

伴奏システムのためのリハーサル

Rehearsal for the Accompaniment System

堀内 靖雄
Yasuo Horiuchi

奥井 学
Manabu Okui

鈴木 泰山
Taizan Suzuki

田中 穂積
Hozumi Tanaka

東京工業大学 工学部
Tokyo Institute of Technology

この論文で我々は伴奏システムのためのリハーサルについて述べる。伴奏システムとは人間の独奏者の演奏にテンポなどを合わせて、その伴奏を行なうシステムであるが、同じ曲でも独奏者ごとに異なる演奏をするので、システムを独奏者ごとに適応させる必要がある。Vercoe は本番の演奏前に何回かリハーサルを行なう方法を提案しているが、その方法では独奏者の演奏の癖を認識するまで数多くのリハーサルを必要とするばかりでなく、人間の独奏者が毎回同じ演奏を繰り返すかどうかという点に関しては疑問が残る。また、独奏者と伴奏システムとの意志伝達の手段が演奏しかないため、独奏者の意図を伴奏システムに伝えることが困難であった。このような問題を解決するため、我々は二つのフェーズからなる漸進的なリハーサルを提案する。その一つのフェーズは「演奏フェーズ」で、実際に独奏者と演奏を行なって、その癖をシステムが認識するフェーズである。もう一つは「コミュニケーション・フェーズ」で、システムが人間の独奏者と GUI などを用いて対話を行なうことにより、より直接的に独奏者の意図を認識するフェーズである。これら二つのフェーズのリハーサルを何回か繰り返すことにより、本番の演奏に向け、伴奏システムを漸進的に独奏者に適応させることを目的とする。

The general problem for an accompaniment system is that different soloists perform a same piece differently, so the system has to adapt to different soloists. In order to realize such an adaptation, we introduce two phases of rehearsal: (1) "performance phase" where the system performs with the soloist to obtain the soloist's way of performance, (2) "communication phase" where the system communicates with the soloist through GUI etc. to understand the soloist's intention of performance more directly. These two phases of rehearsal are repeated several times to improve the performance on the concert stage.

1 はじめに

伴奏システムとは、コンピュータが人間の演奏にテンポなどを合わせて伴奏を行なうシステムであり、すでに多くの研究が発表されている（文献 [1] [2] [3] [4] [5] など。それらの内容については概説した文献 [6] があるのでそちらを参照して頂きたい）。

ここでいう伴奏システムとは、独奏・伴奏パートの楽譜があらかじめシステムに与えられており、

演奏時に独奏者の演奏を聴きながら、それに合わせて伴奏パートを演奏するシステムを意味する。楽譜をあらかじめ与えないで追従するシステムとして即興やインタラクティブ・リアルタイム作曲を含むものもあるが（[7] [8] [9] [10] など）、それらはビート・トラッキング、即興、作曲などが主なテーマとなり、処理の内容も大きく異なるのでここでは対象としない。

伴奏システムは、独奏者と一緒に演奏しながら、独奏者に合わせるようにリアルタイムで自分自身の演奏、特にそのテンポを制御する。具体的には、独奏者から入力される演奏情報をシステム内部に保持している独奏者の楽譜情報とDPマッチングなどの手法を用いてマッチングし、テンポなどの独奏者の情報を得る。このとき独奏者の演奏ミスなどについても考慮する必要がある。独奏者のテンポを推定したら、そのテンポに合わせて伴奏システム自身の演奏を制御する。

しかし従来の伴奏システムのほとんどは、いわば常に初見視奏であり、同じ独奏者と何度演奏を行なっても過去の経験を生かすことができなかった。そのため、例えば独奏者が大きなテンポの変化を行なうと、システムは過去の経験がないために毎回おどろかされ、追従を困難にしていた。

しかし人間同士の演奏でさえ、コンサート・ステージでの本番の前には何回かのリハーサルを行なって、お互いの意志を統一して演奏を行なっている。そのことから考えても、伴奏システムがいきなりステージで独奏者と一緒に演奏を行なうより、その前に何度かリハーサルを行なって本番の演奏に臨むことが望ましいと考えられる。理想的には、独奏者と伴奏システムとでリハーサルを行なうことにより、伴奏システムは独奏者の演奏意図や癖などを自動的に認識し、システム内部のパラメータなどを修正し、人間の独奏者も伴奏システムの演奏の問題点などを指摘し、それらをシステムに教え、修正させることができれば、本番での演奏は独奏者の意図したものになり近づくであろう。

2 従来の伴奏システムのリハーサル

実際に伴奏システムにリハーサルの考えを導入した研究は文献 [11] による Vercoe のものが挙げられる

2.1 Vercoe のリハーサル

Vercoe の伴奏システムでは、コンサート・ステージでの演奏というような本番の演奏の前に独奏者とのリハーサルを何度も行なうことにより、独奏者固有の統計情報を抽出し、その情報を利用して本番の演奏でのマッチングの精度を上げることを目的としている。

具体的には、まず各リハーサルの終了後、独奏者の演奏イベントのリスト（どのイベントがどの

時刻に演奏されたかを示す）のテンポ解析を行ない、楽譜位置を実時間の関数 φ として表わす¹。楽譜中の各イベントに対して、そのイベントが予測された時間と実際に演奏された時間との楽譜上でのずれ（楽譜上における時間を意味する拍を単位とする）を測定する。何回かのリハーサルを行なうことにより、このずれの平均値とその標準偏差とを求める。これらの統計情報はそれぞれ、独奏者の演奏イベントが楽譜とどの程度ずれるのか、そのイベントの楽譜とのずれにはどの程度の一貫性があるのか（正確には、標準偏差が小さいほど一貫性がある）、ということを示している。

簡単な具体例で説明すると、例えば楽譜に付点八分音符と十六分音符が連続して書かれていた場合、十六分音符は一拍の $3/4$ の楽譜位置で演奏されると予測されるが、実際の演奏では（意図的なものにしても無意識的なものにしても）それよりも若干前に演奏されたり、後に演奏されたりすることがある。もし独奏者がリハーサル演奏のとき、いつもその十六分音符を $3/4$ の位置よりも後ろで演奏をしているような場合、そのずれを毎回観察し、それらを平均することにより、その独奏者は大体どこでその音符を演奏するのかという情報（例えば 0.81 拍の位置でというような）を得ることができる。

実際の演奏時には、上記のずれを考慮して独奏者の演奏を認識する。すなわち先の例では、十六分音符が楽譜上であたかも少し後ろ（例えば 0.81 拍の位置）に書かれているかのように考えて独奏者の演奏を楽譜とマッチングする。システムは、このようにして得られたマッチング情報を用いて独奏者のテンポを推定するが、そのとき、もう一つの統計情報である標準偏差の逆数で重み付けを行なうことにより、どの点がマッチするのにより重要であり（標準偏差が小さいイベントほど重要である）、テンポに大きな影響を与えているかということを考慮しながらそのテンポを求める。このようにして、独奏者が固有に持っていると考えられる局所的なリズム上のゆらぎを除去することにより、独奏者のテンポの推定をより確実なものにすることができる。

¹この解析はリアルタイムで行なう必要がないため、未来の演奏イベントも解析に利用でき、より正確な値を得ることができる。

2.2 Vercoe のリハーサルの問題点

このように Vercoe はリハーサルでの統計情報を用いることによって独奏者の局所的なリズムのずれを考慮したが、この方法にもいくつかの問題点が挙げられる。

まずその一つはリハーサルの回数である。すなわち、この Vercoe のリハーサル方法では統計情報を集める必要があるため、伴奏システムが独奏者の癖を認識するまで多くのリハーサルを必要とする。あまりに多くのリハーサルは独奏者の負担になるばかりでなく、人間の独奏者が何度も同じ演奏を繰り返すのかどうかということに関しても疑問が残る。すなわち何十回にも及ぶリハーサルの最初の演奏と最後の演奏では何らかの演奏上の変化が起こることが予想される。そのため、リハーサル回数はそれほど多くない方が好ましいであろう。

また、それに関係する問題として、何回かリハーサルをしたあと、独奏者に適応するように伴奏システムの演奏を突然変化させるよりは各リハーサルごとに独奏者に徐々に適応するような漸進的なリハーサルの方が独奏者にとってもやりやすいであろう。

もう一つの問題点として Vercoe の方法では、独奏者の演奏はすべて独奏者の意図した演奏であると暗黙のうちに仮定しているが、必ずしも独奏者の意図する理想的な演奏になっているとは限らない。何故なら、リハーサルといえども独奏者が伴奏システムを無視して自分勝手に演奏することは困難であり、独奏者も伴奏システムの影響を受けて、その理想とする演奏ができないからである。

そのような場合の簡単な例として、伴奏システムが独奏者よりも先に演奏を始めるような曲を考えて頂きたい。そのとき、もし伴奏システムが独奏者の意図しているテンポよりも遅いテンポで演奏を始めてしまったとすると、独奏者はとりあえず、そのテンポから演奏を始め、それから徐々にテンポを早くしていくであろう。仮にこのようなリハーサルから独奏者の演奏の癖を推定しようとする、と、独奏者の意図はだんだん早くしていくことであるとシステムは予想してしまう。しかし、そのような演奏が独奏者の意図した演奏であるとは考え難い。この状況はリハーサルを繰り返しても伴奏システムの演奏を変化させない限り解消されな

いであろう。

この原因は、独奏者とシステムとの間の情報伝達の手段がリハーサルにおける演奏だけしかないということにあると考えられる。もし先のような状況で例えば、独奏者が伴奏システムに対して「もっとテンポを早くしてもらえませんか?」というような要求ができたり、あるいは逆に伴奏システムが独奏者に「この部分はテンポを徐々に早く(アツチェレランド)したいのですか?」というような質問をして、その答えによって伴奏システムの演奏を変化させるようなことができれば良いと考えられる。

そこで我々はリハーサルをもう少し広い意味でとらえ、本番の演奏前に行なわれる、独奏者と伴奏システムによるリハーサル演奏とコミュニケーションによる意志伝達であると考え。すなわち、我々の考えるリハーサルでは、独奏者と伴奏システムとによる演奏だけでなく、システムがもっと直接的に独奏者とコミュニケーションを行ない、独奏者の意図を認識するようにする。次章で我々の考えるリハーサルについて述べるが、その前に人間同士のリハーサルはどのように行なわれるかについて若干考えてみたいと思う。

2.3 人間同士によるリハーサル

人間同士による演奏の場合、通常は本番前に独奏者と伴奏者として何回かのリハーサルを行なうことにより、お互いの意志を合わせていると考えられる。このとき、演奏者によって個人差はあると思われるが、大体以下のようなシナリオでリハーサルを行なうものと考えられる。

まず、独奏者と伴奏者としてリハーサル演奏を行なう。そのとき全曲演奏するか、あるいは独奏者が曲の途中で止めるかもしれない。それから、独奏者と伴奏者の間で意見交換を行なう。独奏者から伴奏者に対しては伴奏に対する指示を与えたり、何かを要求したりする。逆に伴奏者から独奏者に対しては質問を行なったりして、独奏者の意図を確かめる。それから再び演奏を行なうが、そのとき伴奏者は独奏者の要求に応えるように、以前の演奏を変化させ、独奏者に適応した演奏を行なうようにする。演奏を行なった後、再び意見交換を行なう。このような「演奏」「意見交換」というプロセスを繰り返すことにより、漸進的にお互いの演奏を合わせ、本番の演奏へと備える。

このような人間の伴奏者の行なっている処理に近いモデルを作成するため、本研究ではリハーサルを「演奏フェーズ」と「コミュニケーション・フェーズ」の二つのフェーズに分けて行ない、それらを繰り返すことにより、漸進的に独奏者に適応していく方法を提案し、我々の開発した伴奏システム[12, 13]にその考えを導入しようと思う。

3 二つのフェーズによる漸進的リハーサル

上記のような人間同士のリハーサルに近いリハーサルを伴奏システムにおいて実現するため、我々は Vercoe のような演奏だけによるリハーサルではなく、リハーサルをもう少し大きな枠組としてとらえ、それを二つのフェーズに分けることにした(図1 参照)。その一つは Vercoe の研究と同様に独奏者と伴奏システムとでリハーサル演奏を行ない、そこから独奏者の癖などの情報を抽出する「演奏フェーズ」である。もう一つは独奏者と伴奏システムとが直接コミュニケーションを行なうことにより、お互いの意志の疎通を図る「コミュニケーション・フェーズ」である。これら二つのフェーズを何回か繰り返すことにより、コンサート・ステージのような本番の演奏に向け、伴奏システムを漸進的に独奏者に適応させることを目的とする。

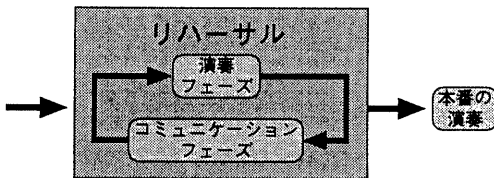


図1: 二つのフェーズによる漸進的リハーサル

まず初期状態は独奏者に対しての個人情報は何もない状態であり、システムが利用できるのはシステム内部にあらかじめ与えられている情報のみである。その段階でまず「演奏フェーズ」を行ない、独奏者の癖などを抽出する。このとき、最初に「コミュニケーション・フェーズ」から始めることも可能であり、独奏者が伴奏システムに対して、例えば初期テンポなどの情報をあらかじめ伝えることもできる。また「演奏フェーズ」では一曲すべてを演奏する必要はなく、人間の独奏者が必要に応じて途中から始めたり、途中で止めることができる。また、途中で止めたときには「コミュニケー

ション・フェーズ」へ移行するか、あるいは「演奏フェーズ」をもう一度行なうか(そのとき最初からやり直すか、途中から始めるか)を選択することができる。「コミュニケーション・フェーズ」のあと、システムはその内部に持っている演奏に関するパラメータ(演奏プラン²)を修正し、次の「演奏フェーズ」から、あるいはリハーサルが終了した場合には本番の演奏において、その新しいパラメータによる演奏を行なう。

これら二つのフェーズのリハーサルを繰り返すことにより、伴奏システムを徐々にその独奏者に適応させ、独奏者が満足すれば、リハーサルを終了して本番の演奏を待つ。以下、「演奏フェーズ」と「コミュニケーション・フェーズ」について具体的に述べる。

3.1 演奏フェーズ

「演奏フェーズ」では独奏者と伴奏システムとで一緒にリハーサル演奏を行なう。通常は全曲を通して演奏するが、独奏者の指示があれば曲の途中から始めることもでき、また途中で中断することもできる。曲の一部分しか演奏しなかったときは、独奏者と一緒に演奏を行なった部分のみで以下の解析を行なう。

まず、この「演奏フェーズ」では Vercoe の研究と同様に、独奏者と一緒にリハーサル演奏を行ないながら、独奏者の演奏が楽譜からどの程度逸脱しているかを測定する。そのとき、Vercoe のように何回かのリハーサルを行なって統計を取るのではなく、一回ごとに徐々にその逸脱に合わせて伴奏システムの演奏を変化したい。そこで n 回目リハーサルにおけるテンポのずれを δ_n としたとき、独奏者の演奏の楽譜からのずれ Δ_n を

$$\Delta_n = (1 - \rho)\delta_{n-1} + \rho\delta_n$$

とする。ここで δ_0 は楽譜通りの演奏、すなわち 0 である。また ρ の値として、現在は 1/3 を用いている。これは最近行なわれた演奏ほど独奏者の意図を反映しているであろうという仮定にもとづくものである。このような漸化式で独奏者のリズムの逸脱を測定することにより、漸進的に独奏者のずれを伴奏システムの以後の演奏に反映してゆく。

²演奏プランとは我々の伴奏システムで楽譜情報に付加する表情付けデータであり、テンポ変化の情報や音量変化の情報などが書かれている ([12, 13] 参照)。

「演奏フェーズ」ではこの他に、もう一つの処理を行なう。それは、独奏者とのリハーサル演奏を行ないながら、伴奏システム自身の演奏と独奏者との演奏とのずれを観察することである。そのとき例えば、独奏者がいつも伴奏システムよりも若干テンポが早く、また独奏者の演奏位置が伴奏システムのものよりも若干早いとき（独奏者が若干先に進み、伴奏システムが後から追いかけているような状況）、独奏者はテンポをだんだん早くしようとしているのか、あるいは伴奏システムのテンポが遅いので、全体のテンポを上げるために伴奏のテンポを引っ張っているのかははっきりとしない。このようなとき、「コミュニケーション・フェーズ」で独奏者に質問することにより、独奏者に確認してから実際に演奏プランを修正する。「演奏フェーズ」ではこのような if-then ルールに従って、以下の「コミュニケーション・フェーズ」で独奏者にその演奏意図を確認してから、伴奏システム自身の演奏プランに反映させる。

現時点では「演奏フェーズ」において、独奏者のテンポ情報しか見ていないが、今後は独奏者の音量情報なども追跡して、その音量に関しても同様の処理を行なうようにしたいと考えている。

3.2 コミュニケーション・フェーズ

「コミュニケーション・フェーズ」では、人間の独奏者と伴奏システムとがコミュニケーションを行なうことにより、お互いの意志をより直接的に伝えることを目的とする。そのとき理想的なインターフェースは自然言語、特に音声対話を用いるものであると思われるが、今回はその最初の段階として GUI による実現を行なう。

「コミュニケーション・フェーズ」には大きく分けて二つの処理がある（図 2 参照）。その一つは「演奏フェーズ」で不明であった点について、独奏者に対する質問を行なう処理である。もう一つはテンポや音量の変化などというような様々な要求を独奏者から受け付けることである。



図 2: 「コミュニケーション・フェーズ」

3.2.1 伴奏システムから独奏者への質問

先に述べたように、独奏者の演奏意図があいまいなときにはシステムはそのテンポ変化が独奏者の意図したものなのかを確認するため、独奏者に対して質問を行なう。先の例では独奏者がテンポをだんだん早くしたいと思っているのかどうかということが明らかではなかったので、独奏者に対して例えば「3 小節目から 5 小節目はだんだんテンポを早くしたいのですか (yes/no)?」というような質問を行ない、独奏者に確認を求める。もし独奏者の答が yes であれば、伴奏システムの演奏プランのテンポ情報の 3 ～ 5 小節目に *accelerando*（だんだん早く）を付け加える。次の演奏（演奏フェーズあるいは本番の演奏）からは修正されたテンポで演奏を行なう。もし独奏者の答が no であれば演奏プランの修正は行なわない。

3.2.2 独奏者から伴奏システムへの要求

独奏者から伴奏システムへはテンポや音量、あるいはその時間変化などの要求を行なうことができる。独奏者がシステムに対して要求する例として、ある曲の最初の部分の楽譜を図 3 に示す。

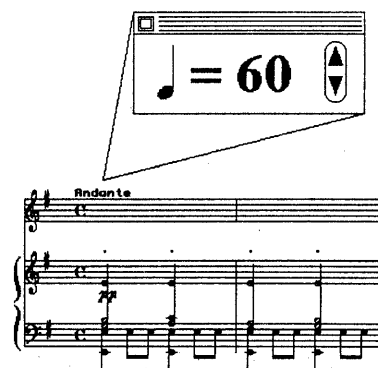


図 3: 演奏修正の要求例

この楽譜では曲の初めのテンポは *Andante* と指定されているだけである。初期状態で伴奏システムが演奏を行なうとき、そのテンポはシステム内部で定義されている *Andante* のテンポになってしまう（この例では四分音符=60[beat/minute]）。独奏者がこのテンポを修正したいとき *Andante* と書かれているあたりをクリックすると図のようなウィンドウが開き、テンポの修正を行なうことができる。

このような独奏者から伴奏システムへの要求は、局所的なテンポや音量ばかりでなく、アツチェレランドやリタルダンドの量、クレッシェンドやデクレッシェンドなどの量というような長いスパンのものなど、非常にさまざまな要求が起こり得ると考えられるので、現在、システムがそのような独奏者のさまざまな要求を受け付けられるようにその機能を拡張中である。

4 おわりに

本論文では、伴奏システムが本番の演奏でより正確に独奏者の意図を反映できるようにするため、従来のリハーサルの考えを広げ、二つのフェーズによる漸進的なリハーサルについて述べた。

今後はこの考えをインプリメントしたシステムを用いて、何人かの演奏家に実際にリハーサルをしてもらい、どのような情報がシステムに対して要求されるのかということを調べ、自然言語対話によるインターフェース構築の足掛かりとしたい。

本システムはリハーサルを行なうことにより、独奏者に適応するための情報を獲得するが、この情報の中には他の演奏者に適用できるような一般的なものもあるかもしれない。もしそうならば他の演奏者と演奏を行なう際にもその情報を最初から利用することができるであろう。そこで何人かの演奏者との共演を行なううちに、それがその演奏者特有のものであるのか、他の人にも共通するようなものであるのかを見分けることを今後考えたい。

最後に、現時点の伴奏システムは比較的簡単なパターン・マッチングの技術だけを用いているが、今後、人間のようなすぐれた伴奏を行なうためにはコンピュータに実装可能な音楽的知識([14]のような)を利用することが必要になってくるであろう。すなわち、曲の構造などを解析することにより、独奏者の行なったテンポ変化の意味などを考え、それをもとに独奏者の意図を推測し、自動的に伴奏を適応させたり、また、システム自身の演奏もそのような音楽的知識を用いて、より人間らしい自然な演奏を行なわせたりすることを考えたい。このような考えを実際に伴奏システム上に実現することができれば、人間の独奏者にとって、より扱いやすいシステムとなるであろう。最終的には人間と共演できる、いわゆる人工演奏家というようなシステムの実現を目指したいと考えている。

参考文献

- [1] Roger B. Dannenberg. An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 193-198, 1984.
- [2] Barry Vercoe. THE SYNTHETIC PERFORMER IN THE CONTEXT OF LIVE PERFORMANCE. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 199-200, 1984.
- [3] Bridget Baird, Donald Blevins, and Noel Zahler. Artificial Intelligence and Music: Implementing an Interactive Computer Performer. *Computer Music Journal*, Vol. 17, No. 2, pp. 73-79, 1993. (Summer 1993).
- [4] Haruhiro Katayose, Tsutomu Kanamori, Katsuyuki Kamei, Yoichi Nagashima, Kosuke Sato, Seiji Inokuchi, and Satoshi Simura. Virtual Performer. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 138-145, 1993.
- [5] Wataru Inoue, Shuji Hashimoto, and Sadamu Ohteru. A COMPUTER MUSIC SYSTEM FOR HUMAN SINGING. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 150-153, 1993.
- [6] 堀内靖雄, 橋本周司. 伴奏システム. 情報処理, Vol. 35, No. 9, pp. 815-821, September 1994.
- [7] R. B. Dannenberg and B. Mont-Reynaud. Following an Improvisation in Real-Time. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 241-248, 1987.
- [8] Anthonie Driesse. Real-Time Tempo Tracking Using Rules to Analyze Rhythmic Qualities. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 578-581, 1991.
- [9] Robert Rowe. Machine Listening and Composing with Cypher. *Computer Music Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 43-63, 1992. (Spring 1992).
- [10] Robert Rowe. *Interactive Music Systems: Machine Listening and Composing*. The MIT Press, 1993.
- [11] Barry Vercoe and Miller Puckette. Synthetic Rehearsal: Training the Synthetic Performer. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 275-278, 1985.
- [12] Yasuo Horiuchi and Hozumi Tanaka. A Computer Accompaniment System With Independence. In *Proceedings of International Computer Music Conference*, pp. 418-420, September 1993. at Waseda University.
- [13] 堀内靖雄, 田中穂積. 自主性を持つ伴奏システム. 人工知能学会 論文誌, Vol. 10, No. 1, 1995. 掲載予定.
- [14] 片寄晴弘, 竹内好宏. 演奏解釈の音楽理論とその応用について. 情報処理学会 研究報告, Vol. 94, No. 71, pp. 15-22, August 1994. 音楽情報科学 研究報告 No.7.