

## HMMとファジィを使った指揮認識システム

宇佐 聡史  
工学院大学(ヤマハ)

持田 康典  
工学院大学

概要：人の指揮を廉価な加速度センサとパソコンで高速に認識，実時間に音楽演奏を制御するシステムを試作した。指揮要素の9割を指示可能とされる右手に注目し，指揮法に則った普遍性の高い重要な要素，即ち曲の演奏開始や停止，アゴーギクを含む拍タイミング，何番目の拍か，フェルマータ，デュナーミク，一部のアーティキュレーションを認識。拍打動作からオーケストラの発音までの時間遅延も考慮した。動作認識にHMM(隠れマルコフモデル)を適用した他，人の認識に倣って曲の知識や演奏情報の活用をファジィ技術で実現。特徴量の揺らぎと時間揺らぎを一度に吸収できるHMMの長所が，音声認識と同様に指揮認識にも有効だった。

## Conducting Recognition with HMM and Fuzzy

Satoshi Usa

Yasunori Mochida

Kogakuin University (Yamaha)

Kogakuin University

Abstract : A conducting recognition system which follows human conducting in real-time has been manufactured experimentally. Since most of the conducting elements can be directed with only right hand, the system recognizes important and universal right hand conducting elements conforming to the grammar of conducting : i.e., beginning and ending of a piece, beat timing, tempo rubato, the beat number in a measure, fermata, dynamics, a part of articulation. HMM(Hidden Markov Models) has been applied to cope with both time variance and the parameter characteristics' variance of input gesture. Fuzzy technique are also applied to recognize on the model of musicians' recognition process.

### 1. はじめに

指揮の機械認識には先行研究が多くある。特殊な操作子を作ってテンポやデュナーミク，音色を制御した初期の研究[1,2,3]，指揮動作を検出するのに，振る強さに応じて変形する把持部の内部圧力[4]や，温度センサ[5]，ペン・インターフェイス[6]，マウス[7]などを使ったり，手で持つマークをカメラで取込んだ研究[8,9]，左手ジェスチャーをデータグローブで採取[10,11]してスラー，ポルタメント，ピアノシモなど音楽要素を制御したり，動作軌跡のローカルピークQ値から滑らかさを抽出した研究[12]などがあつた。しかしデータグローブは応答が遅い上に高価であり，また画像処理では撮像フレーム周波数に伴う時間分解能の限界のため拍点認識に0.1秒もの遅れがある[13]他，フラッシュで誤動作するなど照明の影響を受けやすい。このため新しい研究では加速度センサが使われている[13,14]。発音タイミングと音量を制御したり[15]，ニューラルネットで10種のジェスチャーを弁別して演奏のスタート，ストップなど制御コマンドに対応させた研究[13,16,17]があつた。一方，MITメディアラボのDigital batonは加速度の他に指揮棒の向きや把持部を握る圧力を検出して様々なパラメータを制御し，楽器としての新規性を追求した[18]。これら先行研究の多くでは指揮法に則った要素はテンポと音量だった。

ここでは指揮法に則った動作で音楽演奏制御する廉価な試作システムを紹介する。指揮法では左手が無くてもオーケストラを完全に誘導可能で例えば左手は右手の指示を補うに過ぎない[19]とか，指揮要素の9割は右手だけで指示可能とされる。そこで右手に注目し，指揮法に規定されたり音楽学部で教える基礎的で普遍性のある重要な要素に認識対象を限定した。

右手指揮動作を加速度センサで採取，曲の演奏開始(出,予備動作)や停止，自然な拍タイミング，何番目の拍か，アゴーギク(テンポ変動)，フェルマータ(任意の長さの音符や休符を延

ばす), デュナーミク(音の強弱), 一部のアーティキュレーション(奏法)をパソコンで実時間に認識, 音楽演奏制御した. 拍打動作からオーケストラの発音までの時間遅延も実現した. 認識処理は人の認識に倣って構築した. HMMを狭義の動作認識に適用した他, 曲の情報や演奏中のテンポ情報の併用もファジィ推論で実現した.

動作で電子音源を制御する様々な様式が研究されてきた[20,21]が, 指揮は長い歴史の推敲を経て指揮法として系統立っており, 且つ世界共通である. 当稿では指揮法の基礎に則る.

## 2. 指揮について

指揮法[19]に規定されている, 或いは音大指揮科で教える基本的で普遍性のある右手指揮要素を表1に示す. 指揮者の要件として他に, 人格, 人柄, カリスマ性, 気, 相性, 心などを挙げることもあるが, 当稿では扱わない. 指揮は両手, 目, 顔, 体など異なる部位の異なる動作で複数独立に, 必要により同時に使って意図伝達するので, 典型的なマルチモーダル・コミュニケーションと言える[22]. しかし前記理由により当稿では右手に注目する. 右手指揮動作の軌跡図形例を図1に示す. 2つ振りと3つ振り, 各々のエスプレシボとスタカートの例である. 軌跡図形にはバリエーションがある.

表1 右手指揮の要素と動作 (普遍性の高い重要な要素)

指揮要素	動作	当法
タイミング		
出(曲の演奏開始)	予備位置から1拍前をin tempoで振り始めテンポと強さを指示.	○
アインザッツ(cue)	入り(奏者の演奏開始)の前に, そのパートに向けて指示. (Einsatz)	不要
曲の終わりや切り	手首で叩くか, はっきり手を停止. 揃って切れ難い場合のみ必要.	○
拍子とテンポ	指揮動作軌跡の図形(1~7つ振り). 小節頭は下方に叩き省略不可.	○
拍のタイミング	指揮法の軌跡図形上に規定された箇所を通過した時点. 高さ方向の極小点通過時とは限らない. 厳密には指揮者や楽団で違う.	○
アゴーギク	テンポ変動. テンポ変化開始の拍の前に指示.	○
リテヌート	特定の拍で棒を止めずに待つ. 拍打点直後を極度に遅くする.	×
フェルマータ	終わりは「切り」で指示. ピアノや休符の場合は棒を止めるのみ. フォルテでは棒を徐々に持ち上げたり細かく震わす.	○
強さ(大きさ)		
デュナーミク	図形の大きさ. f, mf, mp, p, cresc., dim., sfz,等の強弱.	○
アクセント	1拍前に予備的運動を行い, アクセントの拍を強く振る.	○
奏法(Articulation)		
スタカート	各拍ではっきりと停止. 素早く直線的. 軌跡図形は小.	○
エスプレシボ	曲線的で滑らかな図形. (レガート)	○
ノンエスプレシボ	上記2者の間. エスプレシボとスタカートの程度や切替は棒だけで示し得る.	○
マルカート	各拍で停止. 拍間がスタカートより緩やか. 重厚で力強い.	×
テヌート	各拍で停止. マルカートより軽い.	×
フレージング	フレーズの終わりで調子が弱まる.	×

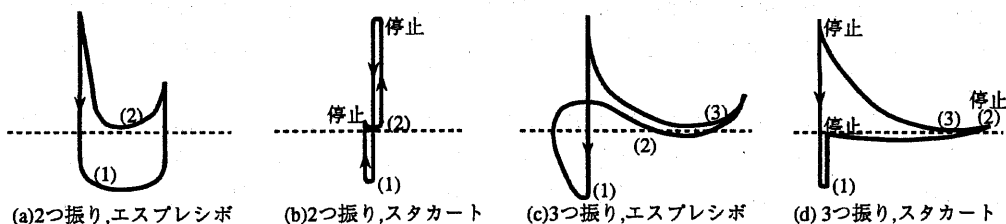


図1 指揮動作軌跡の例

指揮認識で問題となる要素について述べる。

明瞭で揃った曲の演奏開始(出)の指示と同時に、冒頭のテンポやデュナーミクを指示するため、指揮者は演奏開始前に1拍余分に振る。これを予備運動、この拍を予備拍と呼ぶ。

曲の拍子と打数(1小節を幾つに振るか)は必ずしも同じではない。使われ得る打数は4拍子や2拍子では4つ振りや2つ振りや1つ振り、3拍子では3つ振りや1つ振り、5拍子では2+3や3+2などである[23]。例えば3拍子でもワルツは大抵1つ振りであり、4/4拍子をアラプレーベ(2/2拍子)で振ることも多い。拍子と打数が異なる例、或いは曲中で変わり得る例を下に挙げる。

- ・テンポが遅い、速い、或いは大きく変化する場合。

例：J.シュトラウス:美しく青きドナウの冒頭を3つ振り、中間部のワルツは1つ振り。

- ・4拍子や2拍子の中の3連符。

- ・不慣れな曲の練習し始めでは細かく振って、慣れてきたら打数を減らす場合。

- ・指揮者の考えで異なる場合。

例：モーツァルト:交響曲第35番第1楽章は指揮者により4つ振りだったり2/2だったり。

例：ワーグナーの4/4拍子を重厚感出すためにアラプレーベで振ることがある。

- ・テンポ変化が無い区間で、拍の指示を省略しても支障無い場合。

このように打数はテンポと拍子だけでは確定せず明記された法則も無い。従って指揮者は必ず奏者に打数を予め伝えねばならない[23]が、暗黙の了解であることも多い。曲中で打数が変わる場合、打数の変化とテンポの急変を弁別するためには、拍打動作が何番目の拍に相当するか認識が必要となる。

指揮法では奏者が発音するタイミングは図1内(n)で示した位置を通過した時点とされているが、従来の指揮認識研究では指揮動作軌跡の高さが極小となった時点や加速度波形のローカルピーク生起時点を採用していた。当システムの試作過程でもこのタイミングを拍として使ったところ、発音が早過ぎる時があるとか不自然という指摘が指揮習熟者から出た。実際のオーケストラやブラスバンドでも指揮動作が最下点を打った時点と奏者が発音する時点は必ずしも一致しない。この拍タイミングの取り方、つまり最下点の時点から発音までの時間遅延量は、指揮者と楽員(オーケストラの奏者)の間の暗黙且つ共有の習慣で、指揮者やオーケストラによって異なる。一般にドイツ系のオーケストラは反応が遅く、アメリカのオーケストラは早いとされる。指揮者との会話や指揮習熟者による試作評価によると時間遅延には多くの要因が関与するが、最も密接なのはテンポである。テンポが速ければ時間遅延量は小さく、遅ければ大きい。当試作の過程で、ある日本人指揮者に試奏を依頼し、指揮するテンポと発音までの時間遅延量の最も自然に感じる組合せを探った。その結果、メトロノーム(1分間の打数)50で100msec.の時間遅延挿入が丁度良く、メトロノーム110では時間遅延の挿入は不要だった。逆にメトロノーム50で時間遅延を挿入しないと発音が早過ぎた。この際、指揮者は日本のオーケストラの指揮を想定していた。指揮の学び始めでは一般にオーケストラの出(発音)を遅く感じ、更にもその発音を聴いて指揮動作をそれに合わせたりしてしまうため、どんどん演奏が遅くなる現象が頻発する。

打点が示すのはタイミングだけである。アーティキュレーションや音のニュアンスは打点間の振り方や動作軌跡形状で指示する。スタカートとレガートの程度や切替は、右手だけで指示し得る。

### 3. 認識システムと認識処理

3-1. 認識システム : システム構成を図2に示す。

指揮動作は図1のように2次元の動作軌跡として表されるので、縦横方向検出用の加速度センサ2個を指揮棒に装着した。センサは東ブレ(株)静電型加速度センサTPR70G-100。この種の加速度センサは1個数千円で、3次元位置センサ付のデータグローブより2桁以上廉価である。センサ出力はパソコン内蔵のA/D変換器で取り込む。A/D, 認識処理計算, 音楽再生の一連の処理を10msec.毎に繰り返す。

図1の軌跡図形に合わせて丁寧に指揮した際の加速度センサ出力波形の例を図3に示す。各々の右は2次元の加速度軌跡の1周期分, 左は加速度絶対値の時間域波形3秒分である。

コンピュータ上にMIDI規格の曲データを記憶しておき, 指揮認識結果に基づいて拍タイミングや音の強さを制御しながら再生した。再生MIDIデータはヤマハMU80で音響信号に変換した。前処理以外の認識処理はパソコン(Pentium90MHz)で余裕をもって20msec.内に済む。

3-2. 認識処理 : 人は, (i)指揮動作軌跡形状(狭義の動作認識)だけでなく, (ii)演奏中のテンポに基づく拍予測や, (iii)演奏中の曲の知識, も併用して指揮認識していると考えられる。これに倣い, 対応する処理を担う複数のブロック(以下,agentと呼ぶ)で認識処理を構成した。人の指揮認識と当システムの処理の対応を表2に示す。agent-1はHMM動作認識, agent-2は演奏中のテンポからの拍打生起予測, agent-3は曲データ上の拍生起可能性分布計算, agent-4はagent-1,2,3各出力を統合する判定部である。

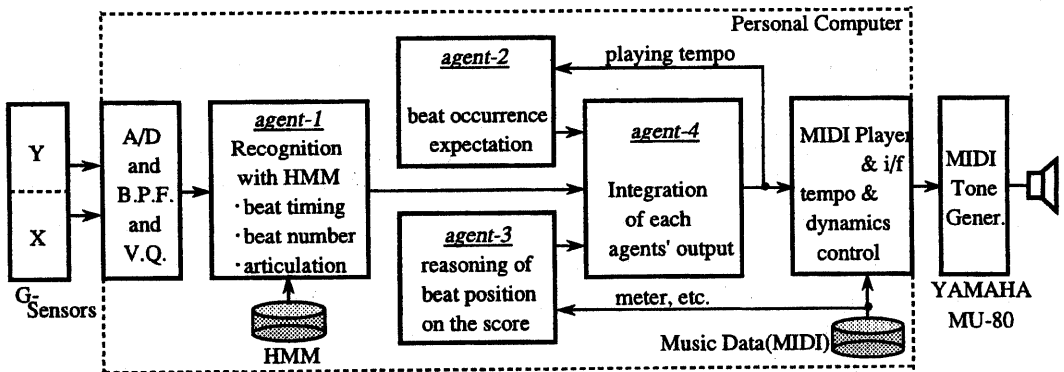


図2 指揮認識システム

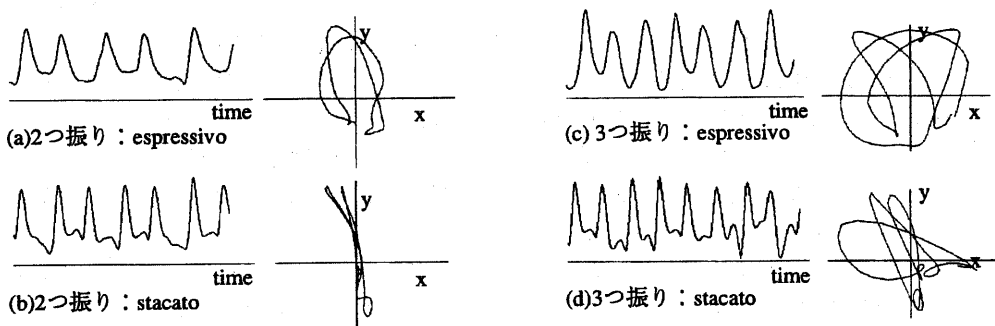


図3 加速度センサ出力波形の例(2次元軌跡1周期分と絶対値時間域波形3秒分)

表2 人と当システムの認識手法の対応

人の認識手段	認識の対象	当システムでの実現方法
指揮する右手の動作軌跡形状	・拍子 ・拍打生起時点 ・何拍目か ・アーティキュレーション ・デュナーミク	HMM (agent-1, 狭義の動作認識) 認識対象に対応する複数のHMMを設定, 学習済. ----- 加速度絶対値の大きさ
演奏中のテンポに基づく拍打生起予測	・拍打生起時点	ファジィ・ルール (agent-2) If(前拍打からの演奏テンポに基づく経過時間が短い) then(拍打生起の可能性が低い).
曲の知識の活用(打数は予め伝達)	・拍子 ・何拍目か, 他	ファジィ・ルール (agent-3) If(演奏中の箇所が曲データの拍や音符に近い) then(拍打入力がそれに相当する可能性が高い).
総合判断(上記複数条件から)	上記各要素	ファジィ・ルール (agent-4) If(agent-1,2,3各出力が3拍目の可能性が高い) then(3拍目の拍打入力生起の可能性が高い), 他.

3-3. HMM認識(agent-1, 狭義の動作認識) : HMMとはラベル系列を出力する確率遷移過程(マルコフモデル)である。音声認識ではHMM方式が高い認識性能のため多くの認識システムで使われ標準技術となり、ニューラルネットの研究はすっかり下火になった[24]。HMM認識の詳細については解説文献[25]があるので、当システムの概略紹介に留める。図4に示すように、まず加速度センサ入力をその特徴量に基づいて32種のラベルに量子化する。特徴量は人の指揮認識に倣って設定した。即ち(a)動作の局所的な強さやそのタイミング(絶対値加速度時間波形のローカルピーク)、(b)動作の方向(加速度のxy平面内での角度)、(c)動作の滑らかさ(絶対値加速度波形の高周波数成分強度や、xy平面内の加速度軌跡の短時間面積)、(d)動作の一時停止の程度(絶対値加速度波形の谷の深さと時間)である。10msec.毎に32種のラベルのいずれかが出力され、そのラベル時系列がHMM認識処理へ入力される。

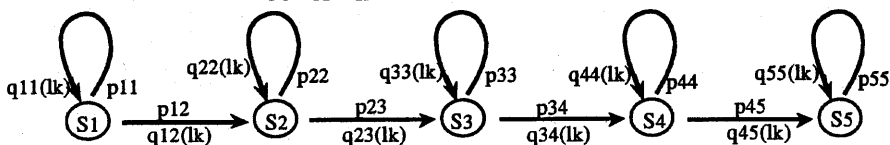
HMMは16種類の認識対象動作毎に設定、予め学習してある。例えば5番のHMMは「3つ振りの3つ目」等である。全HMMについて入力ラベル時系列を出力する確率(これを尤度と呼ぶ)を計算する。加速度絶対値の時間域波形ローカルピーク生起時に最大の尤度を示したHMMの番号が認識結果である。

HMM形式は飛越し無しのleft-to-right型、離散型で、遷移時にラベルを出力。HMMの定義を式(1)に示す。尤度を前向きアルゴリズム[25]で計算した。

- ・状態数  $N = 5$ . (状態:S1, ..., S5)
  - ・ラベル数  $K = 32$ . (ラベル:l1, l2, ..., l32)
  - ・遷移確率  $p_{ij}$  : 状態SiにてSjに遷移する確率.
  - ・出力確率  $q_{ij}(k)$  : 状態SiからSjへの遷移の際にラベルkを出す確率.
  - ・初期状態確率  $r_1 = 1, r_i = 0. (i=2, \dots, 5)$  : 初期状態がSiである確率
  - ・HMM数  $C = 16$ . : 認識対象の数
  - ・最終状態の集合  $I_f = \{5\}$  : S5が最終状態.
- (1)

このHMMのモデルMがラベル系列L=11, l2, ..., lrを出力する確率Pr(L|M), 即ち尤度は(2)式で得られる。

$$Pr(L|M) = \sum_{i_0} \dots \sum_{i_T} r_{i_0} p_{i_0 i_1} q_{i_0 i_1}(l_1) p_{i_1 i_2} q_{i_1 i_2}(l_2) \dots p_{i_{T-1} i_T} q_{i_{T-1} i_T}(l_T) \quad (2)$$



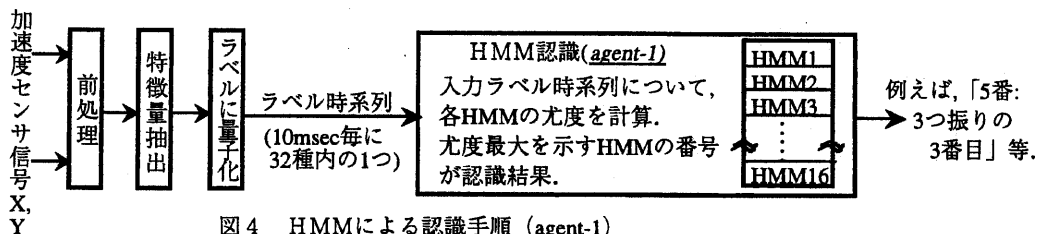


図4 HMMによる認識手順 (agent-1)

HMMの学習にBaum-Welchアルゴリズム[25]を使用。学習の元になる初期HMMは全HMMに共通で、全てのラベル出力確率を均一に設定。HMM学習に使った教師サンプルは1つのHMMにつき約100。

HMMは特徴パラメータの揺らぎを出力確率で、時間伸縮揺らぎを遷移確率で吸収する。両方の揺らぎを吸収できるので、音声認識と同様に指揮認識にも有効である。前述のように拍打動作入力为何番目の拍に相当するのか識別が必要であるが、HMMでこの識別をした。

### 3-4. 曲の知識や演奏情報の活用と各agent出力の統合 (agent-2,3,4)

演奏テンポからの拍生起可能性予測(agent-2)、曲データ上の拍生起可能性計算(agent-3)、各agent出力の統合(agent-4)を、If-then形式のファジィ・プロダクションルールで記述した。ファジィルール例を表2に、agent-2用のメンバシップ関数例を図5に示す。ファジィ推論演算にはmax-min演算、デファジィには重心法を用いた。agent-4では、agent-1で計算されたHMMの尤度や、agent-2やagent-3から出力される拍生起可能性を統合して最終判定する。ファジィ推論は、(イ)人のノウハウをIf-then形式で搭載し易い、(ロ)多くのパラメータが複雑に絡んでも大丈夫、(ハ)厳密な解析モデルが不要という特長を持ち、当システムの実現に適している。

曲データには拍子情報は含まれているが打数の情報は無い。曲データ読み込み時に「拍子=打数」に自動設定し、それに基づいてファジィ・メンバシップ関数形式で拍の生起可能性分布を図6(a)のように自動設定した。拍以外の音符のタイミングを指示する場合は図6(b)のようにマニュアル設定する。打数は演奏中でも任意に設定変更可能とした。

3-5. その他の認識処理 : 当システムは指揮法の予備動作に則って演奏を開始する。予備拍のタイミングと強さを音で確認することもできる。なお、アインザッツ(einsatz,奏者へのcue)は指揮者の重要な仕事の1つだが、奏者部分が機械である当システムでは出忘れが無いので不要である。

加速度時間波形のローカルピーク生起時点から、それに対応する拍の発音までには、前述のようにテンポで変化する時間遅延が必要である。そこでテンポの線形関数で表される時間遅延を挿入した。

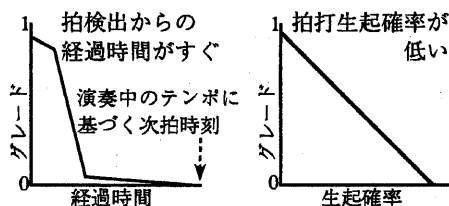


図5 ファジィ・メンバシップ関数例

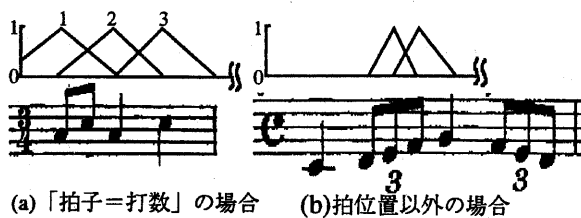


図6 曲データ上の拍打生起可能性分布の例 (agent-3用)

拍入力に追従して曲データを再生することでアゴギクに対応した。指揮動作を止めると同時に音楽再生も停止し次の動作入力までそのまま待ち続ける。発音状態で動作を止めれば音が鳴り続けるので、フェルマータも任意の長さに延ばし続けることができる。休符のフェルマータも同様。

当システムでは手を停めると同時に音楽演奏も停止する密な制御が基本であるが、曲データにモード切替マークを記入することで、手を停めてもその時のテンポで演奏を継続するモードへ切替えたり元に戻したりすることを可能とした。

指揮法によるとデュナーミクは右手指揮動作図形の大きさで表す。しかし指揮者の動作を観察するとテンポの遅いレガートがフォルテを意図しないのに大きな図形になるような場合が多々ある。当システムでは動作軌跡の大きさではなく、加速度の大きさでデュナーミクを制御した。アクセントも局所的なデュナーミクとして対応した。

アーティキュレーションの内、スタカートからエスプレシボの間の程度を認識した。指揮法によるとスタカートには棒が停止する瞬間があるがエスプレシボは滑らかに常に動いている。図1や図3に示したようにスタカートは鋭くエスプレシボは滑らかな動作である。奏法や音のニュアンスは拍打の瞬間ではなく拍間の指揮動作形状で指示するので、拍間の動作の滑らかさや動作の一時停止の程度を検出した。

曲データは市販のものを使用。指揮認識に基づいて曲データを再生する際、曲データ内のテンポ情報は使わず指揮認識出力だけにに基づき、デュナーミクは曲データ内の強弱情報(MIDIのVelocity)に指揮認識からのデュナーミク係数を乗算した。アーティキュレーションはMIDIにパラメータ規定が無いため、認識出力を使わなかった。

3-6. 効果 : 図1のような指揮法に則った丁寧な指揮動作をほぼ間違いなく認識した。

試作の過程で動作軌跡だけ、即ちagent-1のHMMだけで2つ振りと3つ振りの認識を試したところ、学習用教師データ提供者の丁寧な指揮動作を96%、それ以外の人の動作を92%の率で認識した。他の動作認識研究でも、教師データを提供していない人の手振り動作認識率がHMMでは9割台を維持したのにDPマッチングでは7割台に落ち、不特定者の動作認識にHMMが有効であることが確認されている[26]。しかし短い曲1曲にも数百の拍があり、認識率96%では1曲通すこともできず、音楽演奏には全く不十分だった。従って、認識処理への曲や演奏の情報の併用は不可欠である。

指揮の習い始めでは前述の問題が頻発するので、当システムでオーケストラの出の感触を予め把握したり、自分のテンポの維持を訓練ができれば、指揮の練習に有効と考えられる。

#### 4. 結論

人の指揮に従う音楽演奏システムを試作。指揮法に則った普遍性高い重要な要素を認識し、実時間に音楽演奏を制御した。拍打動作からオーケストラの発音までの時間遅延も実現し、指揮練習への応用の可能性も示唆された。データグローブより廉価で画像処理より高速。HMMだけでなく、人の指揮認識に倣った処理が有効だった。今後の課題として、より多種のアーティキュレーション認識、アーティキュレーション認識結果の音への反映、センサ部の無線化、などが挙げられる。

謝辞：東京芸術大学音楽学部指揮科佐藤功太郎先生には、実地の演奏や教育活動に基づいた、指揮法に記されていない様々な指揮について知見やアドバイスを頂戴した。深く感謝致します。有益な議論を頂いた日本音響学会音楽音響研究会の方々や早大橋本研究室澤田氏、本研究の機会を与えて下さったヤマハ株式会社石村社長、奥村取締役、和智取締役、鈴木楽器研究所長、永井主査に感謝します。

#### 参考文献

- [1]Max Mathews : The Conductor Program and Mechanical Baton, Stanford University CCRMA Department of Music Report No.Stan-M-47 May(1988)
- [2]Rubine and McAvinney : The Videoharp,Proc.of ICMC,pp.49-55(1988)
- [3]David Keane, Peter Gross : The Midi Baton, Proc.of ICMC,pp.151-154(1989)
- [4]橋本正治, 西田修三, 岩田一明 : シンセサイザにおけるマンマシンインターフェースに関する研究, 精密工学会誌,57/10,pp.118-123(1991)
- [5]岩下正剛, 大貫進一郎, 日向隆, 細野敏夫 : マンマシンインターフェイスによるシンセサイザー制御法の検討, H5年度日大理工学部学術講演会論文集,pp.677-678(1994)
- [6]井出成教, 加藤慎, 樋口高志, 堀内征治 : ペン入力音楽情報ソフト・カラヤンくん, エレクトロニクスライフ, '95.8号,pp.99-106,日本放送出版協会,(1995)
- [7]伊藤泰成, 清野博之 : 音楽指揮ソフトウェアMagicbaton, PFU Tech.Rev.,7,2,pp.56-61,(1996.11)
- [8]H.Morita,Sadam Ohteru,Shuji Hashoto : Computer Music System Which Follows A Human Conductor, ICMC,Proc.,pp.207-210(1989)
- [9]P.Carosi : Light Implemented Conductor Baton, Light Baton,(Computer Music Department of CNUCE/CNR, Pisa Italy)ICMA Video Review Vol.#1
- [10]H.Morita,Sadam Ohteru,Shuji Hashoto : Computer Music System that Follows a Human Conductor, IEEE Computer, Vol.24, no.7, pp.44-53, (1991)
- [11]Tod Machover, Joo Chung : Hyper-Instruments:Musically Intelligent and Interactive Performance and Creativity Systems, ICMC,Proc.,pp.186-190(1989)
- [12]原田勉, 森田秀之, 大照完, 橋本周司 : 指揮棒を用いた演奏制御, 情報処理学会第42回(平成3年前期)全国大会3N-5,p.1-313-314(1991)
- [13]澤田秀之, 橋本周司 : 加速度センサーを用いたジェスチャー認識と音楽制御への応用, 電子情報通信学会論文誌A,Vol.J79-A,No.2,pp.452-459(1996)
- [14]澤田秀之, 橋本周司, 松島俊明 : ヒューマンインターフェイスとしてのジェスチャー認識, 情報処理学会インタラクション'97論文集, pp.25-32(1997)
- [15]常山剛 : コンピュータ・オーケストラシステム空人について, INTEC Technical Report No.33, pp.57-69(1991)
- [16]Pitoyo Hartono,Kazumi Asano,Wataru Inoue,Shuji Hashimoto : Adaptive Timbre Control Using Gesture, ICMC Proc.,pp.151-158(1994)
- [17]Sawada Hideyuki,Ohkura Shinya,Hashimoto Shuji : Gesture Analysis Using 3D Acceleration Sensor for Music Control, ICMC Proc.,pp.257-160(1995)
- [18]Teresa Anne Marrin : Toward an Understanding of Musical Gesture: Mapping Expressive Intention with the Digital Baton, <http://japan.park.org/Events/BrainOpera/Archive/Thesis.html>
- [19]ルードルフ, 大塚明訳 : 指揮法, 音楽之友社(1968)
- [20]鈴木孝 : 音楽芸術と計算機, 情報処理, Vol.35,No.9,pp.830-835 (1994)
- [21]Roads,C. : the computer music tutorial, The MIT Press (1995)
- [22]宇佐聡史, 持田康典 : HMMを使った指揮認識システム, 日本音響学会音楽音響研究会資料, AA96-60 (1997)
- [23]大塚明, 他 : 新訂 標準音楽辞典アーテ, pp.749-752,音楽之友社,(1966-96)
- [24]古井貞おき : 音声認識, 電子情報通信学会誌, 11/95,Vol.78,No.11,pp.1114-1118(1995)
- [25]大河内正明 : Hidden Markov Modelに基づいた音声認識, 日本音響学会誌42巻12号pp.936-941(1986)
- [26]武士展照, 春山智, 小林哲則 : HMMを用いた手振り認識, 電子情報通信学会信学技報 PRMU96-8,Vol.96,No.40,pp.53-59(1996)