

人間の演奏制御モデルの推定 (2)

～ テンポ変化時における人間のふるまい～

堀内 靖雄

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（テンポ変化）が過去のどのような要因と関係があるのかについて調べた。結果として、(1) 両者の時間的ずれが 30 ミリ秒以上の場合、人間の次のテンポは時間的ずれに応じて変化し、(2) 両者の時間的ずれが 30 ミリ秒以内の場合には、両者のずれの変化量（時間長のずれ）に応じて変化する、という仮説が導かれた。

Modeling Human Performers (1)

Yasuo Horiuchi

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 hypothetical model of human performance. Several performances, where performers play together with a computer which can play with an accurate tempo specified beforehand, were recorded. These recorded performances were analyzed in order to examine which factors affect next human's behavior (tempo changing). As a result, a hypothesis about human's performance were suggested that next beat length played by human performer correlates to (1) the time lag between the computer and the performer when the lag is larger than 30 milliseconds and to (2) the difference of beat length between them when the lag is less than 30 milliseconds.

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に、人間の演奏制御のふるまいを明らかにすることを目的とする。すなわち伴奏システムが、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)を予測できるようにすることである。このような人間のふるまいの予測が可能になると、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。

著者らはすでに [2, 3, 4] などで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] などで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存在し、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独立に同定するまでには至っていない。そこで、二人のうちの片方を機械で置き換えることにより、[7] ではテンポ安定時における演奏者のふるまいを分析した。本研究では、テンポ変化時における演奏者のふるまいを分析する。このような実験は [8] でも示されているが、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。

なお、人間の協調演奏動作のふるまいを分析する場合、大きく分類すると、音楽的な側面での協調動作と反射的な協調動作の二つが挙げられる。本研究では、反射的な協調動作について明らかにすることを目的としており、音楽的な意味での協調動作の分析は今後の課題である。

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。

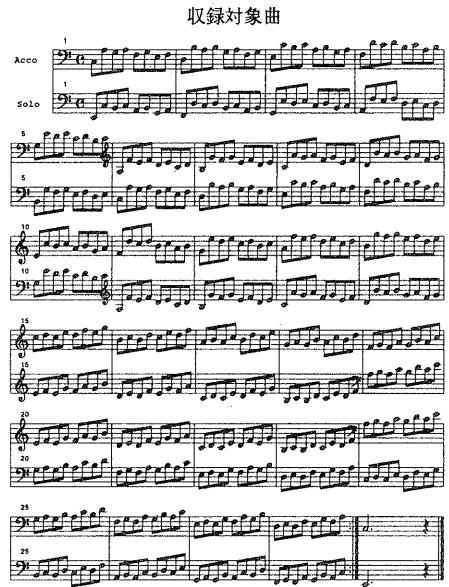


図 1: 収録曲楽譜

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が、お互いの音を聞こえやすくするため、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、表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。MIDI ピアノは音源を内蔵しているが、MIDI 楽器の特性の違いなどによる誤差を最小限に抑えるため、今回は MIDI ピアノの内蔵音源は利用せず、演奏者の演奏した MIDI 信号と計算機が出力した MIDI 信号をもう一つの計算機で記録すると同時に、別個に用意された MIDI 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。

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 拍表示し、それに続けて演奏を開始するよう教示した。

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

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。その後、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、上述のすべてのパターンによる収録が行なわれた。

3 テンポ安定時の人間のふるまい

[7] では上述の収録データに対し、テンポ安定時の人間のふるまいを分析した。以下、その結果について簡単に述べる。

3.1 目的変数

演奏のある時点において、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）を予測する状況を想定し、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。

3.2 説明変数

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ため、[7] では、過

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。

去のパラメータとして以下の二つと時間長変化との関係を明らかにした。

(1) ずれ

(2) ずれの変化量 (= 時間長のずれ)

(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、両者の「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。

3.3 分析結果

テンポ変化が生じた時刻から二小節間をテンポ変化部として除去し、テンポ安定部のみで上述の二つのパラメータと時間長変化の関係を分析した。結果として、ずれの変化量（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を意味している。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、両者のテンポを近付けることが可能であることからも明らかである。

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、時間長のずれと時間長変化の相関は低くなっているため、この制御方法からの逸脱が起こっていると考えられる。仮に上述の制御方法で演奏を続行したとすると、しばらく経過した後、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りてしまうことになる。そこで、本研究では、テンポ変化時の人

間のふるまいが [7] で明らかになったテンポ安定時のふるまいとどのように異なるのかを分析する。

4 テンポ変化時の分析

4.1 テンポ変化時の演奏変化

本研究では、[7] で除外したテンポ変化時における人間のふるまいを分析する。テンポ変化時の人間の演奏動作の例を図 2 に示す。

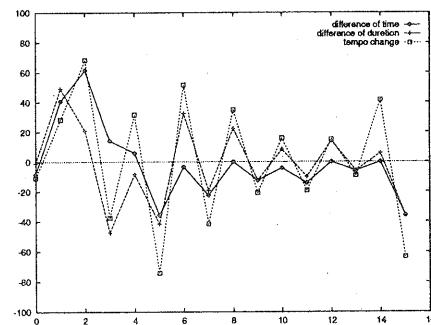


図 2: テンポ変化時のずれ、時間長のずれ、次の時間長変化の関係。横軸は拍時刻（八分音符単位）。テンポ変化は時刻 0 で発生。

図の時刻（拍時刻）0 がテンポ変化の時刻であり、その結果は時刻 1 におけるずれの増加に表われている。この例はテンポが 115 から 100 に変化した状況を示している。時刻 1 から時刻 4 まではテンポ変化の影響を受けているが、時刻 5 以降は [7] で示した制御方法に従っていると考えられる。

テンポ変化時の挙動をもう少し詳細に見てみると、この間は「ずれの変化量」よりも「ずれ」自体に影響を受けているように見受けられる。すなわち、「ずれ」が極端に大きい（30 ミリ秒ないし 40 ミリ秒以上）場合、「ずれ」に応じて、次のテンポを決定してのではないかと考えられる。

4.2 ずれとテンポ変化の関係

「ずれ」が ±30 ミリ秒以内の場合とそれ以外の場合に分けて「ずれ」と「時間長変化」の関係を分析する。演奏者ごとの「ずれ」と「時間長変化」の関係を図 3～図 5 に示す。

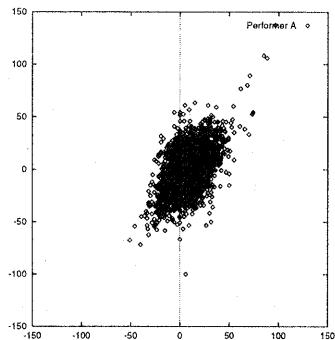


図 3: ずれと時間長変化の関係（演奏者A）。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化。

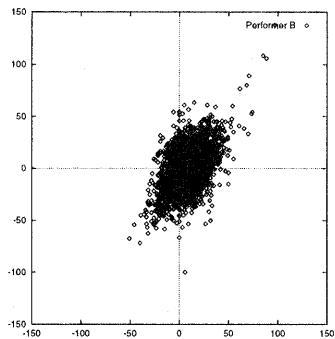


図 4: ずれと時間長変化の関係（演奏者B）。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化。

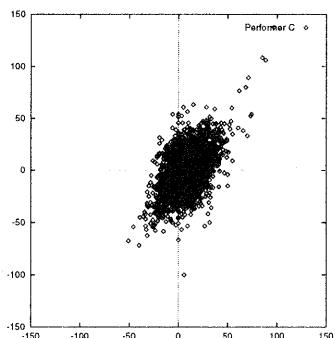


図 5: ずれと時間長変化の関係（演奏者C）。単位はミリ秒。横軸がずれ。縦軸が時間長変化。

これらの図を見ると分かるように、演奏者ごとにずれの値はバイアスがかかっている。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つて異なることを示唆している²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みなし、補正したデータで分析を行なうこととする³。

補正した「ずれ」を土 30 ミリ秒以内の場合とそれ以外の場合に分けて「ずれ」と「時間長変化」の関係を分析した。演奏者ごとの相関係数を表 2 に示す。表から、演奏者を問わず、「ずれ」が大きい場合、「時間長変化」は「ずれ」と非常に相関が高いことが分かる。

表 2: ずれと時間長変化の相関係数。演奏者ごとに、全データ、ずれが土 30 ミリ秒以内、それ以外に分類。

演奏者	全データ	ずれ小 土 30 ミリ秒以内	ずれ大 それ以外
A	0.49	0.39	0.88
B	0.58	0.54	0.88
C	0.52	0.48	0.79

5 考察

上述の結果を [7] と組み合わせることにより、人間の演奏制御において、以下のような仮説が導かれる。

- ずれが小さければ、「ずれの変化量」（時間長のずれ）に応じて、次のテンポを増減する。
- ずれが大きければ、「ずれ」に応じて、次のテンポを増減する。

このことは人間の演奏者が、ずれが小さいときには「テンポを合わせる」という動作を行ない、ずれが大きいときには、仮にテンポ変化が大きくなってしまうとしても、「ずれを修正する」というような動作を行なっていることを意味している。

今回の収録のような、反射レベルの演奏制御において、時間のずれとテンポのずれがテンポ変化

²たとえば演奏者Cは全体的にみた場合、計算機より 20 ミリ以上先行して同期しながら演奏を行なっている。

³各演奏者の平均値（ミリ秒）はそれぞれ、A: 9.0, B: -1.7, C: 24.2 であった。

に影響を与えることが示唆されたが、この二つが線形的に重ね合わされるとすると、得られたデータを説明することは困難である。人間は必ずしも大小によって、その演奏制御のもととなるパラメータを変更しているのではないかと推察されるが、それが大きいときにもテンポのずれがまったく影響を与えていない訳ではないため、それら二つのパラメータの組み合わせ方が異なるのではないかと考えられる。これら二つのパラメータを統一したモデルの構築は今後の課題である。

また、上述の仮説は、局所的な情報のみを用いて将来の演奏を決定しているというものであるが、実際には、過去からの情報も利用していると思われるため、それら過去の情報との関係も分析していきたい。

6 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に、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。^[7] 得られたテンポ安定時における分析結果と組み合わせることにより、「それが小さければ時間長のずれに応じてテンポを修正し、それが大きければ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。

今回の分析では、人間の演奏制御の全体的な挙動を統計的に示したのみであり、より詳細な分析を行なう必要がある。また、今回の収録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ため、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 SIGAL96-2, 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] 堀内靖雄, 財津茜, 市川熹. 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~. 情報処理学会 研究報告, Vol. 99, No. 51, pp. 59-64, May 1999. 音楽情報科学 研究報告 No.30 於 沖縄県立芸術大学.
- [8] Roger B. Dannenberg. Music Understanding By Computer. In *Proceedings of IAKTA/LIST International Workshop on Knowledge Technology in the Arts*, pp. 41-55, 1993.