

伴奏者の演奏表現を考慮した伴奏システム

文俊明^{†1} 堀内靖雄^{†2} 黒岩眞吾^{†3}

概要: 伴奏システムとは人間の伴奏のように独奏者に協調した演奏を計算機で実現するシステムである。従来の伴奏システムは伴奏者の音楽的な演奏表現について考慮されていないことが多く、結果として伴奏システムの演奏が機械的で単調なものになってしまっていた。そこで本研究では独奏者の自由な演奏表現と伴奏者の演奏表現の両立を目的として、新たな伴奏制御手法を提案した。具体的には人間の演奏表現を、(1)拍内での時間タイミングを変化させる拍内の音価の微修正による演奏表現（リズム、アーティキュレーションなど）、(2)局所的に拍時間長を伸縮させる演奏表現（アゴギクなど）、(3)大域的なテンポ変化の演奏表現（リタルダンド、アツチレランドなど）の三種類に分離して、収録したデータからそれらの演奏表現を独立に抽出する手法を提案した。伴奏システムとの合奏時には独奏と伴奏の主従関係の程度を独立度として設定するのに加え、これら3種類の演奏表現を付与する度合いを表すパラメータ（表現度）も導入し、音楽表現の種類ごとに個別に表現表出の度合いを調整し、伴奏を制御することにより伴奏システムの演奏表現を実現した。提案システムを用いた主観評価実験の結果、伴奏システムが人間らしい音楽表現を実現可能であることが示された。

キーワード: 伴奏システム, テンポ制御, 演奏表現

1. はじめに

1.1 伴奏システムとは

伴奏システムとは独奏パートと伴奏パートの楽譜情報が事前に計算機に与えられている状態で、人間の独奏者の演奏に協調した伴奏を人間ではなく計算機で行うシステムである[1-9]。人間の演奏はテンポが変化するので、合奏を成立させるためには、独奏者と伴奏者が互いのテンポを合わせる必要がある。人間の独奏者の演奏時のテンポ変化は演奏表現の一部なのであらかじめ録音されたテンポ一定の伴奏に独奏者が合わせることは独奏者の演奏表現を制限することになる。また、人間同士の合奏では状況に応じて主従関係の度合いが変化し、伴奏者は独奏者に正確にテンポを合わせる場面と独奏者の演奏にあまり影響を受けずに伴奏者が自主的に演奏する場面が存在するので、後者の状況で独奏者にテンポを合わせてしまうと伴奏の演奏が不自然なものになってしまうことがある。よって伴奏システムは一定のテンポで伴奏を出力するのではなく、人間の伴奏者と同様に独奏の演奏を聴き、それに応じて伴奏のテンポを変化させること、伴奏自身の自然なテンポ変化を行うこと、また、状況によっては独奏者にテンポを合わせすぎず自主的に演奏することが必要である[9]。

1.2 伴奏システム処理の概要

本研究で開発している伴奏システムの概要を図1に示す。伴奏システムは最初に独奏者の演奏を楽器用の集音マイクを用いて音響情報として取得する。次に取得した音響情報を、事前に与えられている独奏パートの楽譜情報と照合し、独奏者の楽譜上での演奏位置をリアルタイムで推定する。独奏者の楽譜上の演奏位置を推定した後、楽譜上での独奏者の演奏位置と伴奏システム自身の演奏位置の履歴から伴奏制御を行い、独奏に対して適切な伴奏のテンポを

計算しながら、あらかじめ与えられている伴奏パートの楽譜を演奏する。伴奏には WAV ファイルなどのオーディオ形式の音源ではなく、MIDI (Musical Instrument Digital Interface) 規格の音源を用いる。MIDI 規格の音源はオーディオ形式の音源よりもテンポや音量の制御が容易であるという利点がある。テンポが修正された伴奏は MIDI 信号として MIDI 音源に送信され、音響信号に変換された後、スピーカーから出力される。

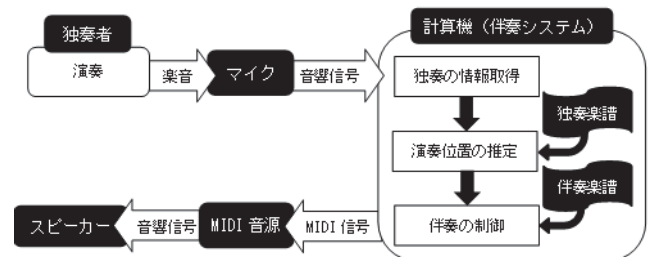


図1 伴奏システム処理の概要

1.3 演奏表現

演奏表現とは演奏者によるタイミング、時間長、音量等の意図的な変化のことであり、本研究では時間的な演奏表現を対象とする。本研究では、人間の演奏者は全ての音符ごとに制御を行っているのではなく、拍を基準として自分の演奏を行っているものと仮定し[9]、時間的な演奏表現を、(1)拍内での時間タイミングを変化させる拍内の音価の微修正による演奏表現（リズム、アーティキュレーションなど）、(2)局所的に拍時間長を伸縮させる演奏表現（アゴギクなど）、(3)大域的なテンポ変化の演奏表現（リタルダンド、アツチレランドなど）の三種類に分離して表現する。演奏表現を伴奏システムで実現することにより、伴奏システムの伴奏を人間の伴奏者の演奏に近づけることができると考えられる。従来の伴奏システムの多くは、伴奏者の演奏表

現を考慮していなかったため、伴奏システムの演奏が人間の伴奏者による演奏とは異なり、機械的で単調なものになってしまっていた。そこで本研究では、独奏の自由な演奏表現と伴奏の演奏表現を両立した、人間らしい表情豊かな演奏ができる伴奏システムの実現を目的として、新たな伴奏制御手法を提案し、実装した。

2. 関連研究

2.1 先行研究

伴奏システムに関連した研究では、主に独奏認識あるいは楽譜追跡、および伴奏制御の提案を行っている研究が存在する。ここでは、伴奏制御を行っている研究のなかで、伴奏の演奏表現を中心に研究しているものを扱う。我々の先行研究[9]では、伴奏システムの演奏表現を演奏プランとして事前にシステムに与えておき、伴奏システムが主導権を握る状況では独奏者からある程度独立して演奏プランに近い演奏を行い、独奏者が主導権を握る状況では独奏者に合わせた演奏を行うため、独立度と呼ばれるパラメータを定義して楽曲の状況に応じた合奏制御を実現した。関連研究[6][7]では伴奏パートがどのように「弾きたいか」を表現するテンポ軌跡を演奏表情付けシステムや人間の演奏から事前に作成した上で、伴奏パートと演奏者の主従関係により両者の誤差を補正する程度を表す結合係数を用いて伴奏の演奏を行うモデルを提案している。これらの先行研究では伴奏システムの演奏表現を保持しながら、テンポを変化させることによって人間の演奏者との協調動作を実現している。本研究では時間的な演奏表現を、大域的なテンポ変化、局所的な拍時間長の伸縮、拍内の音価の微修正の三種類に分離し、それらの音楽表現を個別に調整することにより、人間の演奏者と協調しながら、伴奏システムの音楽表現を実現する手法について検討を行う。

2.2 伴奏制御手法

先行研究[8]では人間同士の演奏を分析し、拍単位での伴奏制御方法が提案された。これは拍ごとに独奏者に協調するように伴奏のテンポを計算して伴奏を出力するという方法である。従来の伴奏システムのほとんどは独奏者と伴奏者の演奏イベントごとにテンポを調整するものであったが、我々は、人間の伴奏者は全ての音符ごとに制御を行っているのではなく、拍を基準として自分の演奏を行いながら、独奏者と協調するようにテンポを制御していると仮定し[9]、拍単位の伴奏制御モデルを提案した。その際、テンポの遅い曲の場合には半拍単位で制御を行うこともある。逆にテンポの速い曲の場合には2拍あるいは3拍をひとまとまりにして拍と考え制御を行うこともある。

独奏が独奏パートの音のうち n 番目の拍上にある音に到達した時刻を演奏時刻 T_n 、同様に伴奏が伴奏パートの拍上の音に到達した時刻を演奏時刻 t_n とする。また、伴奏の拍

時間長 l_n を伴奏の n 番目の拍と $n-1$ 番目の拍の演奏時刻の差として次式(1)で定義する。

$$l_n = t_n - t_{n-1} \quad (1)$$

伴奏のテンポ計算にはこの独奏と伴奏の演奏時刻から計算されるパラメータが使用される。計算に用いるパラメータは各拍における独奏と伴奏の演奏時刻のずれ d_n と伴奏の拍時間長変化 c_n であり、それぞれ次式(2),(3)で定義される。

$$d_n = T_n - t_n \quad (2)$$

$$c_n = l_n - l_{n-1} \quad (3)$$

式(2)において d_n が正の場合は伴奏が独奏よりも先行していることを意味し、 d_n が負の場合は伴奏が独奏よりも遅れていることを意味する。時間長変化 c_n は自分自身の演奏テンポを安定させるために1拍前の時間長に対して次の拍の時間長をどの程度変化させているかを表している。以上のパラメータを用いて前の拍の独奏・伴奏の演奏時刻情報がそろった時点で次拍の伴奏拍時間長変化を次式(4)で決定する。

$$c_n = \alpha d_{n-1} + \beta c_{n-1} \quad (4)$$

式(4)において各パラメータの係数 α および β は人間の合奏の収録データに対して重回帰分析を適用し、結果として求められる偏回帰係数を用いている[8,11]。すなわち、各パラメータの係数は人間同士の合奏における伴奏者のふるまいから決定されている。 c_n が決定されることで次式(5)により次拍の伴奏の拍時間長を決定することができる。

$$l_{n+1} = l_n + c_n \quad (5)$$

各パラメータの関係は図2のようになる。

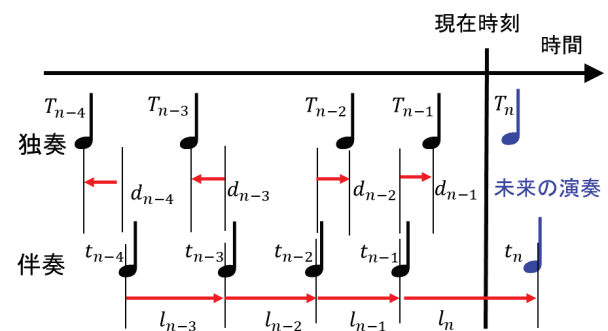


図2 テンポ計算用パラメータの関係

3. 提案手法

3.1 演奏表現の取得

本研究では人間の伴奏者の演奏表現を大域的なテンポ変化の演奏表現、局所的な拍時間長の演奏表現、拍内の音価の微修正による演奏表現の三つに分類し、あらかじめ収録した人間の伴奏者の演奏の録音からそれらを分離して個別に抽出する。まず、テンポ変化の演奏表現は人間の伴奏者の演奏の拍時間長 l_n から抽出する。我々の伴奏制御モデルの式(4)を、伴奏者一人の演奏時に当てはめると、ずれ d_n の

項がなくなり、結果として式(8)が得られる。

$$c_n = \beta c_{n-1} \quad (6)$$

$$l_n - l_{n-1} = \beta(l_{n-1} - l_{n-2}) \quad (7)$$

$$l_n = (1 + \beta)l_{n-1} - \beta l_{n-2} \quad (8)$$

式(8)において β は負の値を持つことから、我々のモデルにおける伴奏者は独奏の影響がないとき、自身の直前二つの時間長の重み付け平均で次の時間長を決定していることとなり、結果として、伴奏システム自身のテンポを安定させるように演奏を制御していることを表している。この伴奏制御モデルの考えに基づいて、観測することのできる拍時間長 l_n から、人間の伴奏者の大域的なテンポ変化の演奏表現を抽出する。具体的には、後述する局所的な拍時間長の演奏表現の影響を分離するために、拍時間長 l_n を次式(9)により移動平均で平滑化し、その後得られた拍時間長 l_n^{ave} に次式(10)を適用することで、拍 n における伴奏者の大域的なテンポに相当する拍時間長 g_n を求め、その軌跡を大域的なテンポ変化の演奏表現 $E_n^{(1)}$ とする。

$$l_n^{ave} = 0.1l_{n-2} + 0.2l_{n-1} + 0.4l_n + 0.2l_{n+1} + 0.1l_{n+2} \quad (9)$$

$$g_n = (1 + \beta)l_{n-1}^{ave} - \beta l_{n-2}^{ave} \quad (10)$$

$$E_n^{(1)} = g_{n+1} - g_n \quad (11)$$

局所的な拍時間長の演奏表現 $E_n^{(2)}$ は上述の大域的な拍時間長 g_n からの逸脱と考え、次式(12)で求める。

$$E_n^{(2)} = l_n - g_n \quad (12)$$

また、拍時間長を極端に引き延ばすような大きな拍時間長変化を伴う演奏表現が存在する場合、式(9)の移動平均による拍時間長の平滑化では、拍時間長の演奏表現の影響を分離できない。そこで特に大きい拍時間長の変化は付録に記した自然観測法により抽出し、外れ値として式(9)の移動平均の計算から除外することとした。

拍内の音価の微修正による演奏表現は拍内の音の時間長比率 U_m として表す。具体的には人間の伴奏者が演奏した m 番目の音の音長を s_m として、拍 n 内における音長 s_m の時間比率を拍内の演奏表現として次式(13)で表す。

$$U_m = \frac{s_m[msec]}{l_n[msec]} \quad (13)$$

音長 s_m は音符の発音時刻の間隔 (IOI, inter-onset interval) として定義する。

3.2 演奏表現の反映

伴奏システムが演奏する伴奏データは、人間の伴奏者の演奏データの拍時間長を一定にしたデータ (ヴェロシティやペダルの情報は含む) と上述の三種類の演奏表現データを用いる。拍時間長一定のデータを作成するため、拍時間長を L として、伴奏データの各音の音長 s_m を次式(14)によ

り補正する。 l_n は人間の伴奏者の演奏データの各拍の拍時間長であり、各拍の拍時間長 l_n が一定の拍時間長 L より長い時、拍 n 中にある音 m の音長 s'_m が短くなり、逆に拍時間長 l_n が一定の拍時間長 L より短い時、音長 s'_m は長くなる

$$s'_m = \frac{L[msec]}{l_n[msec]} s_m \quad (14)$$

式(14)を用いることで拍内の音の時間比率は保持したまま、すべての拍時間長を一定にしたデータが得られる。我々の先行研究の伴奏制御モデルは拍単位で制御されるため、拍内のテンポは一定として伴奏が出力される。よって拍内の音の時間比率を保持することで、実際の合奏時にはその拍内の音価の微修正による演奏表現を反映することができる。また、拍内の演奏表現が入っていない楽譜通りの演奏データと拍内の音の時間比率を比較することで、拍内の演奏表現の効かせ具合を調整することも可能である。具体的には、次式(15)により式(14)により補正した音長 s'_m と拍内の演奏表現が入っていない楽譜通りの演奏データの音長 $s_m^{(noexp)}$ を比較して、 s'_m と $s_m^{(noexp)}$ の重み付き平均をとった新たな音長 $s_m^{(new)}$ を求める。

$$s_m^{(new)} = A s'_m + (1 - A) s_m^{(noexp)} \quad (15)$$

式(15)のパラメータ A は拍内の演奏表現の表現度を表しており、0から1の範囲で設定する。

大域的なテンポ変化の演奏表現と局所的な拍時間長の演奏表現に関しては、もとの伴奏の拍時間長を一定にしたデータの拍時間長を、演奏表現 $E_n^{(1)}$, $E_n^{(2)}$ を用いて変化させることで、伴奏システムに反映する。

演奏表現の反映のため、独奏と伴奏には主従関係の度合いを設定する[9,10]。具体的には、伴奏システムがどれだけ独奏に追従するかを制御する独立度 I_n を用いて伴奏と独奏の主従関係を設定する。独立度 I_n が高いときは、伴奏システムは独奏の演奏にあまり影響を受けず、テンポ変化の演奏表現 $E_n^{(1)}$ と拍時間長の演奏表現 $E_n^{(2)}$ を用いて次拍の伴奏拍時間長を決定する。また、演奏表現 $E_n^{(1)}$, $E_n^{(2)}$ に関しては表現度 $R_n^{(1)}$, $R_n^{(2)}$ を用いて個別に制御する。パラメータ I_n , $R_n^{(1)}$, $R_n^{(2)}$ は0から1の範囲で楽譜の音楽的な状況に応じて拍ごとに手動で設定するが、基本的には音の数が多く細かい動きをするパートが主になるように設定する[6,9]。 I_n が0に近いほど独奏が主であり I_n が1に近いほど伴奏が主である。 I_n , $R_n^{(1)}$, $R_n^{(2)}$ を個別に設定した理由は伴奏の細かい制御を可能にするためである。例えばテンポは独奏者に合わせたいが、伴奏の局所的な拍時間長の演奏表現を反映したい場面では、 I_n , $R_n^{(1)}$ を低く $R_n^{(2)}$ を高く設定する。

伴奏システム使用時には、次式(16)を用いて、式(4)の伴奏制御モデルのパラメータを補正することにより、伴奏の独奏への追従の度合いと、テンポ変化の演奏表現の表現度合いを調整する

$$c_n = (1 - I_n) a d_{n-1} + \beta c_{n-1} + R_n^{(1)} \times E_n^{(1)} \quad (16)$$

伴奏が主であり、独立度 I_n が高いときは、伴奏制御モデル

における独奏者とのずれを表すパラメータ d_n が次拍の伴奏拍時間長に与える影響を減らす。また、テンポ変化の演奏表現は合奏のテンポに影響を与えるため、独奏にテンポを合わせるべき場面で、伴奏の演奏表現を優先してしまい独奏に追従できなくなるのは好ましくない。そこで、そのような場面では表現度 $R_n^{(1)}$ を低く設定し、テンポ変化の演奏表現 $E_n^{(1)}$ の影響を抑えるようにする。拍時間長の演奏表現の反映に関しては次式(17)を用いて、最終的に決定される次拍の伴奏拍時間長 l_{n+1}' を決定することで反映する。

$$l_{n+1}' = l_n + c_n + R_n^{(2)} \times E_n^{(2)} \quad (17)$$

先行研究では式(4)で決定された拍時間長変化 c_n と現在の拍時間長 l_n により次拍の伴奏拍時間長 l_{n+1} が決定されるが、それに対して新たな提案手法では式(16)で決定された拍時間長変化 c_n と現在の拍時間長 l_n 、表現度 $R_n^{(2)}$ に応じた演奏表現 $E_n^{(2)}$ により、次拍の伴奏拍時間長 l_{n+1}' が決定される。

我々の伴奏制御モデルは拍時間長の演奏表現による伴奏の補正は考慮していないので、伴奏制御時のテンポ計算に用いる過去の伴奏拍時間長 l_{n-k}' を次式(18)によって補正して、拍時間長の演奏表現による補正を行う前の拍時間長 l_{n-k} を復元することにより、先行研究の伴奏制御モデルと拍時間長の演奏表現による拍時間長の補正を組み合わせることが可能となる。

$$l_{n-k} = l_{n-k}' - R_n^{(2)} \times E_n^{(2)} \quad (18)$$

4. 評価実験

4.1 実験方法

実験は2名のフルート演奏者と2名のピアノ演奏者の協力の下で行い、演奏表現の表現度を5段階に調節した提案システムを使用してもらい、結果を比較した。具体的には第2章における式(15)、式(16)、式(17)、式(18)のパラメータ $A, R_n^{(1)}, R_n^{(2)}$ を 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 とすることで拍内の演奏表現と演奏表現 $E_n^{(1)}, E_n^{(2)}$ の表現度合いを調整した。独立度は楽曲内の状況に応じて決定し、すべての実験条件において同じ値を利用した。各演奏表現の表現度を0とした場合は、独立度によるテンポ変化の影響の分を除き、伴奏システムの挙動が従来システム[8]と等しくなるため、表現度0の場合を従来システムとして扱う。また伴奏データの収録に関しては2名のピアノ演奏者(ピアノ専攻の音楽大学生)に協力していただき、同一の曲で、異なる二種類の伴奏データ、演奏表現データの組を用意した。伴奏の音量変化に関しては、従来システム、提案システムともに、人間の演奏者の演奏における音量変化をそのまま利用した。

演奏曲目としてシューベルト作曲「しばめる花の主題による序奏と変奏曲」より「序奏」から2つの部分を抜粋したものを実験に使用した。

提案システムは Intel® Core™ i7-4500U CPU @ 1.80GHz

2.40GHz(8.00GB RAM), Microsoft Windows 7 Professional 2009(SP1)が動作するコンピュータ上で Microsoft Visual C++.net 2013 を用いて実装した。コンピュータ以外に MIDI 音源として Roland INTEGRA-7, 独奏の音響情報を取得するマイク用のオーディオインターフェースとして Roland UA-55 を用いた。実験において独奏者はスピーカーから流れる伴奏の音と自分の生の演奏音を聞きながら演奏を行った。

実験参加者は2つの演奏箇所に対して、2名の伴奏者の演奏表現の表現度合いを5段階に調節した計10種類の演奏表現を伴うシステムとの合奏をそれぞれ2回ずつ行った。すなわち実験全体では、2(演奏箇所) × 2(伴奏者数) × 5(表現度の段階) × 2(回数) = 40回の評価実験を2名のフルート演奏家(フルート専攻の音楽大学生一名と経験年数30年以上のアマチュア演奏家)に行っていた。システムの呈示順序はランダム(フルート演奏者ごとに逆順)とし、呈示順について演奏者には何も伝えなかった。

実験参加者には各伴奏が「機械的でなく人間らしい」伴奏であったかどうかを7段階で評価していただいた。伴奏が機械的であれば1を、人間らしい伴奏であれば7をつけていただいた。また、機械的か人間らしいか判断に迷う中間であれば、4をつけていただいた。

4.2 実験結果と考察

表1に実験結果を示す。評価点は、表現度別に16回(演奏箇所2箇所 × 演奏者2名 × 伴奏者2名 × 2回)の平均値を表している。

表1 実験結果(平均)

	表現度 0	表現度 0.25	表現度 0.5	表現度 0.75	表現度 1
評価点	2.1	3.4	4.6	5.1	6.1

表1より、表現度が高くなればなるほど、人間らしい伴奏であると評価される結果になった。すなわち、従来システムは提案システムよりも機械的であり、表現度の増加に伴い、徐々に人間らしい伴奏となることが示された。このことから人間らしい表情豊かな演奏が行える伴奏システムの実現という目的はある程度達成できたと考えられる。また、実験参加者が高い評価点を付けた合奏では、伴奏のテンポ変化が人間と演奏している感覚と近かったというコメントが聞かれた。条件の違いによって合奏が困難になったというコメントはなかったことから、独奏者の演奏にリアルタイムで協調することに加え、伴奏者の表情豊かな演奏表現を両立させることができたと考えられる。

5. おわりに

本研究では、人間の伴奏者の演奏表現を三種類に分離して、それぞれ個別に伴奏システムに反映する手法を提案し、伴奏システムに実装した。評価実験では三種類の表現度を

段階的に変化させたシステムとの合奏を行った結果、従来システムは機械的と評価され、表現度の増加に伴い、徐々に人間らしい伴奏となることが示された。

今後はより多くの曲、演奏者で評価実験を行う他、種類の演奏表現に関して個別に調整を行うことによる有用性の評価を行いたいと考えている。また、引き続き人間の演奏と機械の演奏の違い、さらに人間の演奏者の個性を分析することにより、より人間の演奏に近い伴奏を実現する伴奏システムを目指したい。

謝辞

本研究は科研費 17H00749 の支援を受けています。

参考文献

- [1] Dannenberg, R.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, *Proc. of ICMC*, pp. 193-198 (1984).
- [2] Vercoe, B.: The Synthetic Performer in the Context of Live Performance, *Proc. of ICMC*, pp. 199-200 (1984).
- [3] 中村栄太, 武田晴登, 山本龍一, 齋藤康之, 酒向慎司, 嵯峨山茂樹: 任意箇所への弾き直し・弾き飛ばしを含む演奏に追従可能な楽譜追跡と自動伴奏, *情報学論*, Vol. 54, No. 4, pp. 1338-1349 (2013).
- [4] Raphael, C.: Music Plus One and Machine Learning, *Proc. of ICML*, pp. 21-28 (2010).
- [5] Cont, A.: ANTESCOFO: Anticipatory Synchronization and Control of Interactive Parameters in Computer Music, *Proc. of ICMC* (2008).
- [6] 前澤陽: 自動合奏のためのタイミング結合モデル, *情報処理学会音楽情報科学研究会*, 2016-MUS-112, pp. 1-8 (2016).
- [7] AkiraMaezawa KazuhikoYamamoto, "MuEns: A Multimodal Human-Machine Music Ensemble for Live Concert Performance" CHI2017, May6-11, 2017, Denver, CO, USA
- [8] 和田静花, 堀内靖雄, 黒岩眞吾, "名演奏家の合奏録音における伴奏者の演奏タイミング制御の分析," *情報処理学会研究報告*. [音楽情報科学], 2013-MUS-100(9), pp. 1-6, 2013.
- [9] 堀内靖雄, 田中穂積, "自主性をもつ伴奏システム" *人工知能学会誌*, no.10(1), pp.72-79, 1995-01-01.
- [10] Yasuo Horiuchi, Hozumi Tanaka, "A Computer Accompaniment System With Independence", *Proc. of ICMC*, pp.418-420 (1993).
- [11] 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川薫, "合奏時の人間の演奏制御の分析・推定", *情報処理学会論文誌* 45(3), pp.690-697 (2004)
- [12] 飯島泰蔵, *自然観測法の理論*, 森北出版, 2000
- [13] 飯島泰蔵, *デジタル自然観測法*, 森北出版, 2001

付録

付録 A.1 自然観測法

自然観測法理論は、信号解析の新しい手法として飯島泰蔵東工大名誉教授により提唱されている波形の瞬時的な変化に着目した新しい波形解析法である[12]. 文献[13]では文献[12]の内容を離散的に適用したデジタル自然観測法についての論が展開されている。以下にデジタル自然観測法について概略を示す。

観測された任意の時系列データを $f(n)$ としたとき、恒等作用素 I , 遅延作用素 D をそれぞれ以下のように定義する。

$$If(n) = f(n) \quad (A1)$$

$$Df(n) = f(n-1) \quad (A2)$$

ここで、これらの作用素を用いて

$$\Gamma = (1-\lambda)I + \lambda D \quad (A3)$$

$$\Lambda = \lambda I - \lambda D \quad (A4)$$

の二つの作用素をそれぞれ定義する。 λ は $0 < \lambda < 1$ を満たす重み係数であり、標準値は $1/2$ とされている、ここで Λ を m 回作用させた作用素を Λ^m として、

$$X_m^{(M)} = \Gamma^{M-m} \Lambda^m (m = 0, 1, \dots, M) \quad (A5)$$

なる作用素を新たに考え、

$$n_m^{(M)}(n) = X_m^{(M)} f(n) \quad (A6)$$

という新たな時系列データを定義する。ここで、 M は位数、 m は次数と呼ばれている。 $n_m^{(M)}(n)$ は時系列データ $f(n)$ に対応する基本観測値と呼ばれる M 位の時系列データとなり、時刻 n における観測波形の瞬時的な変化を示したものである。このように観測波形 $f(n)$ に作用させることで、観測波形の瞬時的な変化を示す時系列データ $n_m^{(M)}(n)$ を与える $X_m^{(M)}$ を M 位 m 次基本観測フィルタと呼ぶ。また、式(6)は逆に M 位の時系列データ $n_m^{(M)}(n)$ から

$$f(n) = \sum_{m=0}^M \binom{M}{m} n_m^{(M)}(n) \quad (A7)$$

なる式によって完全にもとの時系列データ $f(n)$ に復元することができる。式(A6),(A7)はあわせて自然観測変換と呼ばれている。

本研究では、瞬時的な変化である拍時間長の演奏表現を抽出するため、拍時間長の時系列に基本観測フィルタを適用し、ある閾値を超えたとき、極端に大きい拍時間長の演奏表現がされたと判断した。とくに人間がある音の演奏時間長を長く引き伸ばしたときに拍時間長の演奏表現があらわれることが多いため、拍時間長が伸びている箇所を分析対象とした。また、本研究では基本観測フィルタ群から $m = 2$ とした場合の 2 次基本観測フィルタに着目した。基本観測フィルタのパラメータとしては、次数 m のほかに、 λ 及び位数 M がある。 λ は標準値の $\lambda = 1/2$ とした。位数 M は基本観測値 $n_m^{(M)}(n)$ が着目している時刻 n に対してそれよりも M 時点前までさかのぼる、次式(A8)で示される時系列の値から定まる量であることを表している。本研究では暫定的に $M = 8$ とした。

$$f(n-M), f(n-M+1), \dots, f(n) \quad (A8)$$