

伴奏システムにおける 独奏者の演奏意図学習のためのリハーサル

山田彩歌^{†1} 堀内靖雄^{†1} 黒岩眞吾^{†1}

概要：音楽情報処理の一分野として研究されている伴奏システムは、人間の伴奏者のように独奏者に協調した演奏を行うシステムである。より良い協調演奏のためにはリハーサルによる独奏者の演奏意図の学習が不可欠であり、この機能を伴奏システムに組み込んだ先行研究はいくつか存在するが、独奏者が伴奏から受ける影響を考慮していないといった手法上の問題があるのに加え、リハーサル機能の有効性の検証も十分ではなかった。そこで本研究では、独奏者の意図したテンポ表現をリハーサルで学習し、学習結果を次の合奏時のテンポ制御に利用することにより、独奏者の意図を反映した伴奏を実現した。本手法ではリハーサルの初期段階で独奏者が伴奏の影響を受けずに演奏意図をシステムへ伝えられるよう、独奏者単独での演奏による学習を可能とした。4名のプロフルート奏者による評価実験の結果、提案したリハーサル機能の有効性を確認することができた。

1. はじめに

音楽情報処理の一分野として音楽による人間と計算機との間のインタラクションに関する研究が行われている。その一つである伴奏システムは、主にクラシック音楽を対象とし、事前に独奏パートと伴奏パートの楽譜情報が計算機に与えられている状態で、人間同士の合奏における伴奏者のように人間の独奏者に協調した演奏を行うシステムである[1,2,3]。

我々の先行研究[4]では伴奏システムにおけるより人間らしいテンポ制御を実現するために、人間同士の MIDI ピアノ合奏（音価一定の単純な練習曲）を収録、分析し、過去数拍分の独奏と伴奏の演奏履歴から計算されるパラメータを用いた重回帰分析により人間の伴奏者のテンポ制御を予測するモデル（テンポ予測モデル）を提案した。また、プロの演奏家による合奏の市販 CD を分析することにより、これらのパラメータが一般的な合奏状況においてテンポ予測に有効であるかどうかを調査した[5]。その結果、テンポ予測モデルはテンポが安定している場面では有効であるが、音楽的な逸脱などによりテンポが大きく変動する場合はこのモデルではテンポ予測が困難であった。一方、人間の伴奏者はこのような音楽的な逸脱に対して、リハーサルや自身の音楽経験、知識から得た事前情報を使って適切なテンポ制御を行うことが可能である。そのため、伴奏システムにはテンポ予測モデルに加え、それらの事前情報を取り込む仕組みも実現する必要がある。

伴奏システムに事前情報を取り込むための機能として、1985年の Vercoe の研究以来、リハーサル機能を取り入れた伴奏システムが提案されている[6,7]。リハーサル機能とは、合奏時に独奏者の演奏情報とそこから計算されるパラメータを記録し、それを次回以降の合奏に利用するものである。独奏者の演奏情報には独奏者自身が持つ音楽的な経験や知識に基づいた演奏意図が含まれており、この演奏意図を適切に学習することによって伴奏制御が大きく改善す

ると期待される。そこで本研究では、伴奏システムにリハーサル機能を実装することによって独奏者の演奏意図を学習し、従来のテンポ予測モデルでは対応できないテンポ変化に対しても人間らしい伴奏制御を実現することを目的とする。

2. 提案手法の着眼点

2.1 リハーサルを取り入れた先行研究の問題点

上述のリハーサル機能に関する先行研究[6,7]はいずれも学習した情報を独奏追跡性能の向上に用いているが、その学習方法には複数の問題点がある。

一つ目は、独奏者が伴奏から受ける影響を考慮していないという問題である。学習が十分でない場合、伴奏システムは独奏者の意図と異なる演奏をする可能性があるが、独奏者はその場合、伴奏を完全に無視して、自分の意図するテンポで演奏することが難しいことがある。このような状況で学習した演奏情報には独奏者の意図が十分に反映されていないことがある。

二つ目は、独奏者が自分の意図通りに毎回同じテンポで演奏することを前提としているという問題である。リハーサルにおいて合奏を繰り返す場合、伴奏のテンポは毎回変化していくため、前述の伴奏の影響により独奏者の演奏も変動していくと考えられる。それに加え、独奏者の演奏にはその演奏意図とは無関係な微小な演奏のゆらぎも含まれている。そのため、独奏者の意図を学習する際にはそのゆらぎを取り除く仕組みとその微小変動への対応が必要であり、リハーサルで学習した情報を利用して伴奏制御を行う際には学習情報からの演奏の逸脱への対応が必要となる。

三つ目は、リハーサルの合奏だけでは独奏者の演奏意図を学習出来ない場合があるという問題である。例えば独奏者の長い音符や休符の途中など、独奏者自身の演奏によってテンポ変化を表現できない場合や、独奏者がテンポ自体は変えずに伴奏とわずかにタイミングをずらして演奏したい場合などである。特に後者の場合は、合奏を繰り返す毎

^{†1} 千葉大学

に伴奏のテンポが独奏者の意図とは異なる方向に変化してしまうことが起こり得る。

さらに、これらの先行研究は独奏追跡性能の改善を目的としているため、評価は録音データを用いた独奏の発音時刻の予測誤差計測が中心であり、独奏者の実演奏による合奏性能の評価が不十分である。そのため、本研究では上記の学習方法における問題点を解決するリハーサル手法を提案するとともに、複数の独奏者の実演奏によるリハーサル機能の評価を行う。

2.2 提案手法の概要

2.1 節で述べたリハーサルを利用した先行研究の問題点を受け、本研究で提案するリハーサルでは、リハーサルで学習した独奏者の演奏意図情報とテンポ予測モデル[4]を組み合わせて伴奏のテンポを決定することとした。これには2つの利点がある。一つ目は、初めて合奏を行う際に伴奏のテンポをある程度独奏者に合わせ、独奏者が自分の意図するテンポを表現しやすいようにすることである。独奏者が少しでも自分の意図に近い演奏を行うことができれば、合奏の繰り返しによって徐々に伴奏を独奏者の意図に近づけていくことができると考えられる。二つ目は、前回までの合奏での学習結果からの変動を吸収することである。先行研究[5]によりテンポ予測モデルはテンポ安定部での伴奏のテンポ変化をある程度予測できることが確認されているため、学習結果からの変動分だけを予測対象とすれば十分な精度が期待できる。

以上のように合奏時の演奏変動の吸収をテンポ予測モデルで行うようにしたため、学習した意図情報は演奏誤差を除いた独奏者のテンポ変化の骨組みを表すようにするのが望ましい。このため、リハーサルにおける毎回の合奏の後には入力された前回の意図情報とその回の独奏者の演奏から抽出された意図情報との重み付き和をとることによって、ランダムな変動は平均化し、毎回の演奏に共通する独奏者の真の意図を強調していくようにする。

また、独奏者が伴奏の影響を受けない状態で自身のテンポ表現をシステムに伝えるため、システムとの合奏前に予め独奏者一人での演奏を収録し、独奏者の演奏意図を学習することも可能とした。その後は学習した意図情報を用いて合奏を行う中で意図情報の微調整を行っていく。

その他、2.1 節で述べた演奏だけで独奏者の意図をシステムに伝えることが困難な場合においては、独奏者から伴奏システムへの言葉による指示（コマンド）によって伴奏制御を行えるようにした。

3. 提案手法

3.1 リハーサルの手順

リハーサルの手順を図1に示す。リハーサルにおける合奏

ではリハーサルデータ（テキストデータ）を入力する。これは独奏者の演奏意図として過去のリハーサルから学習した楽曲中の各拍の拍時間長（テンポ）を記録したデータである。

リハーサルを行う際にはまず、伴奏の演奏を出力せずに独奏者単独の演奏をシステムに入力することにより演奏区間の各拍の拍時間長を記録し、リハーサルデータの初期値とする（独奏者一人演奏）。この手順は省略可能で、図1では独奏者一人演奏を行わなかった場合に1回目の合奏からリハーサルデータの初期値を出力する処理を分岐によって表している。続いて合奏では、演奏中は前回の合奏や独奏者一人演奏で出力されたリハーサルデータを入力として伴奏制御に反映させ、演奏後には記録されたその回の独奏者の各拍の拍時間長を考慮してリハーサルデータを修正・更新する。合奏を繰り返すことで、リハーサルデータを独奏者の演奏意図に徐々に近づけていく。合奏後にはリハーサルデータの更新をして次の合奏に進むか、そこでリハーサルを終了するかの判断を独奏者自身が行い（更新・終了判断）、その回の自身の演奏に不満がある場合はリハーサルデータを更新せずに合奏をやり直すこともできる。その他、合奏の合間にリハーサルデータの内容を確認する目的で、独奏の入力を行わずにリハーサルデータの拍時間長をそのまま伴奏の拍時間長として演奏させることもできる（図1には記載されていない）。このとき、システムの認識ミスや独奏者の演奏ミスなどが原因で独奏者の意図と異なる演奏になったら、前に戻って学習をやり直すことができる。

楽曲1曲分のリハーサルを行う場合、図1の手順を曲全体に対して実行するだけでなく、フレーズのまとまりなどの楽曲中の一部の区間だけのリハーサルを行い、その区間のリハーサルデータを学習させることも可能である。

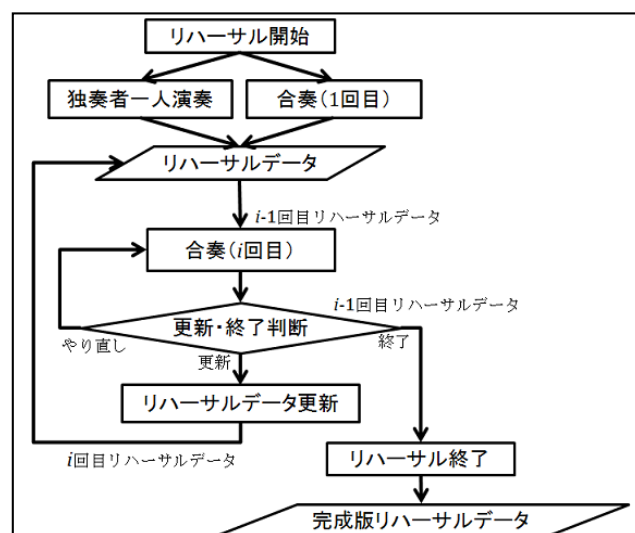


図1 リハーサルの手順

3.2 独奏者一人演奏

以下では独奏者一人演奏の際の詳細な処理を述べる。システムへは予め独奏パートの楽譜を入力しておく。演奏中はマイクで独奏の音響信号を取得し、音高、音量、スペクトル変化の情報から楽譜中の各音の発音タイミングの推定（独奏認識）を行い、その中から拍に当たる音の発音タイミング（独奏拍時刻 T_n^0 [ms]、 n は拍番号、 N は演奏区間の総拍数で $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ ）を記録する。演奏終了後には独奏拍時刻の差分から(1)式のように独奏拍時間長 L_n^0 [ms]（ $n = 1, 2, \dots, N - 1$ ）を計算する。これは独奏の $n - 1$ 番目の拍から n 番目の拍までの1拍分の時間長を表し、一般的に用いられるテンポの単位 bpm (beat per minute、1分間に演奏する拍数)などの逆数に相当する。

$$L_n^0 = T_n^0 - T_{n-1}^0 \quad (1)$$

ただし、拍上に音がなく、拍時刻が得られない拍の拍時間長は直前と直後の拍時刻の得られる拍 n と拍 $n + m$ の拍時刻の差を m 等分して(2)式のように拍時間長を計算し（ $k = n + 1, \dots, n + m$ ）、リハーサルデータの初期値 R_n^0 [ms]（ $n = 1, 2, \dots, N - 1$ ）として出力する（(3)式）。

$$L_k^0 = (T_{n+m}^0 - T_n^0) / m \quad (2)$$

$$R_n^0 = L_n^0 \quad (3)$$

3.3 合奏中のテンポ制御

以下では i 回目（ $i = 1, 2, \dots$ ）の合奏中の処理の流れを説明する。独奏認識部と伴奏スケジューリング部によって n 拍目の独奏拍時刻 T_n^i [ms]と伴奏拍時刻 t_n^i [ms]がそれぞれ検出されると、先行研究のテンポ制御モデル[4]で $n + 1$ 拍目の拍時間長（モデル拍時間長 l_{n+1}^i [ms]）が計算される。その際、伴奏の時間長変化のパラメータ c_n^i の計算では、リハーサルによる時間長変動分を差し引いて計算される(3.4節参照)。そこへ(4)式のように $i - 1$ 回目のリハーサルデータ R_{n+1}^{i-1} と R_n^{i-1} （ $n = 1, 2, \dots, N - 2$ ）の差分をとって拍時間長変化としたものを加算して、スケジューリング部に送る最終的な伴奏拍時間長 l_{n+1}^i （独奏者の意図したテンポ表現を反映した拍時間長）とする。

$$l_{n+1}^i = l_{n+1}^{i-1} + (R_{n+1}^{i-1} - R_n^{i-1}) \quad (4)$$

ただし、演奏区間冒頭でテンポ制御モデルの計算に用いるパラメータ（次節参照）が計算できない場合（ $n = 0, 1$ のとき）はリハーサルデータの拍時間長をそのままスケジューリング部へ送る。また、1回目の合奏の際は、独奏者一人演奏を行った場合はそこで出力されたリハーサルデータの初期値が用いられ、そうでない場合はテンポ予測モデルで計算した拍時間長がそのままスケジューリング部へ送られる。

3.4 拍単位のテンポ予測モデル

本リハーサル手法における合奏の際にはリハーサルデータで独奏者の演奏意図を伴奏のテンポに反映する他に、

先行研究のテンポ予測モデル[4]を用いた制御を加えることにより、リハーサルデータからの変動を考慮した独奏者への追従や伴奏テンポの一貫性を実現する制御を行っている。テンポ予測モデルはリハーサルによる学習が進んだ段階では独奏者の毎回のテンポ表現の揺らぎ（変動）に対応するために伴奏テンポを微調整する役割を果たし、学習が十分に進んでいない段階における合奏（特に1回目の合奏）では独奏者が自分の意図するテンポを表現しやすくする役割を果たす。本節では先行研究[4]で提案されたモデルを説明した後、リハーサル合奏へ適用するための修正点について述べる。

テンポ計算の際には独奏と伴奏の拍時刻から計算されるパラメータが使われる。パラメータはずれ d_n^i [ms]と拍時間長変化 c_n^i [ms]の2種類であり、それぞれ次式(5)、(6)で定義される。

$$d_n^i = T_n^i - t_n^i \quad (5)$$

$$c_n^i = l_n^i - l_{n-1}^i \quad (6)$$

式(5)中の T_n^i [ms]、 t_n^i [ms]はそれぞれ独奏、伴奏の n 拍目の拍時刻を表している。また式(6)中の l_n^i [ms]は伴奏の拍時間長である。拍時間長 l_n^i は伴奏の n 番目の拍と $n - 1$ 番目の拍の演奏時刻の差として次式(7)で計算される。

$$l_n^i = t_n^i - t_{n-1}^i \quad (7)$$

以上から、ずれ d_n^i は n 番目の拍における独奏と伴奏の演奏時刻のずれを表し、拍時間長変化 c_n^i は n 番目の拍における伴奏の一拍分の時間長の変化量を表していると言える。これらのパラメータを用いて直前の拍の独奏・伴奏の演奏時刻が揃った時点で次の拍の伴奏の拍時間長変化 c_{n+1}^i を次式(8)で予測し、それを前の拍の拍時間長 l_n^i に加算することで次の拍の拍時間長（3.3節におけるモデル拍時間長） l_{n+1}^i を決定する。

$$c_{n+1}^i = \sum_{j=0}^p \alpha_j d_{n-j}^i + \sum_{k=0}^q \beta_k c_{n-k}^i \quad (8)$$

式(8)における係数 α_j 、 β_k の値は人間同士の合奏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重回帰係数としている。以上から式(8)は人間の伴奏者の次拍のテンポを独奏と伴奏の過去の拍の演奏時刻の履歴から予測するモデルであると言える。テンポ計算の際の各パラメータの関係を図2に示す。

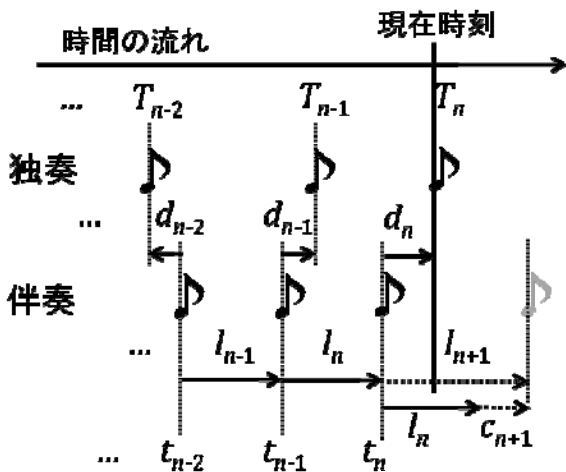


図2 テンポ計算用パラメータの関係
(実線は実測値, 点線はモデルによる予定値)

なお, (8)式のモデルは楽曲のテンポ安定部で独奏者による音楽的なテンポ変化が少ない箇所では有効性が確認されているが, 独奏者の音楽的な意図による大きなテンポ変化は予測できないことが指摘されている[5]. そこで演奏者の意図によるテンポ変化が存在する場合は, 音楽的な変動はリハーサルデータから予測することとし, (8)式のモデルにおける拍時間長変化 c_n^i はリハーサルデータによる拍時間長分を補正する(リハーサルデータ分を差し引く). すなわち, 演奏者の意図に基づく音楽的なテンポ変化はリハーサルデータで表現されていると仮定し, その分を補正することにより, テンポがほぼ一定の状況で適用可能な(8)式のモデルが適用可能であると考えられる. そこで, リハーサルデータの影響がある場合は(6)式の代わりに以下の(9)式で(8)式のモデル計算の右辺に用いる c_n^i を計算する.

$$c_{n-k}^i = l_{n-k}^i - l_{n-k-1}^i - (R_{n-k}^{i-1} - R_{n-k-1}^{i-1}) \quad (9)$$

3.5 合奏後のリハーサルデータの更新

以下では合奏後のリハーサルデータの更新の流れを述べる. まず独奏者一人演奏の演奏後にリハーサルデータの初期値を出力する処理と同様に, 合奏中に記録した独奏の拍時刻から(10)式によって拍時間長 L_n^i を計算し, 拍時刻が得られない区間は(11)式で拍時間長を求める. その後に合奏中のテンポ制御にも用いられた $i-1$ 回目のリハーサルデータ R_n^{i-1} と L_n^i との重み付き和((12)式)によって i 回目の出力リハーサルデータ R_n^i を計算する. ただし, 独奏者一人演奏を行わない場合の1回目合奏でリハーサルデータの入力がない場合は, 独奏者一人演奏と同様に独奏拍時間長をそのままリハーサルデータとして出力する. 毎回のリハーサルデータの更新時に重み付き和をとるのは, 独奏者の拍時間長から意図的なテンポ表現とは無関係な演奏の微小変動を除去するためである.

$$L_n^i = T_n^i - T_{n-1}^i \quad (10)$$

$$L_k^i = (T_{n+m}^i - T_n^i)/m \quad (k = n+1, \dots, n+m) \quad (11)$$

$$R_n^i = w_l L_n^i + w_r R_n^{i-1} \quad (w_l + w_r = 1) \quad (12)$$

3.6 コマンドによる伴奏テンポ制御

以上で述べたように, 提案するリハーサルでは独奏者の意図を独奏者自身の演奏から抽出し, 伴奏システムに伝えることを原則としている. しかしながら, 2.1節で述べたように独奏者の演奏だけではシステムに意図を伝えられない場合も存在する.

この問題に対して我々は, リハーサルにおいて演奏以外に自然言語による伴奏システムへの直接的な意思伝達を行う「コミュニケーション・フェーズ」を提案しており[8], 本節で述べる独奏者から伴奏システムへのコマンドによる指示も「コミュニケーション・フェーズ」と同様の考えに基づくものである. 「コミュニケーション・フェーズ」では, 独奏者が伴奏システムに対して言葉(音声等)によって意図を伝え, それを元に伴奏システムの持つ内部データ(本研究におけるリハーサルデータのようにリハーサルで学習の対象とするデータ)を修正するが, 本研究ではリハーサルデータを演奏で表現された独奏者の意図を表すデータと位置付けているため, コマンドはリハーサルデータを修正するためではなく, 伴奏システムのテンポ制御自体を操作するために入力するものとする.

図3にコマンドデータの記述例を示す. コマンドデータは1行に一つのコマンドを記述したテキストファイルで, コマンドは「開始拍 コマンド名 引数」の書式で書かれ, 引数を複数入力するコマンドも存在する. 現在入力可能としているコマンドは楽譜の速度記号を元にした以下の6種類であるが, 今後コマンドを用いた評価実験を行う中で追加機能の必要性が明らかになった場合は順次追加していく予定である. なお, コマンドによる伴奏制御を行った場合もリハーサルデータを利用した場合と同様に, 後の拍のテンポ予測計算(3.4節の(8)式)に用いる拍時間長変化 c_n^i からコマンドによる変化分を差し引く

- **set_bpm** コマンド: J=150などの定量的なテンポを指定する速度記号に相当するコマンドで, 引数はテンポ[bpm]とする. 伴奏制御では開始拍のテンポを強制的に引数のテンポに合わせ(図3では開始拍が3拍目なので3.3節の l_3^i を150bpmに当たる拍時間長に強制変化させる), 続く拍は通常のテンポ制御を行う.
- **piu_mosso** コマンド: 急なテンポ加速に相当するコマンドで, 引数はテンポ変化量[bpm](何bpm加速するか)とする. 伴奏制御では開始拍のテンポを一つ前の拍のテンポから引数分だけ加速したテンポに強制的に合わせ, 続く拍は通常のテンポ制御を行う.
- **meno_mosso** コマンド: 急なテンポ減速に相当するコマンドで, 引数はテンポ変化量[bpm](何bpm減速するか)とする. 伴奏制御方法は **piu_mosso** と同様.

- **fix_bpm** コマンド: 第 1 引数に終了拍, 第 2 引数にテンポ[bpm]を指定する. 伴奏制御では開始拍から終了拍までのテンポを引数で指定したテンポに固定する. このコマンドによって, 独奏者の演奏とは独立にテンポを指定することが可能となる.
- **accelerando** コマンド: 緩やかな加速に相当するコマンドで, 第 1 引数に終了拍, 第 2 引数にテンポ変化量 [bpm] (何 bpm 加速するか) を指定する. 伴奏制御では開始拍で目標テンポの設定 (開始拍の一つ前の拍のテンポから第 2 引数のテンポ変化量分だけ加速したテンポを目標テンポとする) を行い, 終了拍の 1 つ後の拍のテンポが目標テンポになるように徐々に加速していく. 第 2 変数は省略することもでき, その場合は終了拍の 1 つ後の拍のリハーサルデータを目標テンポとする. この方法で求めた目標テンポが開始拍の一つ前の拍のテンポよりも遅くなる場合は開始拍から終了拍までの区間の長さに応じて適切な目標テンポを設定する.
- **ritardando** コマンド: 緩やかな減速に相当するコマンドで, 第 1 引数に終了拍, 第 2 引数にテンポ変化量 [bpm] (何 bpm 減速するか) を指定する. 伴奏制御方法は **accelerando** と同様.

```
1 fix_bpm 2 140 (1~2拍目のテンポを140bpmに固定)
3 set_bpm 150 (3拍目のテンポを150bpmに)
11 ritardando 15 20 (11~15拍目の間に20bpm減速)
16 piu_mosso 20 (16拍目で20bpm加速)
17 accelerando 20 (17~20拍目の間、徐々に加速)
   :
   :
```

図 3 コマンドデータの例 (()内は指示したい内容)

コマンドによる伴奏制御は人間同士のリハーサルにおいて独奏者が口頭で伴奏者に指示を出す過程を模倣したもので, 独奏者の指示した内容を楽譜に書き込み, 次回合奏では書き込み内容を参照しながら演奏する手順をイメージしている. それゆえ, コマンドによるテンポ制御はリハーサルデータによる制御よりも優先されなければならない. また, コマンドは将来的には GUI を用いて入力することを想定しており, 画面に表示した楽譜上に各コマンドに相当するブロックを配置し, ブロック上の引数入力欄に引数を入力する方法を考えている. この方法によって, コマンド入力をより直感的に行えるだけでなく, 過去にどのようなコマンドを入力したかを容易に参照できるようになると期待される.

4. 評価実験

実験では 4 名のプロのフルート奏者に 3 章で提案したリハーサルを行ってもらい, リハーサルによる学習結果を伴奏制御に用いることの有効性と一人演奏による学習の有効性を主観評価と独奏・伴奏のずれによって評価する.

4.1 実験方法

実験に参加した演奏者はフルート演奏歴 48 年の音楽大学フルート専攻の卒業生 (以下独奏者 A), フルート演奏歴 31 年の音楽大学大学院フルート専攻の修了生 (以下独奏者 B), フルート演奏歴 21 年の音楽大学フルート専攻の卒業生 (以下独奏者 C), フルート演奏歴 18 年の音楽大学フルート専攻の卒業生 (以下独奏者 D) の 4 名である.

演奏曲目としてエルガー作曲「愛の挨拶」(以下収録曲 1), クライスラー作曲「美しきロスマリン」(以下収録曲 2) の 2 つの楽曲を用意し, 収録曲 1 は冒頭 18 小節 (前奏含む), 収録曲 2 は冒頭 17 小節を実験に使用した. また, 独奏者には実験日より前に市販のフルート用楽譜 (速度記号, 強弱記号などの楽譜記号が予め書き込まれているもの) を渡し, 予め自身の解釈に基づいた演奏表現を決定してもらい, その表現に基づいた楽譜への書き込みも自由に行ってもらい, 実験中に参照してもらった. また, 拍時刻を詳細に分析するため, 上記 2 曲は装飾音等を除外するように若干の編曲を加えた.

実験では独奏者 4 名 (独奏者 A, 独奏者 B, 独奏者 C, 独奏者 D) に, 2 種類の楽曲 (収録曲 1, 収録曲 2) に対して合奏前に独奏者一人演奏を行う場合 (一人演奏あり) と行わない場合 (合奏のみ) の 2 種類のリハーサルを順序効果による楽曲やシステムへの慣れの影響を考慮して一人一人異なる順序で行ってもらった.

独奏者には, 一人演奏を行う際は予定した演奏表現をそのまま演奏し, 合奏のみリハーサルの最初の合奏の際は伴奏に合わせるのではなく自身の演奏表現をそのまま演奏して, 伴奏システムにその意図を教え込むように指示した.

リハーサル中の毎回の合奏後には独奏者自身の意図通りの伴奏を 10 としたときのその回の伴奏の満足度を 1~10 の 10 段階で主観評価してもらい, 伴奏が満足できるレベルに達するまで, あるいはそれ以上リハーサルを続けても満足度が変化しないと感じるまで合奏を繰り返してもらった. 伴奏システムの各音の音量は全て一定とし, 原則としてテンポ変化のみで評価してもらった. この主観評価の他に, 定量評価として毎回の合奏時に記録される独奏と伴奏の拍時刻のずれ (3.5 節の(5)式で定義される d_n^i) を求め, リハーサルにおいて合奏を繰り返すことでずれがどのように変化するかを調べた.

なお, 合奏開始の合図として我々の先行研究[9]で実装されたプレスによる合図を利用している.

4.2 実験結果と考察

合奏のみリハーサルの1回目, 2回目, 最終回の合奏と一人演奏ありリハーサルの1回目(一人演奏による学習を行った後の状態で, 演奏としては2回目に当たる), 最終回の合奏における主観評価と独奏と伴奏のずれ[ms]の平均を表1に示す.

表1 主観評価とずれの平均

学習方法	合奏のみ			一人演奏あり	
	1	2	最終	1	最終
合奏回数	1	2	最終	1	最終
主観評価	5.1	6.1	9.5	6.4	9.3
ずれ[ms]	84.0	56.6	43.7	47.6	41.7

表1から, 未学習の状態(合奏のみリハーサルの1回目合奏)よりも1回以上の学習を行った状態の方が主観評価・ずれともに改善していることが読み取れる. また, t検定を行った結果, 最終合奏と未学習の状態との間に有意差が見られた(主観評価では合奏のみの最終合奏と未学習の合奏において $P(T \leq t) = 1.6 \times 10^{-5}$, 一人演奏ありの最終合奏と未学習の合奏において $P(T \leq t) = 1.7 \times 10^{-5}$, ずれでは合奏のみの最終合奏と未学習の合奏において $P(T \leq t) = 0.007$, 一人演奏ありの最終合奏と未学習の合奏において $P(T \leq t) = 0.012$ となった). このことから, リハーサルによる学習はテンポ制御の改善に有効であり, 学習回数を重ねることでより良い合奏が行えるようになったと言える.

また, 合奏のみリハーサルの2回目と一人演奏ありリハーサルの1回目(どちらも学習を1回行った状態に当たる)を比較すると, ずれは後者の方が改善されており, t検定における有意傾向($P(T \leq t) = 0.056$)も確認できたが, 主観評価の方は有意差が見られなかった. ただし, 合奏のみでは1回目から2回目にかけてのずれの減少が大きいため2回目の評価が相対的に高くなったことが考えられ, このことを考慮すれば一人演奏ありの方が早い段階で完成度の高い合奏を実現できると考えられる. なお, 最終回の合奏においては2つの方法で差は見られなかった.

5. おわりに

本研究ではリハーサルによって伴奏システムに独奏者の意図したテンポ表現を学習させる方法を提案・実装した. 4名のプロのフルート演奏家による評価実験の結果, リハーサルの学習結果を伴奏制御に用いることの有効性と独奏者一人演奏による学習の有効性が確認できた.

今後はリハーサル中にコマンドによる伴奏制御を行った場合の評価実験やより正確に独奏者の演奏意図を学習するための独奏認識部の精度向上などに取り組み, より使いやすく効果的なテンポ制御の学習を目指す. また, 多くの演

奏家の演奏意図を学習し, それらの統計を取ることで, 伴奏システムに音楽的知識と呼べるような汎用性の高いテンポ制御の学習をさせることや, テンポ制御以外の表情(強弱やアーティキュレーションなど)の学習を可能とするといった機能拡張により, さらに完成度の高い伴奏を目指していく.

参考文献

- [1] R. B. Dannenberg, "An On-line Algorithm for Real-time Accompaniment," Proc. of ICMC, pp. 193-198, 1984.
- [2] B. Vercoe, "The synthetic performer in the context of live performance," Proc. of ICMC, pp. 199-200, 1984.
- [3] 中村友彦, 水野 優, 鈴木孝輔, 中村栄太, 樋口祐介, 深山 覚, 嵯峨山茂樹, "音楽演奏の誤りや反復に頑健な音響入力自動伴奏," 日本音響学会秋季研究発表会講演集, pp. 931-934, 2012.
- [4] 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, vol.45, no.3, pp. 690-697, 2004.
- [5] 和田静花, 堀内靖雄, 黒岩真吾, "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.
- [6] B. Vercoe, M. Puckette, "Synthetic Rehearsal: Training the Synthetic Performer," Proc. of ICMC, pp. 275-278, 1985.
- [7] C. Raphael, "A Probabilistic Expert System for Automatic Musical Accompaniment," Journal of Computational and Graphical Statistics, vol.10, no.3, pp. 487-512, 2001.
- [8] 堀内靖雄, 奥井学, 鈴木泰山, 田中穂積, "伴奏システムのためのリハーサル," 情報処理学会研究報告, Vol.94, No. 103, pp. 51-56, 1994.
- [9] 大三川晴香, 堀内靖雄, 西田昌史, 黒岩真吾, "曲中のプレスによる合図を利用した伴奏システム," 情報処理学会研究報告. [音楽情報科学], 2009-MUS-81(26), pp. 1-6, 2009.