

# 名演奏家の合奏録音における 伴奏者の演奏タイミング制御の分析

和田 静花<sup>†1</sup> 堀内 靖雄<sup>†1</sup> 黒岩 眞吾<sup>†1</sup>

**概要:** 自動伴奏システムが人間らしい伴奏を実現するためには、人間が行っている伴奏制御方法の解明が必要である。我々の先行研究において、人間同士の合奏を分析することにより、「独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ」と「伴奏者の時間長変化」の履歴から未来の演奏を予測する手法を提案したが、その研究で分析したデータは単純な練習曲であったため、現実的な合奏における有効性は不明であった。そこで本研究では名演奏家の合奏録音データを分析し、先行研究のパラメータの有効性を調査することを目的とする。分析の結果、演奏表現上の音楽的逸脱が少ない状況では先行研究の有効性が示されたが、音楽的逸脱が大きい状況では先行研究のパラメータでは予測が困難であることが示された。

## Analysis of Timing Control of Accompanists in Ensemble Recordings by Virtuosi

SHIZUKA WADA<sup>†1</sup> YASUO HORIUCHI<sup>†1</sup>  
SHINGO KUROIWA<sup>†1</sup>

**Abstract:** In order to realize an automatic accompaniment system like a human, it is necessary that control method of human accompanist is elucidated. In our previous study, we proposed a method to predict the duration of the next beat using the history of two parameters; "the time difference between the soloist and the accompanist" and "the tempo modification of the accompanist". However, the score used in the analysis is just a simple etude, so the pragmatic effectiveness of the method for real-world music is not clear. Therefore, we analyze ensemble recordings by virtuosi to investigate the effectiveness of these two parameters. As a result, the effectiveness was shown when the tempo was stable, on the other hand, it was shown that the prediction was difficult in the situation where the virtuosi perform expressively with tempo rubato.

### 1. はじめに

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・システムの一つとして、音楽情報処理研究のみならず、人間とのリアルタイム・インタラクションを考える上で重要な研究テーマとなっている[1][2][3][4][5]。伴奏システムでは楽譜は独奏・伴奏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システムの演奏タイミングを制御する。従来の研究ではおもに演奏ミス等、独奏者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ことが多かった。この原因として、人間の伴奏者がどのような制御方法により独奏者と合わせているのかが解明されていないことが挙げられる。当研究室の先行研究[6]では二人の演奏者が二台の MIDI ピアノで合奏したデータを分析することにより、伴奏者が独奏者の演奏に対し、どのように演奏しているかを表現する伴奏制御モデルを提案した。しかしながら、分析に利用した楽曲は音価一定の単純な練習曲であったため、現実的な合奏における有効性は不明であった。そこで本研究では市販されている著名な演奏家による録音 CD を分析することにより、先行研究の提案手法の有効性

を調査することを目的とする。

### 2. 先行研究の伴奏制御モデル

先行研究[6]では「独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ」と「伴奏者の時間長変化」の過去の履歴から伴奏者の次の演奏タイミングを予測する伴奏制御モデルが提案されている。

「独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ」とは各拍における両者の演奏時刻のずれであり、 $n$ 拍目のずれ $d_n$ は以下の式で定義される。

$$d_n = T_n - t_n$$

ただし、 $T_n$ は $n$ 拍目の独奏者の演奏時刻、 $t_n$ は $n$ 拍目の伴奏者の演奏時刻である。

「伴奏者の時間長変化」とは各拍における伴奏者の演奏時間間隔(Inter onset interval, 以下 IOI)の変化を表し、 $n$ 拍目の時間長変化 $c_n$ は以下の式で定義される。

$$c_n = l_n - l_{n-1}$$

ここで $l_n$ は伴奏者の IOI であり、以下の式で定義される。

$$l_n = t_n - t_{n-1}$$

先行研究では過去数拍の履歴から、重回帰分析により未来の演奏を予測していたが、本研究で分析するような一般的な楽曲においては、休符や長い音符の影響により、過去数拍分の連続したデータの履歴を取得することが困難である。そのため、本研究においては直前 1 拍前のずれ $d_{n-1}$ と

<sup>†1</sup> 千葉大学  
Chiba University

時間長変化 $c_{n-1}$ から、次拍の時間長変化 $c_n$ を予測するという簡略化したモデルに基づいて分析し、これら二つのパラメータの有効性の評価を行う。

### 3. 分析データ

#### 3.1 分析対象曲ならびに分析 CD

分析対象曲は Schubert 作曲「“しばめる花”の主題による変奏曲」とする。この曲はフルートが独奏パート、ピアノが伴奏パートを演奏しており、テンポ変化など様々な音楽的要素を多く含んだ楽曲である。本研究では第1変奏、第3変奏、第6変奏の三箇所を分析対象とした。これらの箇所は全体的にはテンポが一定であり、また、独奏・伴奏ともに拍上に存在する音符が多いため採用した。楽譜の一部を図1に示す。また、本研究で使用したCDは表1に示す5組の演奏家によるものである。



図1 分析に用いた楽譜の一部

#### 3.2 演奏時刻の計測手法

先行研究[7]では、様々な楽器による合奏において指向性マイクを使用して収録することにより、各楽器の音を分離して分析することを可能にしているが、この手法では大量にデータ収集をすることが困難である。そのため本研究では、楽譜から MIDI データを作成し、文献[8]のツールを用いて CD の音響信号に MIDI データをフィッティングさせ、各音符の立ち上がり時刻を測定した。しかしながら、フィッティングエラーや微妙な誤差が生じるため、フィッティング結果に対し、手修正を行った。その際、文献[9]の P. 67 のツールを利用すると同時に人間の耳による聴取も行い、各拍上の音符の立ち上がり時刻を厳密に決定した[10]。

### 4. 分析

#### 4.1 第6変奏

この箇所は8分の3拍子で、それほど速いテンポではないため八分音符を拍単位と考え、1小節を3拍として分析を行った(BPM=133~154)。各伴奏者の IOI の平均および標準偏差を表2に示す。なお、Duo C については、楽譜上の繰り返しを省略しているため、データ数は他の演奏家の半分となっている。

表2より、この箇所では伴奏者ごとの IOI 平均には若干差が見られるがその標準偏差は小さいことがわかる。この結果から、この箇所は全体として、テンポ変化が少ない箇所であると言える。

本研究では先行研究[6]と同様に「独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ」と「伴奏者の時間長変化」から次の「伴奏者の時間長変化」を予測する手法について、その有効性を調査する。まずはじめにそれぞれのパラメータとの相関を調べるため、横軸を $d_{n-1}$ または $c_{n-1}$ とし、縦軸を $c_n$ とした散布図を図2に示す。

表1 分析に使用した CD

	独奏者 (フルート)	伴奏者 (ピアノ)	収録年
Duo A	白尾 彰	白尾 絵里	2005
Duo B	Alain Marion	Pascal Rogé	1986
Duo C	James Galway	Phillip Moll	1984
Duo D	Jean-Pierre Rampal	Robert Veyron-Lacroix	1958
Duo E	工藤 重典	Karl-Andreas Kolly	2007

表2 第6変奏における IOI の平均・標準偏差(s)

	Duo A	Duo B	Duo C	Duo D	Duo E
平均	0.40	0.45	0.40	0.39	0.43
標準偏差	0.026	0.020	0.017	0.017	0.019

図2より横軸 $d_{n-1}$ のグラフでは正の相関がみられる。これは、例えば伴奏者が独奏者に対して先行した場合、伴奏者は次の IOI を直前の IOI よりも長くする(テンポを遅くする)という傾向を表している。この相関関係を利用して、二者間のずれから次拍の伴奏者の時間長変化を予測できるため、従来研究で用いている「ずれ」のパラメータの有効性がわかる。

また、横軸 $c_{n-1}$ のグラフでは負の相関がみられる。これは、例えば伴奏者が直前の IOI をその前の拍の IOI よりも長くしていた場合、次の IOI は直前の IOI よりも短くするという傾向を表している。このことは伴奏者が自らのテンポを一定に保つような演奏制御をしている結果と考えられる。この相関関係を利用して、直前の時間長変化から次拍の時間長変化を予測できることから、従来研究で用いられている「時間長変化」のパラメータの有効性がわかる。

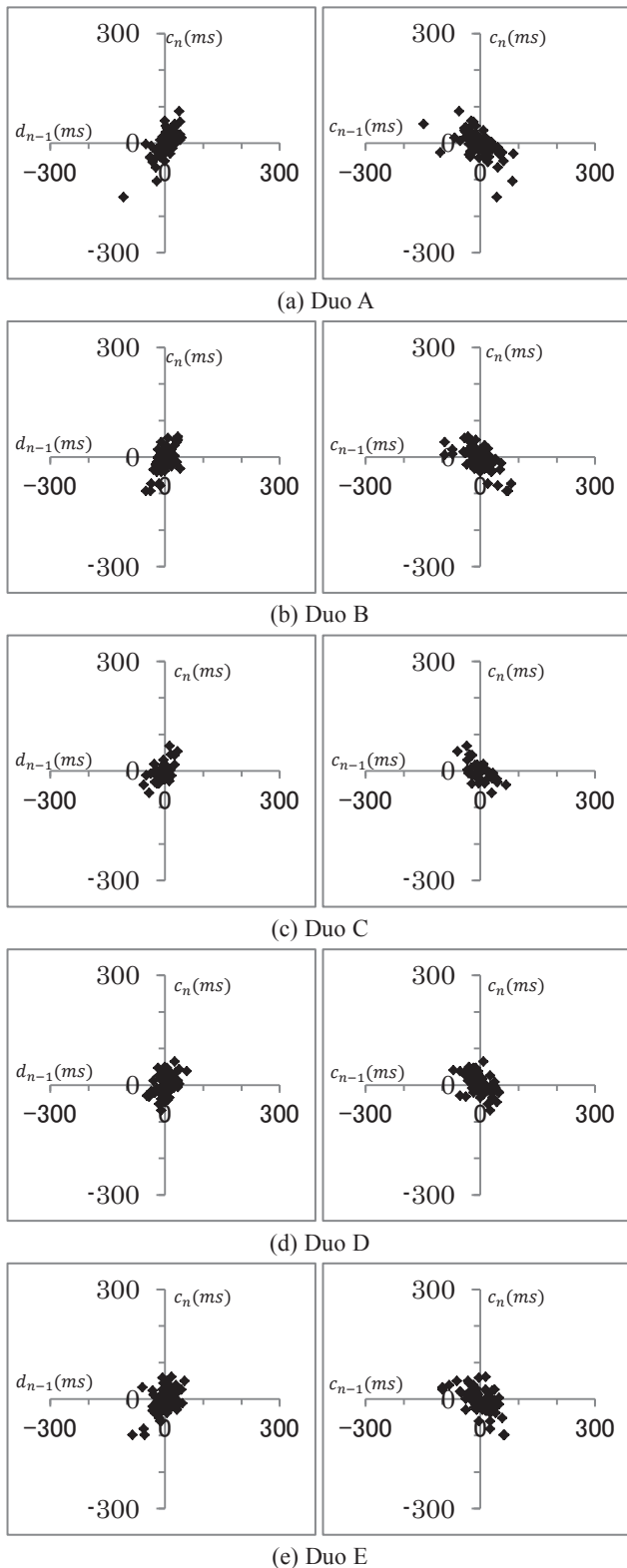


図2 第6変奏における演奏家別散布図

#### 4.2 第1変奏

この箇所は4分の2拍子で書かれているが、その演奏テンポから八分音符を拍単位と考え(BPM=91~118)、1小節を4拍として分析を行った。各伴奏者のIOIの平均および標準偏差を表3に示す。なお、第1変奏においても、Duo Cは、楽譜上の繰り返しを省略しているため、データ数は他

の演奏家の半分となっている。

第1変奏は第6変奏と比べ、IOIの標準偏差が大きくなっており、比較的テンポが変動する箇所であるといえる。

次に、第6変奏同様、 $d_{n-1}$ と $c_{n-1}$ を横軸、 $c_n$ を縦軸とした散布図を図3に示す。

図2と図3を比較すると第6変奏にはほとんど存在しない150ms以上の時間長変化が数多く存在しており、第6変奏とは傾向が異なっていると考えられる。その原因を調べるため、第1変奏における各演奏家の組におけるIOIの推移を図4に示す。

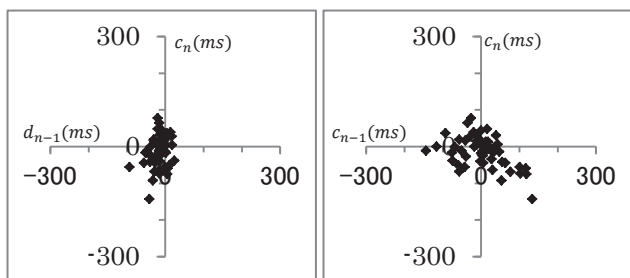
図2と図3を比較すると第6変奏にはほとんど存在しない150ms以上の時間長変化が数多く存在しており、第6変奏とは傾向が異なっていると考えられる。その原因を調べるため、第1変奏における各演奏家の組におけるIOIの推移を図4に示す。

図4より、第1変奏において、ほぼすべての演奏家が2小節目、4小節目、6小節目の4拍目の時間長が長く、次の小節の冒頭でテンポを戻している様子が観察される。このことから演奏家は2小節を単位とするフレーズで演奏し、各フレーズの終端で減速あるいは間の挿入を行っていると考えられる。また、冒頭の1小節目1拍目の音はすべての演奏家が長く演奏している様子が観察される。このような音楽表現上の大きなテンポ変化が存在する箇所では、テンポがほぼ一定の箇所とは異なる制御方法が必要になると考えられる。従来モデルはテンポが比較的安定している状況において、お互いに演奏タイミングを合わせる状況を表現しているモデルであり、このような音楽的逸脱による大きなテンポ変化への対応については考慮されていない。そこで第1変奏において、これらの音楽的逸脱部を除外した場合に従来モデルのパラメータが有効であるかどうかを確認するため、このような音楽的逸脱に影響を受けているデータ(冒頭部分ならびにフレーズ終端部と次フレーズ開始部のデータ)を除外して分析する。Duo C、Duo Dにおいては冒頭以外ではそれほど大きなテンポ変化はないが、全演奏者のデータを同じ条件で分析するため、同じ箇所を除外して分析することとする。各演奏家の演奏から当該箇所を除外した散布図を図5に示す。

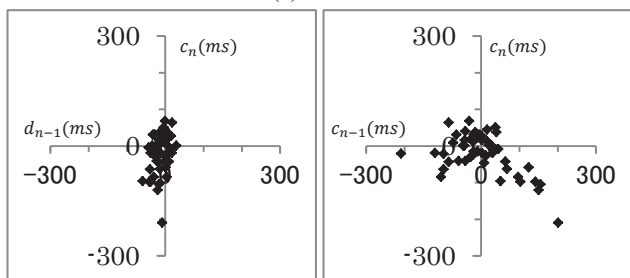
図5より、横軸 $c_{n-1}$ のグラフでは第6変奏と同様に負の相関がみられるが、横軸 $d_{n-1}$ のグラフでは正の相関は見られず、縦に細長く分布するグラフとなっている。ただし、ずれの大きさを見ると、ほぼ50ms以内であり、即座にずれに応じて修正する必要がない状況であるとも考えられる。一方、時間長変化と負の相関が見られるということはテンポを一定に保とうとする傾向を表していることから、伴奏者はずれが小さい場合はテンポを一定に保ち、ずれが大きい場合は独奏者に合うように修正しようとしているのではないかと考えられる。

表3 第1変奏におけるIOIの平均・標準偏差(s)

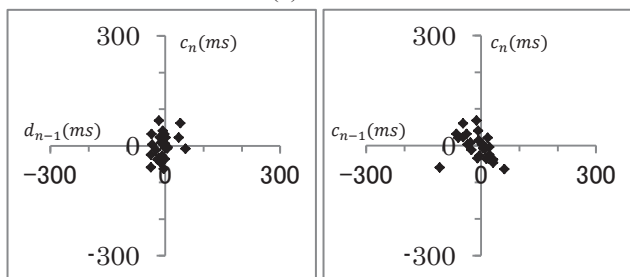
	Duo A	Duo B	Duo C	Duo D	Duo E
平均	0.51	0.66	0.52	0.55	0.64
標準偏差	0.040	0.052	0.033	0.034	0.057



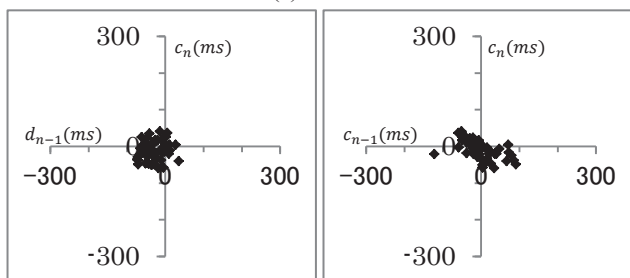
(a) Duo A



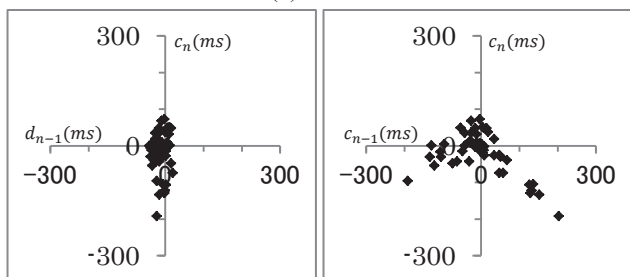
(b) Duo B



(c) Duo C

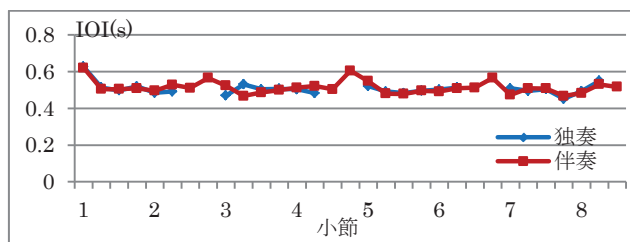


(d) Duo D

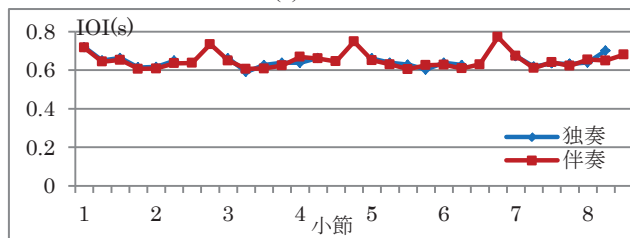


(e) Duo E

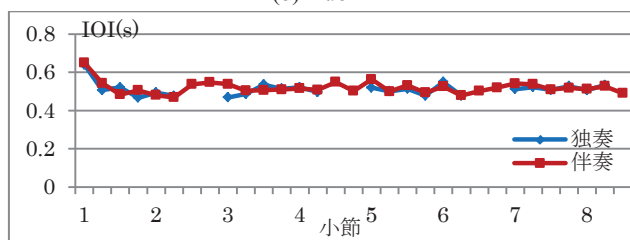
図3 第1変奏における演奏家別散布図



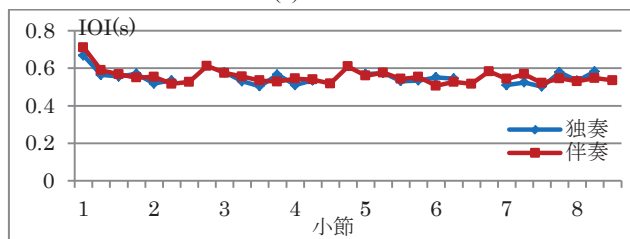
(a) Duo A



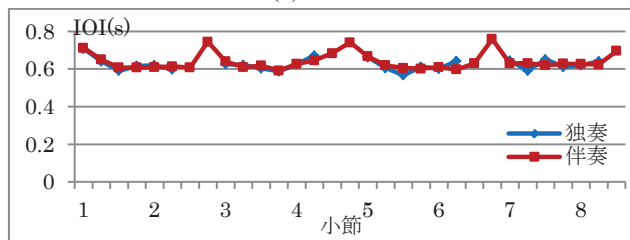
(b) Duo B



(c) Duo C



(d) Duo D



(e) Duo E

図4 各演奏家におけるIOIの推移

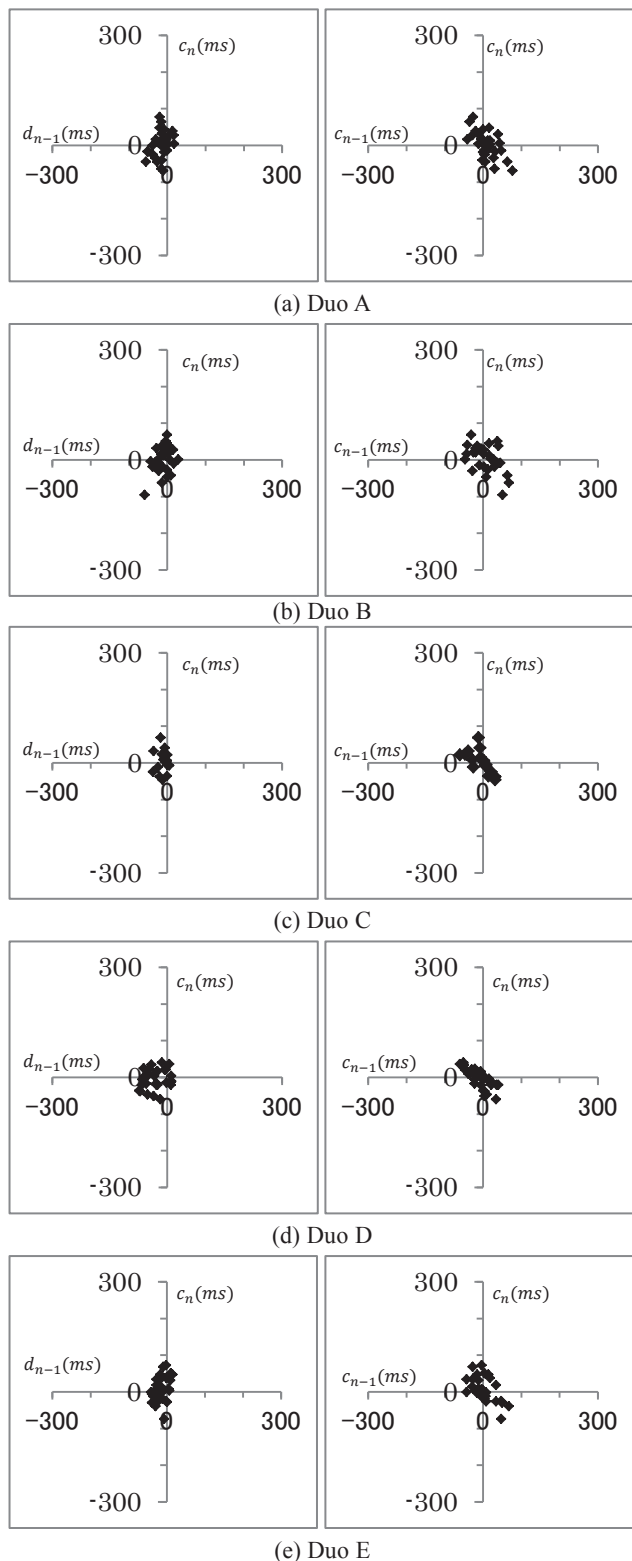


図5 第1変奏における演奏家別散布図（逸脱部除外後）

### 4.3 第3変奏

第3変奏は第1変奏と同様に4分の2拍子で書かれているが、その演奏テンポから八分音符を拍単位と考え(BPM=63~81)、1小節を4拍として分析を行った。各伴奏者のIOIの平均および標準偏差を表4に示す。

表4 第3変奏におけるIOIの平均・標準偏差(s)

	Duo A	Duo B	Duo C	Duo D	Duo E
平均	0.95	0.74	0.95	0.86	0.88
標準偏差	0.063	0.059	0.086	0.083	0.10

第3変奏は第6変奏や第1変奏に比べ、非常に遅いテンポで演奏される変奏であり、表情豊かな演奏を実現するためにアゴークやルバートといった音楽的要因による逸脱が多く存在する。そのため、IOIの標準偏差が他の変奏に比べ、非常に大きくなっていると考えられる。

次に $d_{n-1}$ と $c_{n-1}$ を横軸、 $c_n$ を縦軸とした散布図を図6に示す。

図6より、第3変奏の場合にはどの演奏ペアにおいてもテンポが大きく変動しているが、それに比べてあまり大きなずれが見られないことがわかる。つまり大きなテンポ変化を行いながらも高い精度で同期していると考えられる。これはテンポをどのように変化させるかという音楽的逸脱について、独奏者と伴奏者の両者に共通理解が存在し、互いのテンポが予測可能であることを示している。次拍のテンポ変化が共有される理由として、音楽的知識や経験により次拍の演奏表現方法が予測できること、リハーサルや事前打ち合わせ等により、予めテンポ変化を設定していたことが予想される。このような共有知識は従来の伴奏制御モデルでは考慮されていないため、第3変奏のように音楽的逸脱によりテンポが大きく変化する楽曲においては従来モデルは適用できないと考えられる。

### 4.4 重回帰分析

次に、これら二つのパラメータを用いた重回帰分析を行う。本研究では先行研究[6]の手法を簡略化し、説明変数を直前1拍のずれ $d_{n-1}$ と1拍前の時間長変化 $c_{n-1}$ 、目的変数を次拍の時間長変化 $c_n$ とする重回帰分析を行い、伴奏制御予測モデルを作成した。その推定精度を調べるため、重回帰分析における標準誤差を求めた。表5に各演奏家および全演奏家での標準誤差を示す。

表5において、第1変奏（除外後）とは第1変奏で音楽的逸脱に関連した部分を除外したデータによる分析結果である。Duo Dを除く全ての演奏家において、その推定精度は第6変奏、第1変奏（除外後）、第1変奏、第3変奏の順となった。Duo Dについては、第1変奏において他の演奏家に比べてフレーズ境界でのテンポ変化があまり大きくないため(図4参照)、音楽的逸脱部の除外の有無に関わらず、第6変奏と同程度の推定精度が得られたためであると考えられる。

重回帰分析の結果から音楽的逸脱やテンポ変化が少ない部分では従来モデルの2つのパラメータによる予測が有効であるということが示されたといえる。



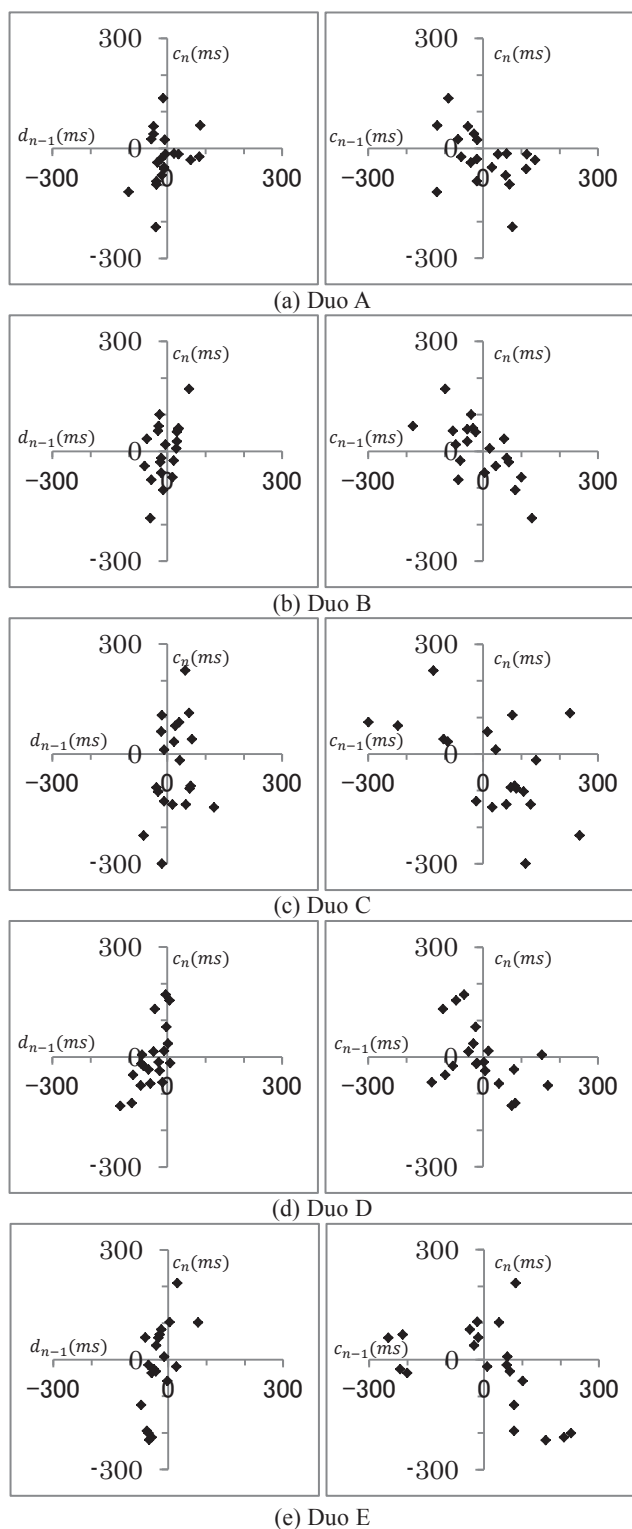


図6 第3変奏における演奏家別散布図

表5 推定値の標準誤差(s)

	Duo A	Duo B	Duo C	Duo D	Duo E	all
第6変奏	0.021	0.019	0.019	0.019	0.023	0.020
第1変奏 (除外後)	0.029	0.032	0.024	0.015	0.029	0.026
第1変奏	0.036	0.044	0.030	0.021	0.049	0.038
第3変奏	0.068	0.054	0.12	0.070	0.083	0.081

## 5. おわりに

本研究ではプロの演奏家による合奏を録音した CD を用いて、一般的な楽曲における伴奏者のテンポ制御の分析を行った。分析の結果、テンポが安定している場面においては先行研究[6]で提案された二つのパラメータ（「独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ」と「伴奏者の時間長変化」）から次の「伴奏者の時間長変化」を予測する手法の有効性が示された。一方、音楽的な逸脱（テンポバートやアゴーギク）などによりテンポが大きく変動する場面は、従来モデルが考慮していない状況であるが、実際の合奏データで分析した結果、上記のパラメータでは予測が困難であることが示された。このような音楽的な逸脱が存在する場面に対しても伴奏システムが適切な伴奏制御を実現するためには音楽的知識の導入や事前リハーサルによる共有知識の実現などが必要であると考えられる。

本研究で分析したデータは5組のプロの演奏家による録音 CD の一部分だけであるが、より多くのデータの分析や、同じ演奏家による別の曲の分析などを通じて、演奏家の個人差の分析などをもしたいと考えている。

**謝辞** 本研究は、亀岡弘和氏（NTT/東京大学）ならびに高宗典玄氏、土屋政人氏（東京大学）よりお借りした分析ツールを用いて実施された。ここに深謝の意を表する。

## 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, 共立出版, pp. 252-269 (1998).
- [2] Roger B. Dannenberg: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, Proceedings of International Computer Music Conference, pp. 193-198 (1984).
- [3] Barry Vercoe: The synthetic performer in the context of live performance, Proceedings of International Computer Music Conference, pp. 199-200 (1984).
- [4] Christopher Raphael: Music plus one: A system for flexible and expressive musical accompaniment, Proceedings of International Computer Music Conference(2001).
- [5] 武田晴登, 西本卓也, 嵯峨山茂樹: HMM による MIDI 演奏の楽譜追跡と自動伴奏, 情報処理学会研究報告, Vol. 2006, No. 90, pp. 109-116 (2006).
- [6] 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川薫: 合奏時の人間の演奏制御の分析・推定, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.3, pp.690-697 (2004).
- [7] Rasch, R.A: Synchronization in Performed Ensemble Music, *Acustica*, vol. 43, pp.121-131 (1979).
- [8] 高宗典玄, 亀岡弘和, 土屋政人, 嵯峨山茂樹: 補助関数法による音楽音響信号への MIDI 信号の詳細なフィッティング, 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会, pp. 2-10-8 (2012).
- [9] Hirokazu Kameoka: Statistical Approach to Multipitch Analysis, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo (2007).
- [10] 橋田光代, 松井淑恵, 北原鉄朗, 片寄晴弘: ピアノ名演奏の演奏表現情報と音楽構造情報を対象とした音楽演奏表情データベース CrestMusePEDB の構築, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.3, pp.1090-1099 (2009).