Vol.2010-MUS-86 No.26
2010/7/30

実際にオーケストラを指揮する感覚に焦点を当てた指揮システム VirtualPhilharmony

馬場隆[†]　橋田光代[†]　片寄晴弘[†]

指揮システム VirtualPhilharmony は，実際にオーケストラを指揮する感覚に焦点を当てた指揮システムである．従来の指揮システムは，指揮動作に音楽がすべて追随するという形をとっていた．しかし実際の演奏においては，それぞれ固有の音楽性を有したオーケストラ団員がおり，指揮者とオーケストラのインタラクションによって演奏が生成される．このインタラクション感が指揮感覚である．本研究ではこれの獲得のために，オーケストラ指揮に関するヒューリスティクスが多数導入され，楽曲分析を経てこれらから最適パラメータが導出される．指揮経験者がパラメータを細かく設定することで，従来研究にないリアルな指揮のシミュレートが可能となっており，指揮の専門家から高い評価を得ている．

VirtualPhilharmony: a conducting system focused on a sensation of conducting a real orchestra

Takashi Baba[†]　Mitsuyo Hashida[†]
Haruhiro Katayose[†]

VirtualPhilharmony is a conducting system focused on a sensation of conducting a real orchestra. In previous conducting systems, a player (conductor) has controlled all of music. But in real performances, there are orchestra members who have own musicality in front of the conductor. Performances are created by interactions between the conductor and the orchestra. This feeling of the interactions is the sensation of conducting a real orchestra. In this study, to get this sensation, a lot of heuristics about conducting an orchestra are introduced; the most suitable parameters are found from these heuristics by analyzing many tunes. The player can enjoy very realistic conducting because a designer who has experience of conducting set up the parameters closely; VirtualPhilharmony is highly regarded from experts of conductor.

1. はじめに

指揮者は，19 世紀に専門職として独立して以来，オーケストラの要として常に脚光を浴びてきた憧れの職種の一つである．指揮者は自ら音を出すことなしに，数十名から時に百人を超えるオーケストラ団員や合唱団員を意のままに操って自らの音楽を具現化する．一人もしくは少人数で楽器を奏でたり，歌を歌ったりするのとは全く異なる音楽の表現手段の特性ゆえに，1980 年代後半から，計算機音楽領域の作曲家や技術者らによって，指揮インタフェースの開発が行われてきた[1][2][3][4]．一方で，指揮体験の要望はアマチュアの中にもあり，巨匠の名録音に合わせて指揮棒を振る「エアコンダクター」を趣味としている人も多い．2000 年代後半に入って，ジェスチャセンサ付随の家庭用ゲーム機やスマートフォンが登場し，それらを用いた指揮ゲームが一般に普及しつつある[5][6].

指揮システムはこれまで，指揮動作のセンシング，誰でも簡単に指揮ができることなどの工学的実現に焦点を当てて，研究・開発がなされてきた．しかし一方で，その指揮動作に従ってどのように音楽を再生させるのか，という点について，音楽的立場から詳細に研究された事例はほとんどない．誰が演奏しても演奏が破綻しないという事項が優先され，システム設計において，予測制御機構の単純化，想定外のセンサ情報に対するフェイルセーフ的処理などが行われた結果，誰でも簡単に指揮できる一方で，細かい制御ができず，実際にオーケストラを指揮している感覚が得難いという問題が生じた．少々操作が難しくても実際の指揮感覚に近いシステムが用意できれば，指揮の訓練等専門分野への応用が可能である．また，リアリティを追求した難易度の高い家庭用レーシングゲームなどが好評を博しているという事実もあり，ハイエンドの指揮ゲームに対する潜在的なニーズはあると考えられる．

本研究では，これまであまり取り上げられてこなかった「実際にオーケストラを指揮する感覚」に焦点を当てている．指揮の経験を持つ筆者(馬場)は，この感覚の再現には，オーケストラ指揮に関わるヒューリスティクスの導入が重要であると認識している．本稿では，ヒューリスティクスを多く盛り込んだコンサートマスター機能を核とする指揮システム“VirtualPhilharmony”(以下 V.P.)を提案する．

2. 関連研究と V.P.の狙い

2.1 関連研究

指揮システムの先駆となった研究に Mathews の Radio Baton (1987)がある[1]．両手に持ったバトンを平面センサ上で滑らしたり叩いたりすることで MIDI (Musical

† 関西学院大学
Kwansei Gakuin University

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

Instrument Digital Interface) のコントロール信号を制御する演奏インタフェースであり，片方のバトンで拍打を与えつつ，もう片方のバトンで音高・音色を変化させて音楽の演奏を行う．このシステム自体は指揮の模倣を目的とはしていないものの，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る．

これ以降様々な指揮システムが開発されてきた．隠れマルコフモデルを用いて指揮動作の詳細な認知を実現した宇佐らによる Conducting Simulator (1997)[2]，フェーズボコーダーを用いて音楽音響信号の時間伸縮を行い，MIDI ではなくオーディオ波形による指揮を可能にした Borchers らによる Personal Orchestra (2004)[3]等が有名である．

奥平らによる iFP (2003)[4]は，ピアノの名演奏をデータ化した演奏表情テンプレート（以下テンプレート）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付与することによって，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ースである．テンプレートの導入によって実演のリアルな表現が演奏に加味されるという点が画期的であった．V.P.は iFP を基に設計されている．

指揮ゲームとしては，Wii リモコンを振ることで指揮をする Wii Music (2008)[5]，同じく iPhone を振ることで指揮をする iCantabile (2010)[6]等が発売されているが，指揮感覚の再現には至っていない．

2.2 オーケストラ側の視点の追加

これら関連研究に共通して言えることは，音楽演奏表現に関する考察に基づくことなく単純な機構で予測スケジューラが構成されていた点であり，結果，生成される演奏にリアリティがなく，指揮感覚も得られにくい．iFP はテンプレートを利用することによって演奏表情を生成することができたが，テンプレート自体は静的なものであり，テンポの変化に応じて表現を切り替えるといった人間の演奏家のような柔軟な対応はできない．特にプレイヤの与えるテンポとテンプレートのテンポが大きく乖離した場合に，プレイヤにストレスを与える，という課題があった．V.P.ではこれらの問題を解決するために，「指揮者に相対するオーケストラ側の視点」がシステムに追加されている．

オーケストラとは，それぞれ固有の音楽観を持った音楽家の集団であり，彼らの頭の中には，彼らの音楽性に基づく演奏モデルが形成されている．彼らは，指揮者が提示する音楽と演奏モデルとを比較しつつ演奏を行う．その際，オーケストラは指揮者に完全に従うわけではなく，両者のインタラクションによって相補的に演奏が生成される．これを模すためには指揮者とオーケストラ，双方の視点に立って指揮システムを設計する必要がある．

従来の指揮システムには，このオーケストラ側の視点がなかったために，音楽は100%指揮者に追随していた．これは，1 人の演奏者が音楽のすべてを支配するという，ソロ演奏と同じ構図である．しかし実際の演奏においては，音楽は指揮者のみによって支配されるものではなく，オーケストラとのインタラクションによって生み出されるものであるから，指揮システムにもオーケストラ側の視点が不可欠となる．その上でもたらされるインタラクション感，アンサンブル感こそが，「実際にオーケストラを指揮する感覚」である．

実際の演奏の場合には，インタラクションの補佐役としてコンサートマスターが両者の間を取り持つ．そこで，V.P.ではこの相補的演奏生成構造，中でも特にテンポに関わる部分を「コンサートマスター機能」と名づけた．インタラクションの観点から予測スケジューラやテンプレートを見直し，また，それらの実装にあたってはオーケストラ指揮に関するヒューリスティクスを導入した．

3. V.P.の概要

V.P.は，指揮におけるジェスチャのうち鉛直方向 1 次元のみの動作を捉える，いわゆる拍打型の演奏システムである．V.P.の概要を図 1 に示す．

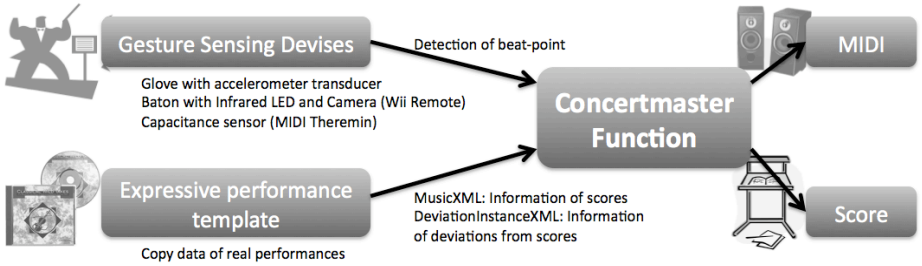

図 1　V.P.の概要
Figure 1　Outline of V.P.

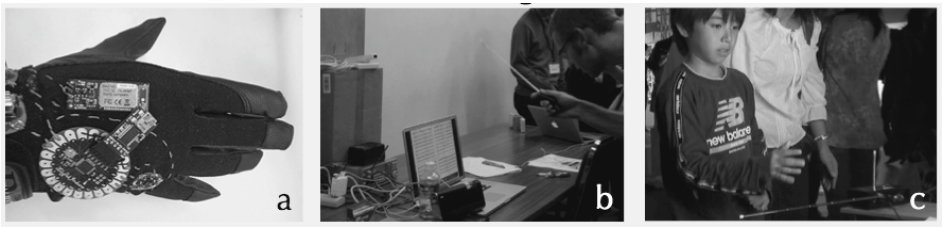

図 2　ジェスチャセンシングデバイス
（a. 加速度センサつきグローブ, b. 赤外線 LED つき指揮棒+Wii リモコン, c. 静電容量センサ）
Figure 2　Gesture Sensing Devises
(a. Glove with accelerometer transducer, b. Baton with infrared LED and camera, c. Capacitance sensor)

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

V.P.は Cycling'74 社の Max/MSP 上で実装されている．他の指揮システムと同様，V.P.は指揮ジェスチャセンサにより指揮者の拍打からテンポを計算する．そのテンポに従って当該拍から次拍までの音符の時間的配置（スケジューリング）を実施し，次拍のテンポの予測を行う．テンプレートを利用する点は iFP と同じであるが，プレイヤがシステム内にオーケストラの存在を感じられるよう，ヒューリスティクスに基づいたコンサートマスター機能が構成されている．

3.1 ジェスチャセンシングデバイス

V.P.ではセンサにより指揮動作の極小点を補足し，これを拍点と定めている．拍点の獲得には以下の 3 通りの方法を用意した．

(1) 加速度センサつきグローブ

加速度センサを装備したグローブを右手に装着する．得られた 3 次元加速度データは Bluetooth によって PC へと送られる．サンプリングレートは 10ms である．無線通信であるため場所を選ばず自由な指揮が可能である反面，回転など上下運動以外の要素でも加速度値が増減するため，拍の誤認識が多い．

(2) 赤外線センサ（赤外線 LED つき指揮棒+Wii リモコン）

指揮棒先端部に近赤外線 LED を装備し，Wii リモコン内蔵の赤外線カメラ(CMOS センサ)により LED の動きを 2 次元でトラッキングする．サンプリングレートは 10ms である．位置情報を捉えるため誤認識は少ないが，外光や障害物，カメラの撮影範囲や LED の照射角度等，制約が多く，認識漏れが多い．

(3) 静電容量センサ（MIDI テルミン）

アンテナと手との間の距離を静電容量の変化を用いて計測し，その変化量を MIDI 信号へと変換させるセンシングデバイスを利用する．静電容量の変化量は距離に反比例するため，位置センサとしてこれを用いる．サンプリングレートは 11ms である．最も誤認識や認識漏れが少ないが，計測範囲がアンテナの直上 20cm 程度しかなく，そこから外れた場合は拍が検出できない．

3.2 テンプレート

iFP 同様，V.P.においてもテンプレートが用いられる．楽譜に記述された各音が，演奏の際にどれだけずれるのかが XML 形式で記述されており，各音における発音時刻・消音時刻のずれとダイナミクス，拍単位でのテンポ変化がそれぞれ格納されている．

テンプレートは，既存の名演奏の録音データを聴取作業によって MIDI にコピーした名演奏テンプレートと，MIDI シーケンサを用いてユーザが独自で作成する自作テンプレートの２つがある．

既存の録音データは，指揮者とオーケストラとのインタラクションの結果を収録したものであるから，その中にはオーケストラ側の意図，即ち演奏モデルも含まれている．それを MIDI にコピーし，XML 化したテンプレートも同様であり，テンプレートの中に演奏モデルが内在している．iFP におけるテンプレートの欠点は，それが常に固定であるという点にあった．そこで V.P.では，録音データやテンプレートから演奏モデルを分析によって一部抽出し，それによってテンプレートを逐次補正することとした．その概要については次節において述べる．

3.3 コンサートマスター機能

コンサートマスター機能の概要を図 3 に示す．センサデバイスによって得られた拍点情報及びテンプレートからどのようにスケジューリングを行うか，という V.P.の根幹となる部分であり，「実際にオーケストラを指揮する感覚」の獲得を実現する部分である．この指揮感覚獲得のためにオーケストラ指揮に関するヒューリスティクスを多数導入し，従来の指揮者視点にオーケストラ視点を加えて両者のインタラクションという観点からスケジューリングを行う，というのが当機能である．V.P.におけるスケジューリングは以下の 5 つの段階を経る．

3.3.1 個別事例に対応した次拍のテンポ予測

従来，次拍のテンポ予測には移動平均や線形予測法が用いられてきたが，いずれの研究においても予測係数や予測次数は常に固定であった．しかし，予測する拍のテンポが，過去のどの拍の影響を強く受けているかは，楽曲の曲種や拍子等よって異なる．

例えばウィンナワルツ（3 拍子）の場合，2 拍目が前のめり気味に演奏される（1 拍目が短く，2 拍目が長くなる）傾向が強いという特徴を持っている．これは，2 拍目でダンサーがターンをするという，人間の身体動作と関連の深いダンスミュージックであるが故の特徴である．予測する拍が 2 拍目だった場合，1 つ前の拍（同じ小節の 1 拍目）と 3 つ前の拍（1 小節前の 2 拍目）とでは，予測拍への影響力が異なることになる．よってウィンナワルツの各拍のテンポを予測する際には，予測係数や予測次数は一定にすべきではなく拍ごとに変えるべきである．他の曲種においても同様である．

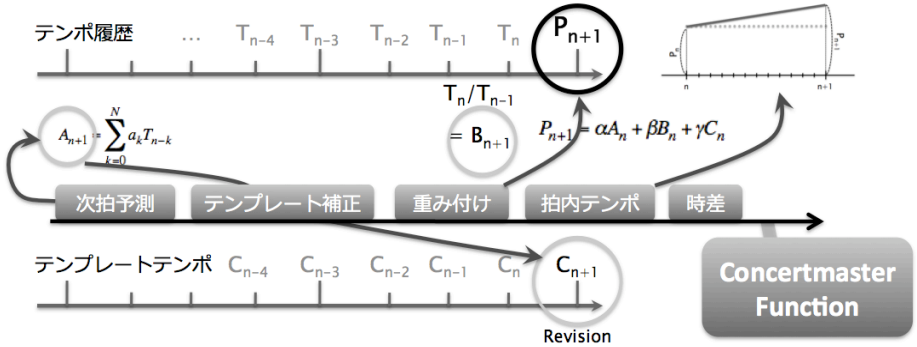

図 3　コンサートマスター機能の概要
Figure 3　Outline of Concertmaster Function

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

V.P.では，楽曲ごとに，また予測する拍ごとに最適な予測係数と予測次数が設定される．これらの値は，実際の録音データを分析することにより導出される．楽曲分析と最適な予測係数・予測次数の導出法に関しては，4 章で詳述する．

3.3.2 予測テンポに基づくテンプレートの補正

前述のように，iFP ではテンプレートの導入により，実演のリアルな表現を演奏に付加させることに成功した反面，テンプレートが固定だったためにもともとのテンプレートとプレイヤが指示するテンポの差が極端に大きい場合にかえってリアリティが小さくなるという課題があった．

V.P.においては，プレイヤの提示するテンポから得られた予測テンポに合わせてテンプレートが補正される．補正されるのは以下の 3 つである．

- **拍単位でのテンポ補正** ： テンプレートには拍単位のテンポ情報が含まれている．iFP ではこの情報は固定されていたが，V.P.では予測テンポと照らし合わせつつ，テンプレートのテンポを補正式(1)に従って補正する．

$$\mathrm{T}_m{}' = \mathrm{T}_m + \alpha(P_{n+1} - \mathrm{T}_m) \qquad (m \geq n+1) \tag{1}$$

- **曲種ごとの特徴に基づくリズム補正** ： ウィンナワルツを例にとると，前述のように 3 つの拍にはそれぞれ固有の性格があり，テンポの揺れも特徴的である．この各拍のテンポ変化は全体のテンポの影響も受けており，全体のテンポが速い時と遅い時とで，3 つの拍の演奏法は変化する．V.P.では，予測テンポによってテンプレートの各音が補正される（図 4-a）．他の曲種においても同様の事象は見られるが，V.P.ではウィンナワルツのみ取り上げる．
- **拍内リズムパターン補正** ： 付点のリズムパターンは，記譜通り演奏すれば演奏時間の比が 3:1 となる．しかし，この比は全体のテンポの影響も受けており，特に全体のテンポが速くなった時，比は 2:1 に近付く．V.P.では，予測テンポによってテンプレートの付点リズムが補正される（図 4-b）．付点リズム以外にも様々なリズムパターンが存在するが，V.P.では付点リズムのみを扱う．

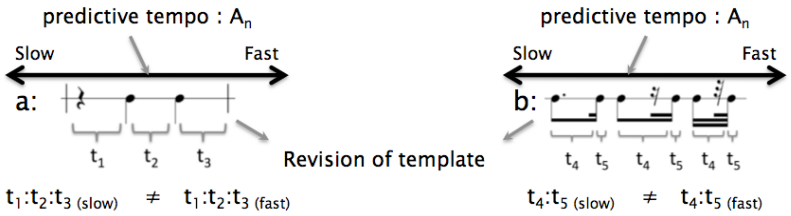

図 4 テンプレートの更新（a. ウィンナワルツ，b. 付点リズム）
Figure 4 Revision of template (a. Viennese Waltz, b. rhythm of dotted note)

これらのうち下の 2 つについては，実曲を用いて分析を行い，最適な補正回帰式を導出する．導出法は 4 章で詳述する．

3.3.3 重み付け

iFP のスケジューラは(2)式に従っていた．

$$P_{n+1} = \alpha A_n + \beta B_n + \gamma C_n \tag{2}$$

ここで，P_{n+1}は次拍の予測テンポ，A_nは過去のテンポ履歴のうち直近の 4 つのテンポ（T_n～T_{n-3}）の移動平均，B_nは T_n と T_{n-1}の差分，C_nはテンプレートのテンポであり，α,β,γはそれぞれ重み係数である．

V.P.も(2)式を使用するが，A_nと C_nは意味合いが異なる．A_nは，最適な予測係数・予測次数によって算出された次拍の予測テンポ，C_nは，A_nに応じて補正された修正済みのテンプレートのテンポである．これらにそれぞれ重みを付加した上で（プレイヤが設定），最終的な次拍の予測テンポを決定する．

3.3.4 積分型スケジューラの導入による拍内テンポ変化への対応

予測テンポは拍単位で離散的にテンポ値を更新する．しかし，accelerando（速度漸増）や ritardando（速度漸減）といったテンポ変化が起こった場合，拍単位の離散的テンポ更新は，予測拍内における各音の配置の乱れを引き起こす．従来の指揮システムにおいてはこの点も問題であった．

実際の演奏において，テンポは離散的に変化するものではなく，連続的変化を伴うことが多い．そこで V.P.では，これに対処するものとして積分型スケジューラを導入した．連続的テンポ変化を一次近似することで，拍内テンポ変化を擬似的に再現する．直近のテンポと予測テンポとを直線で結んで 1 拍を細分化し，その直線による積分値，即ち各区間に対応する面積によって実経過時間を計算するようにした．図 5 は 1 拍を 12 等分した場合である．1 拍が 4 分音符 1 つならば，1 区間は 32 分音符の 3 連符 1 つ分に相当する．

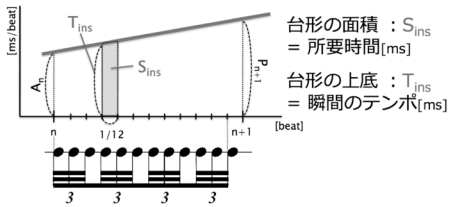

図 5 積分型スケジューラ

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

Figure 5　Integration scheduler

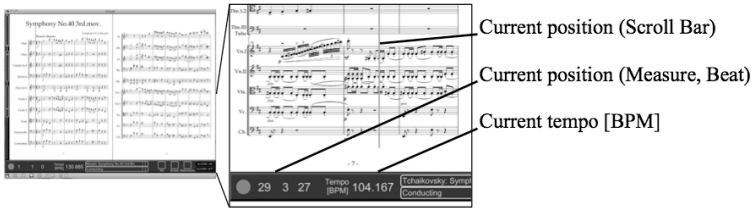

図 6　楽譜表示
Figure 6　Display of score

3.3.5　指揮動作の拍点と演奏の拍点の間の時差の調整

実際の演奏において，音楽はしばしば指揮動作の拍点よりも遅れる[7]. 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場合に時差は長くなり，急速な場合に短くなる．そこで，(3)式に従い，予測テンポに合わせて時差の量を調節する．

$$Timelag = \alpha P_{n+1} \tag{3}$$

$Timelag$ は時差量，P_{n+1} は予測テンポ，α は重み係数 $(0 \le \alpha \le 1)$ であり，α はプレイヤが調節可能である．

3.4　楽譜表示

指揮システムの中には，録画ビデオの映像を時間伸縮させて音楽と同期させ，臨場感を演出した Nakra らの USB Virtual Maestro[7]等があり，Wii Music[5]でも同様にオーケストラ CG が音楽と同期して動く．指揮感覚の獲得にオーケストラの可視化，映像との同期は大きな役割を果たしている．しかし，指揮は音楽演奏であり，楽譜の提示こそが指揮者にとって最重要であると筆者は考えている．また，可視化によって得られる指揮感覚は，前述した「実際にオーケストラを指揮する感覚」とは異なるものである．よって V.P.ではディスプレイに楽譜が表示される．ペンタブレットを用いて自由に楽譜に書き込みできる機能を実装した他，楽譜の読めないユーザのために，現在位置を示すスクロールバー，自動譜めくり機能を実装した（図 6）.

4.　ヒューリスティクスの検証

実演奏録音から演奏モデルを一部抽出することでオーケストラ側の視点を追加し，指揮者とオーケストラのインタラクションによる演奏生成を再現することがコンサートマスター機能の役割である．コンサートマスター機能のうち，(1)個別事例に対応した次拍のテンポ予測，(2)予測テンポに基づくテンプレートの補正のうちの「ウィンナワルツの特徴に基づくリズム補正」及び「付点リズムパターン補正」，の 3 つについては，実装に際して分析を行い，最適パラメータを導出した．以下，その分析方法を述べる．

4.1　個別事例に対応した次拍のテンポ予測

次拍の予測には線形予測法を用いる．次拍の予測テンポ P_{n+1} を(4)式で定義する．

$$A_{n+1} = \sum_{k=0}^{N} a_k T_{n-k} \tag{4}$$

ここで a_k は k+1 拍前の LPC (線形予測符号)係数，T_{n-k} は k+1 拍前のテンポ，N は予測次数を表す．この P_{n+1} と実測値 T_{n+1} との二乗平均誤差平方根 ε ((5)式)が最小となるような a_k を，拍ごとに求める．

$$\varepsilon = \sqrt{E\left[\left|T_{n+1} - P_{n+1}\right|^2\right]} \tag{5}$$

分析には 2 曲を用いた．

1 曲目は，特徴的なテンポの揺れを有する例としてウィンナワルツである．ウィンナワルツに関しては前述のように 2 拍目が前のめり気味に演奏される．使用楽曲は J.シュトラウス作曲『美しく青きドナウ』の第 4 ワルツである．

2 曲目は，テンポ予測が困難な例として espressivo（表情豊かに）の曲である．各拍のテンポは一定ではなく，激しいテンポの揺れとともに奏される．

以上 2 曲について，各拍のテンポの推移を聴取により採集した（各 10 録音，計 20 録音）.

分析結果を図に示す．図 7-a は『美しく青きドナウ』に関するグラフであり，図 7-a1 は，予測拍が第 1 拍・第 2 拍・第 3 拍の時の LPC 次数と LPC 係数の関係を，図 7-a2 は，予測拍が第 1 拍・第 2 拍・第 3 拍の時の LPC 次数と予測残差の関係を，それぞれ表している．また，図 7-b は『悲愴』交響曲に関するグラフであり，図 7-b1 は，予測拍が第 1 拍～第 4 拍の時の LPC 次数と LPC 係数の関係，図 7-b2 は，予測拍が第 1 拍～第 4 拍の時の LPC 次数と予測残差の関係を表している．

4.1　ウィンナワルツの特徴に基づくリズム補正

ウィンナワルツにおける各拍の所要時間を聴取作業により取得し，全体のテンポとの関連性を調べる．分析に使用した楽曲は J.シュトラウス作曲『美しく青きドナウ』の第 4 ワルツである．10 録音について聴取を行った．

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-MUS-86 No.26
2010/7/30

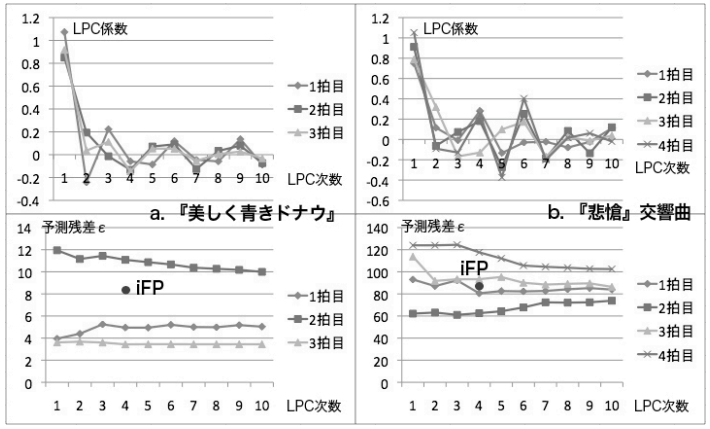

図 7　LPC 次数と LPC 係数・予測残差
Figure 7　LPC degree and LPC coefficient / LPC degree and predictive error

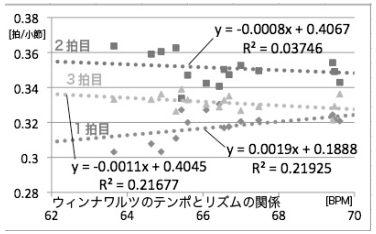

図 8　ウィンナワルツにおける各拍と全体のテンポとの関係
Figure 8　Relation between each beat and whole tempo in Viennese Waltz

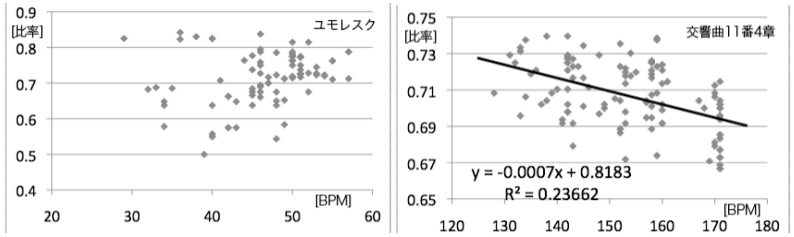

図 9　付点リズムパターンと全体のテンポとの関係

Figure 9　Relation between rhythm-pattern of dotted note and whole tempo

各拍の所要時間を t_1, t_2, t_3[ms]，1 小節の所要時間を $t_W(=t_1+t_2+t_3)$[ms]とする．また，1 小節のテンポを $x(=60000/t_W)$[BPM]とする．この時，各拍の小節内における時間比率 t_1/t_W，t_2/t_W，t_3/t_W と x の関係を示したのが図 8 である．$t_1/t_W=t_2/t_W=t_3/t_W=0.333$ ならば，各拍は均等(1:1:1)である．

最小二乗近似により各拍における回帰式 L_{W1}, L_{W2}, L_{W3} を得た．

$$L_{W1}: y=0.0019x+0.1888 \tag{6}$$

$$L_{W2}: y=-0.0008x+0.4067 \tag{7}$$

$$L_{W3}: y=-0.0011x+0.4045 \tag{8}$$

これらは，テンポが速くなるほど 3 つの拍が均等に演奏されることを示している．例えば BPM=60 の時 0.303:0.359:0.338，BPM=75 の時 0.331:0.347:0.322 となる．

V.P.では，次拍の予測テンポを回帰式 L_{W1}, L_{W2}, L_{W3} の x に代入し，得られた各拍の比率に従ってテンプレートの各音の発音位置を補正する．

4.2 付点リズムパターン補正

付点リズムにおける各音の所要時間を聴取作業により取得し，テンポとの関連性を調べる．なお，ここで扱われる付点リズムは，長音と短音 2 つ合わせてちょうど 1 拍（指揮動作の 1 振り）になる場合に限られる．分析にはテンポの速い楽曲と遅い楽曲を用いることとし，速い楽曲には D.ショスタコーヴィチの交響曲第 11 番『1905 年』第 4 楽章第 1 主題（6～17 小節）を，遅い楽曲には A.ドヴォルザークの『ユモレスク』の主要主題（1～8 小節）を使用した．それぞれ 10 録音について聴取を行った．

各拍の所要時間を t_4, t_5[ms]，1 拍の所要時間を $t_D(=t_4+t_5)$[ms]とする．また，1 小拍のテンポを $x(=60000/t_D)$[BPM]とする．この時，長音の拍内における時間比率 t_4/t_D と x の関係を示したのが図 9 である．$t_4/t_D=0.75$ ならば，記譜通りの比率である．

テンポが速い楽曲においては，最小二乗近似により長音についての回帰式 L_D を得た．

$$L_D: y=-0.0007x+0.8183 \tag{9}$$

この式は，テンポが速くなるほど付点リズム(0.75)が 3 連符(0.666)のように演奏されることを示している．例えば BPM=150 の時 0.713，BPM=200 の時 0.678 となる．

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

一方，テンポが遅い楽曲においては，「溜め」を始め様々な音楽表現を付加することが可能であり，故に分散が大きくなる．この場合は記譜通り $y=0.75$ で固定化する．

これらより回帰式 L_D を(10)式のように定める．

$$L_D:\begin{cases} y=0.75 & (x\le 97.6) \\ y=-0.0007x+0.8183 & (x>97.6) \end{cases} \tag{10}$$

V.P.では，次拍の予測テンポを回帰式 L_D の x に代入し，得られた長音と短音の比率に従ってテンプレートの各音の発音位置を補正する．

5. 評価と議論

V.P.の狙いは，「実際にオーケストラを指揮する感覚」の獲得にある．それに対する評価として，(1)設計者自身による評価，(2)指揮の専門家による評価，(3)一般デモ参加者による評価，の 3 つを紹介し，議論を行う．

5.1 設計者自身による評価（iFP との比較）

V.P.では，従来の指揮者の視点に加えてオーケストラ側の視点を追加し，コンサートマスター機能として実装した．これにより従来の「オーケストラという名のソロ楽器を奏でるための楽器インタフェース」から，「指揮者とオーケストラのインタラクションによって演奏を生成する指揮インタフェース」へと進化を遂げ，インタラクション感・アンサンブル感，即ち「実際にオーケストラを指揮する感覚」を得ることができた．

この指揮感覚は，指揮経験者である設計者自身納得の行くものであるものの，客観的データとしてこの感覚を提示することは非常に難しい．そこで，iFP との比較を行うことによって，V.P.の評価を行う．

iFP における次拍の予測法は(2)式のとおりであるが，このうち A_n に関しては，移動平均により算出していた．予測次数は 4 で固定であった．この iFP の予測法に基づき，4 章と同様に『美しく青きドナウ』と『悲愴』交響曲の予測次数と予測残差の関係を調べると，図 7-a2，7-b2 のようになった．これにより，iFP に比べ，コンサートマスター機能を使った方が予測の精度が上がることが実証された．

5.2 指揮の専門家による評価

指揮者・作曲家の保科洋氏，指揮者の大河内雅彦氏に，V.P.を使用・評価していただいた．

保科氏のコメントは以下のとおりである．

- コンサートマスター機能をオンにした時とオフにした時とでは，オンにした時の方が実際の指揮に近い感覚を得た．
- ウィンナワルツのテンポ感とディレイ感が本物のそれに非常に近い．
- チャイコフスキーの『悲愴』交響曲第 1 楽章第 2 主題(espressivo)において，急激な ritardando に V.P.が追随しきれていない．
- アマチュアの指揮訓練への応用が可能である．

これらのうち 3 番目のコメントに関しては，プレイヤの ritardando の意図に予測が追いつかず，指揮者よりも先に次拍の音が出てしまうということである．これを解決するためには，拍点以外の指揮動作をセンシングが必要であり，そのためには指揮動作における加減速，極大値などを捉えることによって予測精度を高める必要がある．大河内氏も拍点以外の指揮動作のセンシングの必要性を挙げており，予測精度の向上以外にも，精密な音量制御など様々な指揮法のシミュレートに応用可能であろうとのコメントを得た．

拍点以外の指揮動作のセンシングのためには，より細かなサンプリングが不可欠である．V.P.で使用しているジェスチャセンシングデバイスはいずれもサンプリングレート 10[ms]～11[ms]であるが，3～5[ms]程度は必要であろう．また，最も安定して拍を検出できる MIDI テルミンは，静電容量を MIDI 信号に変換しているため，変化幅が[0 127]と極めて狭く，精密な測定には向いていない．

これらを鑑み，今後は本物のテルミンを使用して音響信号をリアルタイムにピッチへと変換し，拍点検出に用いることを考えている．

5.3 一般デモ参加者による評価

V.P.は，これまでに EC2009，インタラクション 2010，NIME2010 などの諸学会，及び予感研究所 3 においてデモ展示を行った．延べ数千人が V.P.を体験し，アンケートも同時に実施された．

アンケート回答者（150 名）のうち，音楽歴が長く楽器体験もある人か（全体の 2 割程度）からは，さらに本物の指揮に近づけるような工夫として，左手の使用や精密な音量制御等の高度な指揮技法のシミュレートについて提案を受けた．特に左手については，動作に一意性がないため V.P.では扱っていないものの，例えば楽器の指定や音量の指示など，用途を限定してのシミュレートを考えている．

音楽歴の少ない人からも多様なコメントが寄せられたが，その中に「操作が Wii Music よりも難しいが，そのことがかえって本物らしくて良い」との意見が複数あった．指揮やアンサンブルを経験していない人は，オーケストラをあくまで指揮者のためのソロ楽器と見なしており，100%音楽を支配することを望む傾向にある．そのようなプレイヤの場合，コンサートマスター機能をオフにした方が気持ち良く指揮できるとのコメントを得た．一方で，コンサートマスター機能をオンにすると，音楽に引きずられてテンポが次第に遅くなっていく，というケースが頻発した．しかし，「音楽に合わせるだけではなく，自分のテンポ感を忘れずに，オーケストラとの協奏を意識し

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan

て」と教示すると，次第に破綻は解消され，結果,「実際にオーケストラを指揮する感覚」を体験できたとのコメントを多数得ることができた．これは「誰でも振れる指揮ゲーム」だけでなく,「敷居は高いが本物志向の指揮システム」に対しても高いニーズがあることを示している．

6. おわりに

本稿では,「実際にオーケストラを指揮する感覚」に焦点を当てた指揮システム VirtualPhilharmony の提案を行った．従来になかったオーケストラ側の視点を追加し，指揮者とオーケストラのインタラクションによる演奏の生成という，実際と同じ方法をシミュレートするためにコンサートマスター機能を実装した．そのためにオーケストラ指揮に関するヒューリスティクスを多数導入した．コンサートマスター機能においては，個別事例に対応した次拍のテンポ予測を行い，その予測テンポに応じて演奏表情テンプレートを補正した．指揮の専門家や数千人のデモ展示体験者から，良好な評価と改善点が得られた．

今後は，本物のテルミンを用いた拍点以外の指揮動作のセンシング，精密な音量制御，左手による指揮動作のシミュレート等を行っていく予定である．

参考文献

1) ICMA Video Review, Vol. 1, 1991 (90 minutes) Review of research in Computers and Music.
2) Usa S., Mochida Y.: A Multi-modal Conducting Simulator; In Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC'98), pp. 25--32 (1998).
3) Borchers, J., Lee, E., Samminger, W. and Mühlhäuser, M. “Personal Orchestra: A real-time audio/video system for interactive conducting.” ACM Multimedia Systems Journal Special Issue on Multimedia Software Engineering, 9(5): 458-465, March 2004.
4) Katayose H., Okudaira K.: 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).
5) Wii Music (任天堂)
http://www.nintendo.co.jp/wii/r64j/
6) i カンタービレ (Crimson)
http://www.crimsontech.jp/jp/conductoron/index.html
7) 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, pp.1-12 日本音楽教育学会学会誌 第 34-2 号 (2004).

ⓒ 2010 Information Processing Society of Japan