

人間の演奏制御モデルの推定 (1)

～ テンポ安定時における人間のふるまい ～

堀内 靖雄 財津 茜 市川 熹

千葉大学 工学部 情報画像工学科

263-8522 千葉県 千葉市 稲毛区 弥生町 1-33

hory@ics.tj.chiba-u.ac.jp

本稿ではテンポ安定時における人間の演奏制御のふるまいについて述べる。収録された人間と計算機（テンポ変化をあらかじめ指定できる）による演奏を分析し、人間の未来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、テンポが安定しているときには、ある時点において、その直前の人間と計算機のずれの変化量（一拍の時間長のずれに等しい）と人間の次の時間長との間に高い相関が見られた。このことから、テンポ安定時における人間の演奏制御のふるまいが明らかになり、人間の演奏を予測できる可能性が示唆された。

Modeling Human Performers (1)

Yasuo Horiuchi, Akane Zaitso and Akira Ichikawa

Department of Information and Image Sciences,
Faculty of Engineering, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522, Japan

hory@ics.tj.chiba-u.ac.jp

In this paper, we will introduce a model of human performance in stable tempi. Several performances, where performers play together with a computer which can play with an accurate tempo specified beforehand, were recorded. We analyzed these recorded performances to examine which parameters are correlated to next human's behavior (tempo changing). The result shows there is a close correlation between the difference of beat length between a computer and a performer and the next beat length played by the performer.

1 はじめに

本研究では、伴奏システム [1] が人間らしい協調動作を行なえるようにするため、人間の演奏制御

モデルを推定することを目的としている。著者らはすでに [2, 3, 4] など二人の人間による演奏を収録し、その分析を行なってきたが、[5, 6] など

示されているように、人間同士の演奏にはお互いの相互作用が含まれており、この相互的に及ぼされる影響のため、二人の人間の制御モデルを同定するまでには至っていない。そこで本研究では、二人のうちの片方を機械で置き換えることによって、問題を単純化する。機械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できる
- 正確なテンポ変化を行なえる
- 相手に影響を受けない（相互作用しない）

これらの特長を活かすことにより、一人の人間のモデルのみを独立に分析することが可能となる。このような実験は[7]でも行なわれているが、人間のモデルを推定するのに十分なデータが得られているとはいえない。

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、左手パートを計算機が演奏し、右手パート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、人間と計算機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、全曲を通じて右手パートと左手パート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、並行オクターブの場合、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、本収録では左手パートを 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三名である。三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、実験概要について説明した。本来、相手が計算機であることを教えない方がより自然な演奏データが得られるのであるが、予備実験の結果、多く



図 1: 収録曲楽譜

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実験条件とした。

2.3 収録環境

演奏の収録は千葉大学工学部情報画像工学科の音声実験室（防音室）で行なわれた。演奏者は 88 鍵の MIDI ピアノで演奏を行なった。機械による演奏もコンピュータ上のシーケンサプログラムの出力 MIDI 信号を MIDI ピアノへ入力して行なった。これらの MIDI ピアノはともに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 信号と計算機により出力された MIDI 信号を別の計算機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、計算機の演奏と自分の演奏を聞きながら演奏を行なう。そのとき、両者の演奏は左右分離して定位された。

2.4 テンポ設定

計算機の演奏には、あらかじめ以下のテンポ変化が設定された。テンポは楽譜の四分音符を単位としている。

- 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、テンポ変化は小節の冒頭で行なった。各演奏者は上述のパターンすべてを演奏することにより、演奏者一人あたり、表 1 に示す回数のテンポ変化データが得られることになる。

表 1: 演奏者一人あたりのテンポ変化の回数

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

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なった。そのあと、演奏者だけ（計算機の演奏はなし）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、収録が行なわれた。

表 2: 収録手順

演奏者	手順 (番号は演奏パターン)							
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

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なった結果、最終的な収録順序は表 3 となった。

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)

演奏者	手順 (番号は演奏パターン)							
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 データの分析

本研究の目的である伴奏システムでの利用を考慮すると、ある時点において、それまでの過去の情報を用い、未来の人間のふるまい（次の音符）を予測することが望ましい。このような人間のふるまいを予測することにより、以下の二点で伴奏システムの性能改善を行なうことができる。

- 相手の次の演奏をより正確に予測することができる。
- 計算機自身の演奏も人間のふるまいをモデル化した演奏制御方法で行なうことにより、人間らしい協調演奏が可能となる。

ここでは人間のテンポ変化に相当する変数として、「人間の次の演奏間隔¹（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。本稿では便宜的に、これを「時間長変化」と呼ぶことにする。

3.1 分析パラメータ

過去の何らかのパラメータから上述の時間長変化を予測するモデルを構築することが本研究の目的である。そこでまず、過去のパラメータとして以下の三つに着目して分析を行なった。

¹演奏間隔とは 図 1 における各八分音符の時間間隔を指す。

- (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、「計算機の演奏時刻－人間の演奏時刻」と定義する。すなわち、「ずれ」が正の場合、人間が計算機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」がどの程度変化したかを意味しており、「現在のずれ－一つ前のずれ」と定義する。これは、現在の「計算機の時間長－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、ということを表わ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を意味しており、「現在のずれの変化量－一つ前のずれの変化量」と定義する。

これら三つのパラメータと時間長変化の関係を図 2, 3, 4 に示す。これらの図が示すように、どのパラメータとの間にも正の相関が見られる。これは一つの演奏例であるが、他の演奏でもおおむね似たような分布となっている。

そこで、全演奏の相関係数を調べたところ、表 4 に示すような範囲の相関をとることが分かった。この表から明らかなように、「ずれ」と「時間長のずれの変化量」は「時間長変化」に対して、それほど高い相関を示さないが、「ずれの変化量（時間長のずれ）」と「時間長変化」との間には 0.8 程度の高い相関が示された。演奏者によって微妙に範囲が異なるが、ほぼ演奏者間の差異はないといつてよいであろう。

表 4: 相関係数。上から順に (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

	演奏者 A	演奏者 B	演奏者 C
(1)	0.48～0.56	0.55～0.64	0.50～0.63
(2)	0.79～0.82	0.75～0.87	0.74～0.79
(3)	0.58～0.66	0.53～0.75	0.55～0.65

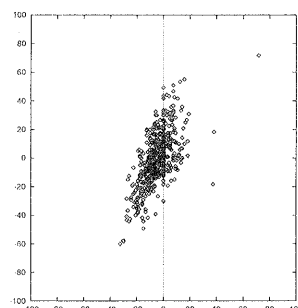


図 2: ずれと時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化。

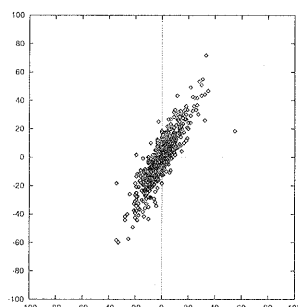


図 3: ずれの変化量 (時間長のずれ) と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれの変化量 (時間長のずれ)。縦軸が時間長変化。

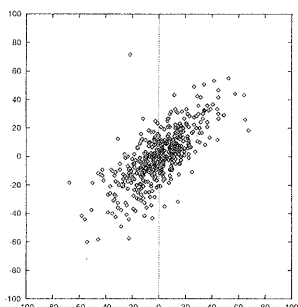


図 4: 時間長のずれの変化量と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸が時間長のずれの変化量。縦軸が時間長変化。

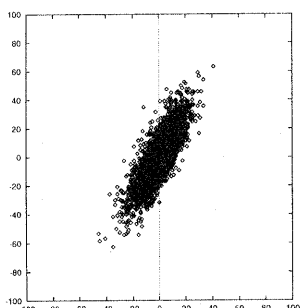


図 5: 演奏者 A のテンポ安定部でのずれの変化量（時間長のずれ）と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれの変化量（時間長のずれ）。縦軸が時間長変化。

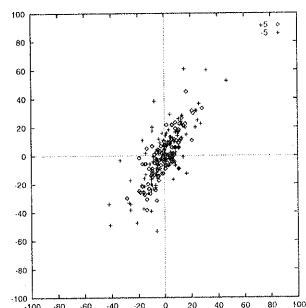


図 6: 演奏者 A のテンポ変動部 (±5) でのずれの変化量（時間長のずれ）と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれの変化量（時間長のずれ）。縦軸が時間長変化。

3.2 時間長のずれと時間長変化との関係

前節で明らかとなった「時間長のずれ」と「時間長変化」との関係について、さらに詳細な分析を進める。この相関関係がテンポ変化とどのような関係にあるのかを調べるため、テンポ変化が生じた時刻から二小節間をテンポ変動部として、テンポ安定部とそれぞれ別々に分析したところ、図 5, 6, 7, 8 のようになった。これらは順に、テンポ安定部、テンポ変動部 (±5, ±10, ±15) を表わしている。

これらの図を見ると明かなように、テンポ安定部では両者は非常に高い相関を示しているのに対し、テンポ変動部ではテンポ変化によらず、す

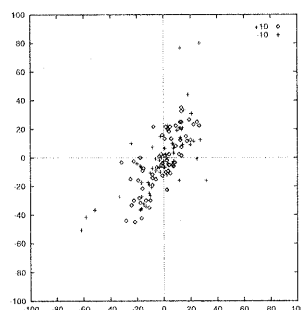


図 7: 演奏者 A のテンポ変動部 (±10) でのずれの変化量（時間長のずれ）と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれの変化量（時間長のずれ）。縦軸が時間長変化。

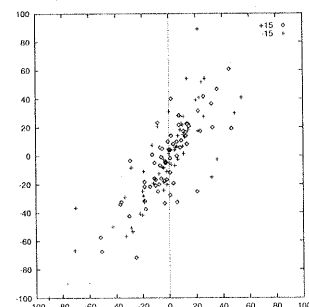


図 8: 演奏者 A のテンポ変動部 (±15) でのずれの変化量（時間長のずれ）と時間長変化の関係。単位はミリ秒。横軸がずれの変化量（時間長のずれ）。縦軸が時間長変化。

べてのグラフにおいて、その相関が低くなっている。これらの図は演奏者 A の全データをプロットしたものであるが、他の演奏者でもほぼ同様の傾向が見られた。

そこで、全データに対し、演奏者ごとにそのテンポ安定部とテンポ変動部に分けて相関を求めた結果を表 5 に示す。どの演奏者のデータにおいても、全データの相関よりも、テンポ安定部の相関が高く、また、テンポ変動部の相関が低くなっている。

また、テンポ安定部の全データから求めた各演奏者の回帰直線はそれぞれ以下ようになる。

$$\text{演奏者 A: } y = 1.35x + 0.01$$

表 5: テンポ安定部とテンポ変動部の相関係数

	全データ	安定部	変動部
演奏者 A	0.80	0.82	0.77
演奏者 B	0.83	0.85	0.77
演奏者 C	0.77	0.81	0.70

$$\text{演奏者 B: } y = 1.44x + 0.08$$

$$\text{演奏者 C: } y = 1.33x - 0.06$$

演奏者ごとに傾きが微妙に異なるが、ほぼ同様の直線で近似されることが示唆される。

4 考察

以上の結果から、テンポが安定している状態では、ずれの変化量、あるいは、時間長のずれが時間長変化と相関が高いことが示された。時間長のずれに応じて、時間長変化を行なうという処理は、お互いのテンポを合わせようとする制御に他ならない。すなわち、両者の時間長のずれが大きい（機械よりも人間の方が時間長が短い、すなわち、テンポが速い）ときには、時間長変化を大きくする（テンポをおそくする）ことにより、両者のテンポを近づけることが可能であることから明らかである。

しかし、テンポ変化が生じたとき、すなわち、相手演奏者とのずれが生じたときには、この制御方法からの逸脱が起こっていると考えられる。上述の回帰式による制御方法を用いれば、しばらくするとテンポは相手と等しくなる（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、時間的なずれは減少せず、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う。すなわち、実際の人間の演奏では、上記のモデルにずれを減らす制御が線形的に加わるのか、あるいは、ずれが生じたときには別の制御モデルに切り替わるのかもしれない。このようなテンポ変化時のモデルの構築は今後の検討課題である。

5 おわりに

本研究では人間の協調演奏動作におけるふるまいを調べるため、機械と人間による演奏を収録し、得られたデータを分析した。その結果、テンポ安定時において、「時間長のずれに応じてテンポを修正する」という人間の演奏制御モデルが示唆された。

今後の課題として、テンポ変化部（不安定状態）における人間の演奏制御の分析が挙げられる。また、今回の実験では協調演奏において重要な要素である相互作用を敢えて除去したため、本稿で示した結果が相互作用が含まれる場合についてもあてはまるかどうかは疑問である。今後は相互作用も含めた演奏収録などについても検討してみたい。

参考文献

- [1] 堀内靖雄. 自動伴奏. 長嶋洋一・橋本周司・平賀譲・平田圭二（編）、コンピュータと音楽の世界—基礎からフロンティアまで（bit 別冊）、pp. 252-269. 共立出版, July 1998.
- [2] 堀内靖雄, 三井卓, 井宮淳, 市川熹. 二人の人間による演奏の収録と分析. 情報処理学会 研究報告, Vol. 96, No. 53, pp. 21-26, May 1996. 音楽情報科学 研究報告 No.15 於 広島文化女子短大.
- [3] 堀内靖雄. 二人の人間による協調演奏動作の分析. 日本認知科学会 学習と対話研究分科会資料 SIGLAL96-2, pp. 1-10, January 1997. 於 東京工業大学.
- [4] 堀内靖雄, 三井卓, 財津茜, 市川熹. 二人の人間による演奏の協調動作について. 情報処理学会 研究報告, Vol. 98, No. 74, pp. 103-108, August 1998. 音楽情報科学 研究報告 No.26 於 北海道大学.
- [5] 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. 1990 年電子情報通信学会春季全国大会 講演論文集, pp. 7.216-7.216, 1990.
- [6] 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（平成 4 年前期）全国大会 講演論文集, pp. 1.389-1.390, 1992.
- [7] Roger B. Dannenberg. Music Understanding By Computer. In *Proceedings of IAKTA/LIST International Workshop on Knowledge Technology in the Arts*, pp. 41-55, 1993.