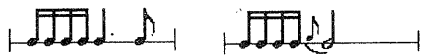


図3: ポロネーズの女性終止

2.2. 表情関数を用いた演奏生成

本研究における演奏生成とは、表情関数と呼ばれる関数に、表情付け関数を繰り返し掛け合わせることである。ルールの適用とは、各ルールによって決められた表情付け関数を表情関数に掛け合わせることで実現する。繰り返し掛け合わせる理由は、楽曲の同じ箇所にも数種類のルールが適用されるからである。図4に演奏生成と表情付けの関係を示す。

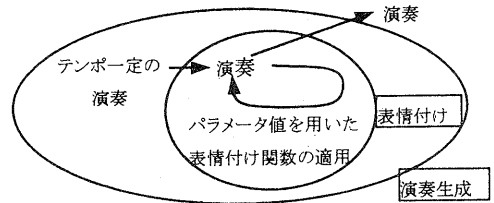


図4 演奏生成と表情付けの関係

表情関数とは、楽譜上の拍位置に対して、対象楽曲の平均拍あたり時間に対する指標をとったもので、楽曲の *agogic* を表す。この表情関数に、平均拍あたり時間を掛け合わせることで各音の演奏される長さが決定される。また、演奏生成を行う際に、表情関数の初期値はテンポ一定のデータとする。

定義

Q^{20} を非負有理数全体の集合、 S を Q^{20} の (ある) 切片とする。 $s \in S$ で楽譜上の拍の位置を表し、 $p \in M \subset Q^{20}$ で (各拍の音の *agogic* の) 倍率を表す。

定義

$\theta : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ を表情基本関数とよぶ。

本稿で表情基本関数は、以下の4つとする。それはいくつかの種類関数を適用して人間の演奏を再現した際、比較的良い結果出した表情基本関数が4分の1関数だったためである。

$$\theta_1(x) = -\sqrt{1-(x-1)^2} + 1$$

$$\theta_2(x) = -\sqrt{1-x^2} + 1$$

$$\theta_3(x) = \sqrt{1-(x-1)^2}$$

$$\theta_4(x) = \sqrt{1-x^2}$$

図5に $\theta_1 \sim \theta_4$ のグラフを示す。

定義

Θ を表情基本関数の集合、 E を表情関数の集合とする。このとき、表情付け関数として、以下の2種類を定義する。

$$g': \Theta \rightarrow S \rightarrow S \rightarrow M \rightarrow M \rightarrow E$$

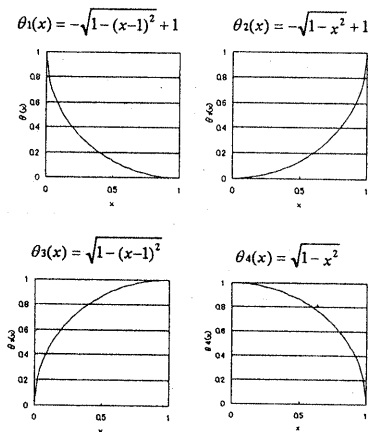


図5 表情基本関数の例

$$g^1(\theta, s_s, s_e, p_s, p_e, s) = \begin{cases} p_e - p_s \theta(x(s)) + \min\{p_e, p_s\} & s_e \leq s \leq s_e \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

但し、 $x = \frac{s - s_s}{s_e - s_s}$

s_s : 適用位置始点
 s_e : 適用位置終点
 p_s : 適用位置始点での倍率
 p_e : 適用位置終点での倍率

または

$$g^2: S \rightarrow S \rightarrow M \rightarrow M \rightarrow D \rightarrow E$$

$$g^2(s_s, s_e, p, q, r, s) = \begin{cases} (p - q + r)x(s)^2 + (2q - 2s - r)x(s) + q & s_e \leq s \leq s_e \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

但し、 p : 適用位置始点での倍率
 q : 適用位置終点での倍率
 $r \in \mathbf{R}$: 適用位置終点での関数の傾き

g^1 の形の表情付け関数は、表情関数に対する agogic の変化を倍率で表したものであり、表情基本関数、適用位置、倍率の3つのパラメータを持つ。適用位置を表すパラメータは、適用位置の始点と終点を表す2つのパラメータであり、倍率を表すパラメータは適用位置の始点と終点での倍率を表す。例えば、始点での倍率を1.2、終点での倍率を0.9とし、この範囲に単調減少する表情基本関数を適用すると、「終点の位置に向かって速くなる」表情付けになる。また、3節で述べる計算の手法3（最小2乗法を用いた手法）の場合のように、表情基本関数を2次関数としたときには、「適用位置の終点での関数の傾き」といったパラメータも加えた、 g^2 の形のものをを用いる。

表情関数の生成は、以下のようにテンポ一定の表情関数に繰り返し表情付け関数を掛け合わせるによって行う。

$$E_{j+1}(s) = E_j(s) \times g(\theta_{\lambda(j)}, s_{sj}, s_{ej}, p_{sj}, p_{ej}, s) \quad (\text{手法1,2})$$

$$E_{j+1}(s) = E_j(s) \times g(s_{sj}, s_{ej}, p_{sj}, p_{ej}, d, s) \quad (\text{手法3})$$

$E_j(s)$: 第j適用レベルの表情関数

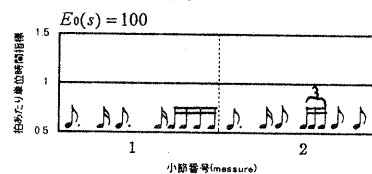
$$E_0(s) = 1 \quad (\text{テンポ一定})$$

$$\lambda(j) = 1, 2, 3, 4: \text{第j適用レベルの}$$

表情基本関数を示す添数

s_{sj}, s_{ej} : 対象楽曲の始点、終点の位置

また以下の図6に、テンポ一定の表情関数に mtf1 の前半を次第に速く演奏するような表情付け関数の適用例を示す。



mtf1 の前半を次第に速く演奏するような表情付け関数の適用例

$$E_1(s) (\theta_{\lambda(j)}(x) = \theta_1(x), s_{s1} = 0, s_{e1} = 1, p_{s1} = 1.2, p_{e1} = 0.8)$$



図6 表情付け関数と表情関数の例

3. パラメータ値自動決定システム

ここでは、本研究において開発中のパラメータ値自動決定システムについて述べる。

3.1. システムの概要

パラメータ値自動決定システムは、人間の演奏を入力として与えると、楽曲情報を基に楽曲分析を行い、ルールの適用位置を決定し、ある一人の演奏に基いて各ルールのパラメータ値を決定し、出力する。なお、楽曲分析は当研究室の楽曲分析支援システム Daphne (Declarative Analysis of Phrasing and Expression) [9][10] によって行われる。ルールの適用位置決定の自動化は、現在開発中である。

3.2. パラメータ値の計算、決定の手法

パラメータ値の計算とは、一人の演奏を基に、各ルールのある一箇所の適用位置におけるパラメータ値を導出することであり、パラメータ値の決定とは、いくつか計算されたパラメータ値を基にルール固有のパラメータ値を決めることである。

パラメータ値の計算の手法について、本稿では以下の3つの手法を採用する。なお、これ以降のグラフ中の階段状グラフは、音価データ換算グラフであり、もう一方のグラフは表情関数である。音価データ換算グラフとは、横軸に音

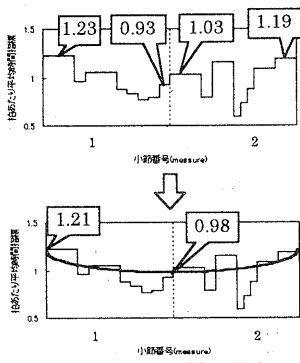


図7 手法1によるパラメータ値計算の例(Rule A-mtf)

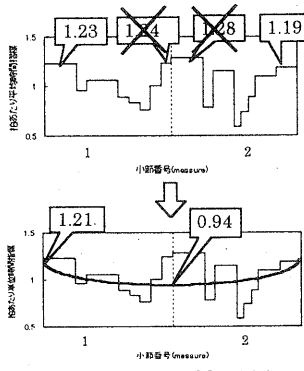


図8 手法2によるパラメータ値計算の例(Rule A-mtf)

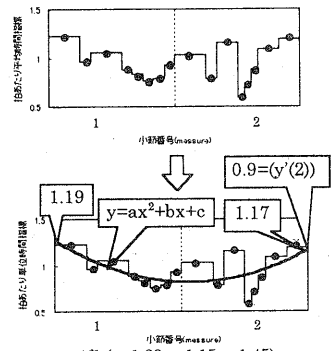


図9 手法3によるパラメータ値計算の例(Rule A-mtf)

の位置、縦軸に音毎の指標を取ったグラフである。

- 平均を用いた手法 (手法1)
- 音楽的特性を考慮した手法 (手法2)
- 最小二乗法を用いた手法 (手法3)

平均を用いた手法とは、もっとも単純なやり方で、ルール適用範囲における最初や最後、あるいは中心位置の音の拍あたり単位時間指標の平均を計算されたパラメータ値にする手法である(図7)。例えばRule Aの場合、適用範囲の最初と最後の音の平均を最大値とし、中心付近にある2音の拍あたり時間の平均値を最小値とする。

音楽的特性を考慮した手法とは、「音楽は伸びるところと縮むところがある」という特性を生かして、Rule Aのように適用範囲が大きいものに関して、適切な単位時間指標を基に、適用位置での表情関数の積分値の平均が1になるようにもう一つのパラメータ値を計算する手法である(図8)。また、値を決定した後に、演奏の表情関数を適用する関数で割ることで表情を一つ消して、次のパラメータ値を計算する。また、適用範囲の大きいルールから決定を行う。

最小二乗法を用いた手法とは、各単位時間指標データ点に近似させた2次多項式を最小二乗法により求め、適用範囲の始点の指標、終点の指標、そして終点での関数の傾きの値を計算されたパラメータ値とする手法である(図9)。手法2同様、値を決定した後に演奏の表情関数を適用する関数で割ることで表情を一つ消して、次のパラメータ値を計算する。但し、適用範囲の小さいルールから決定を行うことにする。

手法1は、単純な方法であり、その効果について検証し、有効な計算の手法を導出するきっかけにするために考案した。手法2は手法1の欠点を改良した手法である。そして、手法3は、表情曲線を最小二乗法を用いて導出する研究[11]を応用したものである。

また、パラメータ値の決定の手法について、本研究では、各々のルールについてある演奏者から計算されたいくつかのパラメータ値を平均することによってパラメータ値の決定をする。理由は、人間の演奏者からパラメータ値の計算をする手法ですら確立されていないため、先に考えるべきことは計算の手法であり、また平均することがもっとも単純で明確な手法であると考えたためである。

4. 各ルールのパラメータ値の獲得

本稿におけるパラメータ値の計算、決定の対象楽曲を、ショパン作曲「軍隊ポロネーズ(Op.40-1)」の冒頭8小節とし、その楽曲に適用できるルールを4つとする。

以下では、4つのルールについて、各ルールのパラメータ値の獲得について述べる。図10にルールの適用位置の例と、ルールの適用例を示す。以下の図中の表情関数および、音価データ換算グラフは、テンポ一定のデータにルールを適用した後のグラフを表す。

- Rule A
motifなどの楽曲構造に対して、その前半部と後半部の2ヶ所にそれぞれ θ_1 、 θ_2 を掛け合わせることで、パラメータ値の獲得を行う。また、前半と後半の関数の繋ぎ目における点において、2つの関数は滑らかになるようにする。また、motif、phrase、sentenceといった楽曲構造に対して、ルールをA-mtf、A-phr、A-senとする。

- Rule B
主導について、実際の演奏ではその音だけが伸びるのではなく、前の音列もその音に向かって次第に遅くなることが分かっている(Rule B-init)。そこで、主導的アクセントの前の音列を含めた位置に θ_3 を適用する。また2拍目の音はポロネーズアクセントの位置となり、そこに位置する音だけが伸びる(Rule B-pacc)ので、その

音の位置に定数を掛け合わせることにする。また、ポロネーズアクセントの位置が終止感を持つか持たないかで、パラメータが大きく違うことから、このパラメータ値について2つの場合を分けることにする。

• Rule C

例えば、16分音符のように短音価の音が3つ以上続くような音列の前半箇所、 θ_1 を適用することで、パラメータ値の獲得を行なう。

• Rule D

前後の音に比べて音価の小さい音はいっそう短く弾かれ (Rule D-snv)、3連符のそれぞれの音もいっそう短く弾かれる (Rule D-trp)。そこでそれぞれの音の位置に定数を掛け合わせることでパラメータ値の獲得を行う。

5. パラメータ値の計算

ここでは、3つの手法を用いて、パラメータ値の計算を行い、その結果を示す。

手法1、2、3を用いて、各ルールのパラメータ値を計算し、決定した結果をそれぞれ表1、2、3に示す。手法1で、sentenceに対するRule Aの適用について、Max値、Min値共に1になっているのは、決定されたMin値がMax値よりも大きかったため、不適切と判断した結果である。

また、手法3について、Rule B-pacc、D-snvについては、手法1、2同様、その音の拍あたり単位時間指標を計算されたパラメータ値とし、Rule D-trpは、3音について近似曲線から計算された3つの値を計算されたパラメータ値とする。

Rule	Max	Min	
A-mtf	1.153	1.064	
A-phr	1.166	0.942	
A-sent	1	1	
B-init	1.093	0.778	
C	0.848	0.792	
B-pacc	1.101	1.142	
D-snv	0.85		
D-trp	0.746	0.849	0.893

表1 手法1によって計算、決定されたパラメータ値

Rule	Max	Min	
A-mtf	1.185	0.949	
A-phr	1.251	0.942	
A-sent	1.161	0.905	
B-init	1.111	0.833	
C	0.906	0.851	
B-pacc	1.051	1.309	
D-snv	0.832		
D-trp	0.705	0.697	0.947

表2 手法2によって計算、決定されたパラメータ値

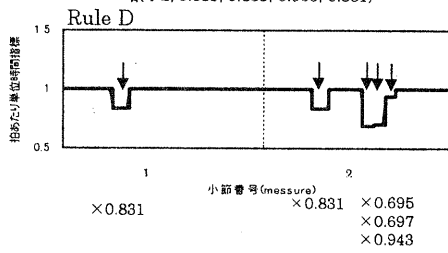
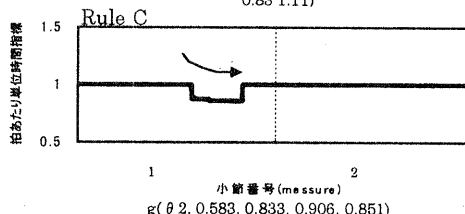
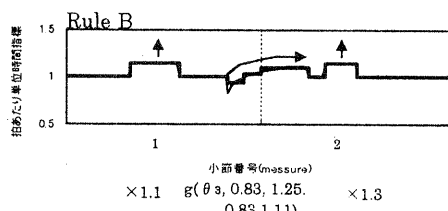
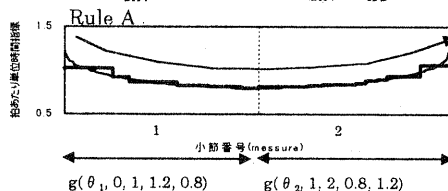
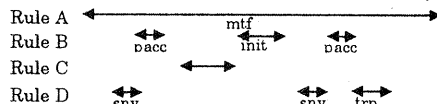
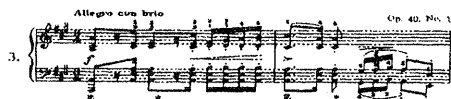


図10 ルールの適用位置と適用例

Rule	p	q	r
A-mtf	1.238	1.094	0.586
A-phr	1.299	1.120	1.120
A-sent	1.005	1.002	0.019
B-init	0.643	1.027	-0.134
C	0.897	0.713	-0.294
B-pacc	1.068		1.216
D-snv	0.842		
D-trp	0.750	1.109	1.432

表3 手法3によって計算、決定されたパラメータ値

6. 考察

図11に、手法1を用いて計算、決定したパラメータ値を英雄ポロネーズに適用した際における音価データ換算グラフを示す。細線グラフが

人間の演奏、太線グラフが今回生成した演奏を表す。この演奏についてピアニストの方から、違和感はないが、軽い感じがするといったことや、遅くなる箇所が溜めが足りないといった指摘を受けた。これについては表情基本関数の選択が正しかったかどうか考えてみる必要がある。

図 12 に、手法 2 の適用の結果を示す。この演奏については、1 小節目や 2 小節目の 2 拍目の裏拍と 3 拍目の拍頭の演奏に違和感があるという指摘を受けた。これは、それらの音の前後の音は伸びるルールが適用されているが、その伸び具合が大きいと想定と考えられる。これについては、「左手は一定のテンポで弾かれる」といった音楽的特性を考慮して、例えば伸び過ぎたり、縮み過ぎた音の長さを補正することが今後の課題の一つとなる。

図 13 に、手法 3 の適用の結果を示す。この演奏については、全体的に拍を強調し過ぎた演奏に聴こえるという指摘を受けた。これは、拍の頭の音が伸び過ぎているためであり、拍の頭に適用されるルール、例えばルール B-pacc などについて、計算の手法を改良する必要がある。

また手法 3 は、局所的に大きな変化を持つ音楽には不向きな手法と言え。例えば、計算する際に極端に伸びている箇所があると、その影響を強く受け、あまり良好な結果が得られないことがある。また、緩急の差について楽曲により大きな違いが見られることから、パラメータ値を定式化し、楽曲に応じてパラメータ値を変化させることが望ましいと考えられる。また、似た構造の繰り返しによるパラメータ値の変化も考慮する必要がある。

7. まとめと今後の課題

本稿において、ルールの適用に必要なパラメータ値を人間の演奏から計算する手法について述べた。システムの実装については、現在行っており、今後は実装中のシステムに、ルール情報を表すルールベース、楽曲情報を表すルールベース、決定したパラメータ値を格納する事例ベースの 3 つのデータベースを取り入れる予定である。

今後の課題としては、表情基本関数について考察を行うことが挙げられる。今回、表情基本関数として 4 分の 1 円状の関数を用いたが、今後は指数関数や楕円の任意の箇所を表情基本関数として実験を行うことを考えている。また、*dynamics* (音の強さ) に関してもルールを導出し、*agogic* 同様にパラメータ値を決定することも考えている。

参考文献

- [1] G. Widmer : Understanding and Learning Musical Expression, *Proc. of ICMC*, pp. 268-275, 1993.

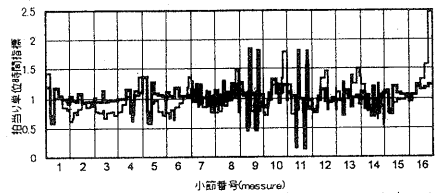


図 11 手法 1 により生成された演奏と人間の演奏の比較

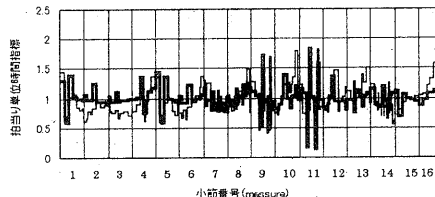


図 12 手法 2 により生成された演奏と人間の演奏の比較

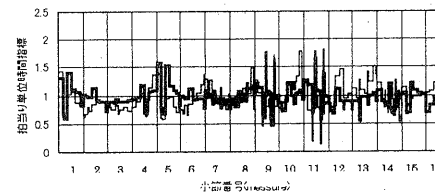


図 13 手法 3 により生成された演奏と人間の演奏の比較

- [2] 玉城謙一, 片寄晴彦, 井口征士 : 演奏ルールの抽出と再現, *情報処理学会*, 94-MUS-8, pp. 13-15, 1994.
- [3] 鈴木泰山, 徳永健伸, 田中穂積 : 事例ベースの演奏表情生成手法に関する研究, *情報処理学会*, 94-MUS-21, pp. 7-12, 1997.
- [4] 小田安彦, 白川健一, 村上豊, 梶川嘉延, 野村康雄 : 演奏者情報を加味したピアノの自動演奏システムの構築—ペロシティ、テンポにおける個人弾き癖抽出に関する一提案—, *情報処理学会* 第 50 回 (平成 7 年前期) 全国大会予稿集, pp. (1)-373-374, 1995.
- [5] 白川貴浩, 冨塚英省, 五十嵐滋 : 音楽処理の 2 つの試み, 第 29 回プログラミング・シンポジウム報告集, pp. 219-228, 1987.
- [6] 瀬富あかね, 平賀瑠美, 五十嵐滋 : 演奏ルールを用いる音楽表情の構造的展開, 1997 年度人工知能学会全国大会(第 11 回), pp. 280-282, 1997.
- [7] R. Hiraga, and S. Igarashi : Psyche : University of Tsukuba, Computer Music Project, *Proc. of ICMC*, pp. 297-300, 1997.
- [8] 小池宏幸, 一柳昌也, 五十嵐滋, 平賀瑠美 : 計算機によるアゴギクの解析と自動演奏への応用, 1998 年度人工知能学会全国大会(第 12 回), pp. 520-521, 1998.
- [9] 劉剣利, 平賀瑠美, 五十嵐滋, 関口由浩 : 楽曲分析システム DAHPNE—実際の楽譜上での自動分析, SIGMUS SS'99 (第 31 回研究会), 1999. (発表予定)
- [10] J. Liu, R. Hiraga, S. Igarashi : Music Analysis System—Daphne, *Proc. of ICMC*, 1999. (発表予定)
- [11] 五十嵐滋, 辻尚史, 千葉大春, 松下昌弘, 小川大典, 瀬富あかね, 清野桂子 : 演奏表情の表現と重奏システムへの応用, *情報処理学会* 第 36 回プログラミング・シンポジウム, pp. 47-56, 1995.