

# 合奏における人間の発音時刻制御モデルの推定

堀内 靖雄<sup>†</sup> 坂本 圭司<sup>†</sup> 市川 薫<sup>†</sup>

本論文では、合奏における人間の発音時刻制御モデルを推定する。人間とコンピュータ(テンポ変化をあらかじめ任意に指定できる)による合奏データを収録、分析し、人間の演奏が過去のどのパラメータと相関があるのかを調べた。その結果、人間の演奏は合奏相手との直前の「ずれの変化量(テンポの逆数に相当)」と相関が高く、また、テンポ変化が発生した場合には「ずれ」と相関が高いことが分かった。そこで、これら2つのパラメータに対し、重回帰分析を行うことにより、人間の演奏制御モデルを推定した。推定モデルによる推定誤差を人間の持つ平均的な誤差(人間の演奏者がテンポ一定の相手と合奏する際の平均的な時間的ずれ)と比較した結果、この推定モデルは人間の誤差と比べても、十分な精度を持つことが示された。

## Estimating the Model of Human Performance in Ensemble

YASUO HORIUCHI,<sup>†</sup> KEIJI SAKAMOTO<sup>†</sup> and AKIRA ICHIKAWA<sup>†</sup>

In this paper, we will estimate a model of human performance in ensemble. Several performances, where performers play together with a computer which can play with an accurate tempo specified beforehand, were recorded. The recorded performances were analyzed in order to examine which parameters are correlated to next human's behavior (tempo changing). It was found that there were close correlations: (1) correlation between "time lag between a computer and a human performer" and the change of duration played by the performer, especially after changes of tempi, (2) correlation between "difference of durations between a computer and a performer" and the change of duration played by the performer. From this observation, the model of human performance was estimated using multiple regression analysis of the recorded data in terms of these two parameters. The model was evaluated in comparison with human errors and it was found that there is no significant difference between errors by human performers and by the model.

### 1. はじめに

現在、音楽情報科学研究の分野では、人間とコンピュータとの音楽によるインタラクションに関する研究がさかんである。本研究は、そのようなインタラクティブ・システムの中で、伴奏システム<sup>1),2)</sup>に焦点をあてている。伴奏システムとは、人間の独奏者の伴奏をコンピュータが行うもので、人間とコンピュータとのリアルタイム・インタラクティブ・システムの1つとして、音楽情報科学のみならず、人間とのリアルタイム・インタラクションを考えるうえで重要な研究テーマとなっている。伴奏システムでは、楽譜情報はあらかじめ独奏パートと伴奏パートの両方がシステムに与えられており、独奏者の演奏と協調するように伴奏システムの演奏タイミングをリアルタイムで制御する。

伴奏システムが研究され始めたのは、計算機の能力が向上し、リアルタイムでの音楽処理が可能となった1980年代半ば以降であるが<sup>3),4)</sup>、従来の研究では、おもに独奏者の演奏の追跡方法に重点が置かれていたため、伴奏システム自身の演奏は機械的で不自然なものとなるが多かった。その理由は、人間の演奏を考慮することなく、簡単な制御モデルで伴奏システムの演奏を決定していたことにあると考えられる。本研究では、この問題点を解決するため、合奏で人間が実際に行っている演奏制御モデルを推定することを目的とする。

人間の行っている演奏制御を調べる方法として、2人の人間による合奏データを収録、分析する、という手法が考えられるが、文献5),6)などで指摘されているように、人間同士の演奏にはお互いの相互作用が含まれているため、合奏データから各演奏者の制御モデルを独立に推定することは困難である。そこで本研究では、合奏における2人の演奏者のうち、片方の演

<sup>†</sup> 千葉大学  
Chiba University

奏者をコンピュータで置き換えることにより、相互作用の存在しない状況での人間の演奏制御モデルを推定することを目的とし、相互作用まで含めた人間の演奏制御モデルは今後の検討課題とする。

人間のかわりにコンピュータで演奏することには以下の利点がある。

- 一定のテンポで演奏が可能
- 正確なテンポ変化が可能
- 相手の影響を受けない(相互作用が存在しない)

これらの特長を活かすことにより、合奏における1人の人間のモデルのみを独立に分析、推定することが可能となると考えられる。類似の実験は文献7)でも示されているが、そこでは与えられたテンポ変化に対する人間の伴奏者の反応が示されているにすぎず、具体的に人間の演奏時刻の制御モデルを同定するまでには至っていない。

本論文では、2章で演奏収録の概要について説明し、3章で人間の演奏データの分析を行う。その結果から、4章で人間の演奏制御モデルを推定し、5章でモデルの評価を行う。最後に6章で、本モデルの制約や問題点について述べ、7章でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 実験デザインと演奏収録

### 2.1 演奏曲目

Hanon 作曲「ピアノの名手になる60練習曲」第5番を収録対象とし、左手部分をコンピュータが演奏し、右手部分を人間が演奏することとした。この曲は、最後の音符以外はすべて同じ音価の音符から構成されているため、音楽的な要素が少なく、また、人間とコンピュータの演奏が記譜上はまったく同じリズムとなるため、分析が容易であるという利点がある。

この曲は本来、全曲を通じて右手部分と左手部分がオクターブで並行移動するのであるが、以前の収録において、オクターブで並行に移動する場合、相手の音がマスキングされ、聞こえにくいという問題点が指摘されたため、本収録では左手部分を3度上げ、6度の並行移動とした。また、もとの楽譜は四分の二拍子で十六分音符の連続であるが、呈示された速度指定よりも早く演奏されてしまう傾向があるため、十六分音符を八分音符に書き換え、拍子も四分の四拍子とした。収録に用いた楽譜を図1に示す。

### 2.2 演奏者

演奏者はピアノ専攻の大学生3名である。3名ともこの曲を演奏したことがあった。また演奏者にはあらかじめ、楽譜とともに実験の手順書を渡し、実験概要

収録対象曲

図1 収録曲楽譜。Accoが人間の演奏するパート、Soloがコンピュータのパート

Fig. 1 The score used by the recording. Acco is the part played by a human performer and Solo is the part played by a computer.

について説明した。本来、相手がコンピュータであることを教えない方が、より自然な演奏データを得られることが期待されるが、予備実験の結果、多くのデータを収録する過程で、相手が人間ではないことが露呈してしまう可能性が否定できず、もし、そのことが演奏者に分かってしまうと、実験条件の統制がとれなくなるため、本研究では最初から演奏者に伝えるデザインとした。

### 2.3 収録環境

演奏の収録は防音室で行われた。演奏者は88鍵のMIDIピアノで演奏を行った。このMIDIピアノは音源を内蔵しているが、今回はその音源は利用せず、演奏者の演奏したMIDI信号とコンピュータにより出力されたMIDI信号をもう1台のコンピュータで記録すると同時に別個に用意された音源で音を鳴らし、それを演奏者のヘッドホンへと伝えた。人間の演奏者はヘッドホンにより、コンピュータの演奏と自分の演奏を聞きながら演奏を行う。そのとき、両者の演奏は左右分離して定位された。

記録にはパソコンが用いられたが、正確な時間情報を記録するため、専用のMIDIハードウェアを用いた。

この収録方法は、コンピュータに記録された両者の演奏の時間的関係をそのまま人間が耳で聞くことができるようにすることを目的としている。

表1 演奏者1人あたりのテンポ変化の回数

Table 1 The number of tempo changes per performer.

テンポ変化		回数
+15	100 → 115	4
+10	100 → 110	2
	105 → 115	2
+5	100 → 105	2
	105 → 110	2
	110 → 115	2
-5	115 → 110	2
	110 → 105	2
	105 → 100	2
-10	115 → 105	2
	110 → 100	2
-15	115 → 100	4

## 2.4 テンポ設定

各演奏者の演奏収録において、表1に示す回数のテンポ変化のデータを得られるようにするため、コンピュータの演奏には、あらかじめ以下のテンポ変化が設定された。なお、このテンポ変化パターンは表の条件を満たすようにランダムに配置されたが、その並びが結果に何らかの影響を与える可能性も否定できない。そのような順序効果については今後の検討課題としたい。

- パターン1: 100 → 105 → 115 → 110 → 100
- パターン2: 105 → 100 → 115 → 105 → 110
- パターン3: 110 → 115 → 100 → 110 → 105
- パターン4: 115 → 105 → 100 → 115 → 100
- パターン5: 100 → 110 → 105 → 115 → 100
- パターン6: 110 → 115 → 100 → 105 → 110
- パターン7: 100 → 115 → 110 → 100 → 115

テンポ変化の場所は演奏者に予測されないよう、ランダムに配置された。ただし、不自然なテンポ変化とならないよう、テンポ変化は小節の冒頭で行った。演奏の開始に際し、メトロノームで最初のテンポを四分音符で8拍呈示し、それに続けて演奏を開始するよう教示した。

## 2.5 収録手順

まず、電子楽器の演奏に慣れるため、演奏者は自由に練習を行った。そのあと、演奏者だけ(コンピュータの演奏はなし)で演奏してもらい、その演奏情報を記録した。その後、表2の収録デザインに従って、収録が行われた。しかし、実際の収録では演奏ミスが生じたため、ミスのあったパターンのみ再収録を行った結果、最終的な収録順序は表3となった。

表2 収録手順

Table 2 The procedure of recordings.

演奏者	手順(番号は演奏パターン)							
	1	2	3	休憩	4	5	6	7
A	1	2	3	休憩	4	5	6	7
B	2	3	1	休憩	5	7	4	6
C	3	1	2	休憩	7	6	5	4

表3 実際の収録(\*が演奏ミスのため再収録されたパターン)

Table 3 The actual procedure of recordings as a result of performer's errors. '\*' shows the second recording.

演奏者	手順(番号は演奏パターン)							
	2	3	1*	休憩	4	5	6	7
A	2	3	1*	休憩	4	5	6	7
B	2	3	1	休憩	5	7	4	6
C	2	3*	1*	休憩	7	6	4	5*

## 3. 演奏データの分析

人間が過去の演奏の履歴からどのようなタイミングで次の演奏を行うか、ということ調べるため、合奏におけるパラメータの中で、どのパラメータが人間の次の演奏と相関が高いかを分析する。

人間が次に行う演奏のタイミングを表すパラメータとして、「人間の次の演奏間隔(時間長)が直前の演奏間隔に対して、どの程度増減したか」を予測すべき目的変数とする。本論文ではこれを「時間長変化」と呼ぶこととする。

本研究では、過去の演奏履歴から、未来の演奏を決定する要因として、以下の3つのパラメータを考える。

- (1) ずれ
- (2) ずれの変化量(=時間長のずれ)
- (3) 時間長のずれの変化量

(1)「ずれ」とは楽譜上同じ時刻に記譜されている音符が、どの程度ずれて演奏されたかを意味しており、「コンピュータの演奏時刻—人間の演奏時刻」と定義する。すなわち、「ずれ」が正の場合、人間がコンピュータよりも早いタイミングで演奏したことを意味する。

(2)「ずれの変化量」とは、(1)の「ずれ」がどの

演奏間隔とは図1における八分音符、四分音符などを単位とし、その音符の立ち上がり時刻間の時間間隔を指す。

実際にコンピュータと人間の演奏の「ずれ」を測定したところ、平均値が0とならないことがあり、演奏者ごとに多少なりともバイアスがかかっていることが示された。これは、「両者の演奏が同期している」という判断が個人によって異なることを示唆しているが、その詳細な検討については今後の課題とし、本研究では全演奏の平均値をバイアス量と見なし、補正したデータで分析を行うこととした。なお、各演奏者の平均値はそれぞれ、演奏者A: 9.0ミリ秒、演奏者B: -1.7ミリ秒、演奏者C: 24.2ミリ秒であった。

結果として生じている可能性のある順序効果については今後の検討課題としたい。

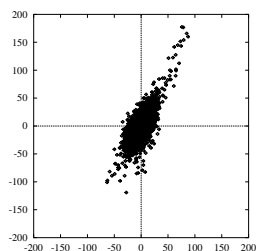


図2 ずれと時間長変化の関係．単位はミリ秒．横軸がずれ．縦軸が時間長変化

Fig. 2 The plot of relation between time lag and the change of durations played by the performer (milliseconds). X-axis means time lag and y-axis means the change of durations.

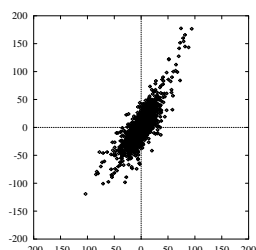


図3 ずれの変化量（時間長のずれ）と時間長変化の関係．単位はミリ秒．横軸がずれの変化量（時間長のずれ）．縦軸が時間長変化

Fig. 3 The plot of relation between the change of time lag (difference of durations) between a computer and a performer, and the change of durations played by the performer (milliseconds). X-axis means the change of time lag and y-axis means the change of durations.

程度変化したかを意味しており「現在のずれ-1つ前のずれ」と定義する．これは、直前の「コンピュータの時間長-人間の時間長」に等しいため「時間長のずれ」と呼ぶこともできる．すなわち、このパラメータはテンポがどの程度ずれているか、ということを表す尺度となっている．

(3)「時間長のずれの変化量」とは、(2)の「ずれの変化量」がどの程度変化したか、すなわち「時間長のずれ」がどの程度変化したかということの意味しており、「現在のずれの変化量-1つ前のずれの変化量」と定義する．

これら3つのパラメータと時間長変化の関係を図2、図3、図4に示す．これらの図から分かるように、時間長変化と(2)のパラメータとの間には高い正の相関が見られるが、時間長変化と(1)あるいは(3)のパラメータとの間にはそれほど大きな相関は見受けられない．

そこで、パラメータ(1)と(3)について、テンポ変

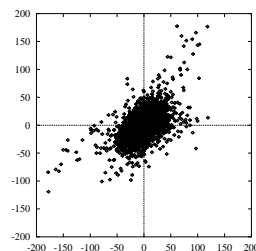


図4 時間長のずれの変化量と時間長変化の関係．単位はミリ秒．横軸が時間長のずれの変化量．縦軸が時間長変化

Fig. 4 The plot of relation between the change of differences of durations between a computer and a performer, and the change of durations played by the performer (milliseconds). X-axis means the change of differences of durations and y-axis means the change of durations.

動時とテンポ安定時における相関の違いについての検討を行った．ここで、テンポ変動時とは、上述の収録デザインで生じたテンポ変動から2小節間、テンポ安定時はそれ以外と定義した．テンポ安定時のパラメータ(1)、(3)と時間長変化との関係をそれぞれ図5、図6に、テンポ変動時のパラメータ(1)、(3)と時間長変化との関係をそれぞれ図7、図8に示す．これらのグラフを見ると分かるように、テンポ変動時には、パラメータ(1)と時間長変化の相関が非常に高いことが見てとれる．これらの図の相関係数を表4に示す．

これらの観察から、人間の次の演奏動作を「ずれ」と「時間長のずれ」から推定する演奏制御モデルが考えられる．そこでまず、各パラメータと時間長変化との相関を調べる．そのとき、従来研究では、過去いくつかの演奏情報を用いて次の演奏を推定するモデルが提案されているので、ここでも、過去いくつかのパラメータとの相関を調べた．また「ずれ」や「時間長のずれ」を考慮する場合、どのような拍を単位として演奏を制御しているか分からないので、音符ごと、四分音符ごと、二分音符ごと、全音符ごとの4種類を調べた．結果を表5、表6に示す．

表5、表6の各列は、時間長の単位を表しており、半拍(八分音符)、1拍(四分音符)、2拍(二分音符)、4拍(全音符)を単位としたときの相関係数の違いを示している．行項目は、それぞれの単位でいくつ前の音符との相関係数かということを示している．これらの表から、2つ以上前の音符とはほぼ無相関であることが分かる．また、時間長の単位を1拍としたときに「ずれ」「ずれの変化量」ともに最も高い相関となることが見てとれる．

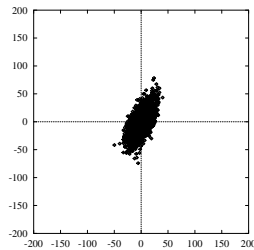


図5 テンポ安定時のずれと時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化

Fig.5 The plot of relation between time lag and the change of duration played by the performer in stable tempi (milliseconds). X-axis means time lag and y-axis means the change of duration.

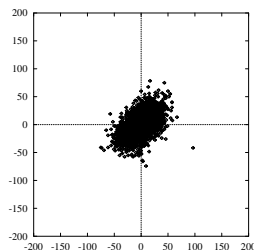


図6 テンポ安定時の時間長のずれの変化量と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸が時間長のずれの変化量。縦軸が時間長変化

Fig.6 The plot of relation between the change of differences of durations between a computer and a performer, and the change of duration played by the performer in stable tempi (milliseconds). X-axis means the change of differences of durations and y-axis means the change of duration.

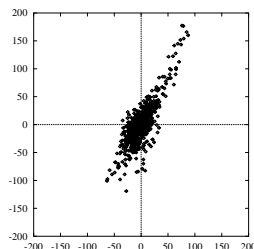


図7 テンポ変動時のずれと時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化

Fig.7 The plot of relation between time lag and the change of duration played by the performer just after changes of tempi (milliseconds). X-axis means the change of differences of durations and y-axis means the change of duration.

#### 4. 重回帰分析による演奏制御モデルの推定

表5, 表6 から, 1 拍単位での直前の情報を用いることにより, 時間長変化を推定する近似モデルを作成可能であると考えられる。そこで, 本研究では, 合奏

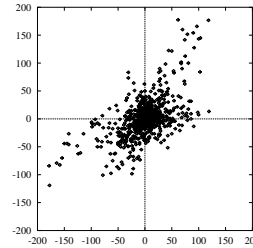


図8 テンポ変動時の時間長のずれの変化量と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化

Fig.8 The plot of relation between the change of differences of durations between a computer and a performer, and the change of duration played by the performer just after changes of tempi (milliseconds). X-axis means the change of differences of durations and y-axis means the change of duration.

表4 テンポ変化にともなうずれ・時間長のずれと時間長変化との相関係数

Table 4 Correlation coefficient of each parameter in terms of tempo changes.

	全体	テンポ安定時	テンポ変動時
ずれ	0.68	0.61	0.81
時間長のずれの変化量	0.53	0.50	0.58

表5 ずれと時間長変化との相関係数

Table 5 Correlation coefficient between time lag and the change of duration played by the performer.

	半拍	1 拍	2 拍	4 拍
1	0.53	0.68	0.59	0.27
2	-0.16	-0.18	-0.30	-0.04
3	0.04	-0.13	0.11	0.03
4	-0.08	-0.06	-0.02	0.01

表6 ずれの変化量と時間長変化との相関係数

Table 6 Correlation coefficient between difference of durations and the change of duration played by the performer.

	半拍	1 拍	2 拍	4 拍
1	0.81	0.81	0.71	0.26
2	-0.23	-0.04	-0.33	-0.06
3	0.14	-0.07	0.10	0.02
4	-0.09	-0.13	-0.07	-0.04

における人間の演奏制御の近似モデルとして, 以下の3通りについて, 検討を行う。

- (1) 「ずれ」による線形予測
- (2) 「ずれの変化量」による線形予測
- (3) 「ずれ」と「ずれの変化量」による線形予測

上記3通りのモデルに対し, 各データから回帰分析により, 予測式を決定した。そのとき「ずれ」や「ずれの変化量」が0の場合, 演奏を変化させる必要はな

表 7 各演奏者の予測モデル式

Table 7 Estimated models of human performance.

モデル	演奏者	予測式	重相関係数
(1)	A	$V = 0.99 \times D$	0.64
	B	$V = 1.23 \times D$	0.70
	C	$V = 1.17 \times D$	0.72
(2)	A	$V = 1.25 \times T$	0.81
	B	$V = 1.27 \times T$	0.81
	C	$V = 1.21 \times T$	0.81
(3)	A	$V = 0.49 \times D + 1.00 \times T$	0.86
	B	$V = 0.63 \times D + 0.95 \times T$	0.86
	C	$V = 0.64 \times D + 0.89 \times T$	0.88

い、という仮定のもと、回帰式の定数項は 0 とする条件で回帰分析を行った。表 7 に各演奏者の推定予測式、および、それぞれの重相関係数を示す。重相関係数の値から、モデル (2) と (3) がモデル (1) に比べて、予測精度が高いことが推測される。

### 5. モデルの評価

前章では人間とコンピュータとの合奏データから各演奏者の演奏制御モデル (各 3 種類) の推定を試みた。これらがどの程度、人間の演奏に近いモデルとなっているのか、ということを検証するため、人間の演奏と比較することにより、モデルの精度について評価を行う。

比較方法として、演奏収録におけるテンポ安定部での人間の持つ演奏制御の誤差と比較する手法を提案する。人間の演奏では、相手と完全な同期をとる演奏は不可能であり、必ず、わずかながらの誤差が生じている。そこで、テンポ一定の相手との演奏を行う場合に人間が持つ誤差 (テンポ安定部における誤差) を人間の持つ不可避の誤差と考え、その誤差と推定モデルによる誤差とを比較する。そこで、収録された演奏において、テンポ安定部をテンポ変化前 32 拍間の演奏と定義した。これは、ランダムに配置されたテンポ変化箇所での最小間隔が 40 拍であり、かつ、誤差の標準偏差が 32 拍付近で最小となったことから決定した。

表 8 に各演奏者ごとに、人間の誤差と推定モデルの誤差を示す。この表は同じ演奏者のデータから求めた予測式に基づく結果であるため、クローズデータによる評価となっている。そこで、オープンデータでの評価として、評価用のデータ以外の演奏者による演奏データから求めた予測式を用いて評価した結果を表 9 に示す。結果より、本モデルによる推定精度は予測式の決定に用いたデータの演奏者にはほとんど影響を受けないことが分かる。

表 8 および 表 9 から、モデル (3) が人間の演奏と

表 8 人間の誤差と推定モデルの誤差との比較 (クローズデータ)

Table 8 Human errors and errors by the models (close data).

演奏者	人間の誤差	モデルの誤差		
		(1)	(2)	(3)
A	0.0147	0.0170	0.0130	0.0115
B	0.0124	0.0156	0.0128	0.0110
C	0.0127	0.0139	0.0117	0.0096

表 9 人間の誤差と推定モデルの誤差との比較 (オープンデータ)

Table 9 Human errors and errors by the models (open data).

演奏者	人間の誤差	モデルの誤差		
		(1)	(2)	(3)
A	0.0147	0.0172	0.0130	0.0116
B	0.0124	0.0157	0.0128	0.0111
C	0.0127	0.0139	0.0117	0.0097

比較しても、十分な近似精度を持っているということが出来る。また、モデル (2) も誤差の値としては、人間の誤差と遜色がない程度の近似精度を持っている。一方、モデル (1) はその推定精度に問題がある。

そこで、モデル (2) と (3) について、シミュレーションした結果を図 9、図 10、図 11、図 12 に示す。図 9 と図 10 はモデル (2) のテンポ変化とずれの変化を表し、図 11 と図 12 はモデル (3) のテンポ変化とずれの変化を表している。図 10 を見ると明らかなように、モデル (2) ではずれが生じたまま、安定状態となっており、その制御方法に問題があると考えられる。モデル (2) はテンポのみで合わせるモデルであり、しばらくするとテンポは相手のテンポと等しくなる (相手のテンポが一定であれば、お互いのテンポのずれは必ず減少するため) が、時間的なずれは考慮されないため、ずれがある一定値のまま演奏が継続する、という奇妙な状況に陥ってしまっているためである。すなわち、モデル (2) は局所的には人間の演奏に近い振舞いをするが、伴奏システムの制御に用いることは困難であるということを示唆している。

結果として、モデル (3) がその推定精度、制御方法ともに、他のモデルに比べ優れており、また、人間と比較しても誤差の少ないモデルとなっていることが示された。最後に比較のため、人間の演奏データの一例を図 13、図 14 に示す。この例では、モデル (3) によるシミュレーション結果と類似した演奏となっていることが見てとれる。

### 6. 考察

すでに述べてきたように、本論文で提案したモデル

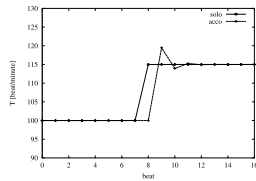


図9 モデル(2)によるシミュレーション結果(テンポ)  
Fig. 9 Tempo changes in the simulation with model (2).

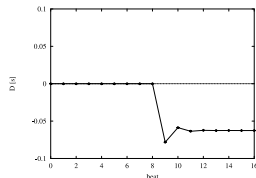


図10 モデル(2)によるシミュレーション結果(ずれ)  
Fig. 10 Time lag in the simulation with model (2).

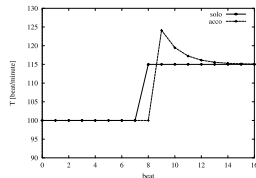


図11 モデル(3)によるシミュレーション結果(テンポ)  
Fig. 11 Tempo changes in the simulation with model (3).

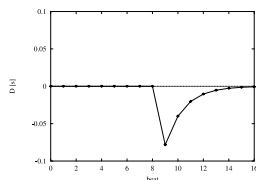


図12 モデル(3)によるシミュレーション結果(ずれ)  
Fig. 12 Time lag in the simulation with model (3).

は人間の振舞いと比較して、良好な結果を得ているが、このモデルを現実の伴奏システムに応用する場合にはいくつかの制限や問題点がある。これらについては今後の検討課題としたい。

まず第1に、実験デザインからも分かるように、今回のモデルは一般の合奏における人間のモデルを推定したものではなく、相手の影響を受けずに演奏を行える演奏者(システム)と合奏する際の人間のモデルを推定したものである。1章でも述べたように、実際の合奏では相互作用が存在し、お互いに相手の影響を受けながら自分の演奏を制御するため、今回のモデルをそのまま適用することはできない。本論文では、一般の合奏における人間の演奏制御モデルを推定することを目標とし、その前段階として、特殊化した状況下で

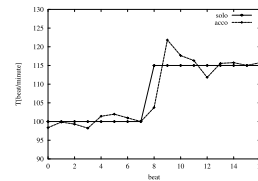


図13 人間の演奏例(テンポ)  
Fig. 13 An example of tempo changes by a human performer.

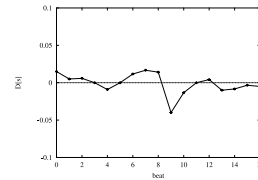


図14 人間の演奏例(ずれ)  
Fig. 14 An example of time lag by a human performer.

の人間の演奏制御モデルを推定した。特殊な状況とはいえ、実際の人間の演奏をモデル化しているため、今後はこのモデルをベースに相互作用を考慮した一般化を行いたいと考えている。

第2に、本論文のモデル推定に用いたデータは同一音価の音符列のみであるが、実際の合奏では、そのような音楽を演奏することは稀であり、さまざまな音価の音符が用いられるため、それらの演奏に対しても合奏を行える必要がある。一方、人間が演奏を行う場合、拍に相当する一定音価の内的クロックに基づいて演奏を行っていると考えられる。本研究では、今回の収録で人間が行った演奏(同一の短い音価の演奏)にその内的なクロックが現れているという仮定に基づいている。実際に伴奏システムが人間の演奏に合わせる場合には、人間の演奏からその内的クロックに相当する拍を検出し、それに対して自分の演奏の基になる内的クロックを生成して伴奏制御を行う手法を検討したい。

第3に、今回の実験では、自分と相手の演奏を明確に区別できるよう、左右の耳に別々に与えたが、実際の演奏では、伴奏者の両耳に独奏者の演奏、伴奏者の演奏が入力されている。このように分離して音を聞かせた要因が脳内で何らかの副作用を生じさせている可能性もあるので、両耳に2人の演奏を混合して入力する場合との比較も今後の検討課題となる。

最後に、本論文では1拍前の状況が人間の演奏に利いているという結果が得られているが、これが音楽的

実際には、この内的クロックは1つではなく、階層性を持っているであろう。

な1拍前なのか、1拍に相当するある一定の時間の情報が利いているのかは定かではないため、曲のテンポを変えるなどして調査する必要がある。

## 7. おわりに

本論文では、人間とコンピュータの合奏データを分析し、「ずれ」と「ずれの変化量」を用いた回帰式により、合奏における人間の演奏時刻を推定するモデルを提案した。このモデルは、人間の持つ誤差と比較しても遜色のない近似精度となっており、また、シミュレーションにより、妥当な制御を行っていることも確認された。

今後の課題として、6章で示した以外にも、以下のことが考えられる。まず、表5、表6において、拍の単位が1拍以外にも関連の高いものがあるが、これはリズムの階層性が演奏制御に影響を与えている可能性を示唆しているため、これらも組み合わせたモデルの構築を検討したい。また、本モデルでは直前のパラメータのみで決定したが、それに加え、さらに過去のパラメータや、本論文では対象としなかった「時間長のずれの変化量」も含め、それらの偏相関などを調べることで、線形予測などの手法が適用できるかどうかを検討する予定である。最終的には、これらの点で改善されたモデルを実際に伴奏システムに組み込むことにより、その演奏が本当に人間らしいものとなっているのか、という点から、チューリングテストのような方法で評価を行いたいと考えている。

## 参考文献

- 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 (1994).
- 堀内靖雄: 自動伴奏, コンピュータと音楽の世界—基礎からフロンティアまで, 長嶋洋一・橋本周司・平賀謙・平田圭二(編), pp.252-269, 共立出版 (1998).
- Dannenberg, R.B.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, *Proc. International Computer Music Conference*, pp.193-198 (1984).
- Vercoe, B.: The Synthetic Performer in the Context of Live Performance, *Proc. International Computer Music Conference*, pp.199-200 (1984).
- 井川孝之, 直井邦彰, 大照 完, 橋本周司: 相互作用モデルによる実時間適応自動伴奏とその動作解析, 電子情報通信学会 1990 年全国大会講演論文集, p.7.216 (1990).
- 澤田秀之, 磯貝昌幸, 橋本周司, 大照 完: 音楽演奏における人間と機械の協調動作について, 情報処理学会第 44 回全国大会講演論文集, pp.1.389-1.390 (1992).
- Dannenberg, R.B.: Music Understanding By Computer, *Proc. IAKTA/LIST International Workshop on Knowledge Technology in the Arts*, pp.41-55 (1993).

(平成 13 年 6 月 15 日受付)

(平成 13 年 12 月 18 日採録)



堀内 靖雄 (正会員)

1967 年生。1990 年東京工業大学工学部情報工学科卒業。1995 年同大学大学院理工学研究科情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。1995 年より千葉大学工学部助手。2000 年より千葉大学大学院自然科学研究科助手。音楽情報科学, 音声情報処理, 福祉情報学に関する研究に従事。訳書に『コンピュータ音楽—歴史・テクノロジー・アート』(Roads, C. 著, 共訳, 東京電機大学出版)。人工知能学会, 音響学会, ソフトウェア学会各会員。



坂本 圭司

1978 年生。2001 年千葉大学工学部情報工学科卒業。現在, 同大学大学院自然科学研究科知能情報科学専攻博士前期課程に在学中。



市川 薫 (正会員)

日立製作所中央研究所を経て現在千葉大学自然科学研究科教授。工学博士。電子情報通信学会理事, 音声研究会委員長, 日本音響学会評議員, 人工知能学会理事等を歴任。電子情報通信学会, 日本音響学会, 人工知能学会, IEEE, 欧州音声学会, 言語処理学会, ヒューマンインターフェース学会, 音声言語医学会, 日本手話学会等の会員。1989 電子情報通信学会論文賞, 1996 年度人工知能学会研究奨励賞受賞。現在, 電子情報通信学会福祉情報学研究委員会委員長, 日本音響学会評議員, 人工知能学会評議員, 電子情報技術産業協会アクセシビリティ対応専門委員会委員長など。