

人間同士の合奏データによる人間の演奏制御の分析

坂本圭司[†] 堀内靖雄[†] 市川 薫[†]

本論文では、人間同士の合奏データを分析し、協調演奏時の人間の演奏制御モデルを推定することを試みる。人間同士の合奏を、独奏者2名・伴奏者2名で2グループ、全48回収録した。伴奏者の未来の演奏は、「両者の時間的ずれ」の履歴と「自分のテンポ変化量」の履歴から決定していると考え、収録データの重回帰分析により、提案モデルが従来モデルより精度が高いことが確認された。さらにモデルの係数より、人間は直前だけでなくより過去の情報を用いて演奏制御を行っていることが示唆された。また、伴奏モデルとは別に独奏モデルについても提案し、推定したモデルの妥当性を検証するため、合奏シミュレーションを行った。

Estimating the Model of Ensemble Based on Human Ensemble Data

KEIJI SAKAMOTO,[†] YASUO HORIUCHI[†] and AKIRA ICHIKAWA[†]

In this paper, we will estimate a model of human performance in ensemble. 48 performances played by 8 couples of pianists (4 soloists and 4 accompanists) were recorded. It is supposed that human performers decide their future performance in real time using two factors in the past. One is the history of 'the time difference between the soloist and the accompanist,' and the other is the history of 'the amount of the tempo modification'. The recorded data were analyzed by multiple regression analysis and it was confirmed that the proposal model has better precision than a conventional model. Furthermore, from the analysis of coefficients of the estimated model, it was suggested that human performers use not only the immediately preceding history but the long history. The simulations of ensemble played by two performer agents were performed in order to verify the availability of the estimated model and they achieved valid ensembles.

1. はじめに

伴奏システム¹⁾とは、あらかじめ独奏と伴奏の楽譜が与えられた状態で、独奏を聞き取りながらその楽譜を参照し、合わせて演奏を行うシステムである。現在の伴奏システムには、出力する演奏が人間にとって不自然に感じられるといった問題点がある。これは、伴奏システムが人間の伴奏を十分に模していないことが原因の一つであると考えられる。

著者らは人間の合奏制御に関して、文献2), 3)にて収録されたデータをもとに、文献4), 5)にてモデル化を試みた。人間同士の演奏は、お互いに影響を及ぼしあうため分析が難しい。そのため、相手に影響されずあらかじめ決められた演奏を行う計算機の独奏に対して、人間の伴奏者がどのように演奏するかを収録し、分析を行い、妥当なモデルを導き出した。しかし、ここで求められたモデルがそのまま人間同士の演奏時

のモデルとすることができないことが、文献6)により確認された。

人間同士の演奏の収録および分析は、文献7)~9)により行われているが、実験デザイン上の問題やデータの少なさなどにより、妥当といえるモデルを導き出すまでに至っていない。人間と機械の協調演奏モデルを扱った研究^{10),11)}も行われているが、実際の人間の協調演奏からモデルを作成したわけではなく、制御的なふるまいを確認するのみに留まっている。

そこで本研究では、伴奏システムが人間らしい協調動作を行えるようにするため、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。そのため、新たに人間同士の合奏を収録し、未来の人間のふるまいが過去のどの要因と関連があるのかを分析し、モデル式を推定して評価する。

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番を編曲したものを収録対象とする(図1)。この曲は

[†] 千葉大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Chiba University



図 1 収録曲の冒頭部分

ピアノ独奏曲であるが、本実験では左手パートを独奏パート、右手パートを伴奏パートとし、独奏・伴奏とも右手で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、独奏と伴奏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が、お互いの音を聴こえやすくするため、左手パートを3度下げ、10度の並行移動とした。

2.2 演奏者

演奏者は、以下の2グループである。

グループ 1 音楽大学ピアノ専攻卒の4名

グループ 2 ピアノ指導者1名と専門学校生3名

1グループで1回ずつ、計2回実験を行った。両グループとも、全員幼少の頃からピアノを習っている。

4人の演奏者のうち2人に独奏者、もう2人に伴奏者という役割を与えた。独奏者には「できるだけ指示されたテンポを守るように」、伴奏者には「相手に合わせて演奏するように」と教示した。

収録は1グループで24回行ったが、そのうち4回は人間の独奏者の代わりに計算機が独奏を行った（以降この合奏を「Type A」と呼ぶ）。計算機は伴奏者の演奏に関わらず、あらかじめ決められたテンポ設定で演奏する。独奏を計算機が行う場合があることは、伴奏者には教示していない。

また参考のため、残りの20回中4回は独奏者1人の演奏を収録するが、その際伴奏者もその演奏に合わせて伴奏してもらった。すなわち、独奏者は伴奏が聴こえない状況で、伴奏者は両方の演奏が聴こえる状況での合奏を収録したが、今回は分析対象外とする。

残りの16回が、通常の間奏同士の合奏である（以降「Type B」と呼ぶ）。

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で行われた。この部屋は2つの防音室が隣接しており、扉を閉めることによって、外部および隣の音を遮断することができる。一方の部屋に独奏者2人、もう一方に伴奏者2人に入ってもらった。実際の演奏は独奏者1人、伴奏者1人であるので、演奏時以外は室内の椅子で待機してもらった。

演奏者は88鍵のMIDIピアノで演奏を行い、各演奏者の演奏したMIDI情報（打鍵時刻、音程、強さ、打鍵時間）を計算機で記録すると同時に、MIDI音源で音を鳴らし、各演奏者のヘッドフォンへと伝えた。また、2人の演奏者の顔と手の動きをビデオテープに録画した。演奏者への指示はマイクを通して行った。

演奏の開始時には、互いに目や音による合図を送ることができないため、冒頭の指示テンポで独奏パートの最初の音を計算機で8拍提示し、そのまま続けて演奏を開始してもらった。

2.4 テンポ変化の指示

独奏者は以下のテンポパターン*のうちいずれかを弾いた。

パターン I 116 → 132 → 116

パターン II 132 → 116 → 132

テンポ変化はいずれかの小節の冒頭になるよう、ランダムに配置された。テンポ変化は楽譜上に数字で指定され、独奏者はそれに従って演奏した。独奏者は、それぞれのテンポがどの程度の速さであるかを収録開始前の練習時間にメトロノームで確認した。

伴奏者には曲中にテンポ変化の可能性があることは伝えたが、楽譜上のどの場所でどの程度の変化が起こるかは教示しなかった。また、テンポパターンの数や順番に関しても一切伝えなかった。これによって、テンポ変化に対して反射的に反応する様子を収録することができたと考えられる。

2.5 収録手順

実験の概要を説明後、独奏・伴奏の役割決めをした。

収録前に、MIDIピアノの演奏になれるため、1人ずつ自由に練習する時間が与えられた。練習終了後、あらかじめ決められた演奏順にしたがって収録を進めた。

隣の鍵盤に手が触れてしまったなどの軽微なミスは再収録しなかった。ただし、演奏ミスから1小節は分析対象から外すこととする。グループ1は再収録はなかったが、グループ2は4回の再収録を必要とした。

3. 収録データの傾向

図2,3は収録データ1曲におけるずれ*d*（左側）とテンポ（右側）の一例である。

図2はType Aである。計算機の独奏は伴奏者の演奏に関わらず常に同じ演奏をするので、指示テンポどおりの安定した演奏を行っている様子がわかる。

図3はType Bである。テンポはかなり速めであり、箇所によっては150近いところもある。合奏の場合、指示されたテンポどおりの演奏をすることが困難

* テンポは1分間に四分音符（1拍）がいくつ入るのかを表す数値であり、単位は [beat/minute]。

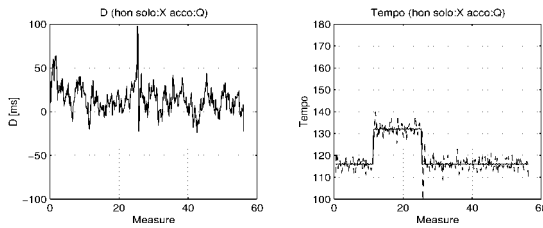


図 2 Type A の一例 (左側:ずれ 右側:テンポ)

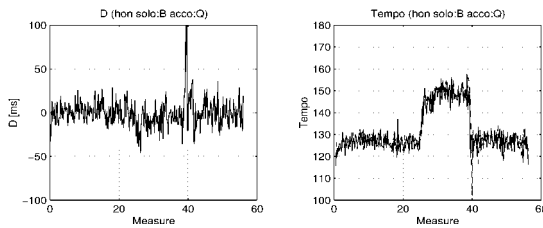


図 3 Type B の一例 (左側:ずれ 右側:テンポ)

であることを示している。

テンポ変化の瞬間について共通して言えることは、独奏者がテンポを上げる瞬間よりもテンポを下げる瞬間のほうがずれが大きくなることである。これは、テンポが上がる瞬間は独奏が先に発音するので、伴奏者は次の音からすぐに対応できるが、テンポが下がる瞬間は独奏が伴奏よりあとに発音するので、伴奏者がすぐに対応することができず、ずれが大きくなってしまっていると考えられる。これより、テンポが上がるときと下がるときで制御方法が異なることが示唆される。

4. モデルの推定

4.1 提案する伴奏モデル

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する。

n 番目の音符における独奏者の発音時刻を T_n 、伴奏者の発音時刻を t_n とする。

ここで、自分の演奏時刻の 2 階差分である「時間長変化 c_n 」を考える。これは、直前の時間長 (演奏間隔) に対して次の時間長をどの程度変化させているかを表すものであり、人間のテンポ変化に相当する変数である。

$$c_n = (t_n - t_{n-1}) - (t_{n-1} - t_{n-2}) \quad (1)$$

時間長変化 c_n は $n-1$ 番目までの時点では説明変数となり、 n 番目は目的変数となるが、説明変数としては自分の演奏を安定させるために使われる変数であると考えられる。それに加えて、説明変数として「ずれ d_n 」を以下の式で定義する。

$$d_n = T_n - t_n \quad (2)$$

本研究では過去の「時間長変化」と「ずれ」の履歴により、次の「時間長変化」を予測するモデルを考える。すなわち、相手とのずれと自分のテンポ変化量の履歴から、次のテンポ変化量を決めるモデルであり、以下の式ようになる。

$$c_n = \sum_{i=1}^p \alpha_i d_{n-i} + \sum_{j=1}^q \beta_j c_{n-j} \quad (3)$$

ただし、 α_i, β_j は係数である。

線形モデルとする理由は、以下の 3 点からである。

- (1) 係数の解釈が容易であり解析しやすい
- (2) 伴奏システムに実装する場合、計算量が少なく、リアルタイム性を確保できる
- (3) 先行研究の結果などから、線形モデルでも十分な近似が得られると期待できる

4.2 従来の伴奏モデル

文献 4), 5) では直前 2 つの「ずれ」から次の「時間長変化」を予測するモデルを考え、重回帰分析により推定した。表 1 は従来手法を今回の収録データに適用した結果である。

重相関係数 R とは、モデルによる予測値 \hat{c}_n と実測値 c_n の相関係数であり、データのあてはまりがよいほど 1 に近づく。予測誤差 E とは、予測値と実測値との差の平均平方和の 2 乗根をとったものであり、以下の式で定義する。

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - \hat{c}_i)^2} \quad (4)$$

ただし、 N はデータのサンプル数である。

Type B の場合は Type A よりも予測誤差が大きい。人間同士の演奏の場合、より過去の情報などを用いている可能性が示唆される。

ところで、人間の演奏には「ゆらぎ」があり、たとえテンポが一定であっても微小ながら必ず相手とのずれが生じている。これは人間が持っている「演奏制御に対する誤差」と考えることができる。

4 人の伴奏者 (P,Q,R,S) のゆらぎの値^{*}を表 2 に示す。表 1 と比べると、Type A はゆらぎの値以下であ

表 1 従来伴奏モデルの重相関係数 R , 予測誤差 E

合奏	R	E [ミリ秒]
Type A	0.84	11.1
Type B	0.73	13.4

^{*} 具体的には人間のゆらぎを「Type A におけるテンポ安定部分のずれの標準偏差」とした。計算機はテンポ変化の瞬間以外は常に一定の間隔で演奏するからである。

表 2 人間のゆらぎ (単位:ミリ秒)

演奏者	P	Q	R	S	平均
ゆらぎ	11.2	14.2	15.3	12.7	13.4

るが、Type B はゆらぎを下回っておらず、改善の余地があると考ええる。

4.3 伴奏モデルの重回帰分析

(3) 式の提案伴奏モデルにおいて、 p, q を大きくするにつれて重相関係数は上がり予測誤差 E は下がるが、説明変数間に多少の相関が存在するので、単純に説明変数を増やしてしまうと多重共線性が強くなってしまふ。多重共線性が強いと不安定なモデルであったり、偏回帰係数の信頼性が下がるなどの問題がある。そのため、使用する説明変数を選択しなくてはならない。

一般に、説明変数 x_i を目的変数として、他の全説明変数で重回帰分析したときの重相関係数を r_i とすると、 r_i が高い説明変数は、他の説明変数を使って十分に説明できるので、省いても予測の性能はほとんど下らない。また、 r_i が 0.6 を超えると偏回帰係数の信頼性が低下することが知られている¹²⁾ ため、すべての r_i が 0.6 を超えなくなるまで r_i が大きい順に説明変数を省いた。これにより、予測の精度をあまり落とすことなく多重共線性を排除することができる。

さらに、ステップワイズ法 (変数減増法) により偏回帰係数の信頼性の低い説明変数を省いた。

以上の手順を経て予測に必要な変数を絞り込んで全演奏データを重回帰分析した結果を表 3 に示す。

4.4 独奏モデル

基本的には伴奏者は独奏者の演奏に合わせているだけであるが、独奏者は演奏をリードする役割を担っている。つまり、伴奏に合わせつつも、自分の理想テンポに演奏を近づけようとすると考えられる。

そこで、伴奏モデルをもとに以下のような独奏モデルを考えた。

$$c_n = \sum_{i=1}^p \alpha_i d_{n-i} + \sum_{j=1}^q \beta_j c_{n-j} + \gamma^{(k)} (\tau^{(k)} - l_{n-1}^{(k)}) \quad (5)$$

ただし、 $\alpha_i, \beta_j, \gamma^{(k)}$ は係数である。ここで、伴奏モデルと違う説明変数として $(\tau - l_{n-1})$ を加える。 τ は独奏者が自分の理想として持っている演奏間隔であり、ここでは理想時間長と呼ぶ。 l_{n-1} は独奏者の現在の演奏間隔であり、現在時間長と呼ぶ。

つまり、理想時間長と現在時間長が離れた場合演奏を修正する働きがある項である。 (k) は時間長を何拍とするかを示す値であり、 $k=1$ であれば半拍 (八分音符)、 $k=2$ であれば 1 拍 (四分音符)、 $k=4$ であれば 2 拍 (二分音符)、 $k=8$ であれば 4 拍 (全音符・

1 小節) である*。

τ は本来定数であり、今回の実験ではテンポ 116 あるいは 132 であるとしたいが、独奏者が実際に演奏したテンポが指示通りの値とは大きく異なってしまったため、本研究では平均演奏間隔で近似することとし、指示テンポ一定の部分の独奏者の平均時間長を用いた。演奏者が理想としていたであろうテンポが実際にどのようなものであったか、という点については今後の検討課題とする。

伴奏モデルと同様に多重共線性を取り除き、偏回帰係数の検定を経て残った説明変数を使って Type B のデータを重回帰分析した結果を表 4 に示す。最下行は参考のために、独奏のデータに伴奏モデルを当てはめてみたときの結果を示している。

5. 考 察

5.1 従来伴奏モデルと提案伴奏モデルの比較

従来モデル (表 1) と提案モデル (表 3) を比較すると、従来モデルでは Type B の演奏に対して予測誤差が大きかったのに対し、提案モデルでは Type A の場合と同程度まで下がっており、提案モデルのほうが予測性能が改善されている。しかも、提案モデルの予測誤差は「人間のゆらぎ (表 2)」を下回っており、ゆらぎを人間が本来持っている演奏制御の誤差と考えれば、提案モデルの予測性能は十分高いものであるといえる。

予測に有効であるとして残った説明変数と係数を見ると、 i, j が飛び飛びになっていることがわかる。これは、 d_n, c_n の自己相関が高いためであると考えられる。つまり、隣り合った 2 つならば 1 つしか予測に有効でないからである。

提案モデルでは、Type A の場合 $i=1, 4, 8$, $j=1, 8$ 、Type B の場合 $i=1, 3, 5, 8$, $j=1, 3, 5, 8$ が予測に有効な説明変数として残っている。これより、人間同士の演奏では直前だけでなくより過去の情報も演奏制御に用いていることが示唆される。

また、Type A, B の両方とも、 $i, j=8$ が残っているが、これはちょうど 1 小節前の音符であるので、人間が音楽上の構造を考慮に入れて演奏制御を行っている可能性が示唆される。

5.2 独奏モデル

表 4 は独奏データをモデル化したものであるが、 k の値が 1 または 2 のとき予測誤差が最も小さくなっている。値も人間のゆらぎを下回っており、予測の精度

* $k=3$ (1.5 拍) や $k=5$ (2.5 拍) などの値も考えられるが、音楽構造上は通常、基本拍として使用しないため、人間もそのような拍を制御に用いないだろうという観点から、今回分析の対象から外している。

表 3 提案伴奏モデルの偏回帰係数、重相関係数 R 、予測誤差 E

演奏データ	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8		
Type A	0.63	-	-	-0.31	-	-	-	-0.11		
Type B	0.50	-	-0.25	-	-0.04	-	-	-0.04		
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	R	E
Type A	-0.54	-	-	-	-	-	-	0.12	0.80	10.5
Type B	-0.56	-	-0.02	-	-0.03	-	-	0.13	0.77	10.5

表 4 独奏データの偏回帰係数・重相関係数 R ・予測誤差 E

モデル	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8			
独奏 ($k = 1$)	0.21	-	-	-0.02	-	-	-	-0.04			
独奏 ($k = 2$)	0.21	-	-	-0.04	-	-	-	-0.04			
独奏 ($k = 4$)	0.34	-	-0.26	-	0.10	-	-	-0.06			
独奏 ($k = 8$)	0.38	-	-0.25	-	0.04	-	-	-0.03			
伴奏	0.39	-	-0.27	-	0.03	-	-	-0.04			
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	γ	R	E
独奏 ($k = 1$)	-	0.05	-	0.06	-	0.07	-	0.14	1.09	0.87	10.0
独奏 ($k = 2$)	-0.60	-	-	0.06	-	0.07	-	0.14	0.46	0.87	10.0
独奏 ($k = 4$)	-0.59	-	-0.03	-	-0.09	-	-	0.17	0.18	0.85	10.6
独奏 ($k = 8$)	-0.59	-	-0.01	-	-0.08	-	-	0.20	0.07	0.84	10.8
伴奏	-0.60	-	-0.02	-	-0.08	-	-	0.18	-	0.83	11.0

としては十分であるといえる。

γ は k が小さいほど大きくなっており、拍単位が小さいほどテンポ制御の項が大きく影響していることがわかる。逆に k が大きいとテンポ制御の項が影響なくなり、結果的に伴奏モデルと同じような形になっていることがわかる。 k が大きいとその時点のテンポと理想テンポと差である $(\tau - l_{n-1})$ が大きくなってしまいうため、予測に役立たなくなってしまうからである。

α_1 の値を見ると、伴奏者のモデルの $\alpha_1 = 0.50$ と比べて小さくなっている。これは、独奏者がずれを伴奏者ほど意識していないことを示しており、「テンポを保つ」という教示どおりの演奏を行っていることが推測される。

また、 $k = 1$ の場合に c_{n-1} (係数 β_1) が採用されていないことがわかる。これは c_{n-1} と $(\tau - l_{n-1})$ に高い相関があるためである。

6. シミュレーションによる検証

モデルの妥当性を検証するため、推定した独奏モデルと伴奏モデルによる合奏シミュレーションを行った。

図 4 は独奏にテンポ変化の意思があるときの人間同士の実際の演奏であり、左がずれ d 、右がテンポ (実線: 独奏, 破線: 伴奏) を表している。図 5~8 はそれぞれ独奏モデルの理想時間長の拍単位を $k = 1, 2, 4, 8$ としたときのシミュレーション結果である。 d や c の初期値は図 4 の人間同士の演奏時における値を用いた。

$k = 1$ のときの演奏は発散してしまっている。これは、現在のテンポを保つ働きがある c_{n-1} (係数 β_1) の項が独奏モデルにないため、理想テンポに近づけた

めの項 $(\tau - l_{n-1})$ (係数 γ) がうまく働いていないためであると考えられる。すなわち、修正量が過剰なので演奏が収束せず破綻してしまうのである。

これに対して $k = 2$ のときはテンポ変化が起こっても安定しており、ずれ修正とテンポ制御がうまくいっていることがわかる。また、 $k = 4, 8$ のときはテンポ変化に時間がかかっている。これは、 γ の値が小さいため、テンポ制御の性能を発揮していないからであると考えられる。

以上より、伴奏システムに独奏予測モデルとして実装する際は、 $k = 2$ がもっとも適当であろう。

7. おわりに

本研究では、人間同士の合奏データを分析し、協調演奏時の人間の演奏制御モデルを推定した。

人間同士の合奏を収録し、「ずれ」と「テンポ変化量」の履歴から次の「テンポ変化量」を予測するモデルを提案し、収録データの重回帰分析により、提案モデルが従来モデルより精度が高いことが確認された。また予測誤差が「人間のゆらぎ」の範囲内であるので、提案モデルは十分な精度を持っていると考えられる。モデルの係数より、人間は直前だけでなくより過去の情報を用いて演奏制御を行っていることが示唆された。

今後の課題としては、人間の演奏制御はテンポが安定している部分と変化する部分では異なると考えられるので、よりテンポ変化の多いデータの追加とその分析が必要である。また、本研究では、すべての音を使ってモデル化したのが、音楽には小節・拍などの構造があり、箇所によって制御が異なる可能性がある。楽曲構

造を考慮して、状況によってモデルを分けるなどの工夫をすることにより、より精度の高いモデルを推定できる可能性もある。さらに、推定したモデルを伴奏システムに実装し、人間の独奏者と合奏を行い、独奏者や聴者による評価実験を行う必要がある。

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—基礎からフロンティアまで—. pp.252-269. 共立出版, July 1998.
- 2) 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.
- 3) 堀内靖雄. 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~. 情報処理学会 研究報告 Vol.99 No.68, pp.73-78, August 1999. 音楽情報科学 研究報告 No.31.
- 4) 坂本圭司, 堀内靖雄, 市川熹. 計算機との合奏データによる人間の演奏モデルの推定. 情報処理学会 研究報告 Vol.2000, No.94, pp.57-62 October 2000. 音楽情報科学 研究報告 No.37.
- 5) 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川熹. 合奏における人間の発音時刻制御モデルの推定. 情報処理学会論文誌 Vol.43, No.2, pp.260-267 February 2002.
- 6) 石毛大悟, 堀内靖雄, 市川熹. 人間の協調演奏モデルの推定. 情報処理学会 研究報告 Vol.2000, No.94, pp.63-68 October 2000. 音楽情報科学 研究報告 No.37.
- 7) 堀内靖雄, 三井卓, 井宮淳, 市川熹. 2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.
- 8) 堀内靖雄. 2人の人間による協調演奏動作の分析. 日本認知科学学会 学習と対話研究分科会資料 SIGLAL96-2, pp.1-10, January 1997.
- 9) 堀内靖雄, 三井卓, 財津茜, 市川熹. 2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.
- 10) 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, p.7.216, 1990.
- 11) 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.
- 12) 小林龍一. 相関・回帰分析法入門. 日科技連出版社, February 1972.

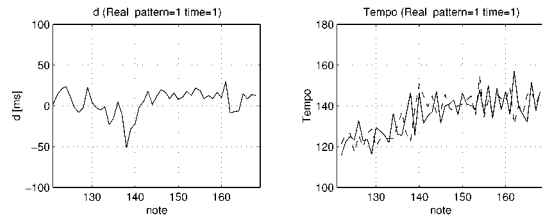


図4 実際の演奏

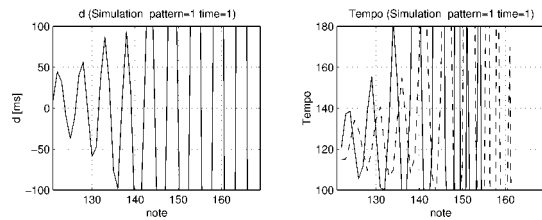


図5 シミュレーション ($k = 1$)

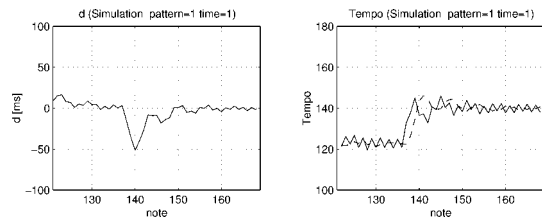


図6 シミュレーション ($k = 2$)

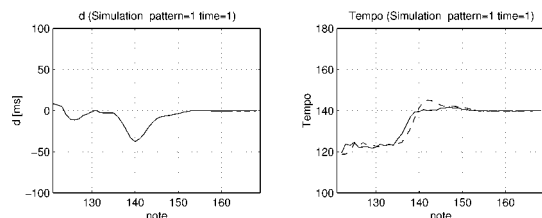


図7 シミュレーション ($k = 4$)

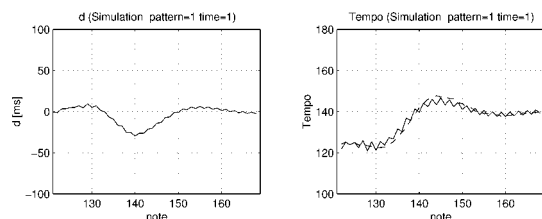


図8 シミュレーション ($k = 8$)