

## 標準的演奏データを用いたピアノ曲の自動演奏

星芝 貴行 堀口 進

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

人間らしい情緒ある演奏を計算機により実現する際、奏者の個性は人間らしさの重要な要素と考えられる。従って、各種の演奏データから奏者の個性パラメータを抽出することは重要な研究課題となる。本論文では、複数の奏者によるピアノ演奏データ (MIDI データ) から標準的演奏データを求める手法について検討する。まず、MIDI データ同士のマッチングを行なう DP 法にスプライン補間を導入し、マッチングデータを修正する手法について提案し、その有効性について議論する。また、標準的演奏データを用いたピアノの自動演奏の試聴実験を行ないその問題点について検討する。

## Computer Performance in Piano Music with Normative Performance Data

Takayuki Hoshishiba, Susumu Horiguchi

Graduate School of Information Science,  
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Individuality of performing musician is an important factor to be considered for computer simulation of musical performance. Therefore, it is important to investigate how to extract parameters that define musical individuality from various performance data. In this paper, we consider how to calculate averaged or normative performance data from music played by different pianists. The individuality is considered as deviation from the norm. We propose a method of matching two or more MIDI data with Dynamic Programming along with spline interpolation to maximize the matching rate. The obtained normative performance data is auditioned and evaluated.

### 1 はじめに

最近の電子機器の発展に伴い、電子楽器の音質は飛躍的に向上した。また、電子楽器同士をつなぐ規格である MIDI と様々な音楽ソフトを用いることにより、計算機で比較的容易に曲の演奏や作曲ができるようになった。しかし、楽譜通りのデータを入力しても計算機は正確な演奏を行うだけで、人間らしい情緒ある演奏は期待できない。人間らしい情緒ある演奏を行うには、演奏者が楽譜を解釈して演奏する特徴を何等かの方法で抽出し、それを計算機に入力しなければならない。

計算機による人間らしい情緒ある演奏を実現するために、井口等 [1][2] は、演奏音を音響分析した周波数マップと楽譜データから、DP マッチングを用いて演奏データを生成する名演奏模倣システムを提案した。演奏ルールを用いた自動演奏システムについては多く提案されているが、玉城等 [4] は楽譜上の演奏記号や楽曲構造などに対する演奏の特徴絞り込み説明変数を求め、実際の演奏を従属変数にし重回帰分析を用いて演奏ルールを抽出するシステムを提案した。堀内等 [3] は、人間と競演するパートナーシステム等の研究を報告し

ている。五十嵐等 [5] は演奏表情の個人差を図形的に表現し、それを媒介とする自動演奏を提案している。しかし、人間らしさの重要な要素と考えられる奏者の個性に着目した自動演奏の研究は未だ十分になされていない。

本研究では、奏者の個性を考慮に入れた自動演奏システムの構築を目的とする。先ず、本報告では楽譜データと複数の上級者による演奏データから標準的演奏データを求める方法を提案し、その結果について検討する。更に、標準的演奏データと個人データの比較により、個性特徴抽出の可能性について議論する。

## 2 DP法によるMIDIデータのマッチング

複数の奏者の演奏データから標準的演奏データを作成するために、演奏データ同士のマッチングをとる必要がある。また、ローカルなテンポを抽出するために、演奏データと楽譜データとの間でマッチングをとることも必要となる。本手法では処理の簡略化を図るため、演奏データおよび楽譜データともに同一のフォーマット（スタンダードMIDIファイル形式）で扱っている。楽譜データをスタンダードMIDIファイル形式にする際、強弱（ペロシティ）は一定、音長はスタッカートなどの記号を考慮せず全てテヌートとして処理した。本章では、クラスタリングやDP法について説明し、ピアノ奏者3名によるショパンの「幻想即興曲」の演奏データと楽譜データのDPマッチングの結果について検討する。

### 2.1 クラスタリング

演奏データと楽譜データの対応をとる際には、和音同士のマッチングをとることになるため、時間的に近い単音データをまとめ一つのクラスタ（和音）とする。時間距離の閾値は、演奏データでは30tick（レコーディング時のタイムベースが四分音符で192tick、テンポが118であるため約0.08秒）、楽譜データでは和音の時間のずれが生じないため0tickとした。図1において、 $a_i, b_j$ はそれぞれデータA,Bの*i,j*番目の音を表し、 $ca_m, cb_n$ はそれぞれデータA,Bの*m,j*番目のクラスタを表す。

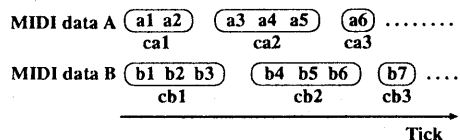


図1: クラスタリング結果

### 2.2 対応づけ

演奏データと楽譜データ中のクラスタ内の要素が最も多くマッチするように、DP法[6]を用い両者の対応づけを行なった。クラスタ間の距離は、次の式のようにそれぞれの要素を比較した時マッチしない要素数とした。

$$d(ca_m, cb_n) = |ca_m| + |cb_n| - 2 \cdot |\{(a, b) \in ca_m \times cb_n | a = b\}|$$

また、クラスタ同士はほぼ1対1に対応づけできると考えられるため、DPのコスト関数*f*を以下のように定義した。

$$f(0, 0) = 0$$

$$f(m, n) = \min \left\{ \begin{array}{l} f(m-1, n) + |ca_m| \\ f(m, n-1) + |cb_n| \\ f(m-1, n-1) + d(ca_m, cb_n) \end{array} \right\}$$

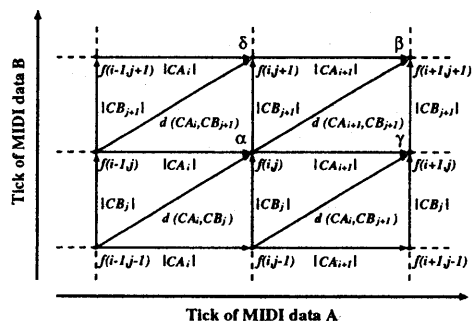


図2: Dynamic Programming法の過程

図2において、点 $\alpha$ ではデータAの*i*番目のクラスタとデータBの*j*番目のクラスタまでの対応づけが終了している。 $\alpha \rightarrow \beta$ の場合は、データAの*i+1*番目のクラスタとデータBの*j+1*番目のクラスタを対応づける。 $\alpha \rightarrow \gamma$ はデータAの*i+1*番目のクラスタを読みとばし、コストを $|ca_{i+1}|$ 増加させる。 $\alpha \rightarrow \delta$ はデータBの*i+1*番目のクラ

スタを読みとばし、コストを  $|cb_{i+1}|$  増加させる。求めたコストが最小になるように対応づけを後方からたどり、最適経路を求める。

### 2.3 DP 法によるマッチング結果

3名の奏者による「幻想即興曲」のピアノ演奏データを用意し、それぞれドレミ楽譜出版社の楽譜をMIDIデータ化したものとマッチングを試みた。その結果を表1に示す。

表1: 3名の奏者による「幻想即興曲」の演奏データと楽譜データとのマッチング成功率

Player	Total notes	Matched notes (%)
X	3036	2172 (71.51%)
Y	3017	2258 (74.81%)
Z	3033	2109 (69.50%)

表1より、どの奏者においてもマッチング結果が70%程度であることがわかる。その原因として、実験に用いた「幻想即興曲」にはテンポが著しく速い部分があることや、図3のように、右手パートは十六分音符の連続に対し、左手パートは二分音符を6等分した六連符の連続である部分が多く存在するため、奏者によっては左右パートの発音時刻が楽譜通りではなく、前後することなどが考えられる。



図3: 「幻想即興曲」の楽譜の一部

奏者 X においてマッチングが失敗している箇所の一部を図4に示す。ここで、◎のついている音に対応づけられた箇所を示す。1行目は演奏データの73032のノートナンバー63(オクターブのD#5)と、楽譜データの80160が対応づけられていることを表す。6行目の演奏データの73070の61は、楽譜データの80220の61と対応づけられるべきであるが、80340の61と対応づけられている。この原因を求めため、DP マッチングを行なう前のこの部分のクラスタリング結果を検討する。図5にDP マッチングを行なう前のクラスタリング結果

Player X	Score	Player X	Score
tick note	tick note	tick note	tick note
◎ 73032 63	: 80160 63		
◎ 73040 40	: 80160 40		
	: 80220 61		
	: 80240 44		
	: 80280 63		
◎ 73070 61	: 80340 61		
73086 44	: 80320 49		
	: 80320 49		
73090 63	: 80400 60		
73126 61	: 80400 52		
73128 49	: 80460 61		
◎ 73156 60	: 80400 60		
◎ 73176 52	: 80400 52		
◎ 73180 61	: 80460 61		

図4: マッチング結果

を示す。これらをコストが最小となるように後方から最適経路を選んでいるため、 $ca_{m+3}$ と $cb_{n+7}$ 、 $ca_{m+2}$ と $cb_{n+6}$ 、 $ca_{m+1}$ と $cb_{n+4}$ 、 $ca_m$ と $cb_n$ を対応づけているためにマッチングに失敗している。そこで、誤ったマッチングの訂正をするために、DP法の改良法を次章で提案し、その検討を行なう。

$ca_m$	= {73032(63), 73040(40)}
$ca_{m+1}$	= {73070(61), 73086(44), 73090(63)}
$ca_{m+2}$	= {73126(61), 73128(49), 73156(60)}
$ca_{m+3}$	= {73176(52), 73180(61)}
$cb_n$	= {80160(63), 80160(40)}
$cb_{n+1}$	= {80220(61)}
$cb_{n+2}$	= {80240(44)}
$cb_{n+3}$	= {80280(63)}
$cb_{n+4}$	= {80320(49)}
$cb_{n+5}$	= {80340(61)}
$cb_{n+6}$	= {80400(60), 80400(52)}
$cb_{n+7}$	= {80460(61)}

図5: クラスタリング結果

## 3 マッチングアルゴリズム

### 3.1 スプライン補間によるデータ修正および追加

DP法によるマッチング結果を広範囲の評価し、修正および追加を行なうために、以下のようなアルゴリズムを提案する。

- DP法により得られたマッチングを、片方のTick値でソートし対応するTick値の順序が正しくないものを削除する。
- その結果をある間隔でサンプリングし、スプライン補間用のテーブルを作成する。
- スプライン補間による予測値付近を検索し、マッチングデータを追加する。

- 1つの音データに対する候補が複数検出された場合、スプライン補間による推測値に近いものを選択する。図6のように、Tick  $\alpha$ に対応する音が、Tick  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ に存在する場合、スプライン補間によって得られる値に近い音  $\beta_2$  を選択する。

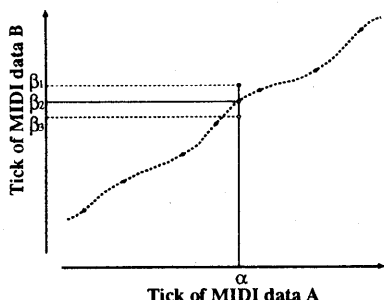


図6: スプライン補間によるデータ修正

### 3.2 マッチング結果

従来のDP法により正しくマッチングできなかった箇所が、本手法によりどのように対応づけられるか図7に示す。これより、正しくマッチングが修正されたことがわかる。

Player X	Score	Player Y	Score
tick note	tick note	tick note	tick note
73032	63	80160	63
73040	40	80160	40
73070	61	80340	61
73086	44	80240	44
73090	63	80280	63
73126	61	80220	61
73128	49	80320	49
73156	60	80400	60
73176	52	80400	52

図7: 修正後のマッチング結果

更に、出版者による楽譜の違いを考慮し、音楽之友社の楽譜（ヘンレ原典版）を用意しマッチングを試みた。この楽譜の解説より、「幻想即興曲」には大きく分けて次の2つの楽譜が存在することがわかった。

- 1855年にフォンターナにより出版されたもの。
- ルービンシュタインが発見したもの。1962年にこれをもとにして新しく出版される。伴奏部に多くの修正が見られるが、ショパンらしい特徴を示し、表記記号も正確であることから、自筆譜に基づく決定稿とみられる。

3名の演奏データと、2種類の楽譜データとのマッチング結果を表2に示す。

表2: 「幻想即興曲」における演奏データの2種類の楽譜データとのマッチング成功率

Player	Score A (%)	Score B (%)
X	3030 (99.80%)	2897 (95.42%)
Y	2977 (98.67%)	2847 (94.37%)
Z	2958 (97.53%)	2946 (97.13%)

以前の実験に用いたドレミ楽譜出版社の楽譜は、音楽之友社のAと音程と音長に関して一致したが、ペダル記号や強弱記号、発想用語などにいくつか異なる部分が見られた。表2より奏者XはAとはほぼ一致していることがわかる。また、他の2名はどちらにも完全には一致しなかったが、それぞれ、2種類の楽譜を参考にしそれぞれの解釈で演奏していると考えられる。更に暗譜をして演奏を行なっていると思われ、ペダル記号や強弱記号、発想用語などに対する演奏は、奏者の解釈によって大きく異なる。

## 4 標準的演奏データ

前章までは演奏データと楽譜の対応づけの手法について述べた。同じ手法を使うことにより演奏データ間の対応づけを行なうことができ、これより複数の演奏データの平均をとることで標準的な演奏データを求めることができる。以下にその手法を述べる。

### 4.1 標準的データの作成方法

- 奏者によって存在しない音

ある奏者の演奏データに存在しない音の発音時刻の平均値を求める時、存在する値のみから求めると、その位置は付近の音と前後する可能性がある。そこで、ある奏者が演奏していない音の発音時刻は、他の奏者とのマッチング結果を利用し、スプライン補間することにより推測し求める。強弱と音長については、存在しないことを0で表し平均には用いない。

- 発音時刻、強弱、音長の平均の算出

発音時刻および音長は演奏時間により大きく値が変わるため、次式を用い曲全体の長さに対する

相対値で平均を求める。

$$\bar{t}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{t_{ji}}{E_j - S_j} \times \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j - S_j$$

ここで  $n$  は演奏データの演奏データ数を、 $\bar{t}_i$  は  $i$  番目の平均発音時刻を、 $S_j, E_j, t_{ji}$  はそれぞれ演奏データ  $j$  の先頭発音時刻、終了時刻、 $i$  番目の発音時刻を表す。音長も同様に求める。強弱については、演奏時間による直接の影響はないと考え、MIDI データでは 0~127 の単純な値で表現されていることから、算術平均を用いる。また、8 割以上の奏者が発音している音のみを有効とする。

#### ● ペダル操作の処理

ペダル操作についても鍵盤（発音）操作と同じようにマッチングさせる。ペダル操作の位置は、その付近の音によって大きく効果が異なると考え、音を跨いでのマッチングを行なわないように設定する。また、半数以上の奏者がペダル操作を行なった場合のみを有効とする。

#### ● ローカルなテンポの抽出

演奏データを楽譜データとマッチングさせ、ある音と次の音の時間間隔と対応する楽譜上の長さから、その発音時のローカルなテンポを求めることができる。演奏データにある音と次の音までの時間を  $\Delta T_{play}$ 、タイムベースを  $B_{play}$ 、グローバルなテンポを  $G_{play}$  とし、 $\Delta T_{play}$  を分 (minute) で表すと、 $\Delta T_{play} / (B_{play} \times G_{play})$  となる。同じ音の楽譜データでの次の音になるまでの時間を  $\Delta T_{score}$ 、タイムベースを  $B_{score}$  とすると、 $\Delta T_{score} / B_{score}$  により、四分音符に換算した長さかが求められる。一般にテンポは一分間における四分音符の数を表すことから、

$$\frac{\frac{\Delta T_{score}}{B_{score}}}{\frac{\Delta T_{play}}{B_{play} \times G_{play}}} = \frac{\Delta T_{score} \times B_{play} \times G_{play}}{\Delta T_{play} \times B_{score}}$$

により、その音の発音時のローカルなテンポが得られる。この値を各演奏から求め、その平均を標準的演奏データに用いることも可能である。

## 4.2 標準的演奏データの検討

### ● 標準的演奏データの作成実験

5名の「革命のエチュード」の演奏データを用いそれぞれを対応づけ、標準的演奏データを作成し

た。表3に作成過程におけるマッチング結果および発音・ペダル操作数を示す。この表で and は対応づけがとれた操作のみを示し、or は対応づけがとれなかったものを含む全ての操作を示している。また、表の下には作成された標準的演奏データの操作数を示した。表3より、各奏者のペダル操作は 200~400 回であるが、標準的演奏データでは 150 となっている。ペダル操作は奏者によって数が大きく異なり、or の値の増加が大きいため、位置も異なりほとんど対応づけがとれていないことがわかる。

マッチングされた結果の演奏データファイルの先頭部分を図9に示す。ここで、velo(ベロシティ)と leng(音長)が0であるデータは、実際には演奏されていないことを示す。また、noteの PON はペダルオンの操作を、POF はペダルオフの操作を表す。それぞれの velo と leng が 127 の箇所はその操作があることを、0 の箇所はその操作がないことを示す。このファイルより求めた標準的データの先頭部分を図8に示す。ここで、CONT 64 はペダル操作を表し、その leng が 127 のときペダルオンを、0 がペダルオフを表す。

Global Performance data			
tick	note	velo	leng
769	B4	95	635
768	B5	92	627
769	D5	84	633
772	F5	81	633
771	G5	80	633
812	CONT 64	127	
903	G#4	75	38
951	G4	73	33
989	F4	76	34
1030	D4	66	34
1063	D#4	72	21
1098	D4	64	29
1132	B3	73	30
1167	G3	65	35
1197	G#3	72	24
1233	G3	63	30
1267	F3	75	29

図 8: 作成した「革命のエチュード」の標準的演奏データ

### ● 波形によるベロシティとテンポの検討

5名の演奏データの曲全体のベロシティの波形および、作成した標準的演奏データのベロシティの波形を図10に示す。また、5名の演奏データと標準的演奏データのローカルテンポを求め、その波形を図11に示す。ローカルテンポの抽出にはヘンレ原典版の楽譜を用い、抽出する間隔は四分音符の長さ以上とした。これらの波形より5名の演

表 3: 標準的演奏データ作成過程におけるマッチング結果および発音・ペダル操作数

	Player A	Player B	Player C	Player D	Player E
operation (note,pedal)	2393 (2091,302)	2472 (2080,392)	2283 (2073,210)	2449 (2087,362)	2504 (2086,418)
and or	2199 (2083,116) 2666 (2120,546)				
and or	2182 (2069,113) 2767 (2124,643)				
and or	2289 (2079,210) 2927 (2132,795)				
and or	2309 (2083,226) 3122 (2135,987)				
operation (note,pedal)	2228 (2078,150)				

Player A			Player B			Player C			Player D			Player E			
tick	note	velo	tick	note	velo	tick	note	velo	tick	note	velo	tick	note	velo	
-49	PON	0	0 = 1108	PON	127	127 = 326	PON	0	0 = 290	PON	0	0 = 1061	PON	0	0
812	B4	103	912 = 1944	B4	98	722 = 768	B4	96	772 = 770	B4	93	338 = 1656	B4	87	388
812	B5	92	916 = 1942	B5	96	704 = 768	B5	93	754 = 768	B5	93	336 = 1650	B5	90	386
812	D5	91	938 = 1946	D5	83	698 = 768	D5	86	762 = 772	D5	80	340 = 1652	D5	80	390
812	F5	87	936 = 1952	F5	76	696 = 768	F5	88	766 = 772	F5	78	340 = 1658	F5	78	390
812	G5	85	930 = 1948	G5	83	710 = 768	G5	84	762 = 774	G5	77	332 = 1654	G5	73	390
854	POF	0	0 = 1982	POF	0	0 = 798	POF	0	0 = 793	POF	0	0 = 1682	POF	127	127
885	PON	0	0 = 2012	PON	0	0 = 808	PON	127	127 = 798	PON	127	127 = 1660	PON	127	127
965	PON	0	0 = 2089	PON	0	0 = 879	PON	0	0 = 859	PON	0	0 = 1760	PON	127	127
990	G#4	87	60 = 2122	G#4	74	44 = 860	G#4	60	18 = 870	G#4	75	28 = 1776	G#4	80	42
994	PON	127	127 = 2117	PON	0	0 = 861	PON	0	0 = 871	PON	0	0 = 1776	PON	0	0
1054	G4	85	52 = 2182	G4	66	40 = 894	G4	65	24 = 906	G4	75	18 = 1824	G4	78	32
1102	F4	87	46 = 2224	F4	66	32 = 922	F4	68	28 = 942	F4	86	36 = 1860	F4	76	32
1152	D4	78	42 = 2264	D4	66	38 = 958	D4	56	18 = 984	D4	60	34 = 1896	D4	74	42
1192	D#4	81	34 = 2298	D#4	69	14 = 980	D#4	70	14 = 1018	D#4	65	26 = 1932	D#4	75	20
1230	D4	75	40 = 2334	D4	56	24 = 101	D4	63	22 = 1052	D4	67	28 = 1964	D4	63	32
1238	POF	127	127 = 2341	POF	0	0 = 1017	POF	0	0 = 1076	POF	127	127 = 1970	POF	0	0
1268	B3	81	40 = 2368	B3	63	20 = 1042	B3	63	26 = 1090	B3	80	34 = 1998	B3	81	32
1292	POF	0	0 = 2389	POF	0	0 = 1109	POF	0	0 = 1104	POF	0	0 = 2014	POF	127	127
1308	G3	75	44 = 2398	G3	58	34 = 1074	G3	60	24 = 1130	G3	59	32 = 2028	G3	74	44
1337	PON	0	0 = 2429	PON	0	0 = 1140	PON	0	0 = 1130	PON	127	127 = 2053	PON	0	0
1342	G#3	75	36 = 2426	G#3	72	18 = 1098	G#3	71	18 = 1160	G#3	68	30 = 2064	G#3	75	24
1378	G3	71	42 = 2466	G3	56	20 = 1132	G3	60	26 = 1196	G3	65	34 = 2096	G3	64	32
1412	PON	0	0 = 2496	PON	0	0 = 1192	PON	0	0 = 1205	PON	0	0 = 2112	PON	127	127
1414	F3	81	38 = 2498	F3	65	20 = 1162	F3	67	28 = 1234	F3	82	30 = 2132	F3	81	32

図 9: マッチングされた5名の「革命のエチュード」の演奏データ

奏のベロシティ、テンポとも全体的に類似しており、これらから生成した標準的演奏データの波形もこれらと類似していることがわかる。

#### ● 試聴実験

標準的演奏データをシーケンスソフトで再生し、被験者17名に試聴させ、演奏に関するアンケート調査を行なった。この結果、ピアノ演奏経験の長い被験者7名の全員から、ペダルの操作が不自然であるという意見が得られた。これは、ペダル操作の数が少ないという数値の結果と一致している。その他の意見では、少数ではあるが「強弱は適当である」、「違和感は感じなかった」、「重みがない」、「一本調子」などを得た。

#### ● 個性を表す特徴量

ベロシティにおける平均値との差異、標準偏差を用い、個性を表す特徴量の検出を試みた。図12に5名の「革命のエチュード」の演奏データにおける結果を示す。標準偏差の値が大きい箇所は、個性が現れる箇所と考えられるが、波形からは特に規則性などは認められなかった。

## 5 まとめと今後の課題

本論文では、標準的演奏データを複数の奏者による演奏データから求める手法を提案した。その際、演奏データと楽譜データのマッチングを行なうDP法をスプライン補間を用いてデータ修正を行なう手法を提案し、高いマッチング率を得られること

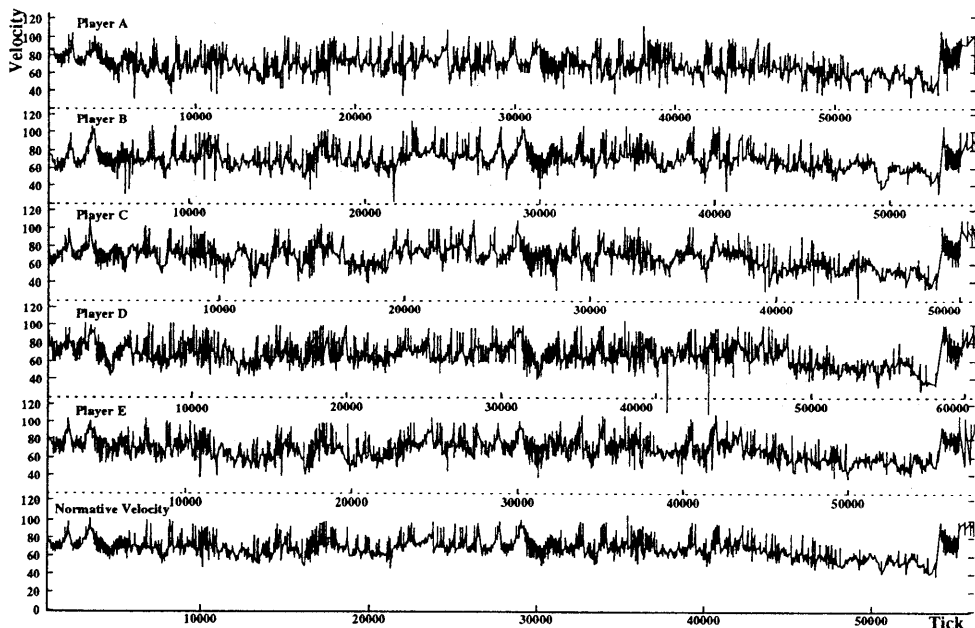


図 10: 5名の「革命のエチュード」の演奏データおよび標準的演奏データのペロシティの波形

を示した。生成された標準的演奏データの試聴実験を行なったところ、発音時刻とペロシティについては違和感が感じられなかったが、ペダル操作について不自然なところがあることがわかった。音長はペダル操作との関係が予想されるため（音を長くするためにペダルを利用し、実際の鍵盤操作は短くするなど）、今後、ペダル操作と音長の関係を調べ、ペダル操作の標準化について検討が必要である。ペロシティの標準偏差から個性を表す特徴量の検出を試みたが、有効な結果は得られなかった。今後、標準偏差の周期性、楽譜との関係を検討する。

また、使用する演奏データにおいて、出版社による楽譜の違いや奏者による解釈の違いがあるため、標準的演奏データを求める際に、楽譜の統一や曲目の難易度について考慮しなければならない。

## 謝辞

有意義な議論をして頂いたジョンホブキンス大学 I.Fujinaga 助教授、神奈川工科大学の徳弘一路助教授に感謝する。なお、本研究の一部は国際メディア研究財団の研究助成を用いて行なわれた。関係各位に深謝する。

## 参考文献

- [1] 原島 博監修, 井口征士 他: 感性情報処理, 電子情報通信学会編ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ, オーム社 (1994).
- [2] 高見啓史, 片寄晴弘, 井口征士: ピアノ演奏における演奏情報の抽出, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-D-II, No6 (1989).
- [3] 堀内靖雄, 橋本修司: 伴奏システム, 情報処理, Vol35, No.9, pp.815-821 (Sep.1994).
- [4] 玉城謙一, 片寄晴弘, 井口征士: 演奏ルールの抽出と再現, 情報処理学会音楽情報科学研究報告, 94-MUS-8, pp.13-16(1994).
- [5] 五十嵐 滋, 彌富あかね, 小川大典, 清野桂子: PSYCHE から: フレーズ表情の多角形、音楽構造に基づく表情付け、自動連弾システム, 情報処理学会音楽情報科学研究報告, 95-MUS-9, pp.1-6(1995).
- [6] 電子情報通信学会編, 長尾 真: パターン情報処理, 電子情報通信学会大学シリーズ, コロナ社 (1983).

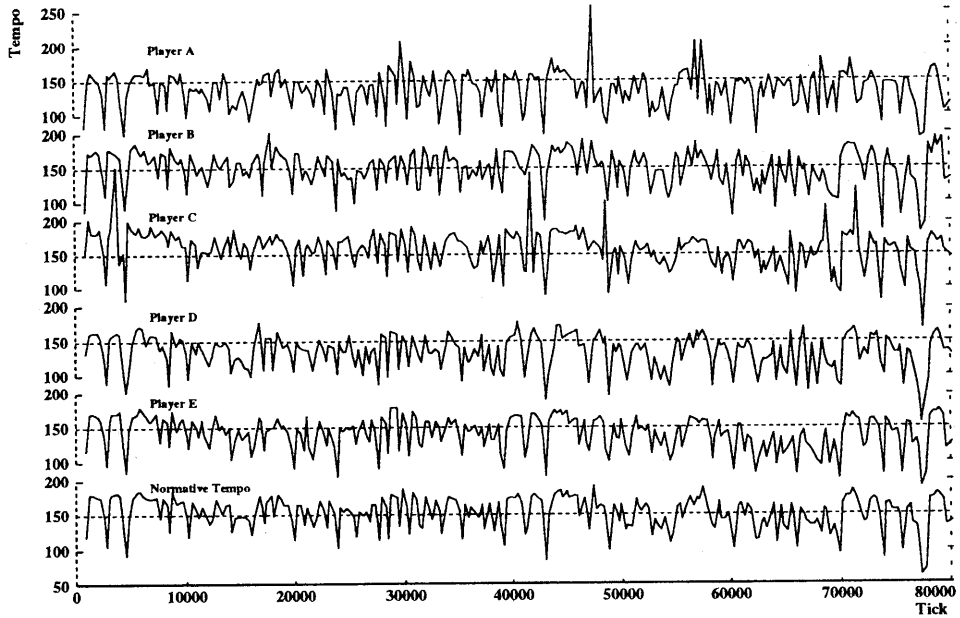


図 11: 5名の「革命のエチュード」の演奏データおよび標準的演奏データのテンポの波形

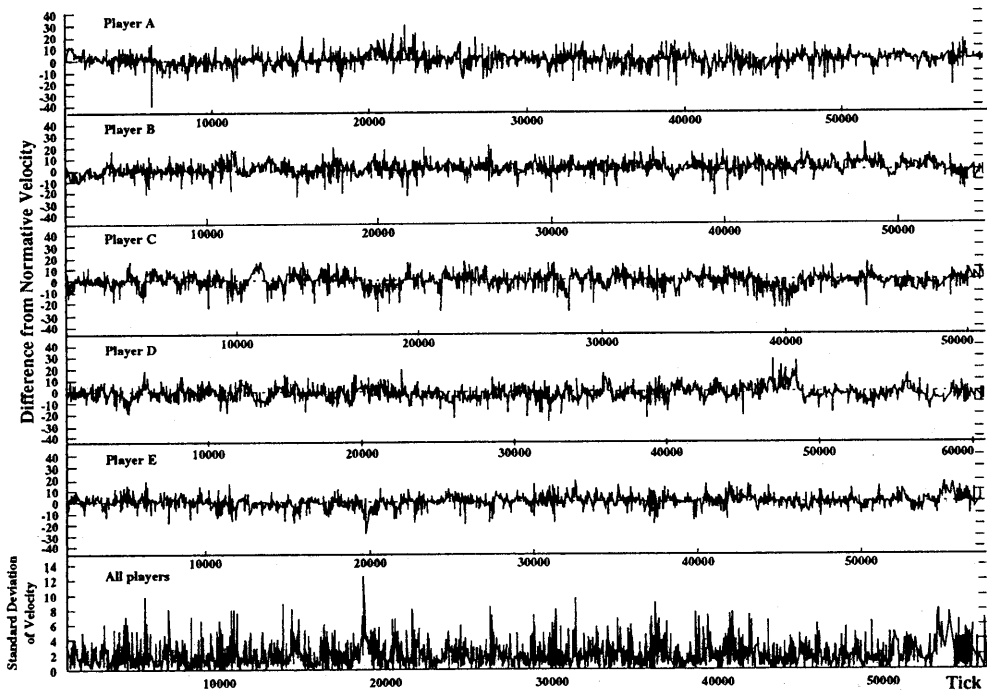


図 12: 5名の「革命のエチュード」におけるペロシティの平均値との差異と標準偏差