

# 5 U-4 音楽演奏における人間と機械の協調動作について

澤田 秀之 磯貝 昌幸 橋本 周司 大照 完  
早稲田大学 理工学部

## 1. はじめに

コンピュータを用いた実時間音楽制御システムの開発は従来、機械が人間の過去の動作を解析して次の動作を予想し決めていくという、あくまでも人間への機械追従形モデルとして進められてきた。しかし人間と機械が実時間で同期演奏を行う場合、機械の動作に対する人間の反応を考慮に入れる必要がある。筆者らはすでに人間も機械に影響を受けるという相互作用を考慮した自動伴奏システムについて報告したが、そこではテンポ(速度)の追従を主として扱ってきた<sup>[1]</sup>。本論では、さらに位相(位置)の追従も陽に含めた一般的なモデルを考え、音楽演奏における人間と機械の協調動作について検討した。

## 2. システム及び相互作用モデル

### 2-1. システム構成

ここで対象としているのは、MIDI楽器とパーソナルコンピュータにより構成される自動伴奏システムである。つまり、MIDIキーボードから入力された信号はMIDIインターフェースを通じてパーソナルコンピュータに入力される。入力された主旋部の演奏情報をもとに伴奏部を適切なタイミングでMIDI楽器より出力する。

### 2-2. 解析原理

まず音符間隔を最小音長音符の整数倍になるように規格化したデータを主旋部と伴奏部に対し作成する(それぞれ  $\{p_k\}$ 、 $\{q_k\}$  とする)。これを楽譜情報としてコンピュータ内部にもつ。

実際の演奏では、人間により順次入力される主旋律の演奏情報について楽譜情報とマッチングをおこない位相(位置)を確定し、主旋部の音符演奏間隔(イベント位置間隔)の時間列  $\{\Delta W_k\}$  を音長データ  $\{p_k\}$  で割り、次式により人間のテンポ  $\{\Delta T_k\}$  を得る。

$$\Delta T_k = \Delta W_k / P_k \quad (1)$$

これに対し機械系はテンポの予測推定値  $\{\Delta t_k\}$  を相互作用モデルにより求め、伴奏部を時間長  $q_1 \times \Delta t_k$  で出力する。これを、実時間で行う。

### 2-3. 相互作用モデル

#### 2-3-1. 定式化

人間は、各時刻において「このようなテンポで演奏したい」という意志  $f(t)$  を持ち、これを目標として演奏する。また同時に、機械のテンポとかけ離れないように協調する(量の大小はあっても)意志が働くものとする。各拍位置に対して出すテンポお

よび機械によって出されるテンポは離散値であるが、人間がそれらから実時間で算出するテンポは、拍時間に関して連続量として扱う。

一方機械系は、人間の過去のテンポから次の拍点を予測するのであるが、この時人間も機械系の過去の出力の影響を受けていることを考慮する必要がある。

以上より、 $\{\Delta T_k\} \rightarrow X_1(t)$ 、 $\{\Delta t_k\} \rightarrow X_2(t)$  とし、 $C_1$ 、 $D_1$  を速度制御の強さ、 $C_2$ 、 $D_2$  を位置制御の強さを表すパラメータとする、人間-機械系の拍協調モデルとして、次の連立微分積分方程式を得る。

人間系モデル;

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = C_1 \times [f(t) - \{ \int_{t-u_1}^t K_{11}(t-\tau) X_1(\tau) d\tau + \int_{t-u_2}^t K_{12}(t-\tau) X_2(\tau) d\tau \}] - C_2 \times \{ \int_0^t X_1(\tau) d\tau - \int_0^t X_2(\tau) d\tau \} \quad (2)$$

$$X_1(t) = \int \frac{dX_1}{dt} dt = \int dX_1 \quad (3)$$

機械系モデル;

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = D_1 \times [X_1(t) - \{ \int_{t-v_1}^t K_{21}(t-\tau) X_1(\tau) d\tau + \int_{t-v_2}^t K_{22}(t-\tau) X_2(\tau) d\tau \}] - D_2 \times \{ \int_0^t X_2(\tau) d\tau - \int_0^t X_1(\tau) d\tau \} \quad (4)$$

$$X_2(t) = \int \frac{dX_2}{dt} dt = \int dX_2 \quad (5)$$

但し実システムでは、機械系は適当な拍時間間隔で離散化してシステムを作成した。

上式(2)、(4)の連立微分積分方程式において、それらの核を

$$K_{ij}(t) = \alpha_{ij} \times \exp(-\beta_{ij} t) \quad (6)$$

として考察及び実験を行った。ここで定数  $\alpha_{ij}$ 、 $\beta_{ij}$  は、過去のテンポの影響の度合を表し、例えば人間を主とした本稿のような系では、 $\alpha_{21} > \alpha_{22}$ 、 $\beta_{21} < \beta_{22}$  となる。これらは過去のテンポから次のテンポを予測するフィルタとなっているが、積分範囲はどの程度の過去までさかのぼるかによって決定される。

#### 2-3-2. モデルのシミュレーション

右辺第一項の畳み込み時間  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $v_1$ 、 $v_2$  を適当に選び、人間の意志項

$$f(t) = U(t-\tau) \quad ; \text{ステップ関数} \quad (7)$$

に対する  $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$  の応答に関してシミュレーションを行った。その結果、パラメータによって4つの応答形態があることが分かった。

①  $X_1$ 、 $X_2$  が、共に単純収束。 (Fig.1)

- ②共に交差しながら振動し収束。(Fig. 2)
- ③同相の長周期で振動しながら収束。(Fig. 3)
- ④共に振動し収束しない。(Fig. 4)

収束する応答の内、①は位置と目標とのずれが大きいため、演奏システムとしては不相当である。一方で④は、人間が速度変化に過敏な上にメトロノームに合わせる意志が強すぎ、機械系も不安定になっている状態である。③は  $C1 \approx 1$ 、 $C2 \approx 2$ 、 $D1 \approx 2$ 、 $D2 \approx 1$  程度の時に発生し、これは人間が位置合わせ、機械がテンポ合わせを強調する場合を示す。

3. 実験

人間の意志項に当たるテンポの目標値をメトロノームで提示した。このテンポは、ある時刻  $\tau$  でステップ状に変化する。人間はこのメトロノームを目標として鍵盤を弾き、機械側ではそれと同期して相互作用モデルにしたがって伴奏側のテンポを出力する。

4. 結果

実験によって得られた結果の例を Fig. 5, Fig. 6 に示す。最も多くみられる応答形態は、Fig. 5 に見られる様な③のタイプであり、人間の出すテンポに追従しつつ共に長い周期で振動しながら収束して行く様子が判る。このタイプは相互作用モデル特有の応答形態で、人間が過去に出したテンポのみによる予測モデルでは、平均化作用によってテンポが交差しながら収束することになり、このような独特の形態は得られない。

5. 考察及びまとめ

機械と人間の相互作用を考慮した自動伴奏システムの一つのモデルを提案し、そのモデルを解析するとともに実験を行った。特に、人間のテンポと機械系のテンポが同相の長い周期をもって振動しながら収束して行くという、相互作用モデルの解析によって見出された特有の収束形態が、実験によって確認された。これは、機械が人間のテンポ許りでなく、イベント位置合わせを同時に考慮した結果である。

ここで提案したモデルとその解析手法は、単に自動伴奏システムに適用できるばかりでなく、一般に、共通知識を持つ人間と機械が高速に調和して動作する場合のマン・マシンインターフェースの解析にも有効であると考えられる。

[参考文献]

[1]大照他、「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」、電子情報通信学会春季全国大会、pp. 7-216、(1990)

