

平成 26 年度 修士論文

自動演奏におけるベイジアンフィルタと  
マルコフモデルを用いた音のパラメータ操作

平成 27 年 2 月 13 日

13350923

橋本 文人

指導教員 三浦 元喜 准教授

九州工業大学大学院 工学府 先端機能システム工学専攻

|          |                      |           |
|----------|----------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>序論</b>            | <b>1</b>  |
| 1.1      | 研究背景                 | 1         |
| 1.2      | 研究目的                 | 3         |
| <b>2</b> | <b>提案手法</b>          | <b>4</b>  |
| 2.1      | 提案手法                 | 4         |
| 2.2      | 曲構成と取得データ            | 5         |
| 2.2.1    | 曲構成の定義               | 5         |
| 2.2.2    | データの整理               | 5         |
| 2.3      | マルコフモデル              | 7         |
| 2.3.1    | マルコフモデル              | 7         |
| 2.3.2    | 動作の一次マルコフモデル         | 7         |
| 2.4      | ベイジアンフィルタ            | 10        |
| 2.5      | 計算機による音のパラメータ操作      | 12        |
| 2.6      | 提案手法の発展と関連研究         | 13        |
| 2.6.1    | 提案手法の発展              | 13        |
| 2.6.2    | 関連研究                 | 14        |
| <b>3</b> | <b>データ取得実験とモデル生成</b> | <b>15</b> |
| 3.1      | データ取得実験の目的           | 15        |
| 3.2      | データの取得方法             | 15        |
| 3.3      | データ取得実験の内容           | 19        |
| 3.3.1    | 実験機材                 | 19        |
| 3.3.2    | 被験者と実験曲              | 20        |
| 3.3.3    | 実験方法                 | 24        |
| 3.3.4    | 取得データ                | 26        |
| 3.4      | 学習                   | 26        |
| 3.4.1    | R プログラムによるモデル化       | 26        |
| 3.4.2    | 生成モデル                | 27        |
| <b>4</b> | <b>評価実験</b>          | <b>30</b> |
| 4.1      | 評価実験の目的              | 30        |
| 4.2      | 評価実験の内容              | 30        |
| 4.2.1    | 計算機による音のパラメータ操作の手順   | 30        |
| 4.2.2    | 評価実験                 | 31        |
| 4.3      | 評価実験の結果と考察           | 35        |
| 4.3.1    | 二項分布                 | 35        |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 4.3.2 実験結果..... | 36 |
| 4.3.3 考察.....   | 43 |
| 5 まとめ.....      | 44 |
| 謝辞.....         | 46 |
| 参考文献.....       | 47 |
| 付録.....         | 49 |

# 1 序論

本論文は、機械学習法を用いた人間のライブパフォーマンスの再現について論ずるものである。第一章では本研究のコンセプトや目的、関連研究等を示していく。

## 1.1 研究背景

打ち込みとは、前もって演奏情報を入力しておきそれを再生することによって実現させる演奏技法のひとつであり、簡潔に述べるとコンピュータに自動で音楽を演奏させることである。レコーディングにおいて人間の演奏を必要とせず低コストであるので、ゲーム音楽から普及が始まり、プロモーションビデオやドラマ・アニメ等の背景曲に至るまで、幅広い音楽素材として使用されることが多くなった。

近年ではその打ち込みをコンサートに取り入れているアーティストやバンド、アイドルグループなどが増加してきている。取り入れ方や生演奏と打ち込みの割合はアーティストによって様々である。生演奏の割合が多い場合は、例えばバンドでキーボディストはいないがキーボードの音色がほしい場合や、人間には演奏できないような分散和音を取り入れたい場合など、曲に味付けをする形で使用される。これはドラマーがクリック音という打ち込みの音とのずれが生じないようにするためのリズムの指標を聴きながら叩き、それに他のメンバーが合わせる形で実現させる。打ち込みの割合が多い場合は、個人で活動していて楽器一本では音が足りない場合や、歌やダンス、映像（VJ）など楽器以外のパフォーマンスで音楽との融合表現を図る場合などに使用され、これは打ち込みが土台となっているので、各々が打ち込みに合わせてパフォーマンスすることによって実現させている。

このように打ち込みにも様々な表現方法があり、特に後者の打ち込みを大きい割合で取り入れているアーティストの中には、流れている打ち込みの音に対して音のパラメータを変化させるという演出を行っているアーティストもいる。DJのように、目の前にある音のパラメータが割り当てられたコントローラつまみを操作してリアルタイムに曲の雰囲気を変化させるという演出である。以下、この演出のことを「音のパラメータ操作」と呼ぶ。図 1.1 は音のパラメータ操作を取り入れているアーティストの一例の写真である。



図 1.1 音のパラメータ操作を取り入れたアーティストの一例

打ち込みを取り入れた元祖とされているテクノミュージックの開拓者に、**Kraftwerk** (クラフトワーク)<sup>1</sup>というドイツの電子音楽グループがいる。このアーティストは70年代から現在に至るまで音楽活動を行っていて、時代やコンピュータの発展と共に使用機材を進化させていき現在では音のパラメータ操作の演出をコンサートに取り入れている。また、その機材の変化と共に曲の音色やアレンジも変化し、現在でも70年代に作られたアルバムの曲をコンサートで披露する。

彼らには自分たちが他界などで活動できなくなった場合に、ロボットに演出を担うことによって活動を続けていく可能性がある。これはメンバーのリーダーであるラルフ・ヒュッターが20代のときから描いていた構想で[1]、これが実現されれば、彼らはエンジニアさえ引き継げば仮の姿で永遠に活動を続けることができる。著者は長期に渡る活動が作品を深くするという価値観を抱いており、クラフトワークの数十年に渡り徐々に形を変えてきたそれらの曲には非常に感慨深いものを感じている。したがって、彼らが活動できなくなってもロボットによってコンサートが行われることに対しては肯定的である。また、著者の率いる電子音楽グループ「テクノイズ」もクラフトワークのような演出をコンサートに取り入れている、彼は自身が活動できなくなった場合に計算機に演出を担うことによって長期に渡る活動を可能にしたいと考えている。

---

<sup>1</sup> Kraftwerk は、アメリカの新聞紙「The New York Times」から The Beatles Of Electronic Dance Music と評されている70年代の電子音楽グループである。

## 1.2 研究目的

前述したクラフトワークのロボットを使った演出は、近年におけるコンサートで披露されるようになった。ステージから演奏していた本人たちが消え、続けて本人たちに似せたロボットが現れ、そのロボットがランダムに動いていて打ち込みの音楽が流れているといった演出である。これがもしラルフの抱いた構想である演出の身代わりだとするならば、彼らがいなくなった場合に音のパラメータ操作がコンサートでリアルタイムに行われないことになる。つまり現時点では、彼らがコンサート中に行っている音のパラメータ操作を、彼らがない場合にどのように再現するかは定かではないということである。そこで我々は、打ち込みの音楽において音のパラメータを操作する演出者をパラメータの変動データから再現したいと考えた。本人たちに似たような音のパラメータ操作をコンピュータで可能にすれば、ロボットが動いて音楽が流れるのみではなくなるので、より臨場感のある演出が可能となるだろう。また毎回違う雰囲気曲を聴くことが可能となるので、リスナーの経験も豊かにすることができる。計算機による音のパラメータ操作は、本人たちが音のパラメータの操作に悩んだときに解決策（良い動かし方）を提示してくれることも考えられる。また、演出者がパラメータを動かす際の動作原理に未解明な部分があることから、何を以て音のパラメータを動かすのかが明らかになるだろう。

本研究は、自動演奏においてベイジアンフィルタとマルコフモデルという統計的手法を用いて、演出者のように振る舞う音のパラメータ操作を実現することを目的とする。

## 2 提案手法

第二章では、コンピュータが人間の演出者に代わってパラメータ操作を行うための手順や手法について述べる。具体的には、人間の演出者の演奏データの取得、特徴量の算出、モデルの生成、コンピュータによるパラメータ操作の実現方法などについて、順を追って説明していく。

### 2.1 提案手法

我々は、音のパラメータ操作における動作の決定が何に起因して行われているのか明確ではなかったため、独自に定義した曲構成においてランダムに発生するベイジアンフィルタとマルコフモデルを組み合わせたモデルを提案した (図 2.1)。なお、図の詳細は 2.2 以降で詳しく説明する。

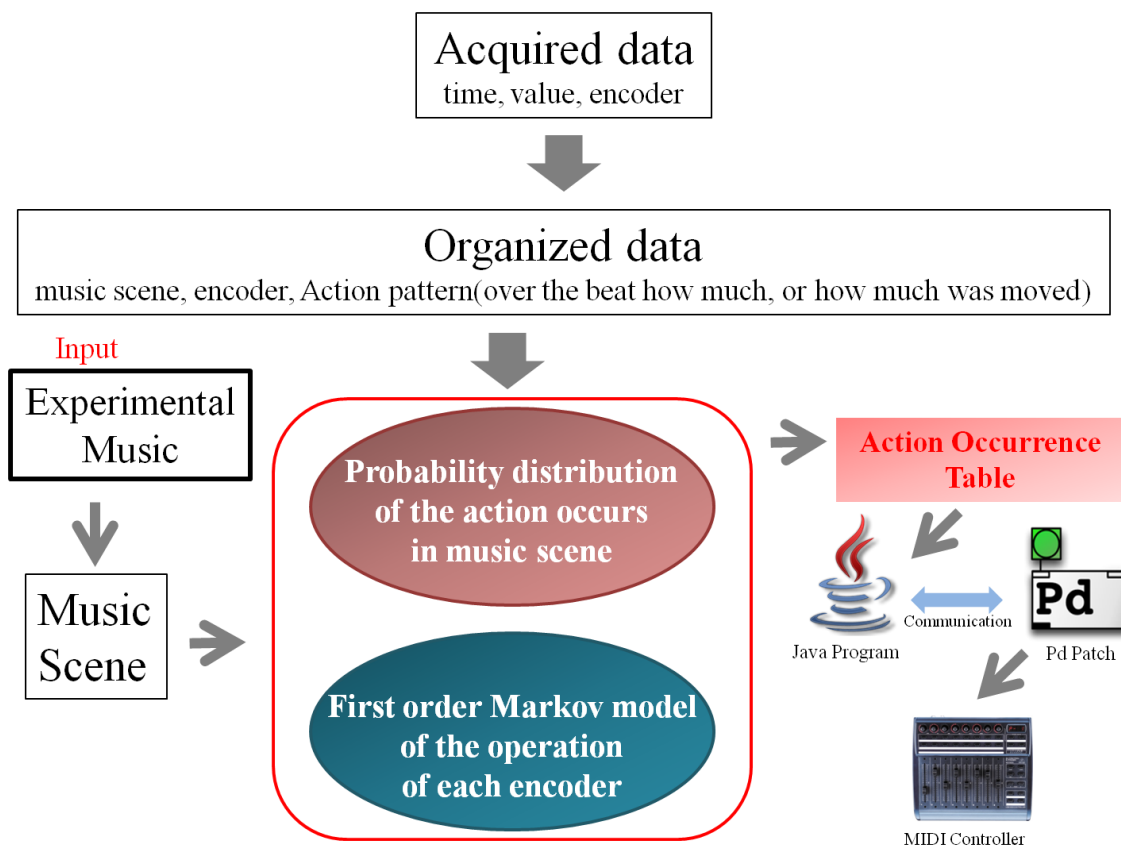


図 2.1 提案手法の概要図

## 2.2 曲構成と取得データ

### 2.2.1 曲構成の定義

本研究のモデルは、動作発生の起因となるものを曲構成とする（一個前の動作も考慮することは2.3のマルコフモデルの説明にて記載）。曲構成は、実験曲に用いられているインストゥルメントのPart1~Part7までのOn/Offで1と0を出力させた際の7bitの値と定義する。例を図2.2に示す。なお、全ての実験曲のインストゥルメントの構成はPart1:Arpeggio（分散和音）、Part2:Chord（和音）、Part3:Cantus Firmus（定旋律）、Part4:Base、Part5:Percussion、Part6:Melody（主旋律）、Part7:Vocalとしている。

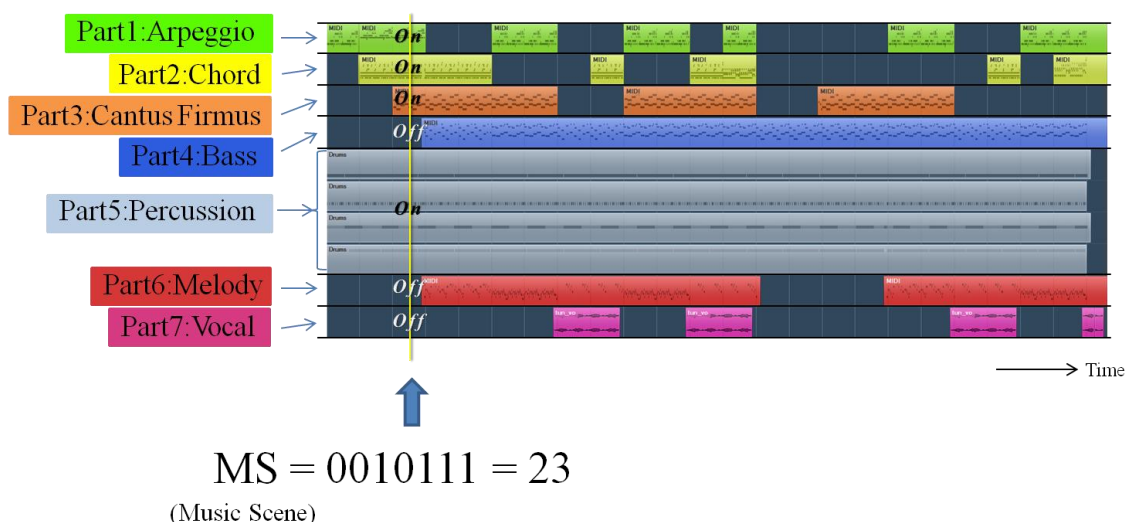


図 2.2 曲構成の定義の例

### 2.2.2 データの整理

特徴量を算出する際は、人間のパラメータ操作により取得したデータを用いる。そのデータには再生時間何秒の位置で、どのエンコーダを、どの値に動かしたかという情報がcsv<sup>2</sup>形式で記載されている。これを各実験曲のbpm<sup>3</sup>の差をなくすために、再生時間を拍数に正規化し、一つのエンコーダ毎の1回の動作に細分化する。以下、この一つ一つの動作をアクションと呼ぶ。例を図2.3に上げる。左から[1]はアクションが発生した時間（拍）、[2]は動かしたエンコーダの番号、[3]はどのくらいの時間（拍）をかけて動かしたか、[4]は動かし幅、[5]、[6]は動かした値の各頂点、[7]は折り返した回数である。例えば1行目のデータであれば図2.4のように、再生時間4.19拍のところで、元の値から一旦66上げ、次に5下げるといった動作を3.33拍かけて行った（結果として5下げた）というアクション

<sup>2</sup> csv (comma-separated-values) とは項目をカンマで区切って列挙したデータ形式のことである。

<sup>3</sup> bpm は Beats Per Minute の略で、1分あたりの拍数のことである。



ンを表すことになる。折り返しのあるアクションについての詳細は、別の配列に保存している。このプログラムでは取得した csv データの、記録のスタート・ストップのコントロール情報と、値を 1 しか動かさなかった動作についてはノイズとみなされ省くことになっている。

| [,1]  | [,2] | [,3]  | [,4] | [,5] | [,6] | [,7] |
|-------|------|-------|------|------|------|------|
| 4.19  | 8    | 3.33  | -5   | 66   | -5   | 1    |
| 8.92  | 3    | 0.95  | -46  | 0    | -46  | 0    |
| 11.26 | 3    | 1.46  | 25   | 25   | -29  | 1    |
| 9.78  | 82   | 1.24  | 73   | 73   | 0    | 4    |
| 12.16 | 82   | 0.49  | -81  | 0    | -81  | 0    |
| 13.28 | 2    | 0.75  | 86   | 86   | 0    | 0    |
| 14.89 | 2    | 1.61  | -92  | 0    | -92  | 2    |
| 19.93 | 24   | 3.47  | 2    | 2    | -60  | 3    |
| 27.29 | 82   | 0.23  | 81   | 81   | 0    | 0    |
| 28.14 | 82   | 0.20  | -81  | 0    | -81  | 0    |
| 31.48 | 11   | 4.97  | -5   | 0    | -64  | 1    |
| 33.79 | 82   | 0.73  | 81   | 81   | 0    | 0    |
| 36.20 | 82   | 0.89  | -77  | 0    | -77  | 0    |
| 39.74 | 27   | 15.80 | -9   | 0    | -62  | 21   |
| 52.17 | 26   | 3.03  | -22  | 84   | -22  | 3    |
| 55.84 | 26   | 0.04  | 2    | 2    | 0    | 0    |
| 58.42 | 85   | 0.83  | -3   | 0    | -3   | 0    |
| 58.43 | 87   | 1.08  | -11  | 0    | -11  | 0    |
| 59.80 | 82   | 2.19  | 3    | 78   | 0    | 1    |
| 63.43 | 82   | 0.66  | -5   | 74   | -5   | 1    |
| 65.80 | 10   | 2.06  | -12  | 83   | -12  | 1    |
| 68.44 | 87   | 0.04  | -2   | 0    | -2   | 0    |
| 68.98 | 87   | 3.39  | 27   | 27   | -11  | 1    |
| 72.96 | 87   | 0.07  | -1   | 0    | -1   | 0    |
| 68.99 | 85   | 3.28  | 9    | 9    | -6   | 1    |
| 73.42 | 86   | 3.49  | 96   | 96   | -20  | 2    |
| 77.54 | 86   | 0.49  | -96  | 0    | -96  | 0    |
| 83.45 | 2    | 3.27  | 12   | 92   | 0    | 3    |
| 84.91 | 7    | 0.23  | 1    | 1    | 0    | 0    |
| 85.87 | 7    | 2.24  | -2   | 42   | -2   | 1    |
| 90.34 | 82   | 0.48  | 78   | 78   | 0    | 0    |
| ⋮     |      |       |      |      |      |      |

図 2.3 データ整理後のアクション発生表の例

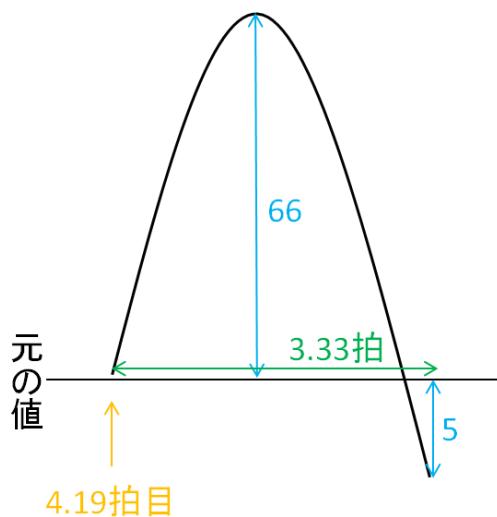


図 2.4 図 2.3 の行列の一行目のアクションの内容

## 2.3 マルコフモデル

### 2.3.1 マルコフモデル

マルコフモデルとは、未来の挙動が現在の値（または過去も含む）で決定されるモデルのことである。現在の値だけで決定されるものを一次マルコフモデル、現在と一個前の値まで含めて考慮するものを二次マルコフモデルという。例えば天気を、前日またはそれ以前の天気を参考にして予測する場合に、同じ天気は続きやすい、曇りの後は雨になりやすい等の特徴を反映させるモデルである。さらに、各状態とその間をつなぐ遷移確率があり、状態から出力される記号が確率的に決まる場合は隠れマルコフモデルを用いる。音楽のジャンルを分類する分野の研究の中では、Wei Chai らの旋律から民俗音楽（ドイツ、アイルランド、オーストリア）を分類する隠れマルコフモデルの提案がある[2]。この研究では旋律を独自に定義し、複数のマルコフモデル、複数のシンボルの定義で分類精度を算出し、民俗音楽を分類するのにどんなモデルが相応しいか、シンボルをどのように定義すればいいのかを検討している。モデル自体は Baum-Welch 再推定法という手法で隠れマルコフモデルを生成している。図 2.5 のように、Forward アルゴリズムと Backward アルゴリズムを繰り返し尤度が最大となるパラメータを求める手法である[3]。

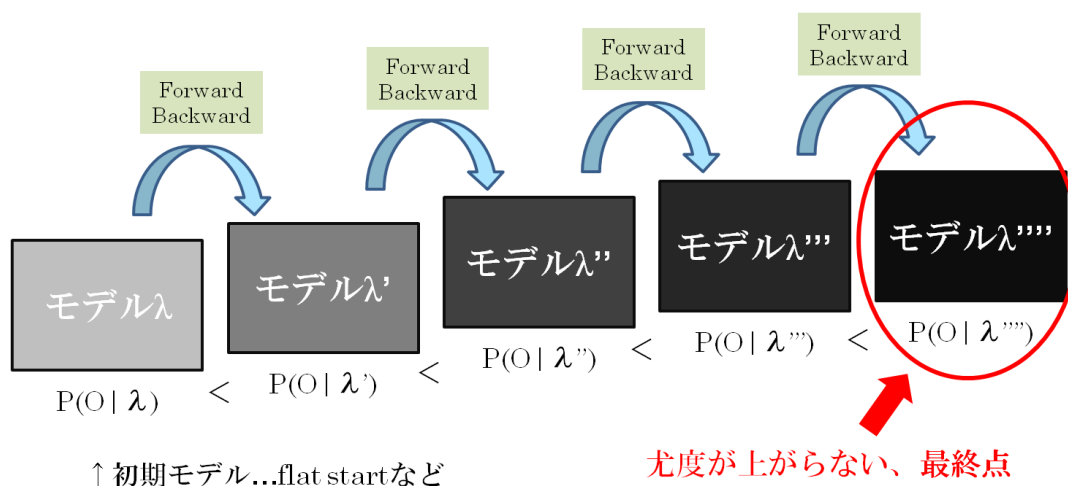


図 2.5 Baum-Welch 再推定法（学習用のシンボル系列  $O$  が観測された場合）

### 2.3.2 動作の一次マルコフモデル

取得したデータを各エンコーダについて時系列順にアクションを並べると、前回値を下げていたならば次に値を上げるといった、ひとつ前の事象に非常に関連している動作が見えてくる。すなわち、エンコーダ毎のアクションはマルコフ過程に従っていると仮定できる。そこで、各エンコーダにおいて状態遷移の確率分布を求め、一次のマルコフモデルを

生成する．この場合、値の幅を 11 段階（2.4 で述べるベイジアンフィルタと同じ幅）に分け度数分布を求める．-127~-112.5 を-5、~-87.5 を-4、~-62.5 を-3、~-37.5 を-2、~-12.5 を-1、~+12.5 を 0、~+37.5 を+1、~+62.5 を+2、~+87.5 を+3、~+112.5 を+4、~+127 を+5 とラベル付けする．状態遷移確率を  $A$  とした場合、状態  $i$  から  $j$  に遷移する確率は(2.1)式のように表される．

$$A = \{a_{ij}\} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1j} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

生成したマルコフモデルの配列は例えば図 2.6 のようなものであり、これは任意のエンコーダの状態が例えば+3 から-3 へと遷移する確率は  $4/36$  すなわち  $1/9$  ということを表している．本研究で使用する MIDI コントローラにはエンコーダが 40 個存在するので、マルコフモデルは 40 個生成される（図 2.7）．

|      | [-5] | [-4] | [-3] | [-2] | [-1] | [ 0] | [+1] | [+2] | [+3] | [+4] | [+5] |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| [-5] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    |
| [-4] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 2    | 0    | 2    | 0    |
| [-3] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 3    | 1    | 0    |
| [-2] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| [-1] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| [ 0] | 0    | 1    | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 2    | 1    | 0    | 0    |
| [+1] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    |
| [+2] | 0    | 1    | 0    | 1    | 0    | 2    | 0    | 1    | 1    | 0    | 0    |
| [+3] | 1    | 0    | 4    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| [+4] | 0    | 3    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| [+5] | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

図 2.6 一次マルコフモデルの配列の例

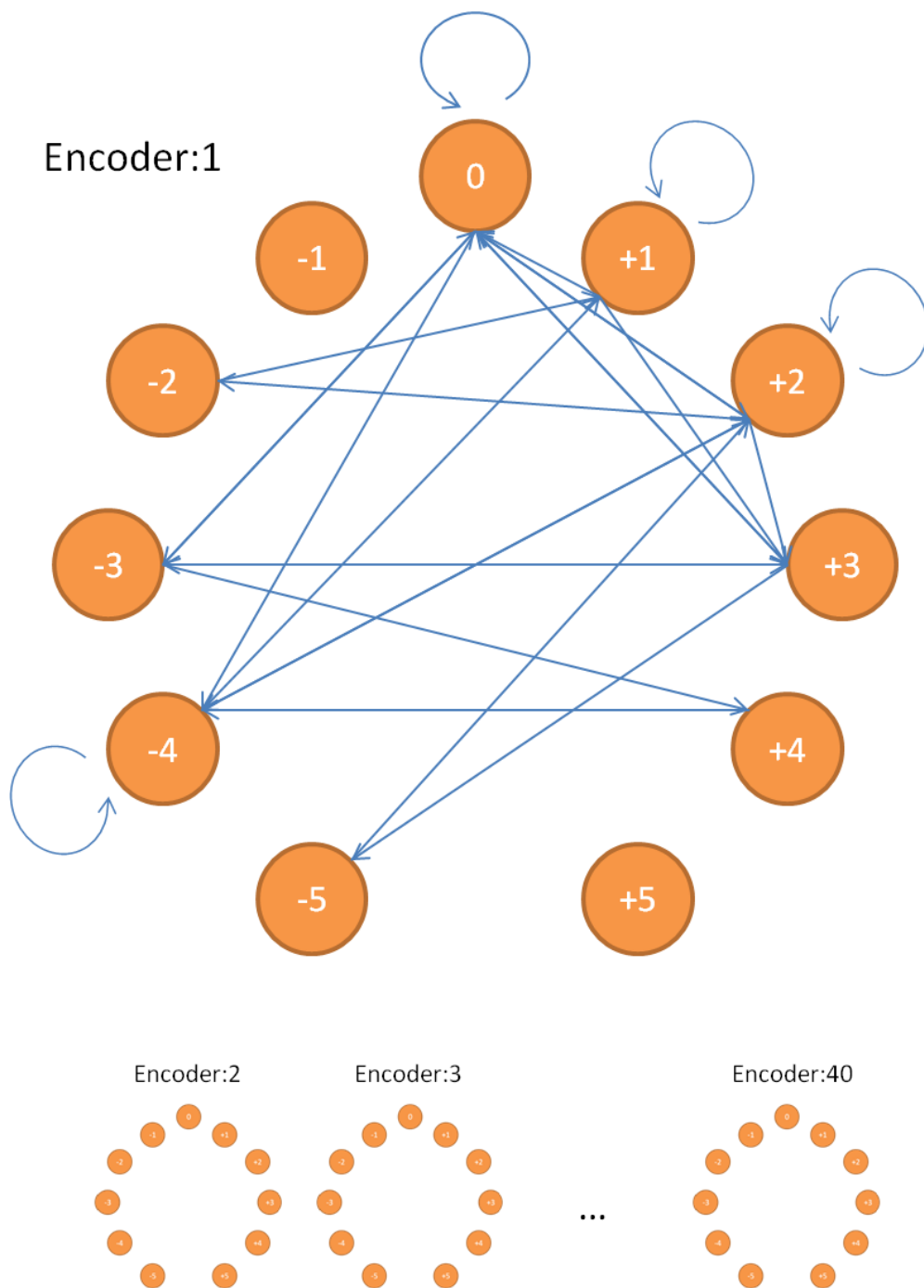


図 2.7 全てのエンコーダにおけるマルコフモデル

## 2.4 ベイジアンフィルタ

ベイジアンフィルタとはベイズ推定と呼ばれる統計的手法を応用した、データを分類したり判別したりする機能を持つシステムのことである。ここでは任意の曲構成において、どのエンコーダを動かすのか、どのような動作をするのかを決定するための確率分布を算出するためにベイズの定理が用いる。ベイズの定理は以下の(2.2)式のように表される。

$$P(Y|X) = \frac{P(X \cap Y)}{P(X)} = \frac{P(Y)P(X|Y)}{P(X)} \quad (2.2)$$

(2.2)式の各記号は、

|               |                         |
|---------------|-------------------------|
| $P(X)$        | ...事象 X が起こる確率          |
| $P(Y)$        | ...事象 Y が起こる確率          |
| $P(X Y)$      | ...事象 Y のもとで事象 X が起こる確率 |
| $P(Y X)$      | ...事象 X のもとで事象 Y が起こる確率 |
| $P(X \cap Y)$ | ...事象 X も Y も起こる確率      |

を表している。これらの式を用いることによって条件付き確率分布が生成する。今回のモデルにおいては事象 X がどのエンコーダを動かすか、事象 Y がどのような動作を取るのかを表している。

ここまでの流れを整理すると、まず図 2.3 のようなアクション発生表に、各アクション発生時にどのような曲構成であったかを割り当てていく。2.2.2 と 2.3.2 で説明した処理とこの作業を、取得した全てのデータに対して、各実験曲の持つ bpm や曲構成の情報を取り入れながら繰り返し行う。そして最後に各曲構成におけるアクション発生の確率分布を求め、既存のマルコフモデルを通してモデルを生成する。値をどのくらい動かしたかという変化の幅は、スタージェスの公式<sup>4</sup>より 11 段階に分けて度数分布を生成する。

また、マルコフモデルによって確率分布を変容させる方法は、例えば図 2.8 のように、ベイジアンフィルタによって発生したアクション発生の確率分布から曲構成が 23 (MS = 23) の時に 2 番のエンコーダを動かすことが決定したとする。すると、どのくらいの幅動かすのか (また、値を上げるのか下げるのか) という度数分布が現れる。これに対して 2 番のエンコーダにおけるマルコフモデルを考慮する。2 番のエンコーダの状態遷移のマル

---

<sup>4</sup> スタージェスの公式とは、 $n = 1 + \log_2 N$  で表される、度数分布を生成する際の階級の個数の目安となるものである。本研究ではアクションの総数が約 1000 個であるため、 $n \doteq 11$  となる。

コフモデルは図 2.8 の中央のようになっており、仮に 2 番のエンコーダが一つ前の動作で 100 上げていた場合、この行の度数分布を先ほどのものに加える。こうすることによってアクション発生の確率分布を図 2.8 の下のように変容させている。

Now action tries to change encoder ID 2.

|                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| -127.0                    | -112.5 | - 87.5 | - 62.5 | - 37.5 | - 12.5 | + 12.5 | + 37.5 | + 62.5 | + 87.5 | +112.5  |
| -112.5                    | - 87.5 | - 62.5 | - 37.5 | - 12.5 | + 12.5 | + 37.5 | + 62.5 | + 87.5 | +112.5 | +127.0  |
| 0                         | 1      | 1      | 1      | 1      | 4      | 1      | 0      | 3      | 0      | 0       |
| (MS = 23, encoder ID = 2) |        |        |        |        |        |        |        |        |        | (1/ 12) |

When previous action changes the value + 100 ...

|                  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |   |         |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---------|
| -127.0           | -112.5 | - 87.5 | - 62.5 | - 37.5 | - 12.5 | + 12.5 | + 37.5 | + 62.5 | + 87.5 | +112.5 |   |         |
| -112.5           | - 87.5 | - 62.5 | - 37.5 | - 12.5 | + 12.5 | + 37.5 | + 62.5 | + 87.5 | +112.5 | +127.0 |   |         |
| -127.0           | -112.5 | 0      | 0      | 1      | 0      | 0      | 0      | 1      | 1      | 0      | 0 | 0       |
| -112.5           | - 87.5 | 0      | 0      | 1      | 1      | 1      | 3      | 0      | 1      | 1      | 2 | 1       |
| - 87.5           | - 62.5 | 0      | 0      | 0      | 2      | 2      | 3      | 1      | 2      | 4      | 2 | 0       |
| - 62.5           | - 37.5 | 0      | 0      | 0      | 0      | 3      | 3      | 4      | 1      | 3      | 2 | 0       |
| - 37.5           | - 12.5 | 0      | 0      | 1      | 3      | 5      | 14     | 7      | 2      | 4      | 1 | 1       |
| - 12.5           | + 12.5 | 0      | 1      | 4      | 5      | 13     | 45     | 16     | 8      | 2      | 2 | 1       |
| + 12.5           | + 37.5 | 1      | 2      | 2      | 1      | 8      | 14     | 3      | 3      | 2      | 0 | 0       |
| + 37.5           | + 62.5 | 0      | 0      | 1      | 1      | 4      | 10     | 2      | 2      | 0      | 0 | 1       |
| + 62.5           | + 87.5 | 0      | 2      | 3      | 4      | 1      | 5      | 2      | 1      | 1      | 0 | 0       |
| + 87.5           | +112.5 | 1      | 4      | 2      | 0      | 1      | 2      | 0      | 0      | 0      | 0 | 0       |
| +112.5           | +127.0 | 1      | 2      | 1      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 | 0       |
| (encoder ID = 2) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |   | (1/ 10) |



|                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| -127.0                    | -112.5 | - 87.5 | - 62.5 | - 37.5 | - 12.5 | + 12.5 | + 37.5 | + 62.5 | + 87.5 | +112.5  |
| -112.5                    | - 87.5 | - 62.5 | - 37.5 | - 12.5 | + 12.5 | + 37.5 | + 62.5 | + 87.5 | +112.5 | +127.0  |
| 0                         | 1      | 1      | 1      | 1      | 4      | 1      | 0      | 3      | 0      | 0       |
| +                         | 1      | 4      | 2      | 0      | 1      | 2      | 0      | 0      | 0      | 0       |
| 1                         | 5      | 3      | 1      | 2      | 6      | 1      | 0      | 3      | 0      | 0       |
| (MS = 23, encoder ID = 2) |        |        |        |        |        |        |        |        |        | (1/ 22) |

**This is the new probability distribution.**

図 2.8 マルコフモデルによってアクション発生の確率分布が変容する例

## 2.5 計算機による音のパラメータ操作

ここまでの段階で一度予備実験を行った。この時点で作成した実験曲は5曲で、3曲(表3.3の実験曲No.1,2,3)×2試行、すなわち6つのcsvファイルをトレーニングデータとし、テストデータを実験曲No.4,5として音のパラメータ操作をモデルに行ってもらった。パラメータが人間の手を借りることなく、自動で動かされることには成功した。しかし、その動かし方はとても乱雑であった。斬新かつ前衛的であったとも言える。我々は原因として考えられるものを以下の表2.1にまとめた。

表 2.1 パラメータ操作が乱雑になる原因として考えられるもの

- 
1. データ数が少なかった。

---

  2. 同じパラメータでも曲(音色)が違っていると、変化させたときに同じように変化しないパラメータがある。

---

  3. Pitch や Frequency (Cutoff) など、動かすすぎると音が変わるパラメータもあり、そのようなパラメータの変化により音がおかしくなっているにもかかわらず、値を戻さない。

---

  4. パラメータが上限に達していても値を上げる命令を受ける、逆に、パラメータが最低になっても値を下げる命令を受ける場合がある。

---

  5. 音程を変化させる際は、音が外れないようにスケールに則った音程に飛ぶ必要がある。
- 

上記の問題点は、2、3、4に関しては音色設定の際に値の領域を決めることで改善できる。また、5は例外処理として、Pitch を変化させる時だけスケールに則った動きをするように制御すれば良い。1に関しては実験曲を増やし、沢山のデータを取得することでカバーできる。したがって、我々はパラメータ領域を設定したcsvファイルを作成し、それを取り込み領域から外れないようにする機能と、Pitch の例外処理を設けた。また、もし被験者が音程も何も気にせず適当に動かすスタイルであった場合には Pitch 例外処理や領域設定は適用しない方がよい。これらの機能を使用するかしないかは、取得データから Pitch の外れる値(0,12,24,36,48 以外)で一定以上の拍数をキープしているアクションの数で判別する。

## 2.6 提案手法の発展と関連研究

### 2.6.1 提案手法の発展

本稿で提案している手法において、入力としては主に曲構成しか扱っていない。そのため、人間がパラメータを操作する起因となっているものとして曲構成しか考えていないことになる。実際は音楽の持つ別の要因や、その人の持つ個性を生物学的・心理学的視点から分析した結果も考慮すべきであると考え、我々は音楽的要因に関して、曲構成以外に起因しているものとして以下のものを導入すると、再現性をさらに高める可能性があると考えている。

#### (1) 楽曲特徴量

調整、和音出現頻度の分散 (HVL)、1 分当たりの拍数 (BPM)、最大ビートレベル (MBL)、最大信号レベル (MSL)、平均信号レベル (ASL) 等を総称して楽曲特徴量という。児玉泰輝らは、これらの値によって曲の雰囲気进行分类する手法を提案している[4]。曲の雰囲気と動かし方の因果関係を調べ、モデルに組み込む。

#### (2) メル周波ケプストラム係数 (MFCC)

MFCC (Mel-Frequency Cepstrum Coefficients) は音声認識で扱われる音声データの特徴量の一つである。例えば、Lisha らは心音から心臓病を認識する手法を提案している (この研究ではさらに隠れマルコフモデルを組み合わせている) [5]。音声データから MFCC を求め、それらと動かし方の因果関係を調べモデルに組み込む。しかし入力として MFCC を扱う場合は、ある区間の音声データからリアルタイムに求めなければならないため、処理の速さが求められるようになる。

#### (3) 曲構成をコード進行で考え、そのマルコフ性を考慮する

本研究では楽器の数で曲構成を定義していたが、曲構成と言えばイントロ、A メロ、B メロ、サビと言ったような名称を扱うのが一般的である。この場合の曲構成はコード進行や主旋律の違いから区別されている。後藤は音響信号の特徴量の一つであるクロマベクトルを用いたサビ検出法も提案している[6]。この曲構成のマルコフ性を考慮したモデルは、1 回目の A メロと 2 回目の A メロで、パラメータの動かし方を変化させることができる。このモデルでは繰り返しの曲構成において、最初は目立たない程度に、次は大胆に動かすというスタイルの人の意図が組み込まれるだろう。



## 2.6.2 関連研究

現在、情報処理における音楽の研究は国内外問わず盛んに行われている。ここでは、機械学習法を用いた音楽に纏わる研究を紹介していく。

音楽情報検索の分野において、Panagakis らは LPNTF 法を使用した強固な音楽ジャンルの分類の枠組みを提案した[7]。また、Hamel と Eck らは FFT 分散による特徴量抽出を用い、音楽を 10 のジャンルに分類する手法を提案した[8]。我々の研究において、特徴量の算出を考える上で参考となった。

パフォーマンス識別の分野では、Stamatatos と Widmer らは同一の楽曲を複数の奏者に演奏させ区別する計算法を報告し、演奏者の個々のスタイルの傾向を取り込む機能を導入した[9]。また、Mantaras と Arcos らは表現力やパフォーマンスをパラメータ化し、ピアノの演奏表現を試みる AI 技術を用い、ピアノ演奏の差を定量化できることを示した[10]。評価方法を考える上で参考となり、パフォーマンスに個人差がどのように出るのかなどは本研究でも興味深いところである。

音声データ処理の分野では、Hamel と Eck らはポリフォニック音楽における楽器の自動識別の手法を示し、計測器であるいくつかのモデルを比較した[11]。この研究では全てのパートの合わさった完成形の音声データを扱うのに対し、我々の実験におけるパラメータ操作では楽器は既に分離されたものを扱い、それぞれのパートに関して操作を施すものである。

音楽情報の自動生成の分野においては、和気らのテンション・パラメータを用いた即興演奏システムの提案や[12]、深山らの歌詞の韻律に基づいた自動作曲システムの提案があり[13]、パラメータ操作を自動で行わせるという本研究の一目的と類似している。

パラメータの自動制御という観点でみると、小山らの視覚デザイン探索のためのクラウドソーシングを活用したパラメータ空間解析がある[14]。この研究では画像のもつ様々なパラメータの中で、どれか一つを動かせば他のパラメータも自動で調整をし見栄えを良くすることを目的としている。これには学習にクラウドソーシングを用いたアンケートの結果を用いている。

どの分野においても特徴量抽出等の機械学習法ベースの提案が多く、また、自動生成の分野では指標となるパラメータが定められている。現在、ある特定の人間に似せたパフォーマンスを計算機にさせる(指標が人間)といった研究は少なく、本人の動きを再現するために必要な特徴量や機械学習アルゴリズムの検討を行う必要があると考えた。我々はこれらの関連研究で提案されている様々な手法を考慮し、次章以降、本研究の提案手法と評価を行っていく。

## 3 データ取得実験とモデル生成

第三章では、第二章で提案された方法を用いて、実際にデータ収集からモデル生成までを行う詳細について述べる。また、実験で用いるプログラムのソースコードは付録にて記載している。

### 3.1 データ取得実験の目的

本研究では、機械学習法を用いた人間のライブパフォーマンスの再現性を評価することを最終目的とする。ライブパフォーマンスには前述した打ちこみの音楽における音のパラメータ操作を用いる。音のパラメータ操作を再現するためには、パラメータの変動データを取得して特徴量を算出しなければならない。この章ではデータを取得し、モデルを生成するまでに用いた機材や実験曲、被験者などの詳細や実験方法について具体的に記述する。

以下、音のパラメータを操作してモデルを生成する為のデータ取得実験を行う被験者を「オリジナル」と呼ぶことがあることに注意してもらいたい。

### 3.2 データの取得方法

本研究の基盤となる打ちこみの音楽は、MIDI データという演奏データと音色を被せる音源から成り立つ。MIDI データは Studio ftn Score Editor を用いて作成し、Cubase7 という DAW<sup>5</sup>を用いてその演奏データを読み込み、音源にはプラグインシンセの SYNTH-WERK を使用する。また、音楽が鳴っている間パラメータ操作をしやすいように、MIDI コントローラの BCF2000 をコンピュータと接続し、音源上の任意のパラメータを図 3.1 のように各エンコーダ（つまみ）に割り当てる。また、音源のボーカルトラックには音声合成ソフトウェア「CeVIO Creative Studio Free」を用いた。

---

<sup>5</sup> DAW は Digital Audio Workstation の略称で、デジタルで音声の録音、編集、ミキシング、打ち込みなど一連の作業ができるように構成された一体型のシステム（ソフトウェア）のことである。



図 3.1 MIDI コントローラ「BCF2000」の写真とパラメータのアサイン

MIDI コントローラのアサインが終わったら、Java のプログラムと PureData<sup>6</sup>のプログラムを用いて初期値の設定を行い (receive\_init2.java と send\_init2.pd を用いる)、その結果を csv データとして出力する。データは図 3.2 のように、実験で行う 40 個のパラメータの初期状態の数値が入力されている。

<sup>6</sup> PureData とは 90 年代に開発されたデスクトップミュージックとマルチメディア作成用のビジュアルプログラミング言語である。Puredata のプログラムのことを Pd パッチと呼ぶ。

|    | A   | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V |
|----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1  | 24  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2  | 40  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3  | 120 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 4  | 100 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5  | 9   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6  | 77  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7  | 28  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 8  | 32  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 9  | 36  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 10 | 40  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 11 | 120 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 12 | 83  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 13 | 7   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 14 | 20  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 15 | 45  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 16 | 99  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 17 | 12  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 18 | 48  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 19 | 56  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 20 | 83  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 21 | 23  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 22 | 54  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 23 | 30  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 24 | 63  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 25 | 24  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 26 | 30  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 27 | 83  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 28 | 118 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 29 | 9   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 30 | 22  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 31 | 27  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 32 | 63  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 33 | 24  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 34 | 53  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 35 | 96  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 36 | 0   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 37 | 24  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 38 | 30  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 39 | 70  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 40 | 0   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 41 |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 42 |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 43 |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 44 |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 45 |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

図 3.2 初期値データの例（図は実験曲 1 の初期値データ）

次に DAW と MIDI コントローラ、Pd パッチと MIDI コントローラを同期し、Java プログラムと併用して時間軸に沿ったパラメータの数値変動の csv データを取得する。この時に Cubase7 の空きトラックに音声データをレコーディングする。ロイロゲームレコーダーというソフトウェアを用い、Pd パッチの画面も併せて録画する。取得したデータは配布資料として <http://istlab.mns.kyutech.ac.jp/~hashi/app.htm> にアップロードしている。

取得した csv データは図 3.3 のように、再生時間何秒の位置で、どのエンコーダを、どの値に動かしたかという情報が記載されている。実験を行いこれらのデータを多量に収集し、R 言語<sup>7</sup>などを用いて前述した提案手法の通りにモデルを生成（特徴量を算出）する。データの取得方法の概要を図 3.4 に示す。

<sup>7</sup> R 言語とは統計解析向けのプログラミング言語である。

|    | A     | B     | C     | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V |
|----|-------|-------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1  | 時刻    | Value | ctIno |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2  | 0.001 | 0     | 89    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3  | 0.057 | 127   | 89    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 4  | 7.125 | 0     | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5  | 7.145 | 33    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6  | 7.117 | 35    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7  | 7.189 | 36    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 8  | 7.21  | 38    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 9  | 7.229 | 40    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 10 | 7.249 | 42    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 11 | 7.268 | 43    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 12 | 7.289 | 45    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 13 | 7.31  | 46    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 14 | 7.331 | 47    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 15 | 7.351 | 49    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 16 | 7.374 | 50    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 17 | 7.395 | 51    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 18 | 7.412 | 52    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 19 | 7.434 | 53    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 20 | 7.456 | 54    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 21 | 7.476 | 55    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 22 | 7.496 | 56    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 23 | 7.517 | 57    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 24 | 7.536 | 58    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 25 | 7.579 | 59    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 26 | 7.596 | 60    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 27 | 7.618 | 61    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 28 | 7.64  | 62    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 29 | 7.662 | 63    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 30 | 7.701 | 64    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 31 | 7.721 | 65    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 32 | 7.741 | 66    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 33 | 7.766 | 67    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 34 | 7.805 | 68    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 35 | 7.824 | 69    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 36 | 7.844 | 70    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 37 | 7.865 | 72    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 38 | 7.887 | 73    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 39 | 7.905 | 75    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 40 | 7.927 | 76    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 41 | 7.95  | 78    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 42 | 7.966 | 79    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 43 | 7.991 | 80    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 44 | 8.013 | 82    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 45 | 8.029 | 83    | 8     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

図 3.3 パラメータの変動データ(データによって差はあるが行数は5000~10000以上に及ぶ)

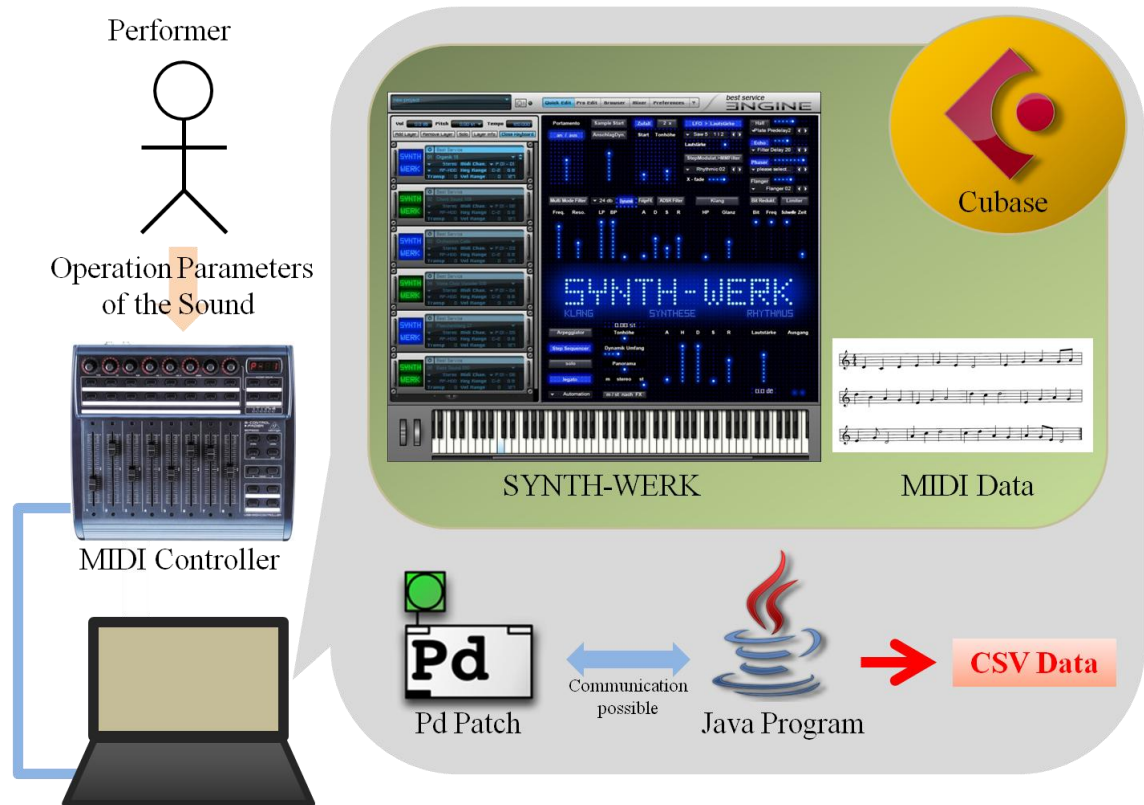


図 3.4 パラメータの変動データの取得方法

### 3.3 データ取得実験の内容

#### 3.3.1 実験機材

実験に使用する機材とソフトウェアの詳細を表 3.1 にまとめた。今回の実験では、データを取得してモデル化した後、コンピュータにパラメータ操作を行ってもらう際に DAW (Cubase7) でそのままレコーディングを続けると処理落ちして録音が止まってしまう問題があった。これはレコーディングを行う部分を別のソフトウェア (Sound Engine Free) で担うことで解決できた。また、今回の実験曲のボーカルは前述したように音声合成ソフトを用いて生成した。

表 3.1 使用機材とソフトウェア

|   |
|---|
| ・ノート PC<br>製造元 : Dell、OS : Windows 7 Professional<br>モデル : Latitude E5520<br>プロセッサ : Intel(R) Core(TM) i5-2520M CPU @ 2.50GHz 2.50GHz<br>実装メモリ (RAM) : 4.00GB (3.16GB)<br>システムの種類 : 32 ビット オペレーティングシステム |
| ・MIDI コントローラ<br>種類 : BCF2000、メーカー : Behringer、Version 1.1、USB インターフェイス  |
| ・ヘッドフォン<br>種類 : HDJ-500-R、メーカー : Pioneer、再生周波数帯域 : 5Hz~28,000Hz   |
| ・Java プログラム開発環境<br>Eclipse IDE for Java Developers, Version: Indigo Service Release 2   |
| ・Pd パッチ開発環境<br>PureData, Version: 0.43.3, Puckette & Mark Danks etc.  |
| ・DAW<br>Cubase7 Advanced Music Production System, Version: 7.0.6, @ 2013 Steinberg  |
| ・録画<br>ロイロゲームレコーダー, Version:1.1.0.0, @ LoiLo  |
| ・レコーディング<br>Sound Engine Free, Version:5.21 @ 1999-2014 Coderium (& Cubase7)  |
| ・音声合成ソフトウェア<br>CeVIO Creative Studio Free, Version 1.3.2.0 @ 2013 CeVIO   |

### 3.3.2 被験者と実験曲

実験の被験者と実験曲の詳細について記述していく。今回の実験はそれぞれ違うステータスを持つ被験者を集め行われた。

被験者3人の内1人は実際のライブでパラメータ操作を行っている経験者である。残りの2名は現役のバンドマンで、音のパラメータ操作に関しては未経験である。いずれも20代の男性であり、音楽歴や普段弾いている楽器等の詳細は表3.2のようになっている。実験に使用した曲は、著者の率いる音楽グループ「テクノイズ」と協力してくれた被験者のバンド「L/S」の曲を打ち込み化して用いた。その詳細と曲構成を表3.3と図3.5に示す。

なお、曲構成の表は1列目がインストゥルメントを表し、2,3列目はそれぞれその楽器が鳴っている始まりと終わりの小節を表している。

表 3.2 実験参加者

| 被験者 No. | 経験の有無 | 演奏楽器        | 音楽歴                |
|---------|-------|-------------|--------------------|
| 1       | 有     | Keyboard    | 作曲歴 12 年、演奏歴 6 年   |
| 2       | 無     | Base, Piano | 作曲歴なし、演奏歴 6 年, 6 年 |
| 3       | 無     | Guitar      | 作曲歴 9 年、演奏歴 9 年    |

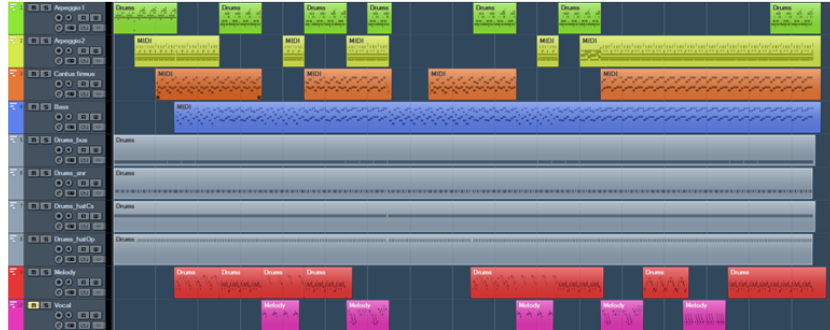
表 3.3 実験曲一覧

| 曲 No. | 曲名           | 曲長   | bpm | 作曲者  | ジャンル       |
|-------|--------------|------|-----|------|------------|
| 1     | トンネル         | 7:31 | 142 | 橋本文人 | Techno Pop |
| 2     | パンク          | 7:55 | 91  | 橋本文人 | Techno Pop |
| 3     | ランプの唄        | 7:42 | 107 | 橋本文人 | Techno Pop |
| 4     | インダストリアルを夢見て | 4:51 | 115 | 橋本文人 | Techno Pop |
| 5     | 僕の声          | 5:09 | 110 | 橋本文人 | Techno Pop |
| 6     | 花の歌          | 4:00 | 108 | 高城真矢 | Pops       |
| 7     | 劇作           | 6:20 | 150 | 高城真矢 | Pops       |
| 8     | 光を見つけて       | 4:33 | 100 | 高城真矢 | Pops       |
| 9     | 額縁の中に幸せを     | 4:19 | 80  | 高城真矢 | Pops       |

図 3.5 各実験曲の曲構成

| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 1     | 25  |
| 1     | 41    | 57  |
| 1     | 73    | 89  |
| 1     | 97    | 105 |
| 1     | 137   | 153 |
| 1     | 169   | 185 |
| 1     | 249   | 265 |
| 2     | 9     | 41  |
| 2     | 65    | 73  |
| 2     | 89    | 105 |
| 2     | 161   | 169 |
| 2     | 177   | 265 |
| 3     | 17    | 57  |
| 3     | 73    | 105 |
| 3     | 120   | 153 |
| 3     | 185   | 265 |
| 4     | 25    | 265 |
| 5     | 1     | 265 |
| 6     | 25    | 89  |
| 6     | 137   | 185 |
| 6     | 201   | 217 |
| 6     | 233   | 265 |
| 7     | 57    | 71  |
| 7     | 89    | 105 |
| 7     | 153   | 167 |
| 7     | 185   | 201 |
| 7     | 217   | 233 |

No.1



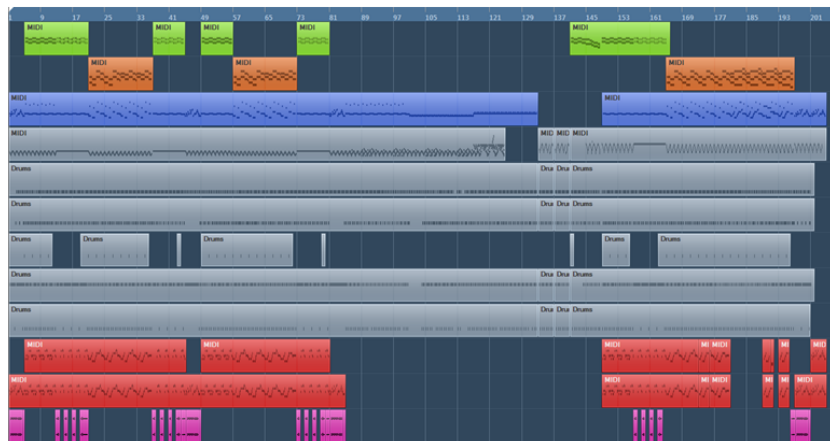
| Track | Start  | End    |
|-------|--------|--------|
| 1     | 1      | 178.75 |
| 2     | 82     | 90     |
| 2     | 133    | 149    |
| 3     | 49     | 64     |
| 3     | 90     | 116.75 |
| 3     | 141    | 178.75 |
| 4     | 32.75  | 65.75  |
| 4     | 81.75  | 90     |
| 4     | 93.75  | 116.75 |
| 4     | 132.75 | 178.75 |
| 5     | 9      | 65.75  |
| 5     | 74     | 179    |
| 6     | 16.75  | 25     |
| 6     | 32.75  | 41     |
| 6     | 48.75  | 65     |
| 6     | 81.75  | 90     |
| 6     | 97.75  | 116    |
| 6     | 148.75 | 176    |
| 7     | 24.75  | 32.75  |
| 7     | 40.75  | 48.75  |
| 7     | 89.75  | 97.75  |
| 7     | 116.75 | 146.75 |

No.2



| Track | Start | End    |
|-------|-------|--------|
| 1     | 5     | 21     |
| 1     | 37    | 45     |
| 1     | 49    | 57     |
| 1     | 73    | 81     |
| 1     | 141   | 148.75 |
| 1     | 149   | 165    |
| 3     | 21    | 36.75  |
| 3     | 57    | 72.75  |
| 3     | 165   | 196.75 |
| 4     | 1     | 133    |
| 4     | 149   | 205    |
| 5     | 1     | 204    |
| 6     | 1     | 85     |
| 6     | 149   | 181    |
| 6     | 189   | 205    |
| 7     | 1     | 5      |
| 7     | 13    | 20     |
| 7     | 37    | 49     |
| 7     | 73    | 85     |
| 7     | 157   | 164    |
| 7     | 197   | 201    |

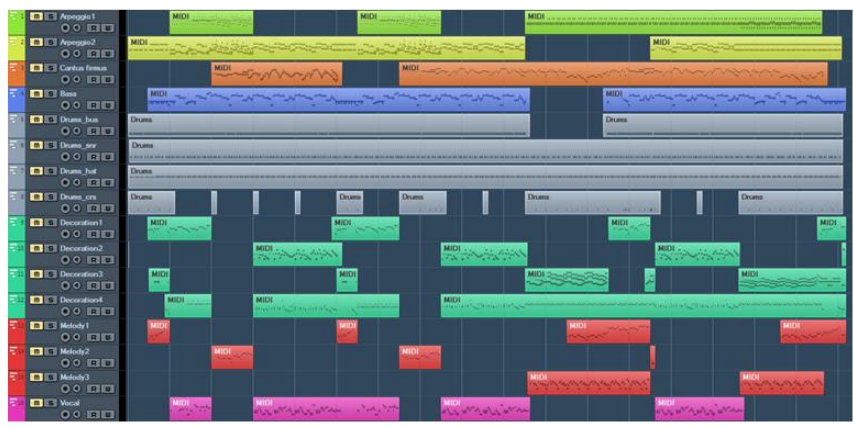
No.3





No.4

| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 9     | 25  |
| 1     | 45    | 61  |
| 1     | 77    | 134 |
| 2     | 1     | 77  |
| 2     | 101   | 138 |
| 3     | 17    | 41  |
| 3     | 53    | 134 |
| 4     | 5     | 77  |
| 4     | 93    | 139 |
| 5     | 1     | 138 |
| 6     | 5     | 9   |
| 6     | 17    | 25  |
| 6     | 41    | 45  |
| 6     | 53    | 61  |
| 6     | 77    | 102 |
| 6     | 118   | 139 |
| 7     | 9     | 17  |
| 7     | 25    | 53  |
| 7     | 61    | 78  |
| 7     | 102   | 119 |



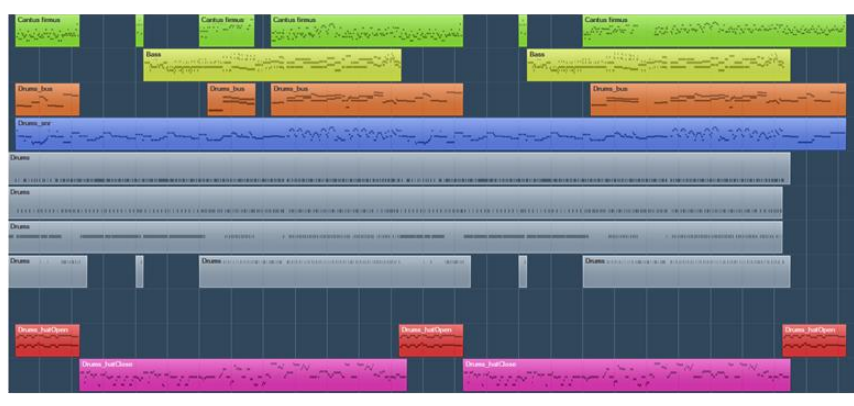
No.5

| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 1     | 33  |
| 1     | 41    | 73  |
| 1     | 81    | 97  |
| 1     | 121   | 141 |
| 2     | 17    | 33  |
| 2     | 57    | 73  |
| 3     | 1     | 17  |
| 3     | 33    | 57  |
| 3     | 73    | 113 |
| 3     | 117   | 137 |
| 4     | 1     | 137 |
| 5     | 1     | 141 |
| 6     | 1     | 17  |
| 6     | 33    | 41  |
| 6     | 73    | 81  |
| 6     | 97    | 137 |
| 7     | 17    | 33  |
| 7     | 41    | 73  |
| 7     | 81    | 97  |



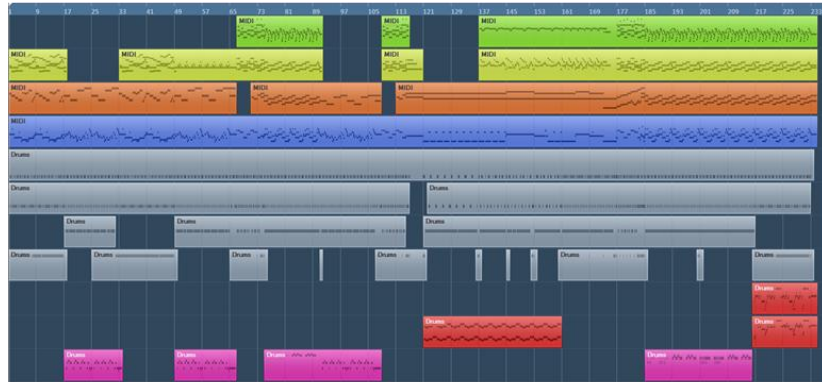
No.6

| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 2     | 10  |
| 1     | 17    | 18  |
| 1     | 25    | 32  |
| 1     | 34    | 58  |
| 1     | 65    | 66  |
| 1     | 73    | 106 |
| 2     | 18    | 50  |
| 2     | 66    | 99  |
| 3     | 2     | 10  |
| 3     | 26    | 32  |
| 3     | 34    | 58  |
| 3     | 74    | 106 |
| 4     | 2     | 106 |
| 5     | 1     | 99  |
| 6     | 2     | 10  |
| 6     | 50    | 58  |
| 6     | 98    | 106 |
| 7     | 10    | 51  |
| 7     | 58    | 99  |



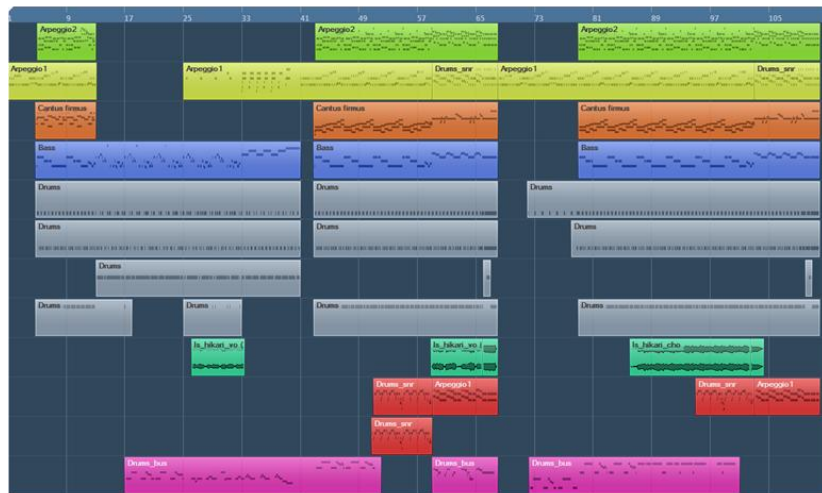
| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 67    | 92  |
| 1     | 109   | 117 |
| 1     | 137   | 175 |
| 1     | 177   | 235 |
| 2     | 1     | 18  |
| 2     | 33    | 92  |
| 2     | 109   | 121 |
| 2     | 137   | 175 |
| 2     | 177   | 235 |
| 3     | 1     | 67  |
| 3     | 71    | 109 |
| 3     | 113   | 235 |
| 4     | 1     | 235 |
| 5     | 1     | 118 |
| 5     | 121   | 234 |
| 6     | 121   | 161 |
| 6     | 216   | 235 |
| 7     | 17    | 34  |
| 7     | 49    | 67  |
| 7     | 75    | 109 |
| 7     | 185   | 216 |

No.7



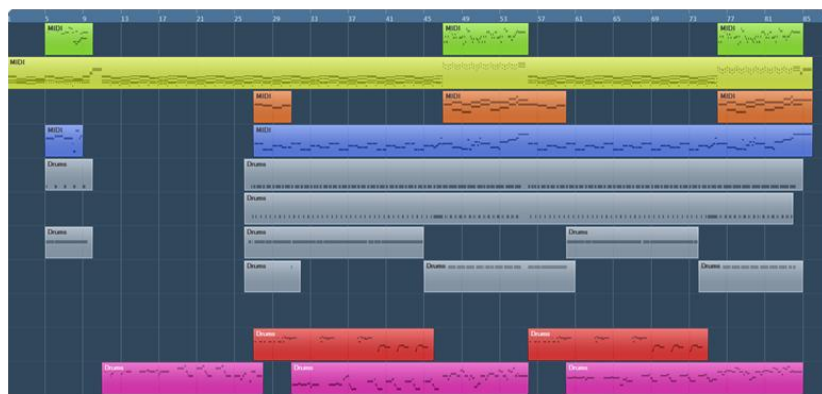
| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 5     | 13  |
| 1     | 43    | 68  |
| 1     | 79    | 112 |
| 2     | 1     | 13  |
| 2     | 25    | 40  |
| 2     | 41    | 112 |
| 3     | 4.75  | 13  |
| 3     | 42.75 | 68  |
| 3     | 79    | 112 |
| 4     | 4.75  | 41  |
| 4     | 42.75 | 68  |
| 4     | 79    | 112 |
| 5     | 4.75  | 41  |
| 5     | 42.75 | 68  |
| 5     | 79    | 112 |
| 6     | 51    | 68  |
| 6     | 95    | 112 |
| 7     | 17    | 40  |
| 7     | 43    | 52  |
| 7     | 59    | 68  |
| 7     | 72    | 101 |

No.8



| Track | Start | End |
|-------|-------|-----|
| 1     | 5     | 10  |
| 1     | 47    | 56  |
| 1     | 76    | 85  |
| 2     | 1     | 86  |
| 3     | 27    | 31  |
| 3     | 47    | 60  |
| 3     | 76    | 86  |
| 4     | 5     | 9   |
| 4     | 27    | 86  |
| 5     | 5     | 9.5 |
| 5     | 26.5  | 84  |
| 6     | 27    | 46  |
| 6     | 56    | 75  |
| 7     | 11    | 28  |
| 7     | 31    | 56  |
| 7     | 60    | 85  |

No.9



### 3.3.3 実験方法

ここではデータ取得実験の詳細を図や写真などを交えて記述していく。

まず、パラメータ操作を行いながらデータを取得できる環境を整える。BCF2000の電源を入れオペレーティングモードをUSBモード1にし、MIDIコントローラとPCをUSBケーブルで接続する。オペレーティングモードの変更はEDITキーを押した状態でSTOREキーを押し、そして一番左のエンコーダを回して設定しEXITで設定が完了できる。次にBCF2000のプリセット番号を実験曲のもの合わせ、その曲の初期状態にする。そしてrep04.javaを立ち上げ実行し、csvファイルを保存するときのファイル名を入力する。CubaseフォルダとPdフォルダをどちらも立ち上げた状態にし、Cubaseプロジェクト→Pdパッチ(od\_\*.pd)の順で立ち上げる。\*\*には曲No.が入る。Pdパッチの時間が0になっていることとPOWERがOffになっていること、Cubaseのレックトラックのみが録音モードになっていることを確認してから、PdパッチのPOWERボタンをOnにして「a」キーを押す(ポートが接続される)。ロイロゲームレコーダーを立ち上げ、Pdパッチを選択して録画ボタンを押す(またはF6)。そしてCubase画面を選択して、BCF2000のRec\_Startボタンを押してパラメータ操作を開始する。曲が終わったら少し余韻を残してMIDIコントローラのStopボタンを押す。Pdパッチを選択し「d」キーを押してポート接続を解除、csvファイルが出力される。ロイロゲームレコーダーの録画をストップする。CubaseのレックしたAudioパートを「ソロ」にして音量を調整し、プロジェクトを別名保存しオーディオミックスダウンで音声データを出力する。CubaseとPdパッチを閉じてBCF2000を安全に取り外す。最後に取得データをチェックし、名前を変更して任意のフォルダに移動する。以上で、パラメータ操作のデータが取得できる。データ取得実験の様子を図3.6に示す。

今回の実験では、トレーニングとして用いた音源は実験曲No.2, 3, 5, 6, 7, 8の6曲で各曲2回ずつパラメータ操作を行ってもらい、一人当たり計12件のデータを取得した。選曲は各バンドの曲から3曲ずつで、bpmや曲長を考慮して選んだ。オリジナルの操作は、No.1は曲中まんべんなくパラメータを動かし、No.2はピッチをよく動かす、No.3はDelayやRelease、Reverbを多用し音に広がりを持たせることが多いなどの特徴が出た。

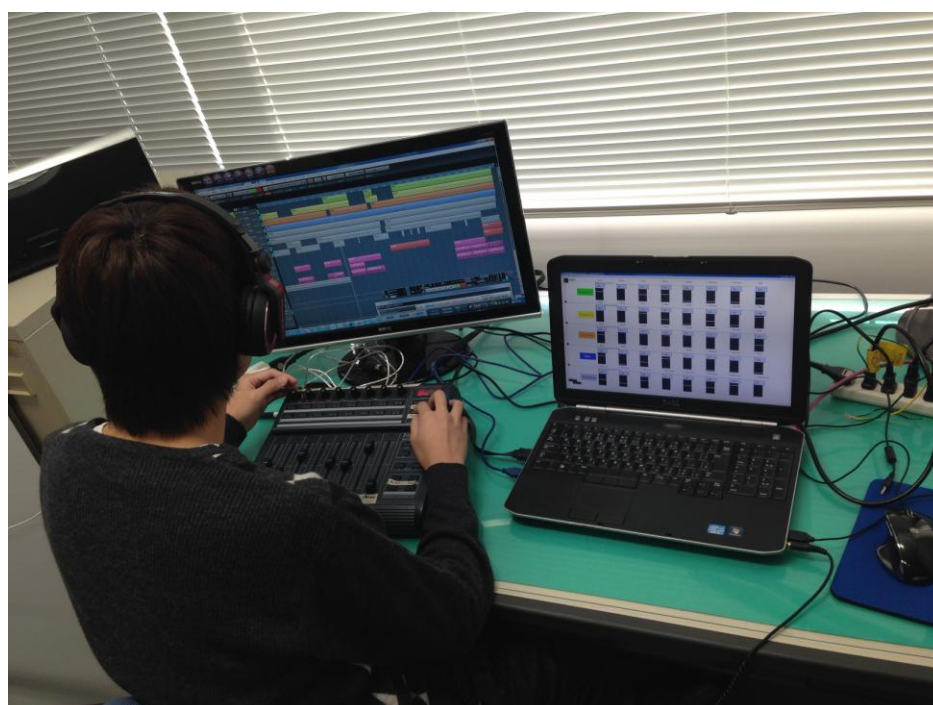
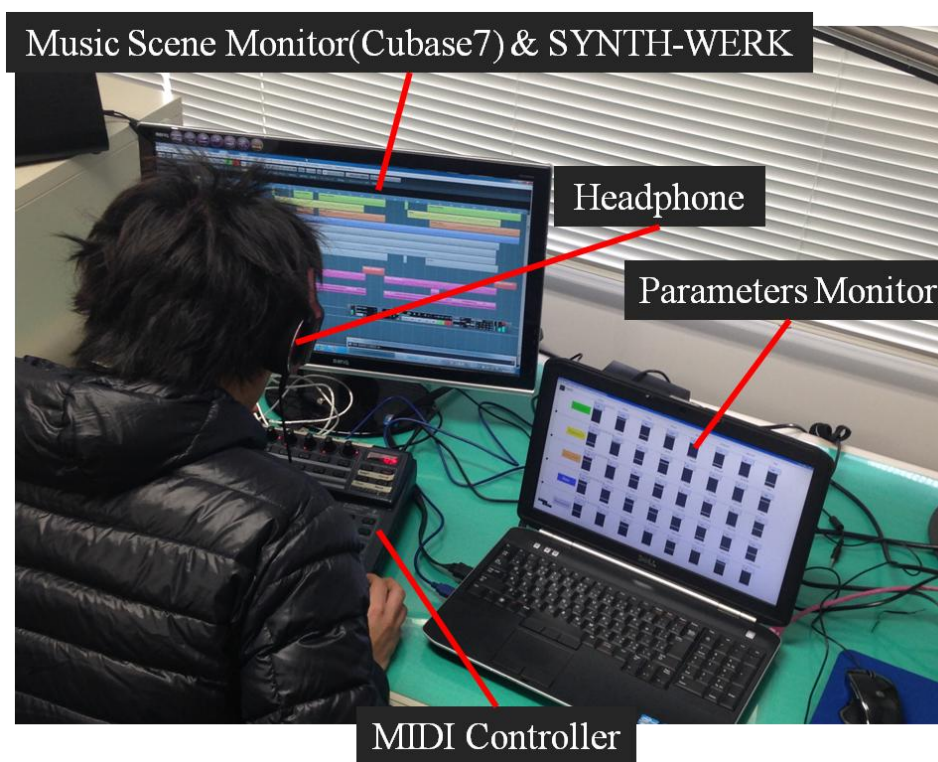


図 3.6 データ取得実験の様子

### 3.3.4 取得データ

今回の実験では音のパラメータ操作に関して、被験者の3人のうち経験者が1人、未経験者が2人であった。未経験者の2人は各パラメータの説明を受けた後、練習時間をおよそ5時間程度設け、それを2日に分けて行ってもらった。チュートリアルでは経験者が実際にパラメータをどのように動かしたかなどの例は一切見せず、各パラメータの意味と変化させるとどのような効果があるのかだけを伝え、練習時間にパラメータを自由に動かしてもらい、自分自身で音の変化を確かめてもらった。なるべく個々の意図が反映されるように、練習は時間を制限せず被験者が満足するまで行ってもらった。実験環境はなるべく被験者が集中できるように、ヘッドフォンを装着してもらい（事前に、自前のものかいいかこちらで用意したものでいいのか尋ねている）周りに音は漏れないようにして一人で行ってもらった（図 3.6 を参考）。

取得 csv ファイルの総数は1人当たり12個であり、その内のアクションの総数はそれぞれ被験者 No.1 が 3926 個、No.2 が 973 個、No.3 が 1580 個であった。通信エラーによるデータ欠損はなく、それぞれ全てのデータを機械学習に使用した。併せてレコーディングした音声データには3件ほど途中で録音が途切れる欠損が見られた。これは学習に影響しないため、被験者への負荷も考え録り直しは行わなかった。データの収集結果を表 3.4 に示す。

表 3.4 データの収集結果

| 内容             | ファイル数                                   |
|----------------|---|
| 全実験回数          | 12 回 (1 人当たり)                           |
| 取得 csv ファイル数   | 12 件 (1 人当たり)                           |
| データ欠損のあったファイル数 | 0 件                                     |
| アクションの総数       | No.1: 3926 個, No.2: 973 個, No.3: 1580 個 |
| 機械学習に使用        | 12 件 (1 人当たり)                           |

## 3.4 学習

### 3.4.1 R プログラムによるモデル化

取得したデータをモデル化するには R 言語プログラムを用いる。csv データを読み込みその曲の bpm を入力後、Data\_reduction.R を実行して取得データをどの時間に、どのパラメータを、どのように動かしたかといった形に整理する。次にエンコーダ毎のマルコフモデルを生成する為に Mrkv.R を実行する。そして曲構成の csv データを読み込み、Music\_scene.R を実行し、アクションを起こした時がどのような曲構成であったかを割り

当てていく。これらを取得データ全てに対して行った後、**Probability.R** を実行して条件付き確率分布を生成する。モデルを生成するまでの処理時間は被験者 No.1 から No.3 までそれぞれ、190s, 50s, 90s 程度であった。データ取得の際にパラメータの動作が多ければ多いほど処理時間は長くなった。

最後に計算機にパラメータ操作を行わせる曲の曲構成・初期値・領域設定の csv データを読み込ませ、**Operation.R** を実行すると、その曲でどのようにパラメータを動かすかというアクション発生表が生成する（これも csv 形式である）。

### 3.4.2 生成モデル

学習データから生成したモデルはある曲構成におけるアクション発生の確率分布とマルコフモデルを有している。図 3.7 は被験者 No.1 のアクション発生表の一部である。1 列目が曲構成、2 列目がエンコーダ No.を表している。3~13 行にかけては度数分布を表していて、その合計が 14 列目である。そしてエンコーダの 33 個目以降（MIDI コントローラではフェーダー）はエンコーダ No.81 以降が割り当てられている。また、図 3.8 は同じ被験者の、エンコーダ毎のマルコフモデルを表したものである。この図ではエンコーダ 1~4 のマルコフモデルを表しているが、実際はこれが 1 人当たり 40 個存在する。

```

> PPP
      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7] [,8] [,9] [,10] [,11] [,12] [,13] [,14]
PPP_  1    1    0    0    0    1    1    0    2    0    0    0    0    4
PPP_  1    2    1    1    1    1    1    2    4    0    0    0    1    12
PPP_  1    3    0    0    0    1    2    5    2    2    0    0    0    12
PPP_  1    4    0    0    0    0    0    5    0    0    0    0    0    5
PPP_  1    5    0    0    1    0    0    0    0    1    0    0    0    2
PPP_  1    7    0    3    1    0    0    1    1    1    1    3    0    11
PPP_  1    8    0    1    0    0    0    0    0    1    0    0    0    2
PPP_  1   82    0    0    0    1    0    0    0    0    0    0    0    1
PPP_  2    8    0    0    0    0    0    0    0    1    0    0    0    1
PPP_  2   10    0    0    0    2    0    3    0    0    0    1    0    6
PPP_  2   11    0    0    0    1    0    0    0    1    0    0    0    2
PPP_  2   15    0    0    0    0    4    2    1    0    0    0    0    7
PPP_  2   16    0    0    3    1    0    0    0    1    2    0    0    7
PPP_  2   82    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    1
PPP_  2   86    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    1
PPP_ 14   27    0    0    0    0    2    0    2    0    0    0    0    4
PPP_ 14   28    0    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    1
PPP_ 16   81    0    0    0    0    1    3    0    0    0    0    0    4
PPP_ 16   82    4    0    0    0    1    0    0    1    0    1    2    9
PPP_ 16   83    0    0    0    0    2    0    1    2    0    0    0    5
PPP_ 16   84    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    1    2
PPP_ 16   85    0    0    0    0    1    1    0    0    0    0    0    2
PPP_ 16   86    3    0    1    0    0    0    0    0    0    0    3    7
PPP_ 16   87    0    0    0    0    1    1    1    1    0    0    0    4
PPP_ 16   88    1    0    0    0    1    0    0    0    0    0    1    3
PPP_ 17    1    0    0    0    0    2    8    2    0    0    0    0    12
PPP_ 17    2    4    1    1    2    2    2    0    0    1    4    6    23
PPP_ 17    3    0    0    3    3    7    4    2    4    3    0    0    26
PPP_ 17    4    0    0    0    0    3    7    3    1    0    0    0    14
PPP_ 17    5    0    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    1
PPP_ 17    7    1    0    2    1    0    3    0    0    1    1    0    9
PPP_ 17    8    2    3    0    0    1   17    4    3    7    1    0    38
PPP_ 17   81    0    0    0    0    2    5    1    0    0    0    0    8
PPP_ 17   82    3    1    0    0    0    0    0    0    2    1    3    10
PPP_ 17   83    0    0    2    0    0    0    0    0    2    0    0    4
PPP_ 17   85    0    0    0    0    0    2    0    0    0    0    0    2
PPP_ 17   86    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    1    2
PPP_ 17   87    0    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    1
PPP_ 24   13    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    0    1
PPP_ 24   25    0    0    0    0    5    4    1    2    0    0    0    12
PPP_ 24   26    2    4    3    2    2    4    1    2    0    6    1    27
PPP_ 24   27    0    0    2    9   27   15   28    7    3    0    0    91
PPP_ 24   28    0    0    0    0    6   14    8    1    0    0    0    29
PPP_ 24   29    0    0    0    0    2    2    2    0    0    0    0    6
PPP_ 24   30    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    0    1
PPP_ 24   31    1    2    1    0    2    0    0    1    0    1    2    10
PPP_ 24   32    0    0    1    0    0    2    1    1    0    0    0    5
PPP_ 24   81    0    0    0    0    2    1    2    0    0    0    0    5
PPP_ 24   82    1    0    0    1    1    0    1    0    1    0    2    7
PPP_ 24   83    0    1    0    2    1    2    0    0    2    0    0    8
PPP_ 24   84    0    1    1    0    0    0    0    2    0    0    0    4
PPP_ 24   85    0    0    0    0    4    9    5    0    0    0    0    18

```

図 3.7 被験者 No.1 のアクション発生表の一部

```

> Mrkv_set[,1]
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7] [,8] [,9] [,10] [,11] [,12]
[1,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  14
[2,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[3,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[4,]  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0
[5,]  0  0  0  0  0  1  1  0  0  0  0  0
[6,]  0  0  0  0  2  5  0  0  0  0  0  0
[7,]  0  0  0  1  1  2  0  0  0  0  0  0
[8,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[9,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[10,] 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[11,] 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
> Mrkv_set[,2]
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7] [,8] [,9] [,10] [,11] [,12]
[1,]  0  0  0  2  0  2  2  5  0  3  5  255
[2,]  0  0  1  0  2  1  1  2  0  3  5  0
[3,]  0  0  1  0  1  1  0  0  1  2  4  0
[4,]  0  0  1  1  3  5  2  5  0  0  2  0
[5,]  2  1  3  2  1  7  7  2  1  1  1  0
[6,]  2  1  2  0  5  24  6  7  2  5  1  0
[7,]  2  1  2  4  6  2  1  3  0  2  1  0
[8,]  1  2  0  8  3  9  0  3  3  0  2  0
[9,]  2  1  0  1  1  2  0  0  1  3  0  0
[10,] 5  4  0  1  2  3  1  0  2  0  1  0
[11,] 10 5  0  2  3  0  1  0  0  0  3  0
> Mrkv_set[,3]
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7] [,8] [,9] [,10] [,11] [,12]
[1,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  238
[2,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[3,]  0  0  0  0  0  0  5  1  4  0  0  0
[4,]  0  0  0  0  2  4  13  6  0  0  0  0
[5,]  0  0  0  1  8  12  21  11  4  1  0  0
[6,]  0  0  1  4  10  23  9  4  2  0  0  0
[7,]  0  0  3  11  24  10  5  4  0  0  0  0
[8,]  0  0  2  8  10  3  2  0  0  0  0  0
[9,]  0  0  1  1  4  2  1  0  0  0  0  0
[10,] 0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[11,] 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
> Mrkv_set[,4]
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7] [,8] [,9] [,10] [,11] [,12]
[1,]  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  111
[2,]  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[3,]  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0
[4,]  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0
[5,]  0  0  0  0  1  9  4  2  0  0  0  0
[6,]  1  0  1  0  11  40  11  1  1  0  0  0
[7,]  0  0  0  0  6  15  1  0  0  0  0  0
[8,]  0  0  0  0  0  3  0  0  0  0  0  0
[9,]  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0
[10,] 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
[11,] 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
>

```

図 3.8 被験者 No.1 のエンコーダ毎のマルコフモデル (エンコーダ 1~4)



## 4 評価実験

第四章では、三章で説明したデータ取得の実験を行って各被験者のモデルを生成した後、果たしてそのモデルが被験者に近い振る舞いをするのかを評価するための実験について記述していく。

### 4.1 評価実験の目的

音のパラメータ操作は例え同じ曲であっても、オリジナルは毎回違う動かし方をする。これはバンド演奏におけるライブで、奏者が毎回同じ曲でも全く同じ音・歌・動きをしないことに例えると理解しやすいだろう。ゆえに、オリジナルが操作するパラメータの変化には明確な解答がないことから、本人を模倣したモデル演奏が実際にどの程度本人に近いかを正確にはかる手段はないと見ることができる。我々はできる限り正確にモデルの再現度を出すために以下に述べるような評価実験を行った。

先のデータ取得の実験から特徴量を算出した結果、3人のオリジナルを模倣した3種類のモデルが完成した。その中で、誰のものか分からないモデルに音のパラメータ操作を行ってもらい、被験者がそれを聴いてモデル演奏が誰のものであったかを回答する。その回答率を二項分布で求めた上側累積確率と比較することによって、それぞれのモデル演奏を区別できたかどうか、その人らしさが出ていたかどうかを評価する。

### 4.2 評価実験の内容

#### 4.2.1 計算機による音のパラメータ操作の手順

評価実験を行う際の、計算機による音のパラメータ操作の手順をここに記す。まずは BCF2000 の電源を入れ、オペレーティングモードをスタンドアローンモード3にしてノート PC と MIDI ケーブルで接続する。MIDI コントローラのプリセット番号を実験曲のものにし、Action.java を起動する。データ取得の際と同じようにして Cubase ファイル→Pd パッチ (Action.pd) の順でプログラムを起動する。Java プログラムを再生し、実験曲のファイル名と bpm、アクション発生のファイル名、被験者 No.を入力する。SoundEngine でレコーディングと、ロイロゲームレコーダーでダビングを開始しておく。ここまでの準備が整っていることを確認したら、Enter キーと BCF2000 の Rec\_Start のボタンを同時に押すことによって音のパラメータ操作を開始することができる。終了したらレックとダビングを

停止し、Cubase と Pd を閉じて MIDI コントローラを安全に取り外す。音声データと動画データを組み合わせ、評価実験に使用できるようにする。また、MIDI コントローラと Cubase、Pd の接続が上手くいかない場合は、Cubase の方の MIDI 設定の入力のみを USB に設定し出力を未接続にする。Pd の方はその逆に設定する。

#### 4.2.2 評価実験

実験に使用する機材は前章表 3.1 の、ノート PC とスピーカ、自動演出に必要な Cubase7 と Java プログラム、Pd パッチ、そしてレコーディング・ダビング用のソフトウェアである。そして本実験でとても重要となるアンケート用紙も用いる。今回は実験をスムーズに進めるために、モデルがパラメータ操作したものをあらかじめ動画 (avi 形式) ファイルにして、それを評価実験ではランダムに再生して回答してもらう方針で準備を進めた。テストデータとして用いた実験曲はデータ取得の際に使用しなかった曲 No.1, 4, 9 の 3 曲、それぞれ 3 回の試行で計 9 回を、それぞれのモデルに操作してもらった。曲は半分に区切り、前半と後半に分けて用いた。1 つのモデルが 9 つのパターンのパラメータ操作を行い、3 つのモデルで計 27 個の音声データが揃っていたので、さらにその倍の 54 件のパラメータ操作の中から 20 件分をランダムに選び出した。被験者にはそれを聴いてもらい、自分をモデルにしたものであるかどうか、さらに自分のでなければ残り 2 人の内どちらのモデル演奏であるかを答えてもらった。モデルの操作がどの程度自分に近いかは図 4.1 に示すアンケート用紙のように 6 段階で評価してもらった。データ取得の実験では著者も参加していたが、今回の評価実験に関しては著者を除く被験者 2 人が参加した。以上の実験の様子を図 4.2 に示す。

実験曲をよく聴いて、自分のモデルか他人のモデルかを例に従って下の尺度表に○を付けてください。また、どの辺が似ていたか・違っていたかなど感想がある場合は記入をお願いします。

<注意事項>

- ・評価実験を始める前に行う説明を施験者からよく聞いてください。
- ・○を付ける判断は曲を聴き終えてからにしてください。
- ・モデルは、同じ曲でも全く同じ動かし方はしません。
- ・質問がある場合は、実験を始める前に済ませてください。
- ・極力聴きなおさないようにしてください。

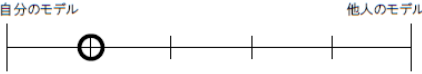
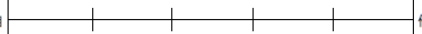

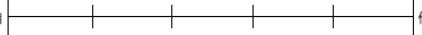



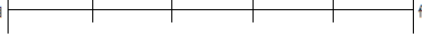

| No.- | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>自分のモデル</span> <span>他人のモデル</span> </div>  | 全体的に自分と似ているが、上物のPANは自分はあまり動かさないのに、結構動いていた。 |
|------|---|--|
| No.1 |   |  |
| No.2 |    |  |
| No.3 |    |  |
| No.4 |    |  |
| No.5 |    |  |
| No.6 |    |  |
| No.7 |    |  |
| No.8 |    |  |

図 4.1 評価実験に使用したアンケート用紙 (No.1)

|       |             |  |
|-------|-------------|--|
| No.9  | 自  -----  他 |  |
| No.10 | 自  -----  他 |  |
| No.11 | 自  -----  他 |  |
| No.12 | 自  -----  他 |  |
| No.13 | 自  -----  他 |  |
| No.14 | 自  -----  他 |  |
| No.15 | 自  -----  他 |  |
| No.16 | 自  -----  他 |  |
| No.17 | 自  -----  他 |  |
| No.18 | 自  -----  他 |  |
| No.19 | 自  -----  他 |  |
| No.20 | 自  -----  他 |  |

図 4.1 評価実験に使用したアンケート用紙 (No.2)

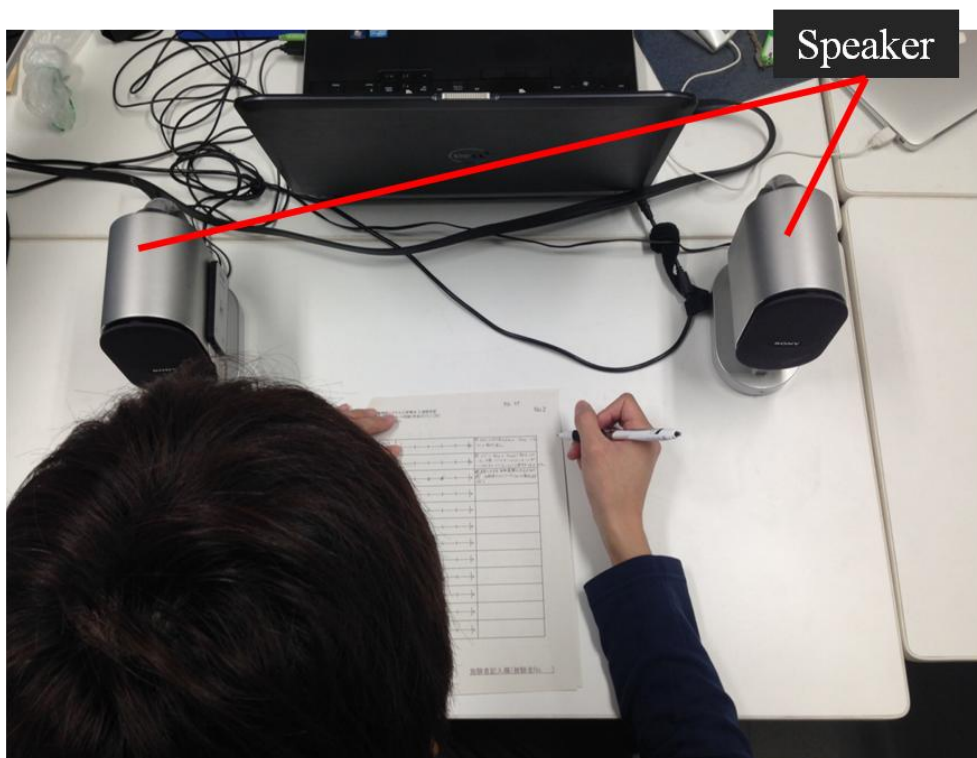
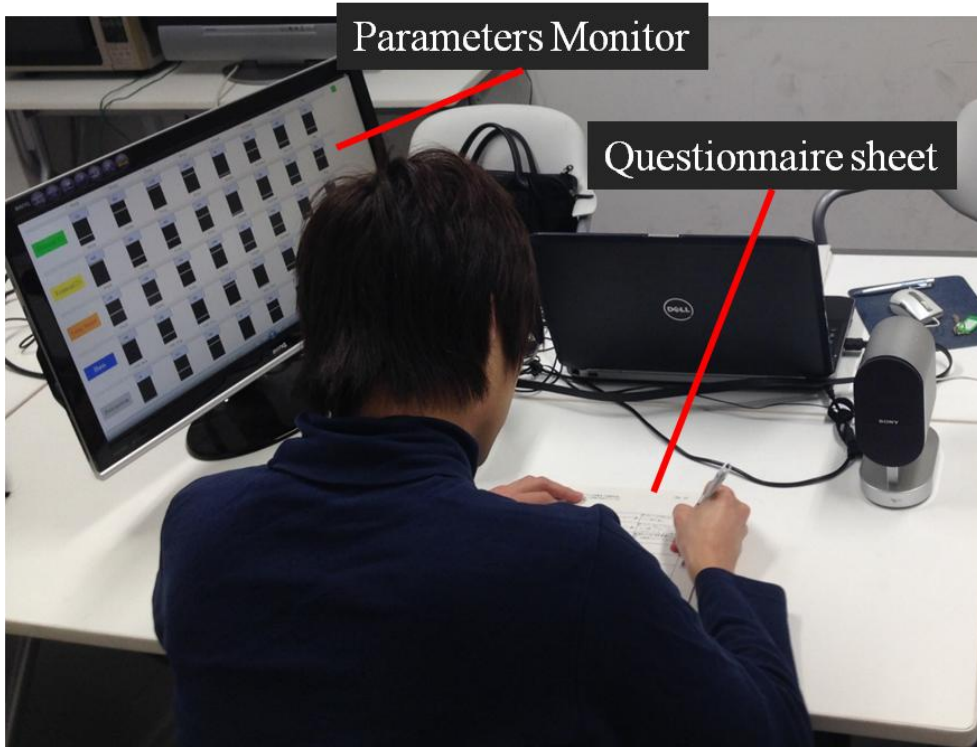


図 4.2 評価実験の様子

### 4.3 評価実験の結果と考察

この章では以上のようにして評価実験を行った結果と考察を記述していく。まずは結果を出すのに用いる二項分布の説明から入る。

#### 4.3.1 二項分布

二項分布とは、ある結果が2通りしかない試行を数回繰り返したときにある事柄が何回起こるかの確率分布である。二項分布の一般式は以下の通りである。P(x)、Q(x)はそれぞれ下側・上側累積確率を表している。

$$p(x) = {}_n C_x p^x (1-p)^{n-x} \quad (4.1)$$

$${}_n C_x = \frac{n!}{x!(n-x)!} \quad (4.2)$$

$$P(x) = \sum_{t=0}^x p(t) \quad (4.3)$$

$$Q(x) = \sum_{t=x}^n p(t) \quad (4.4)$$

例えば2択の問題20個に対し回答をランダムに行った場合に、10回正解が出る確率を求めるとする。それぞれの試行で正解が出る確率は1/2であるから $p=1/2$ 、そして $n=20$ である。 $x=10$ の場合を求めると、これらを上記の式に代入して計算し $p(10) \approx 0.176$ となる。しかし、これはあくまで10回のみ正解する確率であって、11回、12回と正解する確率は含まれていない。 $x=11,12\dots 20$ の場合を計算し足し合わせる、すなわち式(4.4)のように上側累積確率を求めると、 $Q \approx 0.588$ となる。これは、2択の20個の問題に対しては例えランダムに答えていったとしても約59%の確率で10個は正解するというを表している。

#### 4.3.2 実験結果

著者を除く被験者 2 人の評価実験の結果を以下の表 4.1、表 4.2 示す（被験者 No.2 の結果が表 4.1、No.3 の結果が表 4.2）。回数は実験回数を表し、1 曲の半分を 1 回としてカウントしている。自他判定は 0～5 点とし、高いほど自分に近いと感じ、低いほど自分のモデルではないと感じたことを表している。図 4.1 の一番上の例のように書かれていれば 4 点である。3 点以上は自分のモデルと感じたということになるので、4 列目はそれにより正誤を判断している。正解は実際にどのモデルのパラメータ操作を流していたかであり、No.1～No.3 のいずれかである。表の 6 列目の正誤は自他判定だけでなく、3 種類のモデルの区別ができたかどうかの正誤である。

表 4.1 被験者 No.2 の評価実験の結果

| 回数 | 自他判定 | 正解   | 自他判定の正誤 | 推測した演奏者 | 推測の正誤 | 感想   |
|----|------|------|---------|---------|-------|--|
| 1  | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | 低音を多く変化させている、うねるような変化が多い、など自分と全然違う。パーカッションが特徴的だった。                         |
| 2  | 5    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | メロのないパートでベースの音をあえて外して遊んだり、ソロを抜けるとパーカッションをおとなくしたり、Delay を使わないなどの点が自分と同じだった。 |
| 3  | 5    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | 全体的に音の周波数の上げ下げのタイミングが自分と類似している。パートの終わり際に逃げるように音を低くしているところも似ている。            |
| 4  | 0    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | ギターなどの上物をメインで動かしている。メロが入っているパートでも壮大に動かしている。                                |
| 5  | 0    | No.1 | ○       | No.3    | ×     | ベースの音色が多段変化しているので自分のモデルではない。   |
| 6  | 5    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | 上物パートをキラキラさせるために、高音を一気に上げている。その音程の低くなるタイミングが同じであった。                        |
| 7  | 0    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | パーカッションの Attack の動かし方とコードの Delay を強めにかけているところが自分とはまったく違う。                  |

| 回数 | 自他判定 | 正解   | 自他判定の正誤 | 推測した演奏者 | 推測の正誤 | 感想  |
|----|------|------|---------|---------|-------|---|
| 8  | 5    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | ソロパートを意図的に作り出すために、Attack を削って上物を消しているのが自分と同じである。                          |
| 9  | 0    | No.1 | ○       | No.3    | ×     | 広がりや大きさを出そうとしている Delay やパーカッションの動きが自分とは違う。                                |
| 10 | 0    | No.1 | ○       | No.3    | ×     | コードに Delay と Reverb で変化を付けている反面、ベースをいじっていない。サビへ入る時のパーカッションの盛り上がり方が特徴的である。 |
| 11 | 3    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | 高音を上げる後半の展開のさせ方が似ている。初期値からのパーカッションの動かし方が自分と同じである。Delay が弱いのも同じく           |
| 12 | 0    | No.3 | ○       | No.1    | ×     | 全てのパートがまんべんなく動いていて、折りをなしてうねっている。一番 DJ らしく感じた。                             |
| 13 | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | パーカッションの Delay の使い方が自分とは違う。Pitch を使わずに表現しているところも同じく。                      |
| 14 | 5    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | アウトロの表現の仕方、音階を一周目に対して下げにしているのが自分と同じである。                                   |
| 15 | 3    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | 全体の音程のバランスのとり方として、ベースを高音にした時に、分散和音を下げているのが自分的にあり得る動作である。                  |
| 16 | 0    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | Pitch の上げ下げが特徴的で、自分のやりたいこととは微妙に違う。  |
| 17 | 0    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | 全てのパートで音の広がりを重視しているのが自分とは違う。Reverb を過度に多用している。                            |



| 回数 | 自他判定 | 正解   | 自他判定の正誤 | 推測した演奏者 | 推測の正誤 | 感想  |
|----|------|------|---------|---------|-------|---|
| 18 | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | 周波数、Pan の動かし方が違う。空間的になっているところも違う。                                     |
| 19 | 5    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | コードを、Attack を上げることで消し A メロをベースとボーカルのみに行っている。分散和音を高音に行っている。一番自分らしく感じた。 |
| 20 | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | 曲がなめらかになっていて良いが、周波数と手数が自分とは違う。  |

表 4.2 被験者 No.3 の評価実験の結果

| 回数 | 自他判定 | 正解   | 自他判定の正誤 | 推測した演奏者 | 推測の正誤 | 感想  |
|----|------|------|---------|---------|-------|---|
| 1  | 4    | No.1 | ×       | No.3    | ×     | 上物の Pan は基本的には動かさない。しかし、パーカッションやベースの Pitch の変化のさせ方などは自分と似ていた。 |
| 2  | 0    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | 自分なら Frequency はもっと大胆に動かす。ベースの Pitch の動かし方が特徴的であった。           |
| 3  | 0    | No.3 | ×       | No.2    | ×     | 自分ならベースの Pan はいじらない。その上、上物 2 つがあまり動いていない。                     |
| 4  | 5    | No.2 | ×       | No.3    | ×     | Pitch の動かし方が自分と似ているように感じた。                                    |
| 5  | 5    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | パーカッションの変化のさせ方が自分とまったく同じであった。間違いなく自分のモデルである。                  |
| 6  | 5    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | 定旋律とパーカッションの変化のさせ方が自分と類似している。                                 |

| 回数 | 自他判定 | 正解   | 自他判定の正誤 | 推測した演奏者 | 推測の正誤 | 感想   |
|----|------|------|---------|---------|-------|--|
| 7  | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | Pan の変化があり動かし方が繊細であるので、自分ではない。                   |
| 8  | 0    | No.2 | ○       | No.1    | ×     | Attack 以外が非常によく動く。その他の面では同上。                     |
| 9  | 5    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | Frequency の動かし方が大胆である所が自分と類似している。                |
| 10 | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | Pitch を動かさないあたり、自分のモデルではないと考えられる。                |
| 11 | 5    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | Pan の移動がなく、Frequency をふんだんに扱っている。                |
| 12 | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | Pitch と Frequency の動かし方が自分とは違った。                 |
| 13 | 0    | No.1 | ○       | No.2    | ×     | ベースの Frequency と Pan の移動が基本的に大胆である。              |
| 14 | 0    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | ベースとコードの Delay のかけ方が、自分とは違うように感じた。               |
| 15 | 0    | No.1 | ○       | No.1    | ○     | 同時にいくつものパラメータを操作し手数が多く、手慣れている雰囲気が自分ではないと考えられる。   |
| 16 | 5    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | 定旋律の Frequency が自分にそっくりであった。                     |
| 17 | 0    | No.3 | ×       | No.1    | ×     | Pan の変化のさせ方、パーカッションの Delay をサビで上げるなどの動作が自分とは異なる。 |

| 回数 | 自他判定 | 正解   | 自他判定の正誤 | 推測した演奏者 | 推測の正誤 | 感想  |
|----|------|------|---------|---------|-------|---|
| 18 | 5    | No.3 | ○       | No.3    | ○     | Pitch と定旋律の Frequency の変化のさせ方が自分と類似していた.      |
| 19 | 0    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | Pitch を同時に動かすという動作を自分はない. また、Pan の動きが特徴的であった. |
| 20 | 0    | No.2 | ○       | No.2    | ○     | Pitch や Delay の動かし方が自分とは異なる.                  |

以上の結果から被験者の正解率は、No.2 が 20/20 (2 択)・16/20 (3 択)、No.3 が 16/20 (2 択)・14/20 (3 択) となった。2 択の方は自他判定の正解率、3 択の方は誰のモデルであるかまで当てた正解率を表している。これらをまとめたものを表 4.3 に示した。また、20 回試行で 2 択、3 択それぞれの二項分布の結果を図 4.3 に示している。縦軸は確率密度、横軸は試行回数を表す。そして、各正解数の上側累積確率は表 4.3 のようになり、いずれも 0.01 を下回った。有意水準を 1% として考えた場合、今回の実験における正解率はランダムに答えた場合との正解率に比べて、有意な差があることが示された。

表 4.3 評価実験の正解率と二項分布

| 被験者  | 正解率 (2 択) | 上側累積確率 (2 択)         | 正解率 (3 択) | 上側累積確率 (3 択)         |
|------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|
| No.2 | 1.00      | $9.5 \times 10^{-7}$ | 0.80      | $2.5 \times 10^{-5}$ |
| No.3 | 0.80      | $5.9 \times 10^{-3}$ | 0.70      | $8.8 \times 10^{-4}$ |

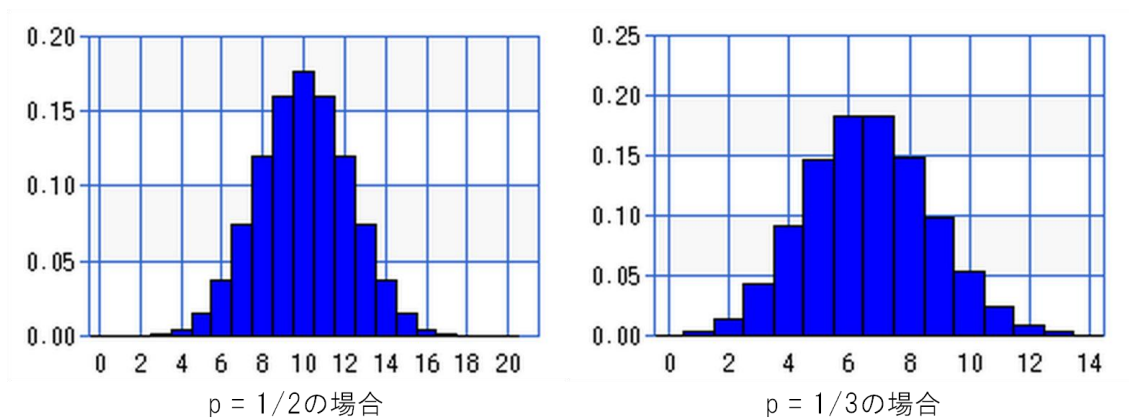


図 4.3 正解率の二項分布

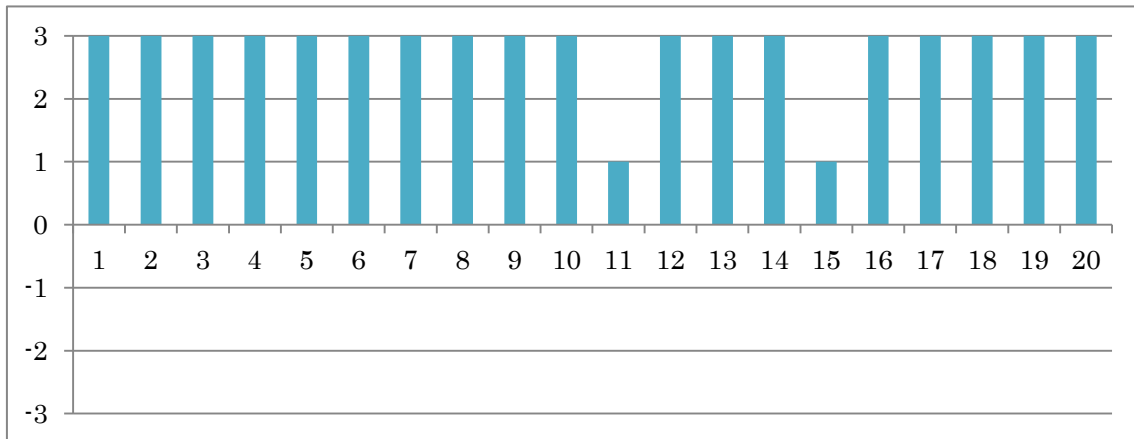
また、モデルの区別のしやすさが曲や被験者によって差が出ていないかを検証するために、アンケート結果でそれぞれの実験において付けた評価の点数の平均と分散を求める。点数の付け方は以下の表 4.4 に従い、正しければ加点、誤っていれば減点する。

表 4.4 アンケート結果の採点方法

| 正誤 | 評価   | 点数 |
|----|------|----|
| ○  | 5, 0 | +3 |
|    | 4, 1 | +2 |
|    | 3, 2 | +1 |
| ×  | 5, 0 | -3 |
|    | 4, 1 | -2 |
|    | 3, 2 | -1 |

この方式で実験毎に点数を付けた結果を図 4.4 に示し、平均と分散を求めたものを表 4.5 に示す。合計点数は-60~60 点の幅を取る。図 4.4 の縦軸は点数、横軸は実験回数を表している。

被験者 No.2



被験者 No.3

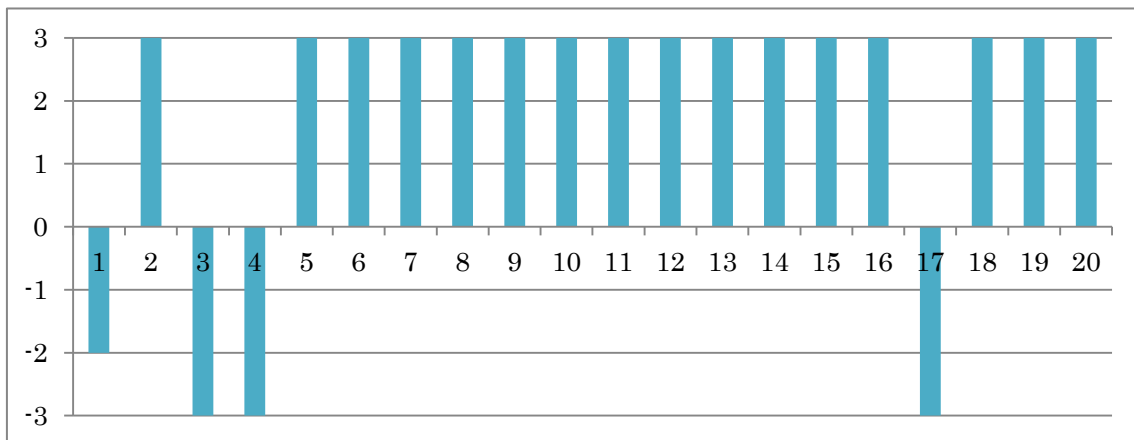


図 4.4 実験毎に被験者が付けた評価の点数

表 4.5 実験毎の評価の点数の平均と分散および合計点数

| モデル  | 平均   | 分散   | 合計点数(60点満点) |
|------|------|------|-------------|
| No.2 | 2.80 | 0.36 | 56          |
| No.3 | 2.15 | 4.18 | 43          |

### 4.3.3 考察

今回の結果から2つのモデルを比較すると、No.2に関しては非常に良い結果となったが、No.3に関してはそれには劣るものであった。合計点数は60点中43点となり、7割以上の正解率となったものの、分散が大きくなり、モデルが操作する曲や試行によっては区別できないものもあるという結果になった。被験者の感想をもとに考えられる原因としては、学習の際に極めて少なかった動作（ミス）が出現した、PitchやPanを動かした後に元の値に戻す動作がなかったなどが考えられる。被験者 No.2 の結果が非常に良かったのはこのような動作や、データ取得の際のミスが少なかったことによって、本研究で提案しているアルゴリズムがオリジナルの動作原理と調和が取れていたからであるということが考えられる。二つのモデルにこのような差が出た以上、全てのタイプのオリジナルには完全には対応できないことが分かったが、今回の結果は前述した動作以外の、オリジナルがパラメータを操作する流れや癖などに関しては再現できる可能性を見出している。よって、人間が音のパラメータを操作する動作原理のひとつには、独自に定義した曲構成が含まれているということが言える。さらにパラメータの保持時間やリアルタイム音声処理など学習データの種類を多く取り入れれば、よりモデルを発展させ本人に近づけることができるだろう。

## 5 まとめ

ドイツの電子音楽グループ「Kraftwerk」はコンピュータ音楽を築き上げてきた世界を代表するアーティストであるが、現在彼らがライブで行っているパラメータ操作をあたかも本人が動かしているかのようにコンピュータに操作させたいという意志からこの研究は始まった。長期に渡る活動が音楽を育み、作品としての価値を深めるという価値観のもと、著者は本人不在でもコンピュータにおけるライブが可能であることは永遠の活動を可能にするものであると考えた。

そこで本研究では、音のパラメータ操作という演出において、ベイジアンフィルタとマルコフモデルを用いたアルゴリズムを提案した。

演出者が何を以てパラメータを動かすのかという動作原理に未解明な部分があったものの、学習ではある曲構成においてどのようなパラメータの動かし方をしていたかという特徴を抽出することに決定した。さらに、つまみ（エンコーダ）毎に動作を並べてみると見えてくるマルコフ性も考慮し、モデルに組み込む方向で研究を進めた。

データ取得の実験では MIDI コントローラと DAW、そして Pd パッチの同期に苦戦したが、通信によるデータ欠損の問題もなく完了出来た。人間が操作する場合に稀にミスが発生することも考慮して、取得中にミス（ノイズ）があってもそのデータを除くことなく全てのデータを学習に用いた。学習には R プログラムを用い、クラス分けをしておらず複数のプログラムを再生しなければならなかったのでスムーズではなかったが、被験者毎のアクション発生の確率分布もエンコーダ毎のマルコフモデルも生成させることに成功した。そのモデルを通すことによって、被験者が操作したことの無い曲でもアクションを発生し、コンピュータに自動で音のパラメータ操作を実行させることが実現できた。

本研究ではモデル演奏が本人にどれだけ近いかをできる限り正確に出すための評価実験も行った。今回用意したのは3人の被験者の取得データから生成した3つのモデルであり、誰のモデルが操作しているか分からない音源を流し、それがどの被験者のモデルであるかを答えてもらう実験を行った。3つのモデルの内の一つは著者のものであったが、著者はモデルの仕組みの詳細まで頭に入っているため評価実験には加わらなかった。よって、評価実験は他の2名に行ってもらった。被験者の一人は正解率が9割以上と非常に高い数値を叩きだした。一方被験者も7割以上となり、まずまずの結果であった。しかし、実験毎の評価の点数の分散が大きくなり結果としては少々不安定な要素もあった。このアルゴリズムは被験者の特徴によって向き不向きがあり、それを改善する為にはパラメータの保持時間や曲構成以外の特徴量も用いるべきだと考えた。

今後の課題としては、パラメータ変化幅の正規化やパラメータを最大・最小にする動作の導入、初期値を被験者各々が決められるシステムの考案とソロパートにおける Pitch コントロールの重複の問題や Pan の動作に関してどうするかなどを解決する必要がある。そ

の上で、被験者を3人から10名程度、データの取得を10曲の2回試行程度に増やす方向で考えている。また、更なる発展としては音楽ジャンル・音声データとパラメータ操作の関係性を考慮するなど、複数のモデルを生成して比較実験を行っていく。



## 謝辞

この研究を遂行するにあたり、私の意思を重んじたテーマの選定や国際会議参加に向けたご指導等、終始温かく見守ってくださった三浦准教授に深く感謝致します。また、輪講や中間発表においてご指導・ご教授を下さった情報セクションの先生方に御礼を申し上げます。不慣れなコンピュータに途方に暮れる私に的確な助言と激励、人としての振る舞いのお手本までも見せて下さった後藤秀信氏や、勉強会などで共に勉学に励んで下さった三浦研究室・情報セクションの学生の皆さんに御礼を述べたいと思います。最後に不甲斐ない私が学部と院の6年間、勉学や研究、課外活動等充実した生活を送ることができ、そのために経済面・生活面においてご支援を下さった家族に心から感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Pascal Bussy, *Man-Machine and Music*, Suiseisha (1994).
- [2] Wei Chai, Barry Vercoe, *Folk Music Classification Using Hidden Markov Model*, *Proceeding of International Conference on Artificial Intelligence 2001*.
- [3] Jin'ichi Murakami, *Step by Step the Baum-Welch Algorithm and its Application*, *IEICE Fundamentals Review Vol.4 No.1* 48-56.
- [4] Yasuteru Kodama, Yasunori Suzuki, Fumio Matsushita, Satoshi Odagawa, Shinichi Gayama, Takehiko Shioda, *Development of "Feeling Play"*, *Technical Journal "Pioneer R & D" Vol,14 No.3*.
- [5] Lisha Zhong, Jiangzhong Wan, Zhiwei Huang, Gaofei Cao, Bo Xiao, *Heart Murmur Recognition Based on Hidden Markov Model*, *Journal of Signal and Information Processing* 2013.
- [6] 後藤真孝, *リアルタイム楽曲情景記述システム : サビ区間検出法*, *情報処理学会 音楽情報科学研究会 研究報告 Vol.2002 No.100* 27-34, October 2002.
- [7] Yannis Panagakis, Constantine Kotropoulos, Gonzalo R. Arce, *Music Genre Classification Using Locality Preserving Non-Negative Tensor Factorization and Sparse Representations*, *The International Society for Music Information Retrieval*, 2009.
- [8] Philippe Hamel, Douglas Eck, *Learning Features from Music Audio with Deep Belief Networks*, *The International Society for Music Information Retrieval*, 2010.
- [9] Efstathios Stamatos, Gerhard Widmer, *Automatic identification of music performers with learning ensembles*, *Artificial Intelligence* 165 (2005) 37-56.
- [10] Ramon Lopez de Mantaras, Josep Lluís Arcos, *AI and Music from Composition to Expressive Performance*, *AI Magazine Vol.23*, 2002.
- [11] Philippe Hamel, Douglas Eck, *Automatic Identification of Instrument Classes in Polyphonic and Poly-Instrument Audio*, *The International Society for Music Information Retrieval*, 2009.
- [12] Sanae Wake, Hirokazu Kato, Naoki Sawaki, Seiji Inokuchi, *Cooperative Musical Partner System Using Tension-Parameter: JASPER (Jam Session Partner)*, *Information Processing Society of Japan* (1994), 35(7), 1496-1481.
- [13] Satoru Fukayama, Kei Nakatsuma, Yuichiro Yonebayashi, Shinji Sako, Takuya Nishimoto, Nobutaka Ono, Shigeki Sagayama, *Orpheus: A System for Prosody-based Automatic Song Composition from the Lyrics*, *Information Processing Society of Japan* (2008), 179-184.

- [14] Yuki Koyama, Daisuke Sakamoto, Takeo Igarashi, Crowd-Powered Parameter Analysis for Visual Design Exploration, User Interface Software and Technology Symposium (October 2014), 65-74.

## 付録

### ～学会発表～

(1) “Live Operator –In the Comments-: コメント入力による音、演出への干渉”, 第66回電気関係学会九州支部連合大会, 熊本, 2013年9月.

(2) “自動演奏において音のパラメータを操作する演出者の再現と再現性の評価”, 情報処理学会インタラクシオン2014, 東京, 2014年2月.

(3) “Operating Sound Parameters Using Markov Model and Bayesian Filters in Automated Music Performance”, New Interfaces for Musical Expressions 2014, London, UK, July 2014.

### ～ソースコード～

自作のプログラムのソースコード : <http://istlab.mns.kyutech.ac.jp/~hashi/app.htm>

receive\_init2.java

rep04.java

Action.java

Data\_reduction.R

Mrkv.R

Music\_Scene.R

Probability.R

Operation.R

Operation\_Storage.R

send\_init2.pd

od\_01~09.pd

Action.pd

### ～音声データ～

取得データ、計算機によるパラメータ操作の音声データ : <http://istlab.mns.kyutech.ac.jp/~hashi/app.htm>