

## 相互作用を考慮した人間の協調演奏モデルの推定

石毛 大悟   堀内 靖雄   市川 熹

千葉大学 工学部 情報工学科  
263-8522 千葉県 千葉市 稲毛区 弥生町 1-33  
manbo@icsd4.tj.chiba-u.ac.jp

本稿では人間同士の協調演奏動作における制御モデルを推定する。機械と人間による合奏のデータから推定されたモデルにもとづいて動作する2つのエージェントを考え、それらの協調演奏をシミュレーションにより観察した。その結果、人間対機械のモデルをそのまま適用すると両者の演奏は収束しなかったが、「エージェントの演奏は互いに影響を及ぼし合う」という相互作用の考えを考慮に入れたモデルに修正する事により収束するシミュレーション結果を得た。

## Modeling Interactive Human Performers

Daigo Ishige, Yasuo Horiuchi, Akira Ichikawa  
Department of Information Sciences,  
Faculty of Engineering, Chiba University  
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522, Japan  
manbo@icsd4.tj.chiba-u.ac.jp

In this paper, we will introduce a hypothetical model of interactive human performance. Models of human performance were derived from performance data of human performer and machine. We simulated interactive performance by applying these models to ensemble by two agents. As a result, these models did not work well and ensemble diverged. Then we adjusted parameters by taking interaction between performers into consideration. Simulation with new parameters succeeded and realized ensembles as human performers do.

## 1 はじめに

人間的な協調演奏を行う自動伴奏システム[1]の実現を目標として、計算機と人間との演奏データを分析することにより、人間の演奏モデルを推定するに至った[2,3,4]。しかし、[5,6]で示されている「人間(独奏)も機械(伴奏)に影響を受けていて、両者の演奏は互いに影響を及ぼし合っている」という協調演奏において重要な要素である相互作用を取って排除して推定したモデルであるために、相互作用が存在する状況でもこのモデルが正しく機能するかどうかは不明である。

そこで、本研究では推定された伴奏モデルが相互作用を考慮したときにも適用できるかどうかを検討する。[4]で示されたモデルは人間と機械による演奏であり、

- ・ 拍単位での予測。
- ・ ずれの変化量を制御に利用。
- ・ 制御係数を人間の演奏データから算出。

という特色を持っている。

なお、今回のモデル式は反射的な協調動作を推定したモデル式であり、現在の拍と過去一拍における演奏状況のみで未来を予測している。数拍前まで含めた過去の履歴を使う予測によるモデルは今後の検討課題としたい。

## 2 シミュレーション

本節では、[4]で示されたモデルに従って動作する二つのエージェントによる演奏の振る舞いをシミュレーションにより分析する。

### 2.1 モデル式

二つのエージェント  $X, Y$  について、それぞれ  $i$  番目の拍の演奏時刻を  $X(i), Y(i)$ 、時間長(テンポの逆数)を  $x(i), y(i)$ 、加える時間長変化を  $\Delta x(i), \Delta y(i)$ 、 $Y$  から見た  $X$  とのずれと時間長の差をそれぞれ  $D(i), T(i)$  とする。また、 $\alpha$  はずれを、 $\beta$  はテンポをどの程度相手に合わせようとするかを表す

パラメータであるとする

$$Y(i+1) = Y(i) + y(i) + \Delta y(i)$$

$$X(i+1) = X(i) + x(i) + \Delta x(i)$$

$$\Delta y(i) = \alpha D(i) + \beta T(i)$$

$$\Delta x(i) = -(\alpha D(i) + \beta T(i))$$

$$D(i) = X(i) - Y(i)$$

$$T(i) = (X(i) - X(i-1)) - (Y(i) - Y(i-1))$$

と表すことができる。演奏時刻の単位は秒とする。ただし、ずれとテンポ差の修正具合はずれの大きさに相関がある事が示されているので、ずれの大きさ(ずれの絶対値)の一次式として、 $\alpha$  と  $\beta$  は次のように定義されている。

$$\alpha = a |D(i)| + b, \beta = c |D(i)| + d$$

$a, b, c, d$  は[4]で収録した演奏データから重回帰分析により決定された。このモデル式を元に、 $\alpha$  と  $\beta$  の決め方が妥当であろうと推定された4パターンのモデル式(表1)に対してシミュレーションを行う。

表1. モデル式

| 番号  | 式                   |
|-----|---------------------|
| i   | $\alpha = a D  + b$ |
|     | $\beta = c D  + d$  |
| ii  | $\alpha = a D  + b$ |
|     | $\beta = d$         |
| iii | $\alpha = b$        |
|     | $\beta = c D  + d$  |
| iv  | $\alpha = b$        |
|     | $\beta = d$         |

### 2.2 方法

初期条件として、両者がテンポ 100 で演奏している状態で、ずれが 50 ミリ秒あるとした。モデル式の予測に従い、表2~4に示した回帰係数[4]を用いてシミュレーションを行い、ずれやテンポがどのように変化するかを観測した。また、9拍目

表2. 演奏者Aの回帰係数

| モデル | a     | b    | c     | d    |
|-----|-------|------|-------|------|
| i   | 12.84 | 0.19 | -2.11 | 0.98 |
| ii  | 10.90 | 0.22 |       | 0.95 |
| iii |       | 0.41 | 8.94  | 0.86 |
| iv  |       | 0.49 |       | 1.00 |

表3. 演奏者Bの回帰係数

| モデル | a     | b    | c     | d    |
|-----|-------|------|-------|------|
| i   | 10.41 | 0.42 | -3.50 | 0.97 |
| ii  | 6.73  | 0.47 |       | 0.93 |
| iii |       | 0.59 | 4.23  | 0.89 |
| iv  |       | 0.63 |       | 0.95 |

表4. 演奏者Cの回帰係数

| モデル | a    | b    | c     | d    |
|-----|------|------|-------|------|
| i   | 9.75 | 0.43 | -4.00 | 0.91 |
| ii  | 5.82 | 0.49 |       | 0.87 |
| iii |      | 0.60 | 4.29  | 0.83 |
| iv  |      | 0.64 |       | 0.89 |

でエージェント X (独奏に相当する) に+15 のテンポ変化を加えた。以後のシミュレーションでもこの条件を用いている。

### 2.3 結果

シミュレーションの結果、すべてのモデルでずれが拡大し続け、途中のテンポ変化に関わらず、演奏のずれは発散してしまう傾向を示した。

ずれが拡大していく原因として、人間と機械によるデータから求めた回帰係数を用いていることが挙げられる。機械は人間の演奏を無視した演奏を行い、人間が一方向的に合わせる必要があるため、人間が過剰に修正するモデルになっていると推測できる。そのため、両エージェントに人間のモデ

ルを適用すると、お互いが一方向的に相手に合わせようとするので、過剰修正による予測の行き違いのために、ずれの符号が逆転しながら拡大していき、両者の演奏が発散すると考えられる。

### 2.4 人間同士の演奏

予測式は、人間が両者のずれとテンポのずれから、現在の自分のテンポにどれくらいの変化を加えているかということを表しているので、 $\alpha$  と  $\beta$  は自らの演奏速度を変え、相手との差を減らそうとする大きさを表していると考えられる。一方、この係数を求めるのに用いた演奏における相手 (機械) のモデルでは  $\alpha = \beta = 0$  である。しかし、実際の人間同士の演奏ではどちらの演奏者も相手の影響を受けるので、 $\alpha = \beta = 0$  になる状況は考えにくい。そこで、二人の人間による演奏の場合にはお互いの係数をある程度落とす必要があるのではないかと推論した。

この推論の裏付けをとるために、[7]で収録されたデータを分析した。このデータは[4]の演奏者とは別の3人の人間と計算機とで、表5のデザインに従い、9通りの組み合わせによる演奏を収録したものである。収録曲目は同じであり、収録方法の主な違いは

- ・ 計算機との収録では、相手が計算機であることを伴奏者は知らない。
- ・ 4分の2拍子で16分音符の連続であるオリジナルの楽譜を使っている。

という点にある。

この収録データでは、同じ伴奏者が機械と人間の両方の独奏と演奏しているので、独奏が機械であるときと、人間であるときの演奏における違いを見ることができる。

このデータを重回帰分析して係数を求めた。比較検討を簡単にするために、モデルiv式の係数に注目し、表6、表7に求めた係数を示す。機械

表5. 収録のデザイン

| 収録番号 | 演奏者  |      |
|------|------|------|
|      | 独奏者  | 伴奏者  |
| 1    | 計算機  | 演奏者L |
| 2    | 演奏者L | 演奏者M |
| 3    | 演奏者M | 演奏者N |
| 4    | 演奏者N | 演奏者L |
| 5    | 計算機  | 演奏者M |
| 6    | 演奏者L | 演奏者N |
| 7    | 演奏者M | 演奏者L |
| 8    | 演奏者N | 演奏者M |
| 9    | 計算機  | 演奏者N |

表6. モデルivの係数(機械との演奏)

| 伴奏者 | 係数   |      |
|-----|------|------|
|     | b    | d    |
| L   | 0.26 | 0.90 |
| M   | 0.53 | 0.93 |
| N   | 0.64 | 0.93 |

表7. モデルivの係数(人間同士の演奏)

| 演奏者 | 役割 | 係数   |      |
|-----|----|------|------|
|     |    | b    | d    |
| L   | 伴奏 | 0.42 | 0.57 |
|     | 独奏 | 0.33 | 0.62 |
| M   | 伴奏 | 0.35 | 0.49 |
|     | 独奏 | 0.28 | 0.43 |
| N   | 伴奏 | 0.55 | 0.56 |
|     | 独奏 | 0.24 | 0.58 |

と人間による演奏データは、[4]で求めた係数と似た数値が確認された。一方、人間同士の演奏と係数を比較してみると、人間同士の演奏の方が係数dの値が半分程度に小さくなっていることがわかる。これは、演奏速度のずれをお互いがちょうど

折り合いを探しながら合わせようとしている様子を表しているように考えられる。また、bの係数で独奏の方が伴奏よりも小さい値を示しているのは、独奏は伴奏に比べて、相手とのずれをあまり考慮しないで演奏を行っていることを表していると考えられる。つまり、独奏と伴奏の立場の差が $\alpha$ に現れていると解釈できる。

## 2.5 改案

以上のことから、係数 $\beta$ の値を半分減らすことで再びシミュレーションを行う。また、係数 $\alpha$ に関しては、小さくはなっていたものの明確な数値を決定するに至らなかったため、いくつかのパターンによりシミュレーションを行う。

## 3. 相互作用を考慮したシミュレーション

### 3.1 対等の立場

二つのエージェントに対して、 $\alpha$ を80%、 $\beta$ を50%にしてシミュレーションを行ったところ、すべてのモデル式でずれとテンポは収束する結果を得た(例を図1~4に示す)。

このことから[4]のモデルは相互作用を考慮した場合、各係数を小さくする必要があることが示された。

### 3.2 独奏と伴奏の役割

人間同士のデータから、独奏の方が伴奏よりも $\alpha$ の値が小さいことが確認できたことに着目し、 $\beta$ の係数を50%にして、 $\alpha$ の大きさに差を出してシミュレーションを行った。

まず、エージェントX、Yを独奏と伴奏に見立て、独奏の $\alpha$ を20%、伴奏の $\alpha$ を80%にしてシミュレーションを行ったところ、同じくすべてのモデル式でずれとテンポが収束する結果を得たが、すべての結果において、テンポの収束先が3.1の時より大きくなった(例を図5に示す)。また、逆に独奏

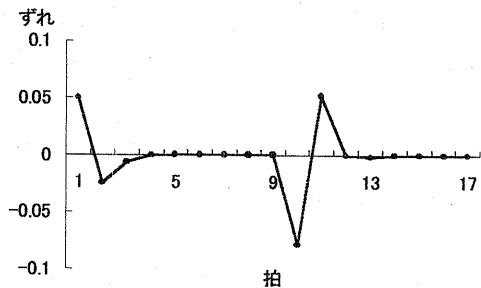


図 1 : 演奏者 B, モデル i の拍とずれのグラフ。  
ずれの単位は秒

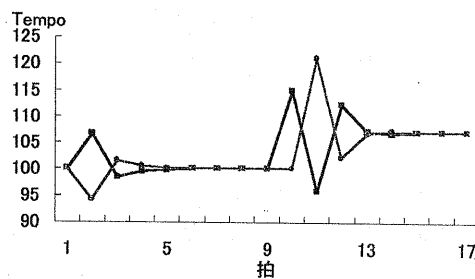


図 2 : 演奏者 B, モデル i の拍とテンポのグラフ。  
■が X、●が Y。

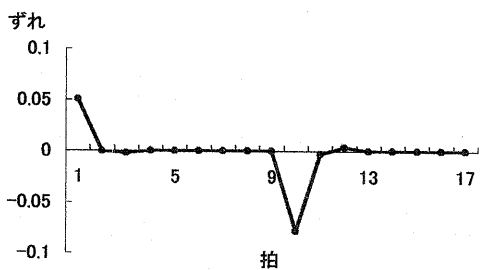


図 3 : 演奏者 B, モデル iv の拍とずれのグラフ。  
ずれの単位は秒

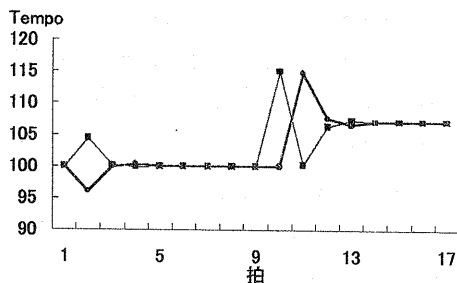


図 4 : 演奏者 B, モデル iv の拍とテンポのグラフ。  
■が X、●が Y。

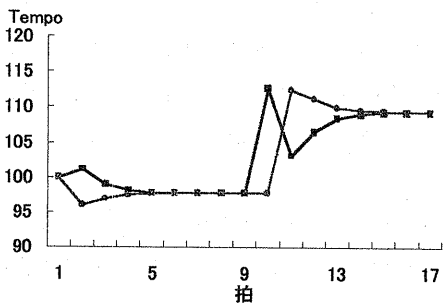


図 5 : 演奏者 B, モデル iv. Y (●:伴奏) の  $\alpha$  が 80%  
に対して X (■:独奏) の  $\alpha$  が 20%。

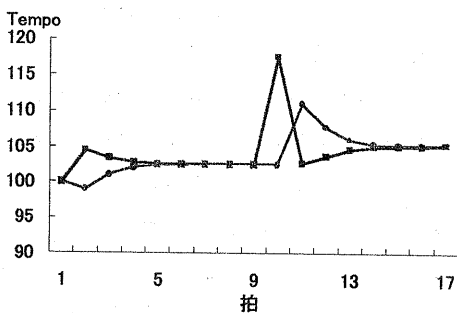


図 6 : 演奏者 B, モデル iv. Y (●:伴奏) の  $\alpha$  が 20%  
に対して X (■:独奏) の  $\alpha$  が 80%。

の  $\alpha$  を 80% にして、伴奏の  $\alpha$  を 20% にしたところ、先ほどと同様にすべてのモデルでずれとテンポは収束したが、すべての結果において、先ほどとは逆に収束先のテンポが 3.1 の時よりも小さくなっ

た (例を図 6 に示す)。

これらの結果から係数  $\alpha$  は、どちらが自主的な演奏を行っているかを表していると推測される。また、テンポ変化を加えるときは、目標よりも大

きい変化を加えるという経験的な現象も、シミュレーション結果によく現れている。

### 3.3 考察

以上の結果から、[4]で推定されたモデルから相互作用を考えて係数を変化させることにより、人間のふるまいを近似的に表現しているシミュレーション結果を得た。

今回のシミュレーションではすべて収束する結果を得たが、モデルや係数の値によって収束の仕方に違いがあることがグラフから読みとれた。人間同士の演奏データの分析をさらに進め、様々な係数の組み合わせでシミュレーションを行い、その様子を観察することにより、最適なモデルを決定することは今後の検討課題である。

### 4.おわりに

[4]で示されたモデルに相互作用の考えを導入することで、演奏制御に有効であるモデル式がシミュレーションにより示された。実際に人間と演奏したときに、このモデル式がうまく機能するかは今後の課題である。

また、一方的な演奏を行う機械との演奏制御と、相互作用が働く人間同士の演奏制御で違いがあったことから、人間同士の協調演奏は、お互いに演奏がずれないようにという意志が働き、演奏制御のバランスで成り立っているように思える。今後はお互いがどのようなバランスで制御を行っているかを調べてみたい。

### 参考文献

[1]堀内靖雄. 自動伴奏. 長嶋洋一・橋本周司・平賀謙・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, 財津茜, 市川薫, 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, Vo.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.

[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 (音楽情報科学研究報告 No.31), pp.73～78, August 1999 於 国民宿舎水郷.

[4]坂本圭司, 堀内靖雄, 市川薫 計算機との合奏データによる人間の演奏モデルの推定. 本研究報告.

[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応答自動伴奏とその動作解析. 1990年電子情報通信学会春期全国大会講演論文集, p.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. 情報処理学会題 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, 三井卓, 財津茜, 市川薫, 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.