

自主性を持つ伴奏システム

An Accompaniment System with Independence

堀内 靖雄* 田中 穂積*
Yasuo Horiuchi Hozumi Tanaka

* 東京工業大学工学部情報工学科
Dept. of Computer Science, Faculty of Eng., Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152, Japan.

1993年11月11日 受理

Keywords: accompaniment system, independence, performance plan, listening experiment, ensemble.

Summary

In this paper, we introduce a new accompaniment system which takes independence from the soloist into consideration. In order to make a natural-sounding ensemble, we allow our system to change its independence dynamically from the soloist according to the musical situation. We introduce three new techniques into our accompaniment system. "The performance plan" allows the system to perform with expression as a human player would. "The independence rate" corresponds to how independently the system should perform from the soloist. "The time of the ensemble" provides information to enable the system to correct its tempo according to the independence rate. In order to evaluate the system, we carried out a listening experiment where the subjects listened to three versions of the same musical piece. The first was accompanied by a real human being, while the other two were computer-accompanied, where the first system simulated past researches which lacked the techniques mentioned above, while the second incorporated them. The results of the experiment show that our system which incorporated the three techniques sounds better than the system based upon past researches, and that it even sounds as good as a human accompanist.

1. は じ め に

伴奏システムとは人間の独奏者の伴奏を行うシステムである。一番身近な例としては「カラオケ」があげられる。しかし現在の「カラオケ」は、あらかじめ記録された演奏を再現しているにすぎないため、テンポや音量などのさまざまなニュアンスを独奏者に合わせることができない。そのため独奏者(人間)は(自分の演奏意志に反する場合であっても)伴奏システム(機械)に合わせて演奏しなければならない。このとき、全体の演奏の主導権は伴奏システムが握っていることになるため、このようなアンサンブル(合奏)の形態は「機械主導型のアンサンブル」であるといえる。

「機械主導型のアンサンブル」では、人間の独奏者が自分の演奏意志に従って自由に演奏することはできず、常に伴奏システムに合わせて演奏しなければなら

ない。この問題点を解決するため、人間の独奏者の演奏に合わせて伴奏パートの演奏を制御する適応型伴奏システムが研究されている([Baird 93, Dannenberg 89, Inoue 93, Katayose 93, Vercoe 84]etc.)。このようなアンサンブルの形態は、人間がアンサンブルの主導権を握ることができるため、「人間主導型のアンサンブル」であるといえる。

従来の適応型伴奏システムの研究は、この「人間主導型のアンサンブル」の実現を目的としており、独奏者にぴったりと合わせて伴奏することが最も重要であると考えられていた。しかし、独奏者の演奏にただ単に合わせるだけでは、良いアンサンブルを実現することは不可能であり、実際、従来のシステムによる演奏のほとんどは不自然で機械的な伴奏になっていた。人間どうしのアンサンブルの形態は、「独奏者主導型」か「伴奏者主導型」のどちらか一方という固定的なものではなく、いわばその中間にあり、どちらの形態に近い

かは音楽的な状況によって絶えず変化している。通常は独奏者がアンサンブルの中心となり、その主導権を握るため(「独奏者主導型のアンサンブル」)、伴奏者は独奏者に合わせた伴奏を行うが、一曲を通して常にそのような状況にあることはなく、あるときは伴奏者がアンサンブルの中心となり、その主導権を握る場合もある(「伴奏者主導型のアンサンブル」)。例えば、独奏者が休みで伴奏者だけが演奏しているときはいうまでもなく、独奏者が長い音符を演奏しているとき、あるいは、伴奏者がメロディを演奏して独奏者がその伴奏をするような状況がしばしば起こり得る。従来の伴奏システムは、そのような状況になっても独奏者に無理に合わせようとしていたために不自然な伴奏になってしまっていたと考えられる。人間どうしのアンサンブルでは、そのような状況のとき、伴奏者が自分の音楽性に従って表情豊かな演奏を行い、独奏者をリードし、独奏者は伴奏者の演奏を聴き、その演奏と調和・協調するように演奏を行っている。

本研究ではこのような人間の伴奏者をモデル化するため、伴奏者の自主性を考慮した伴奏システムを提案し、その有効性を実験により検証する。本システムは従来の適応型伴奏システムのように、常に人間の独奏者に合わせて演奏するのではなく、システムが自主性を持ってその演奏を行い、音楽的状況に応じてその自主性の度合いを変化させ、より自然で人間らしい(機械的でない)アンサンブルの実現を目標とする。そのため、以下の三つの考えを導入する。まず第一に、伴奏システムの自主的な演奏意志に相当するものとして、「演奏プラン」を与える。第二に、伴奏システムが独奏者に対して、どの程度独立して自主的に演奏するかということを表す尺度として「独立度」を定義する。この「独立度」に応じた伴奏の制御を行うため、第三の考えである「アンサンブル時間」を導入する。次章で、これら三つの考えを中心に伴奏システム[Horiuchi 93]について述べ、最後に伴奏システムの評価のために行った聴取実験とその考察について述べる。

2. 自主性を持つ伴奏システム

2.1 伴奏システムの概観

本研究で開発している伴奏システムの構成を図1に示す。システムにはあらかじめ、独奏パート・伴奏パートの楽譜情報を与えておく^{*1}、また「演奏プラン」、^{*}「独立度」もあらかじめ与えておく^{*2}。実際に人間の独奏者と演奏を行うとき、独奏者の演奏はシステムに入力され、システムはこの演奏に合わせてリアルタイムで伴奏パートの演奏を出力する。ここで、独奏者の演奏(入力)と伴奏システムの演奏(出力)はともに MIDI 信号である^{*3}。

システムは処理の違いによって大きく二つのモジュールに分けられる。第一のモジュールは Listener と呼ばれ、独奏者の演奏を楽譜を参照しながら追跡し、独奏者が現在、楽譜上のどの位置を演奏しているかを認識する。第二のモジュールは Performer と呼ばれ、Listener が認識した独奏者の演奏位置情報に基づいて伴奏パートの演奏テンポを制御し、実際に演奏を行う。以下、Listener と Performer について順に説明する。Performer の章では、上述した三つの考えについて述べ、それらを用いた伴奏テンポ制御方法について述べる。

2.2 Listener

Listener の役割は独奏者の演奏を追跡し、独奏者の演奏情報を認識することであるが、そのなかで最も重要なのは独奏者のテンポの認識である。具体的には、独奏者の演奏をその楽譜とマッチングすることにより、独奏者が各音符をどの時刻に演奏しているのかを認識する。このとき、音声認識の分野でよく用いられる DP マッチングアルゴリズムをリアルタイムに適用

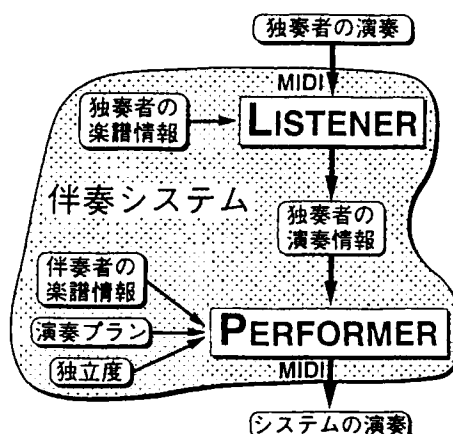


図1 伴奏システムの構成

* 1 人間どうしによる演奏の場合でも伴奏者は通常、独奏パートと伴奏パートがともに書かれた譜面を見ながら伴奏を行う。

* 2 実際のインプリメントでは、楽譜情報は楽譜に書かれている情報をシステムが読める形に書き直したものを与え、「演奏プラン」と「独立度」は伴奏パートの楽譜に付加してある。

* 3 MIDI とは電子楽器の通信などに用いられる規格であり、シンセサイザやコンピュータ間の通信は通常、この信号により行われる。

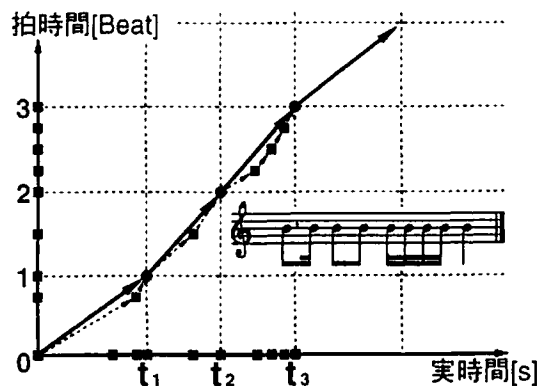


図2 時間マップ

する。このアルゴリズムを用いることにより、各音符の時間伸縮の認識および間違いの認識が可能となる。

ここで説明のため、図2に示す時間マップを考える。この時間マップは実時間(独奏者の演奏イベントが入力された時刻を表す)を横軸に取り、拍時間(独奏者の楽譜上の仮想時間を表す)を縦軸に取ったもので、独奏者の演奏データと図中の楽譜データとの対応関係を示したものである。グラフの傾きが独奏者の局所テンポを表し、傾きが急なほどテンポが早く、緩やかなほどテンポが遅い。このグラフの点線の矢印で表される曲線が独奏者の演奏した音符一つ一つに対応するマッチングデータであるが、実際に独奏者のテンポを認識するのに重要なのは、このような細かいテンポ変化よりはむしろ、1拍ごと^{*4}のマッチングデータを結んだ太い矢印で表される曲線(独奏者のリズム感と考えられる)である。これを細かいテンポのゆらぎを除去した独奏者のテンポと考える。

しかし独奏者が演奏ミスや大きなテンポ変化を行ったとき、独奏者の演奏と楽譜とのマッチングが一意に決定できず、マッチングの候補が複数存在する状況が生じる。そのような状況では、Listenerは可能な複数の解釈(仮説)と、その解釈の妥当性を表すスコアを持ちながら独奏者の演奏を追跡する。スコアは現在のシステムでは0~127の整数値を用いており、スコアが大きいほどその解釈が妥当であるということを意味する。また、ある解釈のスコアがあらかじめ決められているしきい値(現在のシステムでは60)よりも小さくなったとき、その解釈は妥当でないと考え、破棄する。追跡における妥当な解釈は通常一つであり、演奏ミス

などが発生したときに複数に分岐するが^{*5}、その後、正しい入力が続くと誤った解釈は破棄されるか、正しい解釈にマージ(同じ楽譜位置にある解釈は一つの解釈に統合する)されることにより、一つの解釈に収束する。Listenerは初期状態として一つの解釈(独奏者が楽譜の最初の位置にいる)を持ち、そのスコアを最大値127にセットする。その後、演奏イベントを受け取るごとに解釈とスコアを更新しながら追跡を続ける。もし独奏者の演奏イベントが楽譜に記述された正しい音符であり、予測される時刻付近で入力された場合、解釈はその音符が楽譜とマッチしたと考え、スコアを増加(最大値を超えない範囲で)する。演奏ミスや大きなテンポ変化が生じ、マッチングの候補が複数存在するときは、それぞれのマッチングに対して、新しい解釈に分岐し、複数の解釈を持ちながら追跡する。そのときミスや時間逸脱の度合いに応じてペナルティを与えるため、その解釈のスコアに1より小さいコストを乗じる。ペナルティはまず、音符の間違いに対して間違いコスト $C_{miss} (< 1)$ を乗じ、さらに、その音符が入力された時刻が予測された時刻より離れるにつれて大きなペナルティを課すように時間コスト $C_{time}(\Delta t) (< 1)$ を乗じる。ここで、 C_{miss} は間違いの種類によって異なる定数である。具体的には、楽譜にある音符の音程を間違えて演奏した場合、楽譜にない音符を余分に演奏した場合、楽譜にある音符を省略した場合のそれぞれに対して別々の定数コストを用いている。また C_{time} は予測された時刻と実際に演奏された時刻との間の時間のずれ Δt の関数であり、 Δt が大きいほど C_{time} は小さくなる。 C_{miss} の値、および $C_{time}(\Delta t)$ 関数は追跡の精度に影響を与えるため、その最適値を現在調査中である。Listenerはスコアが最も高い解釈を現在の独奏者の演奏であると考え、その解釈に従って1拍ごとに独奏者のテンポ情報をPerformerへ出力する。テンポ情報は楽譜上の位置(拍時間)、演奏時間(実時間)、その解釈のスコアの三つからなる。

2.3 Performer

Performerは、あらかじめ与えられた伴奏パートの楽譜を演奏するが、独奏者と合わせるため、Listenerで認識された独奏者の演奏位置情報を用いて伴奏のテンポを制御する。そのとき、先に述べたように伴奏者の自主性を考慮した伴奏制御を行う。以下の節で本システムで導入した三つの考え「演奏プラン」、「独立度」、「アンサンブル時間」について順に述べる。

(1) 演奏プラン

人間は演奏を行う際に、自分の意志に基づく独自の

*4 これは通常、楽譜の1拍ごととしているが、テンポの遅い曲の場合は、楽譜上の1拍を2分割したり、逆に早い曲の場合は、楽譜上の2拍をまとめて1拍としている。オーケストラの指揮者が4拍子を8拍で指揮したり、2拍で指揮したりする状況を考えてほしい。

*5 複数の解釈が考えられるときは、スコアの最も高い解釈が現在の独奏者の演奏であると考え、破棄する。

演奏プランに従って演奏しており[Sloboda 87], また, アンサンブルの場合には, この独自の演奏プランを動的に修正し, 他の人間と協調しながら演奏を行っていると考えられる. そこで伴奏システムも人間のように表情豊かに演奏しながら, 自然なアンサンブルを実現するため, システム内部にあらかじめ演奏プランを与えておく. 具体的には, 楽譜に書かれていない表情データとして, テンポのゆらぎ, 音量変化, ペダル情報などを与える.

伴奏システムは, この演奏プランに従って伴奏パートを表情豊かに演奏するが, 独奏者と協調するように演奏プランのテンポ情報を動的に修正しながら演奏を進める. そのとき, 以下の「独立度」と「アンサンブル時間」の考えに基づいた演奏制御を行う.

〔2〕 独立度

独奏者と伴奏者による演奏では, 通常, 独奏者がアンサンブルの中心となって伴奏者をリードするが, 先に述べたように状況によっては伴奏者がアンサンブルの中心となり独奏者をリードすることもある. 伴奏者がアンサンブルの中心となり独奏者をリードする場合, 従来の独奏者主導型の伴奏システムでは, 独奏者に合わせようとしても, 独奏者からの情報が少ないか, あるいはまったくないため, 自然で人間的な演奏が行えない. 本研究では伴奏者の自主性を考慮に入れ, アンサンブルの状況に応じて伴奏システムの独奏者に対する追従性を変化させ, 伴奏システムが独奏者をリードすべき状況でも自然で表情豊かな演奏を行えるようにする.

そのため, 独立度の概念を導入する. 独立度とは伴奏パートの演奏を独奏者の演奏に比べてどの程度独立して演奏するかを表す尺度である. 独立度は0~100の整数値を取り, 数値が高いほど独奏者の演奏に対する独立の度合いが高くなる. ただし, 独立度0と100は特別の意味を持つ. 独立度100は独奏者の演奏とまったく独立に演奏プランどおりに演奏する状況で, 逆に独立度0は独奏者と「同時」に伴奏パートの音符を出力すべき状況である^{*6}. 現在のシステムでは, 独立度は楽譜の独奏パートと伴奏パートとの関係から以下のような規則を用いて人間が決定し, あらかじめシステム

に与えておく.

- ・独奏者が長い休み^{*7}のときは独立度を100にする.
- ・独奏と伴奏の縦の線をそろえるべきところ(同時に演奏すべきところ)ではその瞬間を0にする.
- ・一般的に独立度は50より若干低めにする(通常は従来のシステムと同様に独奏者の演奏に合わせようとする).
- ・伴奏パートがメロディを奏でるときは独立度は50より高くなる.
- ・独奏パートに比べて伴奏パートが細かい動きをしているときは若干高めにする^{*8}.

ここで独立度の意味について述べる. 独立度が低いのは独奏者がメロディを演奏しているような状況で独奏者がアンサンブルの中心となっているときである. そのとき伴奏システムは独奏者の演奏によく合わせて伴奏を行うべきである. 逆に独立度が高いのは, 独奏者が休みだったり, あるいは伴奏システムがメロディを演奏し, 独奏者がその伴奏をしているような状況で伴奏システムがアンサンブルの中心となっているときである. そのとき伴奏システムは独奏者の演奏にあまり影響を受けず, 自主的で表情豊かに伴奏パートを演奏する. このような伴奏制御を実現するため, 「アンサンブル時間」の考えを導入し, それを用いた伴奏制御について述べる.

〔3〕 アンサンブル時間

独奏者の演奏と伴奏システムの演奏との間には通常ずれが生じている^{*9}. そこで伴奏システムは独奏者の演奏に応じて, ずれを小さくするように伴奏パートの演奏を制御する. しかし, 独奏者の演奏位置とずれたとき, すぐにその位置にシステムの演奏を合わせる^{*10}のでは, システムの演奏のテンポ変化が細かくゆらいでしまい, 自然な演奏は行えない. 先に述べた独立度とは, 言い換えれば, どの程度滑らかに独奏者の演奏に追従すべきかということを示している. すなわち, 独立度が高いときは, 演奏プランどおりの伴奏を試み, ゆるやかに独奏者に追従すればよい. 逆に, 独立度が低いときには, 素早くずれをなくすようにする. そのような伴奏制御を行うため, 「アンサンブル時間」の考えを導入する. これは, 独奏者と伴奏システムが楽譜上のある音符を演奏する時刻(通常その二つの時刻にはずれがある)を独立度で重み付けして求めた重心の時刻であり, 直感的にはアンサンブル全体の演奏時刻と考えられる. ある拍時刻において, 独奏者の演奏時刻を t_{solo} , 伴奏システムの演奏時刻を t_{acco} , そのときの独立度を $Indep$ とすると, アンサンブル時間は以下

*6 ここでいう「同時」とは, 独奏者の演奏が入力された直後に出力するということを意味し, 若干の遅れが生じるが, 人間には, ほぼ同時に聞こえる範囲を考える.

*7 本システムでは1小節以上の休み.

*8 伴奏パートがアンサンブル全体のテンポに大きな影響を与えていると考えられるため.

*9 これは人間どうしの演奏の場合にも同様である.

*10 システムが現在演奏している楽譜位置をジャンプする.

のように定義される。

$$t_{ensemble} = \frac{Indep}{100} t_{acco} + \frac{100 - Indep}{100} t_{solo} \quad (1)$$

この式の意味するところは、独立度が高いときには、この時刻は伴奏システムの演奏時刻に近づき、独立度が低いときには、独奏者の演奏時刻に近づくということである。次項ではアンサンブル時間の考えを用いて伴奏を制御する方法について述べる。

〔4〕 伴奏制御

今、実時刻 $t_{acco}(s)$ に伴奏システムが拍時刻 s を演奏したところであり、独奏者はそのとき s' を演奏しているとする(図3参照)。伴奏システムは演奏を続けるため、次のテンポ、すなわち拍時刻 $s+1$ を演奏すべき実時刻を計算する必要があるが、その時刻として拍時刻 $s+1$ におけるアンサンブル時間を適用する。

$$t_{ensemble}(s+1) = \frac{Indep(s+1)}{100} t_{acco}(s+1) + \frac{100 - Indep(s+1)}{100} t_{solo}(s+1) \quad (2)$$

$t_{acco}(s+1)$ は、演奏プランの中のテンポ情報 $V_{plan}(s)$ を用いて以下のように計算される。ここで $V_{plan}(s)$ は、拍 s から $s+1$ までの伴奏システムのデフォルトの演奏テンポ(単位は[beat/sec])を表しており、楽譜の各拍ごとに演奏プラン中に記述されている*11。

$$t_{acco}(s+1) = t_{acco}(s) + \frac{1}{V_{plan}(s)} \quad (3)$$

$t_{solo}(s+1)$ は過去数拍*12の演奏履歴を重み付けして予測する。これらから式(2)に従って計算したアンサンブル時間 $t_{ensemble}(s+1)$ により、伴奏システムの次の演奏テンポ $V_{acco}(s)$ は以下ようになる。

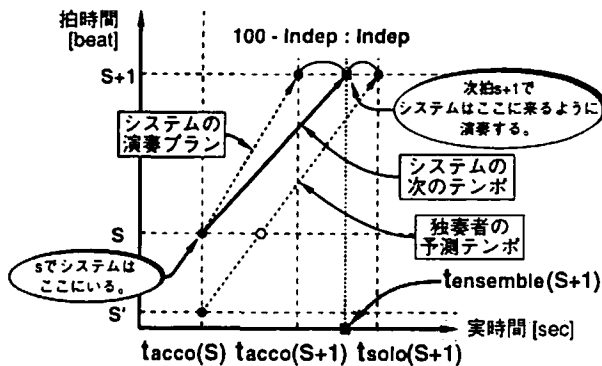


図3 アンサンブル時間によるテンポ修正

* 11 実際のインプリメントでは、わかりやすいようにメトロノーム記号と同様に[beat/minute]の単位で記述している。

* 12 本システムでは1小節分。

* 13 具体的には、各演奏イベントの時刻を記録し、独奏者とコンピュータとの間のずれを合計する。

$$V_{acco}(s) = \frac{1}{t_{ensemble}(s+1) - t_{acco}(s)} \quad (4)$$

もし、式(4)で $t_{ensemble}(s+1) < t_{acco}(s)$ となり、計算されたテンポが負になるときは、伴奏システムは独奏者の演奏が追いついてくるまで演奏を待つ。

また独立度が100のときは、式(4)に従って演奏を行うことにより、独奏者の演奏から独立して、演奏プランどおりの自主的な演奏を行うことができる。

式(2)の例外的な処理として、拍時刻 s における独立度が0のとき(伴奏システムが独奏者にタイミングを合わせる必要があるとき)には、伴奏システムは独奏者が s の音符を演奏した直後に演奏する。そのとき、もし、システムの演奏が独奏者より遅れているのなら、システムはその拍時間を s にジャンプし、逆に、システムが独奏者よりも進んでいるのなら、独奏者が追いつくまでその音符を演奏するのを待つ。

〔5〕 演奏ミスへの対応

このようにしてテンポ修正を行うが、独奏者の演奏ミスなどにより独奏者の演奏のトラッキングに失敗している可能性もある。そのとき間違ったマッチングに合わせてテンポ修正を行ってしまうと、独奏者の意図しないテンポになってしまう可能性がある。この問題点を解決するため、Listener から受け取るマッチングのスコアが低い場合は、それに応じて独立度を高くして、独奏者に影響されすぎないようにする。

3. 伴奏システムの評価

伴奏システムはコンピュータによる自動演奏システムと同様、その客観的な評価が困難である。音楽のように人間の感性と深く関わる分野において、その善し悪しの判断には個人差があり、何が良いのかということを決するユニバーサルで客観的な尺度はないといえる。客観的に伴奏システムの性能を評価する方法の一つとして、例えば、独奏者の演奏テンポと伴奏者の演奏テンポがどの程度近いかを測定することを考えてみる*13。しかしこのような評価では、伴奏システムを評価するのに必要十分な条件とはいえない。なぜなら、もし仮に、独奏者の演奏テンポとまったく同じテンポで伴奏パートを演奏することができたと仮定すると、その両者の距離は0であるが、伴奏のテンポ変化は急激で不安定なものになってしまい、結果として人間が聴くアンサンブルは不自然なものになってしまう。そこには伴奏者の感性が存在せず、本来は独奏者と伴奏者のアンサンブルであるはずのものが、独奏者一人の感性による演奏になってしまい、優れたアンサンブル

は実現できない。従来の伴奏システムのほとんどは、システムをシステム作成者自身が評価していたため、客観的な評価が行われていたとは言い難い。

以上の点を考慮すると、どのような演奏が良い演奏なのかを聴衆あるいは独奏者に判断させ、評価を行うことが最も望ましいと考えられる。そこで本研究では、人間の独奏者と伴奏システムとのアンサンブルを録音したテープを人間の被験者が聴いて評価するという聴取実験を行う。

3.1 実験目的

本システムを人間の伴奏者、従来の研究に基づいたシステム^{*14}の二つに対して比較し、本システムに導入した三つの考え(「演奏プラン」、「独立度」、「アンサンブル時間」)の有効性を評価する。

3.2 実験方法

(1) 刺激材料

人間の独奏者(プロのピアニスト)と以下の3種類の伴奏システムとによるアンサンブルを録音したテープを用意した。

Acco.1 人間の伴奏者：音楽大学の学生。

Acco.2 従来の研究に基づく伴奏システム：独奏者のテンポ変化に合わせて、すばやく伴奏システムのテンポを変化させるシステム。

Acco.3 本研究の伴奏システム：音楽的状况に従って、独奏者に対する独立の度合いを動的に変化させるシステム。

Acco.2とAcco.3では、伴奏演奏における音量変化は同じであり、独奏者に対する追従方法だけが異なる。実験に用いた曲はCésar Franck作曲の「ヴァイオリンとピアノのためのソナタ」第1楽章の冒頭40小節(約2分)である。テープの録音に関しては、各演奏を何回か録音して、独奏者が最も良い出来だと判断したものを使用した。このとき実験に関して恣意的な演奏にならないように注意するため、できるだけ自然に演奏してもらうように指示した。

(2) 実験デザイン

被験者は聴取前にまず、以下の評価項目のリストを与えられた。また被験者は、判定を下すのに必要なだけ何度でも繰り返し演奏を聴くことが可能であるということが告げられた(しかし、そのときには常に3種類

の演奏すべてを順番に聴かなければならず、特定の演奏だけを取り出して聴くことは許されない)。その後、三つの刺激は順番にスピーカーを用いて適当な音量で呈示され、以下の評価項目ごとに三つの演奏を順序づけてもらった^{*15}。

Q1. 伴奏の合わせ方はスムーズ(自然)であるか?

Q2. 伴奏は独奏に縦の線をそろえて演奏しているか?

Q3. 伴奏は表現豊かであるか(良く歌っているか)?

Q4. アンサンブル全体の完成度は?

実験後、各被験者に対して音楽経験やアンサンブル経験を調べる簡単なアンケートを行った。

(3) 被験者

東京工業大学の管弦楽団に所属する大学生と大学院生36人が実験に参加した。この36人は六つのグループに分けられ、三つの演奏すべての演奏順序の組合せ(6通り)が各グループに割り当てられた。被験者の音楽経験年数は1~20年で、アンサンブル経験年数は1~14年であった。また被験者の14人(39%)がこの曲を以前に聴いたことがあった。

3.3 実験結果と考察

各評価項目ごとの評価結果を図4に示す。この図は、1位から3位に各演奏を順位づけした被験者の数を示している。各評価項目ごとに評価結果の分析を行った。まず、フリードマン検定により、演奏間の評価に有意

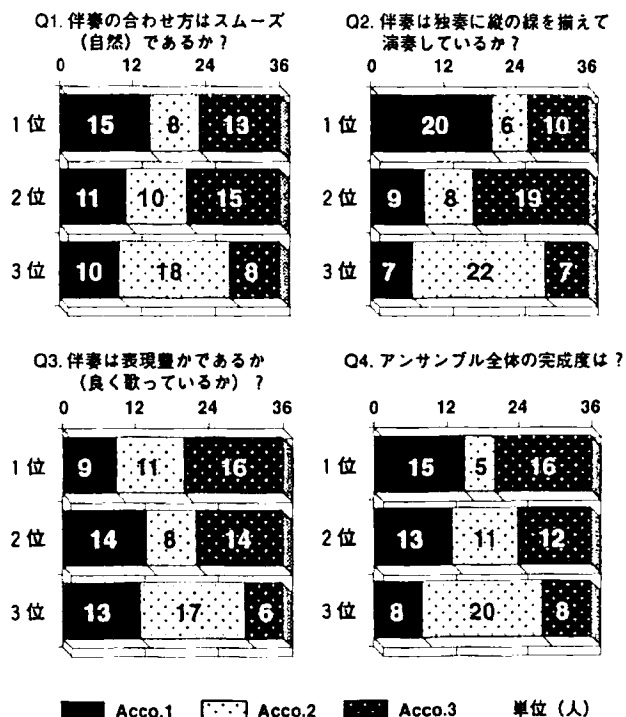


図4 評価結果

* 14 独奏者にぴったりと合わせることを目標とする。

* 15 例えばQ4に対して、三つの演奏A, B, Cが、C>A>Bの順で完成しているとすると、C-A-Bのように順序づけてもらった。

差が生じているかどうかの検定を行い、その後、符号検定法による多重比較を行い、どの演奏間に有意差が存在するかを調べた。以下、各評価項目ごとに検定結果について述べ、その考察を行う。

Q1. 伴奏の合わせ方はスムーズ(自然)であるか?

フリードマン検定の結果、三つの演奏間には有意差があまり見られなかった($S=4.2$, $df=2$, $p<0.2$)*¹⁶。確認のため、符号検定を行ったところ、有意水準10%ではあるが、Acco.1はAcco.2よりも良い評価を受け、Acco.3はAcco.2よりも良い評価を受けた傾向が見られた(それぞれ $z=1.5$, $p<0.1$)。またアンサンブル経験年数が7年未満の被験者(22人)と7年以上の被験者(14人)とで別々に検定を行ったところ、7年未満の被験者では各演奏間にほとんど差が出なかったのに対して、7年以上の被験者では、Acco.3がAcco.2よりも有意水準1%で良い評価を受けた($z=2.4$, $p<0.01$)。

この評価項目は伴奏がどの程度人間の独奏者に自然に合わせることができるかを調べるものであったが、アンサンブル経験の豊富な被験者に対して、本研究のシステムが従来のシステムよりも良い評価を受けたということは、本システムがアンサンブルにおいて自然な追従を行っているということがアンサンブル経験豊富な被験者に高く評価されたことを示唆している。

Q2. 伴奏は独奏に縦の線をそろえて演奏しているか?

フリードマン検定の結果、有意水準1%で有意差が生じた($S=12.1$, $df=2$, $p<0.01$)。符号検定を行ったところ、Acco.1とAcco.3はAcco.2に対して、ともに有意水準1%で良い評価を受けた(ともに $z=2.5$, $p<0.01$)。Acco.1とAcco.3の関係は、被験者全体の検定では、有意水準10%でAcco.1のほうがわずかに良い評価を受けたが($z=1.5$, $p<0.1$)、これもアンサンブル経験年数により検定結果に差が生じ、アンサンブル経験年数が7年以上の被験者では、Acco.1とAcco.3の間に有意差が生じなかった($z=0.27$)。

この評価項目は伴奏がどの程度独奏にタイミングを合わせているかということ人間が聴くことにより評価するもので、本システムは従来のシステムよりも良い評価を受けた。また、アンサンブル経験の豊富な被験者(ずれを認識する能力が優れていると考えられる)によって、本システムが人間の伴奏者とほとんど差がないという結果が示された。

Q3. 伴奏は表現豊かであるか(良く歌っているか)?

フリードマン検定および符号検定の結果、三つの演奏間に有意差はあまり見られなかった($S=4.2$, $df=2$, $p<0.02$)。このような結果となったのは、被験者がテンポ変化による表現よりも音量変化による表現を重視したためと考えられる。すなわち、上述のように、Acco.2とAcco.3は同じ音量変化のデータ(演奏プランの一部で、表情豊かな演奏を行うためのデータ)を用いており、音量変化に関しては両者に差がない。また、人間の独奏者が音量変化の点では比較的小となしい演奏をしたため、これら三つの演奏間にそれほど差が生じなかったものと考えられる。

Q4. アンサンブル全体の完成度は?

フリードマン検定の結果、有意水準1%で有意差が生じた($S=9.4$, $df=2$, $p<0.01$)。符号検定の結果、Acco.1はAcco.2よりも有意水準5%で良い評価を受け($z=2.2$, $p<0.05$)、Acco.1とAcco.3は有意差がなく($z=-0.2$)、Acco.3はAcco.2よりも有意水準1%で良い評価を受けた($z=2.5$, $p<0.01$)。このとき、アンサンブル経験が7年以上の被験者では、ほぼ同じ検定結果となったが、7年未満の被験者では、三つの演奏間に有意な差は見られなかった($S=2.5$, $df=2$)。

これは三つの演奏を総合的に評価してもらうもので、本実験の最も重要な評価項目である。検定結果より、本システムは従来のシステムよりも良い評価を受け、人間の伴奏者(音大生)に対してもほとんど差がないということが示された。特にアンサンブル経験の長い人ほど、このような傾向が強かったことから、本システムのアンサンブル能力が人間に近いことを示唆している。

《考察》

これらの実験結果から、おおむね、本システムは人間の伴奏者とほぼ同じ評価を受け、従来の研究に基づいた伴奏システムよりも良い評価を受けたことが示された。また、アンサンブル経験の長い(アンサンブル演奏の質を評価する能力が高いと考えられる)被験者ほど強く、このような評価傾向を示したことから、「伴奏システムが人間のようなアンサンブルを実現する」という目標が部分的に達成されたと考えられる。

4. お わ り に

本論文では伴奏者の自主性を考慮した伴奏システムについて述べた。伴奏システムは演奏プランを持ち、音楽的状況に従って変化する独立性によって伴奏を制御し(アンサンブル時間の考えに基づく)、人間的で自

* 16 df は自由度、 p は有意水準を表す。

然な伴奏を行う。聴取実験により本システムは人間の伴奏者とはほぼ同じ評価を受け、従来の考えに基づくシステムよりも良い評価を受けた。

今後の研究課題として、独奏者とリハーサルを行うことによって演奏プランを修正し、独奏者の個性も考慮した演奏プランを学習する方法を検討したい。また本論文ではテンポ制御についてしか述べなかったが、ダイナミクス(音量)なども状況に応じて変化させるこ

とが考えられる。そのときにも独立度の考えにより、独奏者と伴奏システムの音量のバランスを考慮した制御を行うことを考えている。最後に、本システムは独奏者と伴奏システムという2人のアンサンブル構成であるが、これを複数の人間とコンピュータによるアンサンブルにまで拡張してテンポやダイナミクスなどのバランスのとれたアンサンブルを実現したいと考えている。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Baird 93] Baird, B., Blevins, D. and Zahler, N.: Artificial Intelligence and Music: Implementing an Interactive Computer Performer, *Computer Music J.*, Vol. 17, No. 2, pp. 73-79 (Summer 1993).
- [Dannenberg 89] Dannenberg, R. B.: Real-Time Scheduling and Computer Accompaniment, Mathews, M. V. and J. R. Pierce (eds.), *Current Directions in Computer Music Research*, System Development Foundation Benchmark Series, chapter 18, pp. 225-262, MIT Press (1989).
- [Horiuchi 93] Horiuchi, Y. and Tanaka, H.: A Computer Accompaniment System With Independence, *Proc. Int. Computer Music Conf.*, pp. 418-420 (1993).
- [Inoue 93] Inoue, W., Hashimoto, S. and Ohteru, S.: A COMPUTER MUSIC SYSTEM FOR HUMAN SINGING, *Proc. Int. Computer Music Conf.*, pp. 150-153 (1993).
- [Katayose 93] Katayose, H., Kanamori, T., Kamei, K., Nagashima, Y., Sato, K., Inokuchi, S. and Shimura, S.: Virtual Performer, *Proc. Int. Computer Music Conf.*, pp. 138-145 (1993).
- [Sloboda 87] Sloboda, J. A.: 「演奏」, Deutsch, D. 編著, 音楽の心理学, 第16章, pp. 587-609, 西村書店 (1987).
- [Vercoe 84] Vercoe, B.: THE SYNTHETIC PERFORMER IN THE CONTEXT OF LIVE PERFORMANCE, *Proc. Int. Computer Music Conf.*, pp. 199-200 (1984).

(担当編集委員: 北橋忠宏, 査読者: 高島洋典)

著 者 紹 介



堀内 靖雄(学生会員)

1967年生まれ, 1990年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 1992年同大学院理工学研究科修士課程修了。現在, 同大学院理工学研究科博士課程在学中。音楽情報処理の研究に従事。情報処理学会会員。



田中 穂積(正会員)

1964年東京工業大学理工学部制御工学科卒業, 1966年同大学院修士課程修了。同年, 電気試験所(現 電子技術総合研究所)入所。1983年東京工業大学工学部情報工学科助教授, 1986年同大学教授, 工学博士。人工知能, 自然言語処理の研究に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 計量言語学会, 言語処理学会各会員。