

二人の人間による演奏の協調動作について

Cooperation between Two Performers

堀内 靖雄 三井 卓 財津 茜 市川 熹
Yasuo Horiuchi Suguru Mitsui Akane Zaitso Akira Ichikawa

千葉大学 工学部
Chiba University

本論文では人間二人の演奏およびテンポ一定で演奏を行なう計算機と人間による演奏を収録し、人間の演奏制御がどのように行なわれているのかということ調査する。相手に合わせるように教示された演奏者(伴奏者)は、ずれに敏感に反応し、テンポを修正して合わせようとするのが示された。また、テンポを早くしたいという欲求があるとき、その分をバイアスしてテンポ変化を行なうということが示唆された。相手をリードするように教示された独奏者は、伴奏者ほど敏感にテンポ変化をせず、テンポをキープしようとする意図がみられた。さらにずれが小さい場合には、ずれとはあまり相関のないテンポ変化を行なうことが観察された。

We recorded several performances where two performers play together or one performer plays with a computer which can play with a fixed tempo. We analyzed the timing information of these performances. The result shows a performer who is instructed to be an accompanist changes her tempo according to the time lag between her and another performer(soloist). A performer who is instructed to be a soloist does not change her tempo according to the lag so much in order to keep their tempo. When the lag is very short, they change their tempo regardless of their time lag.

1 はじめに

現在、「人間とコンピュータが協調して演奏を行なう」というテーマは、研究分野としても、音楽制作の現場においても、もっともホットなトピックの一つとなっている。その中で要素技術的な研究分野に位置するものとして、伴奏システム [1] が挙げられる。伴奏システムとは、独奏、伴奏の楽譜がともにシステムにあらかじめ与えられており、人間の独奏者と一緒に演奏を行なうシステムである。コンピュータの行なうべき処理は、楽譜を参照しながら独奏者の演奏を追跡し、それと同期して伴奏パートの演奏を行なうというものである。

従来の伴奏システムの問題点として、伴奏の合

わせ方が機械的で、不自然な印象を与えてしまうということが挙げられる。この原因はさまざま考えられるが、その一つとして、人間の伴奏者がどのような制御により独奏者と合わせているのか、ということが解明されていないことが挙げられる。人間一人の演奏の認知科学的な分析は数多く行なわれているが、このように、二人あるいはそれ以上の人間による演奏の分析はほとんど行なわれていないのが現状である。

そこで本研究では、実際に人間同士の演奏を収録し、その演奏制御がどのように行なわれているのか、ということ調べることを目的とする。また、それと同時に、テンポ一定で演奏を行なう計算

機と人間による演奏も収録する。このとき、人間の演奏者は相手が機械であるということを知らず、人間と合わせていると思込んでいる。本論文では、このようにして得られたデータを分析した結果について報告する。

2 実験デザインと演奏収録

2.1 演奏の制約

人間同士によるアンサンブル演奏では、音響的な情報以外にも視線や動作など、さまざまな情報を利用してコミュニケーションを行ないながら演奏している。しかし、それらをすべて包括的に分析することは困難であるため、今回の収録では相手の演奏と自分の演奏のみしか聞こえない、という状況での合奏を行なった。これは人間の演奏者に機械と演奏しているということを気付かれないようにするための必要条件でもある。

2.2 演奏曲目

収録の対象曲として、Hanon 作曲の「ピアノの名手になる 60 練習曲」の第 5 番を選択した。これは四分の二拍子の曲で 29 小節からなり、繰り返により、全体が二回繰り返され、繰り返した場合の小節数は 57 小節である。この曲は全曲を通じて、右手パートと左手パートがオクターブで並行移動する曲である（譜例として冒頭部分を図 1 に示す）。

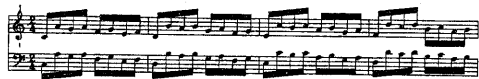


図 1: 収録曲冒頭部分

今回の収録では、右手パートと左手パートをそれぞれ二人の演奏者に演奏してもらうこととした。すなわち、右手だけで演奏できる単旋律の曲として、この曲を合奏してもらう。そのとき、右手で演奏しやすいようにするため、もとの記譜よりもオクターブ高く移調した。図 1 は移調したあとの楽譜である。

この曲を選んだ理由は以下の通りである。

- 最後の音符以外はすべて 16 分音符から構成されており、一定のリズムで演奏したデータを大量に得ることができる。
- 繰り返しがあるため、同じ箇所を 2 度収録できる。
- 二人の演奏が記譜上はまったく同じリズムで

オクターブが異なるだけなので分析が容易である。

- 技巧上、簡単な曲であるため、演奏ミスが起こりにくい。

楽譜通りに繰り返しを実行したところ、一曲の演奏時間は約 3 分であった。また、実際の楽譜には存在しないが、繰り返したあと 2 回目の 15 小節目でテンポを早くする指示 (*piu mosso*) を与えた。

より音楽的な曲を用いて同様の収録を行なっている研究も見られるが [2, 3]、音楽性を分離して分析することが困難であるため、本研究では、このような技巧的、音楽的にシンプルな曲を選択した。

2.3 演奏者

演奏者は音楽大学に所属する学生および卒業生三名である。三名はお互いに収録時が初対面であった。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、アンサンブル演奏が録画される、ということのみ伝えられた。

2.4 収録環境

演奏の収録は千葉大学工学部情報工学科の音声実験室で行なわれた。この部屋は二つの防音室が隣接しており、各々の部屋からガラス越しに反対の部屋を見ることが可能である。今回の収録では演奏者は音響のみの情報しか用いないため、ガラス窓はふさいで実験を行なった。

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、各演奏者の演奏した MIDI 信号を計算機で記録すると同時に別に用意された音源で音を鳴らし、それを各演奏者のヘッドホンへと伝えた。ここで重要なことは、各演奏者が聴いている音は厳密には鍵盤をたたいてから音として出力されるまで若干遅れているが、二人の演奏者は同じ音源の音を聴いているため、二人のデータ間のずれの誤差は最も少なくなるということである。

演奏者はヘッドホンにより、(外部音源で鳴らされた) 相手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、各演奏者の演奏は左右分離して定位された。

鍵盤をたたいたときに発生する MIDI 信号はパ

ソコンを用いて記録された。また、音源で合成された音響信号（ヘッドホンに呈示されるものと同じ）は DAT に収録された。さらに、二人の演奏者の顔と手の動きがビデオテープに収録された。

2.5 収録における条件

収録の条件をいくつか設定した。

演奏者の役割 各演奏者には独奏者と伴奏者という役割を与えた。独奏者には相手をリードするように、また、伴奏者には相手に合わせるようにという教示を与えた。

テンポ変化の指示 独奏者にはテンポ変化の教示を与えたが、伴奏者にはテンポ変化の教示を与える場合と与えない場合について行なった。ただし、各被検者の 2 回目以降の演奏では、テンポ変化が被検者に推測されるってしまう可能性があるため、各被検者の最初の演奏でのみテンポ変化の指示を与えないデザインとした。

演奏するパート 独奏者と伴奏者がもとの楽譜における右手、左手のどちらのパートを演奏するか。

以下、便宜上、計算機を S、三人の演奏者を A、B、C と呼ぶことにする。収録デザインを表 1 に示す。

表 1: 収録のデザイン

収録番号	演奏者		テンポ変化	独奏者の演奏パート
	独奏者	伴奏者		
1	計算機 S	演奏者 A	未知	右手パート
2	演奏者 A	演奏者 B	未知	右手パート
3	演奏者 B	演奏者 C	未知	右手パート
4	演奏者 C	演奏者 A	既知	右手パート
5	計算機 S	演奏者 B	既知	右手パート
6	演奏者 A	演奏者 C	既知	右手パート
7	演奏者 B	演奏者 A	既知	左手パート
8	演奏者 C	演奏者 B	既知	左手パート
9	計算機 S	演奏者 C	既知	左手パート

2.6 演奏者の待機と誘導

各演奏者は別々の待合い室で待機してもらい、演奏の直前に実験者が呼びに行き、収録まで誘導した。待機、誘導、入室において、相手の演奏者が誰であるのか分からないようにするため、実験者は細心の注意を払って行なった。

2.7 演奏の開始

メトロノームで 8 分音符 = 90 で 8 拍呈示したのち、そのテンポでメトロノームに続けて演奏を開

始してもらった。これは、両者の演奏が同時に始まるのにもかかわらず、目や音による合図を送れないために必要な情報である。

2.8 収録手順

収録当日、電子楽器の演奏に慣れるため、演奏者は一人ずつ、自由に練習する時間が与えられた。

収録にあたり、はじめに各演奏者に伴奏パートを一人だけで演奏させ、演奏情報を記録した。

その後、上述の収録デザインに従って、収録を行なった。各演奏者において、演奏ミスはなく、すべてのデータが得られた。また、収録が終わってから、一緒に演奏した相手の中にテンポ一定の機械があったことに気が付いたかどうか、という質問を各被検者に行なったところ、誰もそのことに気が付いていなかったということが確認された。

3 データの分析

3.1 分析の対象データ

上述の収録により得られたデータのうち、本稿で分析の対象とするのは、テンポ変化を行なうまでのデータである。テンポ変化の瞬間、および、その後の演奏からも有用なデータが得られたが、本稿では紙面の都合上それらについて割愛する。

3.2 ずれの分析

まず、各演奏におけるずれについて分析を行なう。「ずれ」とは楽譜上同じ時刻に記譜されている音符が実際の演奏で、どの程度ずれたかを意味しており、「独奏者の演奏時刻 - 伴奏者の演奏時刻」と定義する。すなわち、ずれが正の場合、伴奏が独奏よりも早いタイミングで演奏し、ずれが負の場合、独奏が伴奏よりも早いタイミングで演奏しているということの意味する。

ずれの度数分布を図 2 に、平均値と標準偏差を表 2 に示す。

表 2: ずれの平均値。括弧内が標準偏差である。単位はミリ秒。

		伴奏		
		A	B	C
独奏	S	29.3(25.5)	2.7(13.0)	6.6(12.0)
	A	—	1.1(17.4)	8.9(15.1)
	B	12.7(16.2)	—	10.7(14.2)
	C	4.2(13.9)	-6.1(14.0)	—

最初の演奏を除けば、度数分布は全体的に同じような分布を示しているが、その分布の中心が微

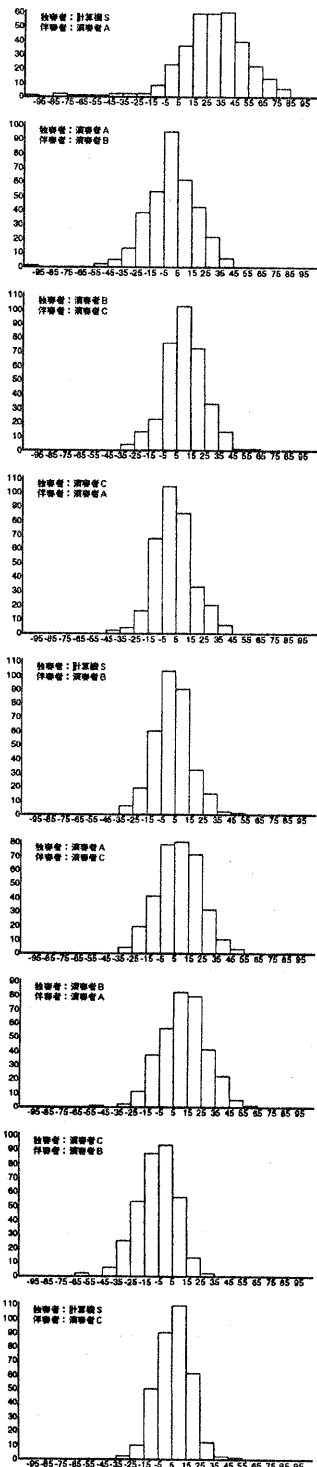


図 2: 度数分布。各クラスは 10 ミリ秒幅。横軸の単位はミリ秒。縦軸の単位は頻度。

妙にずれている。このことは表 2 の平均値からもみてとれる。

まず、平均値が正の方向へシフトするという点について考察を加える。この曲はメトロノームで呈示されるテンポが演奏者にとっては遅く感じ、どうしても早く演奏したい、という意志が生じるようである。しかし、独奏の役割の演奏者は伴奏がテンポを早くしようとして、早いタイミングで演奏したとしても、テンポを一定に保とうとするため、伴奏のタイミングより遅いタイミングで演奏し、テンポキープにつとめる。その結果、独奏者は伴奏者よりも遅いタイミングで演奏するという図式ができあがる。

一方、8 番目の演奏では、平均値が負となっている。これは伴奏の役割の演奏者 B は 3 回目の演奏であり、すでに、この曲のテンポについて、独奏者の意図（あるいは実験者の意図）を十分に理解しているからであると考えられる。演奏者 C は三人の中で一番テンポを早くしたいという意図が強い傾向が見られ、実際、この演奏では最終的にはどんどんテンポが早くなってしまい、最初のメトロノームで呈示されたテンポとは大きく異なってしまった。しかし、演奏者 B はあまり早くならないようにテンポキープを試みている。すなわち、独奏者と伴奏者の役割が逆転してしまったかのような関係となっている。結果として、演奏者 C は早く演奏しようとし、演奏者 B がテンポキープしようとしたため、他とは逆の傾向が表われたと考えられる。

演奏者 B がテンポキープしようとしている様子は他の演奏からもうかがえる。例えば、演奏者 B が独奏の役割のとき、演奏者 B は伴奏に引張られないよう、一所懸命テンポをキープし、結果として、演奏者 A に対しても、演奏者 C に対しても大きく遅れたタイミングで演奏を行なっている。また、演奏者 B が伴奏の立場の場合、相手が機械の場合は落ち着いて演奏しており、ほぼ同期がとられている。独奏が演奏者 A の場合にも同様で、この場合、演奏者 A も独奏者という役割をまっとうするため、テンポをキープし、伴奏の演奏者 B もテンポを早くしようとしないうえ、安定したテンポでほぼ同期がとられている。

次に最初の演奏（機械と演奏者 A によるもの）が他と大きく違うことについても考察する必要がある。これは演奏者 A にとって最初の演奏であり、し

かも、独奏者はテンポ一定の機械であるため、なかなか合わせづらそうである、という状況がその表情からもみてとれた（他の演奏者二人は人間との演奏から収録が開始される）。演奏者Aには、テンポを早くしたいという意図も感じられ、テンポアップを何度も試みるが、機械の一定のテンポにははまれ、度数分布にあるように独奏よりも早いタイミングで演奏を行ない、他とは異なる分布になってしまったものと思われる。

このように、演奏者の個性や状況によって、結果が大きく異なってしまうということが生じるため、この事実は今後の収録の際にも注意深く検討する必要がある。

3.3 ずれの修正の分析

次に、ずれが生じたあと、各演奏者がどのように次の演奏を修正しているのかということについて分析を行なう。各演奏者ごとにずれとその次の音符のテンポ変化（実際には、ずれの前との音符間隔に対して、次の音符間隔をどの程度増減したか）を図3に示す。機械が独奏の役割を演じるときには、テンポの変化は起こらないので、図には示していない。よって、図は上段から順に、独奏者の演奏2,3,4、独奏者の演奏6,7,8、伴奏者の演奏1,2,3、伴奏者の演奏4,5,6、伴奏者の演奏7,8,9を表わしている。

演奏1は上述のように、特殊な状況となっているため、伴奏者のテンポ変化もずれとはほとんど無関係であるが、それ以外の伴奏者のテンポ変化はおおむね似たような分布を示している。すなわち、以下の二点が示唆される。

- ずれを修正する方向へテンポを変化する
 - 分布がずれの平均値のあたりへ横方向にシフトしている
 - 分布の中心部分はややふくらみがある
- 一方、独奏者の方は、伴奏と似ている傾向を示すものの、伴奏に比べて、ふくらみが大きい。

これらから、以下のような人間の演奏制御が示唆される。

- 伴奏の役割の演奏者は、ずれに敏感に反応し、テンポを修正して合わせようとする。
- そのとき、テンポを早くしたいという欲求がある場合、ずれにそのバイアス分を付加して、テンポを修正する。

- 独奏の役割の演奏者は、おおむねずれを修正する方向へテンポを変化するが、テンポキープのため、伴奏者ほど敏感にはずれに反応しない。
- 独奏、伴奏とも、ずれが小さい場合には、必ずしも修正の方向へ変化させず、ずれとはあまり関連のないテンポ変化を行なう。

4 おわりに

本研究では、人間による協調演奏動作について調べるため、人間同士、および、人間と機械による演奏を収録し、得られたデータを分析した。個人差や演奏状況による影響が大きいものの、全体として、独奏、伴奏という役割に応じたテンポ制御を行なっているということが示唆された。また、テンポを変化させたいという意図がどのように演奏制御に表われるか、ということに関しても興味深い知見が得られた。

今後は、個人差などの影響を抑えられるような実験デザインを設計し、より大量の演奏データを収録することにより、人間同士のアンサンブルにおける演奏制御に関するさまざまな知見を得たいと考えている。このような演奏データを数多く集めることができれば、その演奏コーパスを用いて、伴奏システムのみならず、さまざまな分野へと応用できるであろう。

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] R. A. Rasch. Synchronization in Performed Ensemble Music. *Acustica*, Vol. 43, pp. 121-131, 1979.
- [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.

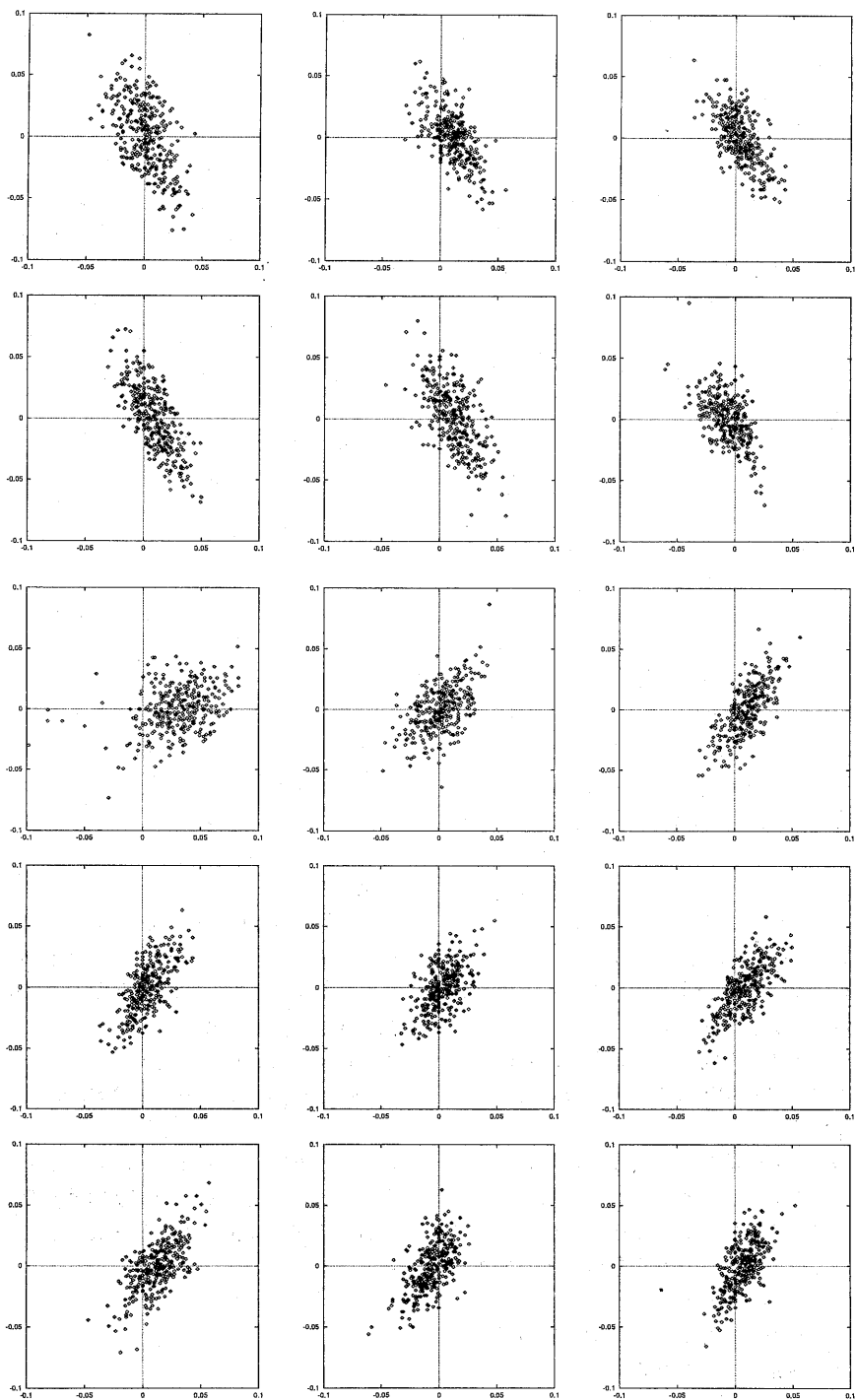


図 3: 横軸はずれ、縦軸はそのずれの次の音符の修正量。単位はともに秒。グラフは上 2 段が独奏 (左上から順に演奏 2,3,4,6,7,8)、下 3 段が伴奏 (順に演奏 1,2,3,4,5,6,7,8,9)。