

# 指揮者のヒューリスティクスを盛り込んだ指揮システム “VirtualPhilharmony”

馬場 隆<sup>†</sup>      橋田 光代<sup>†</sup>      片寄 晴弘<sup>†</sup>

## Conducting System with heuristics of the conductor “VirtualPhilharmony”

TAKASHI BABA<sup>†</sup>      MITSUYO HASHIDA<sup>†</sup>      HARUHIRO KATAYOSE<sup>†</sup>

### 1. はじめに

指揮者は、19世紀に専門職となって以来現在に至るまで、オーケストラの要として常に脚光を浴び、憧れの存在であった。その理由の一つとして、指揮者は百人にも及ぶオーケストラ団員を駆使して音楽を表現するという、一人で楽器を奏で、歌を歌うのとは全く異なる表現手段を有する点が挙げられる。その魅力ゆえに、往年の巨匠の名録音に合わせて指揮棒を振る、という趣味を持った人が数多くいるのだろう。では、その演奏が自分の振りに合わせて動いたらどうだろうか。

近年、音楽に対する新たなアプローチの方法として、能動的音楽鑑賞という考えが提唱されている。これまで聴く一方であった聴者が、音楽の生成にも能動的に関与し、奏者と聴者の双方のインタラクションによって音楽を創造していこうというものであり、様々な研究が行われている。指揮動作に音楽を追随させる、いわゆる指揮システムもこの一環であり、数多くの先行研究が存在する。

筆者（馬場）は音楽大学を卒業し、指揮の経験も持つ。その立場からは、これらの先行研究の演奏感には必ずしも満足は行くものではなく、スケジューラの見直しが不可欠であると認識した。我々は、指揮者の持つヒューリスティクスを盛り込むことでこの問題を解決し、プロユースにも耐えうる本格的指揮システムの構築を目指している。本稿では、その取り組みとして、“VirtualPhilharmony”（以下 V.P.）を提案する。

### 2. 先行研究

Max Mathews の “Radio Baton” (1987) は、両手に持ったバトン平面センサ上で動かしたり叩いたりする

ことで MIDI のコントロール信号等を制御するというものがある(1)。片方の手で拍打を与えつつ、もう片方の手で楽曲の音高や音色をリアルタイムに変化させることができる。このシステム自体は指揮行為自体の模倣を目的に作られたものではないが、拍打によって楽曲のテンポを制御する、という行為は結果的に指揮と同義であり、指揮システムにおける先駆けである。

奥平らによる “iFP” (2003) は、ピアノの名演をデータ化した演奏表情テンプレートを用意し、それに対して手振り等の単純動作で拍打情報を与えることによって、ピアノ演奏を自在に表現しようという拍打型演奏インタフェイスである(2)。MIDI テルミン（静電容量センサ）等を用いて拍打を抽出し、過去のテンポデータから次拍を予測することで拍打に追従させている。

Nakra らによる “UBS Virtual Maestro” (2007) は、Wii リモコンの加速度センサを用いて拍打を検出、phase vocoder を用いて拍に合わせて音響信号の時間伸縮を行い、映像も同期させるというものである(3)。MIDI ではなく実際の生演奏を用いているが最大の特徴である。ボストンシンフォニーホールロビーに専用ブースを設け、気軽に楽しめる環境を整備している。

Wii Music(2008,任天堂)は、60種類以上の楽器を、Wii リモコンを用いて模擬演奏するというゲームであり、その中に指揮も含まれている。ただし、鋭敏な反応ゆえに、しばしば楽曲が破綻してしまう。

### 3. V.P.の概要

V.P.は、先の iFP を基に設計されている。iFP の対象楽曲がピアノであったのを、オーケストラへと変更し、同時にスケジューラの見直しを実施している。設計にあたっては本物の指揮感覚をできるだけ忠実に再現することを課題とし、指揮経験者である開発者のヒューリスティクスを採り入れたことが大きな特徴である。

<sup>†</sup> 関西学院大学

Kwansei Gakuin University

採り入れたヒューリスティクスのうち主なものを以下に挙げる。

1. 次拍のテンポの予測スケジューラの見直し
2. 楽曲の拍点と振りの拍点(極小点)との間の時差
3. 小節内の各拍におけるテンポの推移
4. 様々な曲種における特徴的なテンポ変化

これらに関しては章を変えて詳述することとし、まずは V.P.のシステム構成図を図 1 に示す。V.P.は Cycling'74 社の Max/MSP 上で構築されている。



図1 V.P.システム構成図

### 3.1 指揮のジェスチャー

指揮で用いられるジェスチャーは通常以下の3つに大別される。

1. 右手：指揮棒を持ち、空中に図形を描くことで奏者に拍子や拍打を提示。
2. 左手：曲の表情付け、奏者への合図等。
3. その他：視線、顔の表情等。

V.P.ではこのうち右手の動きのみを扱う（左手に関しては後述する）。右手の動きから拍点とダイナミクスを獲得し、これらをもとに音楽に表情を付与させる。通常、拍点は指揮図形における極小値を指すので、これを捉える。また、ダイナミクスは振りの強さ(=加速度)により決定する。

拍点及びダイナミクスの獲得には加速度センサを内蔵した自作のリストバンドを用い、プレイヤーはこれを右手首に装着して指揮を行う。加速度センサはWiiリモコンにも内蔵されており、これを用いた研究は多いが、Wiiリモコン(160g)は指揮棒(10g)に比べて非常に重く、指揮動作に影響を与えるため導入を見送った。

また、V.P.では以前、指揮棒先端に赤外線LEDを装着し、WiiリモコンのCMOSセンサでその動きを読み取ることにより拍点の検出を行っていた。この方法による指揮も可能である。

加速度センサとマイコンに LilyPad Arduino (4)を使用し、サンプリングレート 100Hz で 3次元の加速度情報を取得、BlueSMiRF (5)により Bluetooth 通信を行って PC へ送信する。なお、リストバンドの重量は

100g 程度であるが、腕に装着しているため指揮棒の操作に影響はない。3次元の加速度情報より重力を抽出してこの方向を鉛直成分と定め、鉛直成分の極小値を拍点、拍点近傍における絶対値の極大値を音量とした。これらの検出には鉛直成分1次元のみを使用しているが、プレイヤーは自由に指揮図形を描くことが可能である。ただし、指揮図形が意味する拍子の提示は1次元では判別できないため、拍子によるテンポ変化は予測スケジューラの方に組み込むこととした。

図2に回路図を、図3に装着した様子を示す。

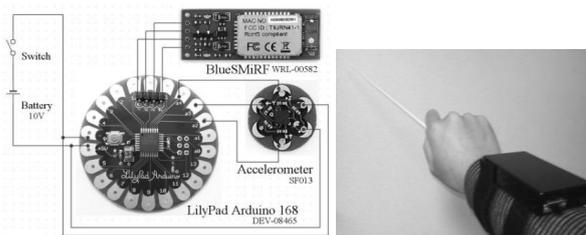


図2 リストバンドの回路図

図3 装着したところ

左手に関しては、指揮者によっても楽曲によっても左手の扱いは大きく異なるという問題があり、一意性が担保されないため、今回は採用を見送った。ただし、全体の音量、パートの指示など、用途を限定してのシミュレートは可能であり、現在検討中である。

### 3.2 楽譜情報

指揮に際し、楽譜は必要不可欠である。譜読により楽曲全体を見渡し、すべての音符に意味付けを行う。V.P.では、事前に譜読結果を反映させた SMF (Standard MIDI File)を、シーケンサを用いて打ち込みで作成し、これを指揮するという手法をとった。この時、SMFに含まれる小節番号等の楽譜の詳細情報の読み込みには、CrestMuseXML (CMX) (7)を利用した。

CMX で扱われる XML 群のうち、V.P.では楽譜情報を記述する MusicXML (8)及び、逸脱情報を記述する DeviationInstanceXML を用いる。後者は音楽演奏表現に係る微細情報を取り扱うためのフォーマットであり、音楽における逸脱、即ち各音におけるアタック・リリース・音量・テンポ等の楽譜からのずれを記述する。

楽譜製作ソフト Finale を用いて既存或いは自作の楽曲を入力し、MusicXML に変換、同じく Finale から出力させた SMF にシーケンサを用いて譜読情報を付与する。これらより DeviationInstanceXML を合成し、2つの XML より各音について、小節番号、拍、MIDIチャンネル、ノートナンバー、音価（以上楽譜情報）、アタック時のずれ、リリース時のずれ、音量のずれ（以上逸脱情報）の8種の情報を text 形式で抽出する。

### 3.3 次拍のテンポのスケジューラ

指揮システムでは次拍のテンポの予測が不可欠である。拍点のみという限られた情報からこれを行うためには、予測スケジューラの緻密な設計が必須である。

iFP では、現在のテンポ  $T_n$  から 3 拍前のテンポ  $T_{n-3}$  までの加重移動平均テンポ  $A_n$ 、 $T_n$  と  $T_{n-1}$  の差分  $B_n$ 、名演奏テンプレートのテンポ  $C_n$  について、それぞれ重みを設定することで次拍を割り出していた。V.P.でもこの方法を基本的に踏襲している。

### 3.4 出力

出力された MIDI 信号は外部音源へと送信される。Audio データを用いた指揮システムに比べ、音質の点で劣るが、柔軟性は非常に高い。

また、指揮における楽譜の重要性を鑑み、ディスプレイに楽譜を表示させることとした(図 4)。譜めくり個所に関しては MusicXML からページ情報を抽出することで、自動譜めくりを実現した。

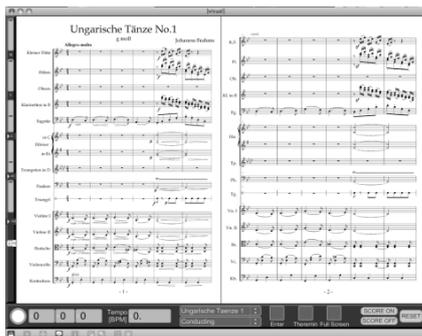


図 4 Visualization

## 4. 指揮者の持つヒューリスティクスの導入

### 4.1 次拍のテンポの予測スケジューラの見直し

#### 4.1.1 予測アルゴリズム

予測のアルゴリズムに平均を用いた場合、局所的な変化は抑制の方向に働く。しかし変化が漸増或いは漸減している場合には、次拍  $P_{n+1}$  はさらに変化を促進させる方向に予測した方が自然である。図 5 のように、

$$(T_n / T_{n-1}) \geq 1 \cap (T_{n-1} / T_{n-2}) \leq 1$$

のとき平均

$$(T_n / T_{n-1}) \geq 1 \cap (T_{n-1} / T_{n-2}) \geq 1$$

のとき(線形)最小二乗法を用いることとした。

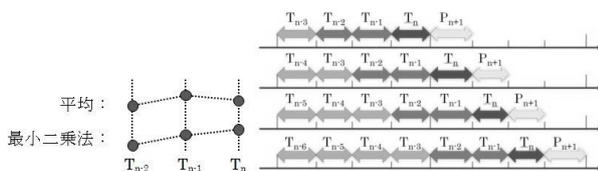


図 5 予測アルゴリズム

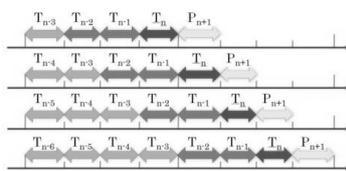


図 6 過去の参照数

### 4.1.2 急激なテンポ変化への対応

楽曲の節目等では、ritardando や基準テンポの変更等、テンポが急激に変化する場合がある。これらの特異値をスケジューリング計算に組み込むと、演奏が破綻し、しかもその影響が数拍後まで残ることになる。これを防ぐため、テンポ変化に閾値を設けて閾値を超える変化が生じた場合には過去のテンポ情報を消去、特異値を新たなテンポとして設定し直すこととした。

### 4.1.3 拍内のテンポ変化

音楽演奏において、テンポは拍毎の離散値ではなく、連続的变化を伴うものとして捉えるべきである。この連続的テンポ変化を直線で近似することで拍内テンポ変化をシミュレートする。現在のテンポ  $T_n$  と予測テンポ  $P_{n+1}$  を直線で結び、1 拍を 12 等分してそれぞれの個所におけるテンポを疑似拍内テンポとした。

### 4.2 楽曲の拍点と振りの拍点との間の時差の調節

実際の指揮においては楽曲の拍点が指揮動作の拍点より遅れる場合がしばしばある。この時差はテンポによって変動し、一般に緩やかなテンポの楽曲において大きくなる(6)。これを踏まえ、V.P.では時差の量を調節できるパラメータを用意した。

### 4.3 小節内の各拍におけるテンポの推移への対応

#### 4.3.1 拍節に合わせた過去の参照数

指揮動作から抽出するのは拍点のみであるから、拍子はない(1 拍子)のであるが、実際の楽曲には拍子が存在し、何拍目かでテンポは微細に変化する。iFP では過去の参照数は 4 で固定であったが、V.P.では現在の拍位置によって過去の参照数を可変とした。例として 4/4 拍子の場合を図 6 に示す。

予測する次拍が小節の何拍目に当たるかで過去の参照数は 3~6 と変化する。小節内において最も重要な拍は 1 拍目であるから、予測する場合には必ず 1 小節前の 1 拍目から現在の拍までの情報を取ることとした。

また、2/4 拍子・3/4 拍子の場合は参照数が少なくなるため、2 小節前から参照している。

#### 4.3.2 最終拍への重みづけ

小節内で 1 拍目と共に重要なのが最終拍、4/4 拍子であれば 4 拍目である。この拍は他の拍に対してテンポが遅くなる傾向が強い。一定のテンポで流れているように聴こえる個所でも、拍毎のテンポを調べると最終拍が若干長くなる場合が多い。

この点について、ブラームスの交響曲第 1 番ハ短調 op.68 の第 4 楽章第 1 主題(62~77 小節)を例にとって説明する。選考理由は有名であること、4 つ振り振られる 4/4 拍子であること、4 分音符を中心に構成

され細かい音符のフレーズがないこと等による。演奏は1940年代から現代まで14点を選び、各拍のテンポを聴取により採集した。このうち1拍目と4拍目のテンポについて小節毎の平均をとり、重回帰分析を実施したところ、表1のような結果を得た。

表1 重回帰分析の結果

決定係数 $R^2$	0.988957
観測数	14
P-値	4.11E-13
偏回帰係数	0.96884
切片	4.878828

$P < 0.01$  より99%以上の確率で4拍目は1拍目に比して長いことが実証された。また、4拍目と2拍目、4拍目と3拍目に関しても同様の結果が得られている。

これにより、最終拍をそのまま前節で述べた過去のテンポ平均に組込むと分散値が増え、結果予測値が一定テンポから逸脱することになる。この逸脱を抑制するために平均を取る際に最終拍の重みを減らすこととした。ただし、予測テンポが1拍目の場合は現在の最終拍の影響は無視できないため、この規則は除外する。

なお、4/4拍子の楽曲といっても、例えば4拍が均等に奏される行進曲のように、様々な性格のものがあり、一様にこの規則を当てはめることはできないため、次節で述べる曲種によるテンプレートと併用している。

#### 4.4 小節内の各拍におけるテンポの推移への対応

ウィンナワルツは2拍目を前のめり気味に奏するために1拍目が短く、2拍目が長くなる(9)。これら曲種による特徴的なテンポ変化については、曲種毎にテンプレートを用意した。聴取により様々な楽曲の特徴的なテンポ変化を採集し、重回帰分析により特徴量を数値化して、これを予測係数に反映させることとした。

しかし、例えばワルツは「撥ね上げ」という指揮動作によって、1小節を1つ振りで円を描くように振るのが一般的である(10)。同様に6/8拍子の楽曲を2つ振りで振る場合等もある。これら、指揮動作の拍点と楽曲の拍点が1対1の関係にない場合の拍毎の調整については未実装である。

## 5. 検討

V.P.の最大の特徴は、システム設計にヒューリスティクスを数多く取り入れたということである。これによりiFPやWii Musicと比較して、より現実の指揮感覚に近い感触が得られた。

Crestmuse Workshop 2009においてデモを行い、自動伴奏システムの第一人者 R. Dannenberg 氏、Rencon 2003の優勝者 C. Raphael から良い追従感があるとのコメントが得られた。このデモの際には、赤外線センサを用いていたことから、動作範囲を大きくして欲しいとの声が寄せられた(図7)。また、Interaction 2010では指揮者の保科洋氏の評価についても報告したい。



図7 Crestmuse Workshop 2009にて

## 6. まとめ

指揮システム“VirtualPhilharmony”は、指揮者の持つヒューリスティクスを多く盛り込むことで、従来研究になかった高い追従性と音楽的説得力を得ることができた。

V.P.はヒューリスティクスであるが故に、経験則等、客観的評価を行わずに導入したものが多い。これらに対する定量的な検証が必要である。最終拍の影響の検討や曲種毎のテンプレートの作成は、検証の一環である。また、左手の活用等、さらに本物の指揮に近いシステムを構築していく予定である。

## 参考文献

- 1) ICMA Video Review, Vol. 1, 1991 (90 minutes) Review of research in Computers and Music.
- 2) Haruhiro Katayose and Keita Okudaira: iFP A Music Interface Using an Expressive Performance Template, Entertainment Computing 2004, Lecture Notes of Computer Science, Vol. 3166, pp.529-540 Springer (2004.9)
- 3) Teresa Marrin Nakra Yuri Ivanov Paris Smaragdis Chris Ault: The UBS Virtual Maestro: an Interactive Conducting System, pp.250-255, NIME 2009
- 4) <http://web.media.mit.edu/~leah/LilyPad/>
- 5) [http://www.sparkfun.com/commerce/product\\_info.php?prodprod\\_id=582](http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?prodprod_id=582)
- 6) 新山王政和: 指揮基本動作における初心者と熟達者の動作タイミングの違いに関する分析的研究, 日本音楽教育学会学会誌「音楽教育学第34-2号」, pp.1-12, 2004
- 7) 北原鉄朗, 橋田光代, 片寄晴弘: 音楽情報科学研究のための共通データフォーマットの確立を目指して, pp.149-154 第71回音楽情報科学研究会発表論文
- 8) <http://musicxml.org/default.asp>
- 9) New Grove Dictionary of Music and Musicians
- 10) 斎藤秀雄: 指揮法教程, 音楽之友社