

計算機によるピアノ演奏動作の生成と表示

関 口 博 之[†] 英 保 茂[†]

鍵盤楽器の演奏は手と指のダイナミックな動きによって実現される。手指の動作速度には物理的な限界があるとともに、その動作可能範囲と方向は手指の腱、筋肉、骨格構造の制約を受ける。したがって、鍵盤楽器の演奏においては、手指への負担や動作の無駄を抑えた、合理的な手指の動作が求められる。しかし打鍵指の選択や手指動作に対する自由度はきわめて大きく、手本なしに理想的な演奏動作を習得することは難しい。本研究の目的の1つはこの「理想的」な演奏動作を、直感的に理解可能な3次元動画等を用いて提示することである。ここでは理想的演奏動作を、1. 譜面に忠実な演奏結果が得られること、2. 手指への負担を抑えた動作であること、3. 手指の運動量（変位・速度・加速度）が最小化されていること、の3点をともに高いレベルで満足する動作ととらえ、本稿ではこの演奏動作を生成するアルゴリズムについて述べる。本研究のもう1つの目的は「人間的」な演奏を計算機上で実現することである。従来の計算機による演奏は、1音1音を正確に発音する一方、音楽的表現に欠けたものになりがちであった。これは単にテンポや音量に、乱数的な変動を加えるだけでは解決できない。これに対し、提案手法では手指の動作を介して演奏結果を得ているため、人の手指の動作特性を仮想空間内の手オブジェクトに反映させることにより「人が弾いている」ような効果が容易に得られる。これをさらに発展させれば、ニュアンス表現をともなった自動演奏も実現可能になると考えられる。

Generating and Displaying the Human Piano Performance

HIROYUKI SEKIGUCHI[†] and SHIGERU EIHO[†]

The piano performance is realized by the dynamic hand and finger movements, which are constrained due to the anatomical components, such as tendons and skeletons. We have developed an algorithm that generates a kind of the optimal movements of hands and fingers at the piano performance. The optimal movements are obtainable by 1) finding the most appropriate finger assignments, 2) finding the smallest hand movement to play, and 3) calculating the finger position and bend angles to attack the key. The appropriate hand and finger movements in piano performance, obtained and shown in understandable 3D animations, will be quite useful for students in piano lesson. Another aim of this research is to realize a humane performance by computer. In this system, the sound is generated as a result of the interaction of fingers and a keyboard in the virtual space. So it is easy to modify the character of performance by changing the physical characteristics of the hand and fingers. This special feature will be useful to produce more realistic (humane) sounds of music than that of the computer music of today.

1. はじめに

鍵盤楽器の構造上の大きな特徴は、発音メカニズムを楽器内部に備えていることである。このため鍵盤楽器は、他の楽器に比べて発音がきわめて容易であり、またつねに正確な音程が得られる。したがって、鍵盤楽器の演奏は一見非常に簡単のように思われる。しかし、現実には、鍵盤楽器、特にピアノの習得には幼少期からの長期間にわたる練習が必要とされている。ピ

アノ演奏に高度のスキルが要求されることは、テクニック修得のみを目的として書かれた「練習曲」の数の多さからも容易に推測できる。

楽器の演奏動作は、音符の認識と演奏イメージの構築からなる知覚動作と、楽器に対する物理的な作用を行う身体動作から構成される。この双方に対し、鍵盤楽器の演奏には鍵盤楽器特有の難しさが存在する。

知覚動作における難しさは、鍵盤楽器が複音楽器であることに起因する。鍵盤楽器、特にピアノでは主/副旋律から伴奏まですべて1人でまかなうことが求められる。このため限られた時間内に膨大な音符の認知処理を行うとともに、複数旋律からの演奏イメージ構築という困難な作業が必要となる。

[†] 京都大学大学院情報学研究科システム情報論講座画像情報システム分野

Department of Systems Science, Graduate School of Informatics, Kyoto University

身体動作の難しさは、人間の手指と鍵盤間のインタフェースの不整合によって生ずる。鍵盤楽器特有の広い打鍵領域をカバーするために、手指には高速かつ正確な動作が要求される。しかし手指の運動能力には限界があるうえ、高速性と正確さを両立することは本質的に困難な作業である。さらに手指の動作可能な方向と範囲、運動特性は、骨格や腱の構造によって制約を受ける¹⁾。特に各指の長さや強さのバラツキ、中指から小指にかけての非独立性は、音の粒（音の強弱やタイミング）を描えて弾くことを著しく困難にする。

鍵盤楽器では知覚処理の難しさにとらわれがちであるが、実際にはこれらの身体動作に関する問題の方がはるかに解決は困難である。これは楽譜を暗譜した後（すなわち知覚処理の完了後に）多くの練習時間が費やされている事実を見れば明らかである。

これを解決するには、訓練によって手指の運動能力を改善するだけではなく、演奏が最小の手指運動で行われるように、弾き方の合理化を行うことが不可欠である。無駄な動きは簡単な曲では許容されても、難易度が上がった時点で対応不能になる。また手指の動作に十分な余裕がなければ、高度な音楽性や情感の表現はまず不可能であると考えられる。

誤った癖を後から修正することは多大な労力を要するため、練習に際しては正しい弾き方をつねに意識する必要がある。しかし演奏中における手指の動きは非常に複雑であるため、教則本に書かれた説明文や写真等から正しい弾き方を理解することは難しい。近年新しい試みとして、模範演奏の実写画像と楽譜を同時表示するピアノ教育支援システムが、大塚、袖山、村中、今西らにより提案されている^{2)~5)}。しかし実写画像を用いた手法では、1. 収録曲が限定される、2. 視点位置・方向が観察者の自由にならない、3. 演奏速度の変更が困難、4. ソフト自体が高価等数々の問題を抱えている。

ここでもし、計算機内で生成した演奏動作を図1に示すようなCGで表示可能になれば、これらの問題

はほぼ解決できると考えられる。また練習者の手指の寸法、運動特性を演奏動作の生成過程に適用すれば、個々の練習者に対し最適な演奏法を提供することも可能となる。筆者らはこのような理想的な演奏動作を3次元動画として練習者に提示することを目的として、これまで研究を進めてきた^{6)~15)}。

「理想的な演奏動作」の構成要素としては次の3点が考えられる。

- (1) 譜面に忠実な演奏結果が得られること
- (2) 手や指の各関節に負担をかけないこと
- (3) 無駄のないスムーズな動きであること

ここでは(1)~(3)を総合的に判断し、各条件とともに高いレベルで満足するような演奏動作の実現手法について考える。

なお譜面上の運指番号については、その多くが校訂者によって付加されたものであり、作曲者自身の音楽的意図とはほとんど関わりを持たない。また手指形状の個人差を考慮すれば、運指番号は厳守すべきものではなく、参考程度に扱うのが妥当であろうと考えられる。

本稿で述べる手法は「人間的な演奏を実現する自動演奏システム」への応用も可能である。計算機は譜面に記された音符情報を完璧に再現するが、その結果として、音楽的な表現に乏しい、無機質的な演奏になりがちである。もちろん単にタイミングや音量に乱数による変動を加えるだけでは「人が弾いているような」演奏を得ることは不可能である。

これに対し、本システムでは手指の打鍵動作を介して演奏結果を得ているため、手指の挙動に基づいた、タイミングや強弱の微妙な変動を生成することが可能である。したがって、操作者の指示に応じて手指の動き方を変化させることにより（たとえば、「やさしい雰囲気」を出したい場合には、手指の動作を遅くし、かつ指に加える力を弱める等）、操作者の表現意図を反映し、かつ人間味のある演奏結果を得られる可能性がある。これは本システムを自動演奏ツールとしてとらえた場合のユニークな特徴の1つである。

2. システムの構成

本システムの構成を図2に示す。右側の3D実装モジュールは仮想空間内に手指オブジェクトと鍵盤オブジェクトを構築する。左側の動作生成モジュールはシステムに入力された音符データ、各オブジェクトの寸法や動作特性をもとに、手指オブジェクトの演奏動作を生成する。3D実装モジュールにおける鍵盤オブジェクト各部の寸法は、鍵盤支点位置も含め、すべてピア

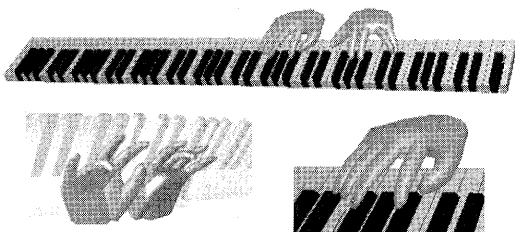


図1 3次元CGによる演奏動作表示例
Fig.1 Virtual piano performance.

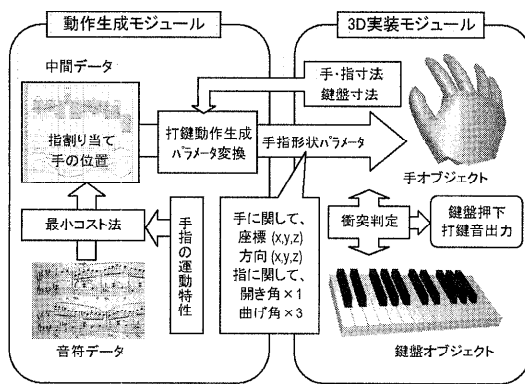


図2 システム構成図

Fig. 2 System structure.

ノ標準鍵盤の寸法を採用した。一方、手オブジェクト形状については、個人差に対応するため、指関節長や各指の基準軸方向からなる、各指13個のパラメータを個々に設定可能とした。

手と鍵盤オブジェクトは仮想空間内において実空間に準じた動作を行う。たとえば各鍵盤の沈み角は、指先端と鍵盤との位置関係によって定まる。そして鍵盤が所定の角度まで押し込まれた時点で、各鍵盤に対応した音程の打鍵音を発生する。なお実際のピアノ鍵盤では打鍵の強さ(打鍵速度)によって音量が変わるが、現時点ではシステムの処理速度と時間分解能の制約から音量の変化は未対応となっている。しかし音の強弱は音楽的表現をともなった演奏には欠かせない要素であるため、現在その対応を進めている。

3. 音符列からの演奏動作生成

本システムでは手オブジェクトから指を除いた部分を剛体と見なしている。したがって、手の自由度は、手の中心(重心)座標と各軸回りの回転を合わせた6となる。各指については、横方向の動きと3関節の曲げ動作が可能であることから、その自由度は4となる。したがって、手全体の位置と形状を一意に決定するには、合計26個(=6+4×5本)の形状パラメータを定める必要がある。

楽譜中の個々の音符には、音程(五線譜内の縦位置によって示される)、発音開始時刻(小節内の横位置)、発音持続時間(音符の玉と羽の形)の3種類の情報が含まれている。手オブジェクトの空間座標に関する情報は音程によって得られる。しかしこの情報からは鍵盤押下中の指先の横位置が分かるにすぎず、各時刻における手指形状を定めることは不可能である。そこでまず最初に、実際の演奏における手指の動きを調べ、



図3 演奏動作の解析装置

Fig. 3 Analyzing the performance.

演奏動作において各形状パラメータがどのように変化しているかを解析した。

演奏動作データの取得に用いた装置を図3に示す。演奏中の任意時刻における手と指先の位置を、3次元磁気センサとMIDI(Musical Instrument Digital Interface)出力を持つキーボードを用いて取得する。演奏中の各指各関節の動きについては、同時に録画したビデオ映像をもとにその解析を行った。

サンプル演奏は2人の被験者により取得した。被験者はいずれもアマチュアであるが、1人はクラシックピアノの上級課程を修了しており、もう1人はポピュラーピアノで20年以上のキャリアを持つ。したがって、今回用いたサンプルは本解析には十分な信頼性を持つと考えてよい。

サンプル演奏より取得した解析データの一部を図4に示す。これは「ドミソ」からなる分散3和音を4オクターブにわたって右手親指、人差し指、中指の順に用いて(最高音のみ小指を使用)弾いたものである。短い横線はその時刻に押し込まれている鍵盤の位置であり、これは同時に打鍵中の指先の左右位置も示している。プロット点の集合からなる山なりの曲線は手の中心点の動きを表している。

このグラフからは、1)演奏開始時、中間部、終了時において手の動きがほぼ停止していること、2)打鍵動作ごとに手の移動速度が減少していること、3)上昇時に比べて下降時の方が手の速度変化が少なく、なめらかな動きになっていることが読み取れる。

鍵盤を叩く指先位置は、打鍵指、指の開き角、手の横位置によって定まるが、1)から、指の選択と指の開き角の調節で鍵盤への位置合わせが可能であるならば、手はほとんど定位置に保たれることが分かる。また2)からは、打鍵動作は可能な限り手の動きを止めたいうで行われること、3)からは、上昇音列より下降音列の方が右手にとって弾きやすいことが推測できる。

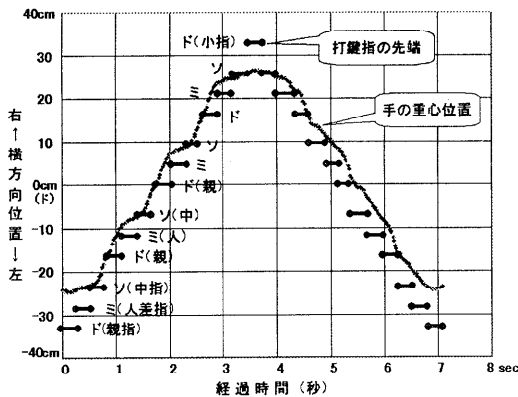


図4 手指運動解析データの例
Fig. 4 Example of hand-finger movements.

1) において手の位置が保持される理由としては次の2つの理由が考えられる。

(1) 手の移動は腕、肘、上腕全体の大きな動きをとまうため、正確かつ細かな動きがもともと困難であること。

(2) 手の動きとともにすべての指が動くため、各指の位置を演奏者が正確に把握することが困難になること。

数オクターブにわたるアルペジオ（分散和音）演奏が高等テクニックの1つであることから分かるように、手の広範囲な移動が要求されるほど演奏の難度は高くなる。これから逆に、手の動きを必要最小限に抑えることは、演奏法として理に叶っていると考えることができる。

このほか、同一指による反復打鍵、音階等を含む演奏データに対して手指動作の解析を行った。ここで得られた主な知見を以下に示す。なお本稿では指の各関節を付け根に近い方から第1、第2、第3関節と呼んでいる。

(1) 鍵盤楽器演奏における手指の動作は、発音時刻における打鍵動作と、鍵盤の選択ならびに鍵盤上の打点を定める横方向の移動動作とから構成される。以後それぞれ、打鍵動作、横動作と略記する。

(2) 横動作は打鍵動作の開始前に完了し、通常、同時に行われることはない。

(3) 横動作は親指では各関節の屈伸、他の指では指の開き角の変化によって行われる。

(4) 横動作における手の動きは、可能な限り最小化される。

(5) 黒鍵、白鍵の選択は指の第2、第3関節の屈伸による指形状の変化によって行われる。

(6) 第3関節の曲げ角の大きさは第2関節の曲げ角の大きさに依存する。

(7) 打鍵動作は、親指では指の開きによって、親指以外では第1関節の屈曲によって行われる。

(8) 打鍵動作中の指の形は固定される。すなわち打鍵中に第2、第3関節角は変化しない。

打鍵動作は指の第1関節の瞬間的な動きによって行われる、比較的単純な動作である。また白鍵/黒鍵の選択は、打鍵直前において各指の第2、第3関節角度を変化させればよい。これらはいずれも動作生成のための計算量が比較的少ないことから、本システムでは演奏実行時にその算出を行っている。

一方、横動作の生成には手の横位置、手の左右の振れ、各指の開き角、手指の寸法、運動特性等、数多くのパラメータを考慮する必要がある。本システムでは、特に計算量の必要な、指使いと手の移動経路の算出に関しては、音符データをシステムに読み込んだ時点であらかじめ計算しておく方式をとっている。

残りのパラメータである、腕を軸とする手の回転、手の上下方向の振れ、上下移動については演奏動作への寄与が他のパラメータに比べて低いことから、今回は特に考慮していない。しかしさらにリアルな手の動きを実現するためには、これらのパラメータに関する検討も当然必要になると考えている。

4. 手指の横動作の導出

本章では前章で述べた演奏動作の特徴に基づく、鍵盤上の打点を定める横動作の生成法について述べる。

4.1 パラメータの決定順序

指先の左右位置は、手の位置、手の向き、打鍵指、指の開き角の4パラメータによってほぼ定まる。そこで各音符より得られた指先位置から、逆にこれらのパラメータを導出することを考える。ただしこれらのパラメータの最適解を同時に算出することは困難であるため、ここでは各パラメータの重要性をもとに優先順位を定め、その順に各パラメータの最適解を求めていく手法を用いた。

最初に各音符に対する打鍵指の割当て（以後単に指使いと記す）を行う。これは不適切な指使いの下では演奏自体が不可能になってしまうためである。次に手の位置を決定する。これは前章で示した、理想的な演奏動作における「手の動きは最小限に抑えられる」という原則に基づくものである。

演奏中の手の向きは基本的に正面に向けられており、左右への振れが生ずるのは、手が体の中心から大きく離れた場合と、親指で黒鍵を弾く場合に限られる。そ

こで手の左右の振れについては、演奏実行時にこれらの状況に応じて修正を行う。

打点までの残りの位置合わせは、指の開き角の調整によって行われる。ここで優先度を低く設定した指に対し、大きな負担がかかることが懸念されるが、適切な指使いが選択されていればこの負担は各指に分散される。また次節で述べるように、指開き角の限界等については、最初に行う指使い決定アルゴリズムの中にすでに織り込まれている。したがって、この段階で実行不能な指開き角が算出されることは起こりえない。

4.2 指使い選択法

近年、ピアノ演奏における指使い選択に関する考察がいくつか報告されている。Sloboda ら¹⁶⁾は初見演奏における指使い選択の適切さと演奏者の熟練度との相関性について、16人のピアニストより得たテストデータをもとに評価を行った。Parncutt ら^{17),18)}は自らのピアニストとしての経験に基づき、指使いに関する12個のルールを提案し、これらのルールに基づいて適切な指使いの算出が可能であることを示した。

Parncutt の手法と、筆者らが提案する指使い決定法の間には、親指による黒鍵打鍵に制限を設けていること等、いくつかの類似点が存在する。しかし基本となる指使い評価に対するアプローチは大きく異なる。Parncutt の手法では指使いの妥当性を、打鍵鍵盤間の距離と各指間の最大/標準距離との大小関係をもとに評価する。これに対し本手法では後述するように、与えられた指使いを実現するための手の位置が存在するか否かをその評価基準としている。すなわち指と手のどちらを評価対象にするかが両者の大きな相違点と考えられる。

指使いを手の動きを介して求めることは一見回り道のように見える。しかし評価対象を手のポジション1つに絞ることができること（指を主体とした場合、指使いの妥当性を各指ごとに評価する必要がある）、手の位置移動を最小化するような指使いが実際に多く用いられていることから、本手法は効率的かつ有効な指使いの算出手法であると考えられる。実際 Parncutt の手法では、その適用範囲が単音かつ休符のない旋律に限定されており、しかも多数のルールに対しそれぞれ適切な重みを設定する必要がある等、その実用性には疑問が残る。一方、本手法では和音や休符への対応も実現しており、難度の高いピアノ曲に対しても十分妥当な演奏結果がすでに得られている。以下、筆者らが提案する指使い選択方法について述べる。

いま人差し指の開き角の可変域を図5の人差し指上に示した矢印の範囲と仮定する。左側は人差し指を右

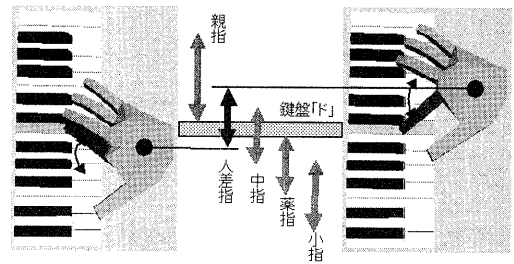
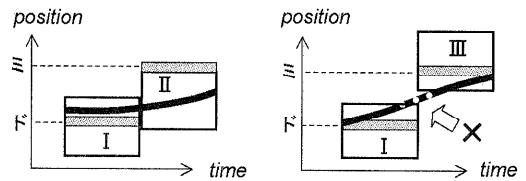


図5 打鍵指に対する手の存在範囲

Fig. 5 Possible hand position using the forefinger.



(a) 中指→薬指 : ○

(b) 中指→人差し指 : ×

図6 連続打鍵可能な指の割当て

Fig. 6 Fingering for the two consecutive notes.

一杯に曲げた手の状態を、右側は左一杯に曲げた状態を示している。この図から、人差し指を用いて図中の網掛けした鍵盤ドを弾くためには、手はこの2つの手の間に存在していなければならないことが分かる。手の中心点がとりうる範囲（以後手の存在範囲と記す）を同図中央の矢印で示す。

手の存在範囲は各指の手に対する位置、可変域の幅によって異なる。たとえば、親指に対する手の存在範囲は打鍵鍵盤の右側（図では上方）に位置し、また指の打鍵可能範囲が広いことから手の存在範囲も広くなる。他の指についても同様に打鍵位置と手の存在範囲との関係が同図中央に示すようにそれぞれ定められる。

次に2つの音を連続して弾く場合を考える。図6(a)はドとミを（中指→薬指）の順に弾く場合である。横軸は経過時間である。図5の結果から、中指でドを弾いている間、手は図6(a)の領域I内に存在し、薬指でミを弾いている間は領域II内に存在しなければならない。両領域は互いに接しているため、任意の時点において両条件を満たす手の位置（図中の太い曲線、以後手の移動経路と記す）が存在する。これはこの指使いにより2音を連続的に弾くことが可能であることを示している。

一方、2音目のミを人差し指で弾く場合、手の存在範囲は図6(b)の領域IIIとなる。ここで領域Iと領域IIIは互いに離れているため、両領域を連続して通

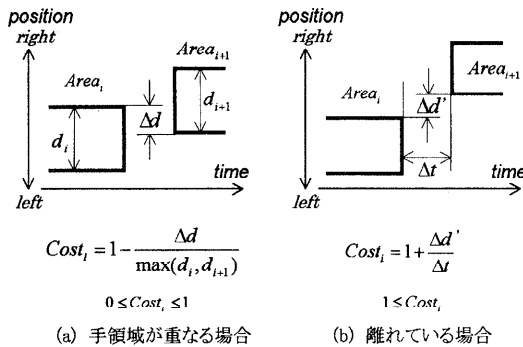


図7 指使いコスト計算法
Fig.7 Functions for fingering cost calculation.

る手の移動経路は存在しない。これは（中指→人差し指）の指使いによってドとミを連続して弾くことが不可能であることを示している。

このように、連続する複数の音符に割り当てた指使いの妥当性は、隣り合う手の存在可能領域の重なり大きさをもとに評価できると考えられる。なお両領域間に休符をはさむ場合には、手の存在領域に重なりがなくても演奏可能となる。この場合は休符の長さと同領域間の距離を考慮して、指使いの妥当性を評価する。

本システムで採用している、指使いの基本コスト計算式を図7に示す。

図7中の $Area_i$ は、 i 番目の音符がある特定の指で弾いた場合に、鍵盤押下中において手が存在すべき領域である。 d_i は手の存在可能領域の幅であり、これは打鍵指先端の左右可動幅に等しい。 $Area_{i+1}$ 、 d_{i+1} は $i+1$ 番目の音に対して同様に定めたものである。

(a) は隣り合う手の存在領域 $Area_i$ 、 $Area_{i+1}$ が空間的な重なりを持つ場合である。図中の $\Delta d (> 0)$ はこの重なり大きさを表している。この場合休符の有無を考慮する必要はなく、手の移動動作も基本的に不要である。しかし重なり領域の幅が大きくなるほど、指を弛緩した（左右開き角 $= \pm 0$ ）状態に置ける可能性が高くなる。すなわち、より大きな Δd に対しては、より低いコストを割り当てるのが妥当と考えられる。

この重なり幅 Δd を考慮した区間コスト $Cost_i$ の計算式を図中 (a) に示す。なお分母の $\max(d_i, d_{i+1})$ は、区間コストの正規化ならびに、各指ごとの手の存在領域幅のバラツキによる影響を抑えるためのものである。この計算式により、(a) の場合の区間コストはつねに 0 以上 1 以下の値をとる。

(b) は手の存在領域に重なりを持たない場合である。このとき、両領域間では手の移動が必須となる。この場合の区間コストは移動動作の難易度をもとに決定す

る。難易度は移動距離よりもそのときの動作速度に大きく依存すると考えられるため、ここでは図中 (b) に示す式を採用した。

図中の Δt は音符 i に対応する鍵盤を離してから、次の音符 $i+1$ に対する鍵盤の打鍵開始までの時間を示す。また、 $\Delta d' (> 0)$ は両領域間の距離を示す。

この区間で計算されるコスト $Cost_i$ の値はつねに 1 以上となり、(a) より必ず大きな値をとる。もし休符がない場合 ($\Delta t = 0$) はその時の区間コストは ∞ となる。

区間コストは 2 音間の弾きにくさを忠実に反映するものが理想的である。しかし、実際の弾きにくさは手の移動量だけではなく、指の強弱や弾く鍵盤の種類（黒鍵/白鍵）によっても影響を受ける。そこで図7(a)、(b) の関数によって計算したコストに対し、同一指による連続打鍵、親指による打鍵、親指による黒鍵打鍵の 3 動作について、それぞれの難易度に応じたコスト付加を行った。

同一指による連続打鍵は特定の指に大きな負担をかけることになるため、実際の演奏ではほとんど行われることはない。そこでこの動作に対する付加コストは ∞ とした。また親指はその構造上、打鍵動作が緩慢になるため、使用頻度を抑えた方が弾きやすくなる。そこで親指の使用時/非使用時のコストがほぼ同等である場合には、親指の使用ごとに 0.1 程度のコストを付加し、親指の使用頻度を抑制するようにした。親指で黒鍵を弾く場合は、さらに手の前後方向の移動も必要となるため、腕にも大きな負担を掛けることになる。そこでこの動作に対してはやや多めのコスト (1.5) を付加し、親指による黒鍵打鍵の頻度を大幅に減少させた。これらの付加コストの具体的な数値は、標準的な指使いに近くなるように実験的に求めたものである。

曲全体に対する指使いは、すべての指使いの組合せについて、各区間コスト $Cost_i$ を全区間にわたって累積した値をそれぞれ求めた後、この値を最小にする組合せとして選択される。したがって、一部でも $Cost_i = \infty$ となる区間があれば、その指使いを途中に含むものが選択されることはない。

1 つの曲には数百～数千の音符が含まれるため、指使いの組合せの数は天文学的な数になる。しかしある音符の指使いに対し、そこから十分に離れた音符が与える影響はほとんど無視できる。ここではある 1 つの音符に対する指使いを、それに先行する数個の音符をもとに決定することにした。実際に 6～7 音先まで考慮して決定した指使いは、それより先まで考慮して決定した結果とほとんど変わらなくなることが、実験的

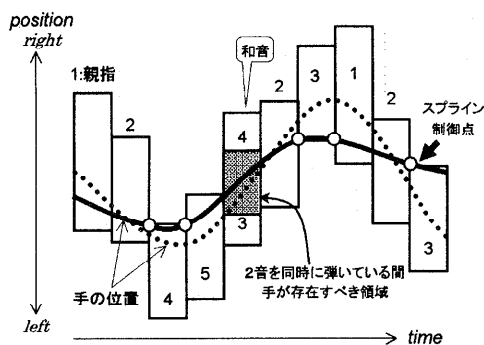


図 8 手の移動経路割当ての例

Fig. 8 Assignment of hand movement path.

に確かめられている。

4.3 手の位置の決定方法

曲全体を通した手の移動経路は、各音符に対する手の存在領域のすべてを通過する 1 本のラインとして定められる。手の移動経路の一例を図 8 中の点線で示す。

領域内を通るラインのとり方は無数に存在するが、求めるべきラインは手の動きを最小限に抑えたものでなければならない。このような手の移動経路を与えるラインは、すべての手存在領域内を最短距離で結んだ折れ線として求められる。

折れ線を移動経路とする手の動きはインパルスの加速度成分を持つため、人の手の動きとは明らかに異なったものになる。そこでこの線の折点を制御点とする 3 次自然スプライン曲線を求め、これを最終的な手の移動経路として採用することにした。3 次自然スプライン曲線は全区間で速度・加速度の連続性が保証されるため¹⁹⁾、ここで求めた手の動きは、なめらかでかつ自然な動きを与えるものとなる。本曲線による手の移動経路を図 8 中の実線で示す。図中の白丸はスプラインの制御点(元の最短経路の折れ点)を示している。

なお音符列に和音が含まれる場合は、各打鍵指に対応する手の存在領域の重複部を、新たな手の存在領域と考え、この内部を手の移動経路が通るようにすれば良い(図 8 中央の「和音」部分を参照)。

4.4 指開き角の決定方法

打鍵指と手の位置が定まると、指先を打鍵鍵盤の中心線上に合わせるための指先端の横方向変位量が確定する。仮想空間内の指オブジェクトは左右への開き角としてパラメータを受け取るため、以下の手法を用いて、この変位量を指開き角に変換する。

定常状態(指開き角=0)から打鍵完了までの指先の経路を図 9 の実線矢印(A → B → C)で示す。図 9

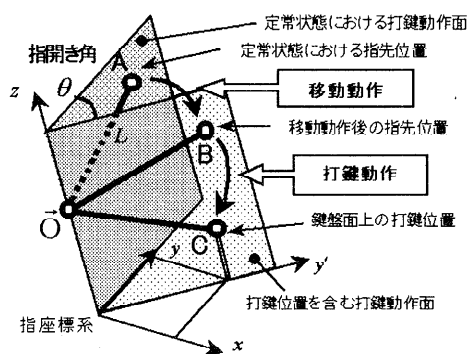


図 9 指先位置の移動経路

Fig. 9 Movement path of finger tip.

における x , y , z 軸は各指の基準座標軸である。指の付け根から指先へ向かう方向を y 軸、横方向(親指側から小指側)を x 軸、上下方向を z 軸としている。また指開き角変更後の y 軸を y' 軸として示す。

定常状態における指先(A位置)はまず横移動動作による指 z 軸回りの回転を行い、打点 C を含む打鍵動作面($y'-z$ 平面)上の 1 点 B に移動する。このときの回転角 θ が求めるべき指開き角である。その後、打鍵時刻において指先は指関節の屈曲によって打鍵動作面上を動き、目標鍵盤上の打点 C に到達する。したがって、指座標系における打点 C の座標 (x, y) が得られれば指開き角は $\theta = \arctan(x/y)$ として導出できることになる。

3 章で示したように、打鍵動作中に指の第 2, 第 3 関節角の大きさは変化しないことが分かっている。したがって、指の付け根 O から指先端までの直線距離 L は打鍵動作中において一定値となり、定常状態における第 2, 第 3 関節角ならびに各関節長から算出できる。さらに打鍵動作と横移動動作が同時に行われないことから、打鍵時における指原点(付け根) O も打鍵動作中の手の位置から求められる。

ワールド座標系における打鍵位置は、指付け根 O から距離 L にある曲面と目標鍵盤の中心線との交点として定まる。この打点座標を手座標系を介して指座標系に変換することにより、上図の $C(x, y)$ が求まり、ここから指開き角 θ を算出できる。

5. 結果と考察

5.1 演奏結果の評価

クラシックピアノ曲の中から比較的有名な 5 曲(エリーゼのために/ベートーベン, トルコ行進曲・ピアノソナタ(ハ長調)/モーツァルト, スケルツォ第 1 番・黒鍵/ショパン)を選び、これらの音符データを本シ

表 1 打鍵指割当て結果 (親指: 1, 人差し指: 2, 中指: 3, 薬指: 4, 小指: 5)
Table 1 Results of finger assignment. Each number means finger order.

小節番号	5	6	7	一致度
I				
楽譜記載の指使い	●○○ ○●○○ ●●●● ○●○○ 232 1235 4232 1235	○○● ●○○○ ○○○○ ○●○○ 123 4123 5432 1352	○○○○ ●○○○ ●●○○ ○●○○ 1413 2413 5214 1243	基準
a) 手位置のみ考慮	121 2124 3232 1235	121 2121 5432 1242	1312 1213 4213 1243	59%
b) 親指黒鍵打鍵制限	232 1245 4343 1235	123 4123 5432 1352	1413 2413 5213 1243	85%
II				
経験者Aの指使い	○○○ ●○○○ ○○○○ ●○○○ 121 2135 4343 2135	○○○ ○○○○ ○○○○ ○○○○ 123 4123 5432 1351	●○○○ ○○○○ ○●○○ ○○○○ 3521 3521 4124 1243	基準
経験者Bの指使い	121 2124 3121 2135	123 1234 5432 1241	3521 3521 4135 2132	61%
c) 上記(a)(b)を適用	121 2124 3121 2135	121 2121 4321 2131	2412 1312 4124 1243	48%
d) 親指使用制限	143 2124 3243 2135	123 1241 5432 1241	2413 2412 4124 1243	61%

※1 基準指使いの○は白鍵、●は黒鍵を示す ※2 白抜き数字は基準指使いと異なる指使い

ステムに入力して自動演奏を行った。各曲の音符数は両手パート合計で450~1850である。まずシミュレーションによる演奏結果について述べる。

これらのピアノ曲については、強弱やアクセントを除き、ほぼ楽譜どおりの演奏結果が得られることを確認した。これは生成された手指の演奏動作に破綻が生じていないことを示している。もちろんピアノによる演奏を想定していない譜面については、本システムでつねに演奏可能であるとは限らない。

本システムにおける演奏の正確さは次の3点に依存する。

- (1) 手指形状の更新間隔 (座標計算時間に依存)
- (2) 仮想空間上の指の運動速度
- (3) 定常状態での手指形状とその姿勢

更新間隔が長くなるに従って1フレームあたりの動作量が多くなるため、動作のなめらかさが失われていく。これが30ミリ秒を超えると打鍵タイミングの不揃いとして演奏結果に影響が現れてくる。したがって、更新間隔は短いほど望ましいが、現実には計算機の処理能力による制約を受ける。本システムでは3Dオブジェクトの表示サイズや描画インターバル回数を調整することにより、更新間隔を10ミリ秒弱としている。

打鍵動作の開始から鍵盤を打鍵するまでに要する時間は、打鍵前の指位置と鍵盤間の距離に比例し、指の動作速度に反比例する。したがって、各指の先端を鍵盤のすぐ上に待機させておき、指の動作速度を高め設定すれば、タイミング的にはほぼ正確な演奏が得られる。

逆に、初心者が陥りやすい弾き方、すなわち指を伸ばし気味にし、指の動作を緩慢にして演奏を行わせてみた場合、打鍵タイミングが不揃いになったり、音の欠落が生じる等、演奏も初心者と思わせるものとなった。現在のシステムでは、手指にかかる力や鍵盤の質量を考慮していないため、演奏結果から演奏動作の良否を客観的に評価することは困難である。しかしより高度なシミュレーションが可能になれば、演奏結果をもとに演奏動作のどこに問題があるかを指摘することも可能になるとと思われる。

なお、本システムでは、音の強弱ならびにペダリングについては未対応であるため、音楽的表現において不十分であることは否めない。この点は今後早急に改良すべき課題と考えている。

5.2 指使いの評価

本節では4章に述べた指使い選択アルゴリズムの評価について述べる。ここでは指使いの評価用題材として、幻想即興曲/ショパンの右手冒頭部分(小節番号5~7)を用いた。譜面を表1の上段(I)に示す。

このフレーズは、1. 演奏速度が速く、2. 黒鍵と白鍵の打鍵が交互に行われ、3. 急激な音程の上昇下降部分を持ち(6小節目)、4. 複雑に細かく動く旋律が含まれる(7小節目)等、演奏を困難にする要素を多く含んでいる。このため適切な指使いが特に要求されることになるが、これは生成した指使いの評価にはむしろ都合が良いと考えられる。

最上段の数字列は、楽譜上に記載された標準的な指使いである。なお各音符に対する指番号は、その前後

関係から明らかな場合、あるいは複数の指使いが考えられる場合には通常記載されない。このような音符に対しては、経験者の意見を参考にして最も標準的に用いられると思われる指使いを定め、表中に記した。

指使いの自動割当て結果を同表 (a), (b) に示す。ここでは各指の打鍵可能範囲を、定常状態の中指位置を基準に、親指： $-4.5\delta \sim +1\delta$ 、人差し指： $-2\delta \sim +0.5\delta$ 、中指： $-1\delta \sim +1\delta$ 、薬指： $0\delta \sim +2\delta$ 、小指： $+1\delta \sim +3.5\delta$ として計算した。ここに δ は標準鍵盤における白鍵の間隔 (23.5 mm) である。これらの値は演奏者の指の開き具合を参考にして定めた。

(a) の指使いは 4.2 節に述べた指使い選択アルゴリズムを用いて算出したものである。ただしここには親指の使用に対するコストはまだ付加していない。その結果、ここで算出された指使いは楽譜記載の指使いとはかなり異なった (一致度 59%) ものになった。特に親指による黒鍵打鍵が頻繁に行われており、実際にこの指使いで演奏することはほとんど不可能に近い。

(b) は黒鍵を親指で弾く場合に一定量 (+1.5) のコストを加えることにより、その発生頻度を抑えたものである。この条件の追加により、薬指の使用頻度が若干多目になることを除けば、楽譜記載の指使いにかなり近い (一致度 85%)、ほぼ妥当と見なせる指使いが得られている。

曲中に黒鍵が数多く含まれる場合は、指使いに対する制約が増えるため、標準的な指使いを生成することはそれほど難しくはない。そこで次に黒鍵打鍵頻度の少ない曲を用いて、どの程度妥当な指使いが得られるかを評価した。題材には先の曲を黒鍵の出現頻度が最少となる調に移調 (嬰ハ短調→イ短調) したものをを用いた。この譜面を (II) に示す。譜面の下に記した 2 種類の指使いは 2 人のピアノ経験者によってそれぞれ選択されたものである。

(c) は譜面 II に対し、譜面 I における (b) と同等の条件を適用して求めた指使いである。白鍵に対する親指の使用が 18 回もあり、経験者の 12, 14 回に対してかなり多い。これは親指の打鍵可能範囲が他の指に比べて広いために、親指の選択頻度が増えたものである。しかし親指は他の指に比べて敏捷性が劣るため、(c) の指使いは一応演奏は可能ではあるものの、速くならぬに弾くことは難しいものとなっている。

(d) は (白鍵、黒鍵を問わず) 親指を使用するごとに一定量 (+0.1) のコストを追加することにより、親指の選択頻度を減らしたものである。これにより親指打鍵が必要な箇所に限定された結果、より速く楽に弾くことが可能な指使いが得られるようになった。

(d) の経験者 A の指使いに対する一致度は 61% で、それほど高くはない。しかしこれは譜面 II は指使いに対する制約が小さく、もともと様々な弾き方が可能であったためと考えられる。このことは経験者同士の指使いの一致度が同程度であることから推測できる。実際、経験者によれば (d) と自分が選択した指使いを弾き比べても、弾きやすさはほとんど変わらないということであった。したがって、譜面 II に対する (d) の指使いも (b) と同様、練習者に提示するものとして特に問題ないと考えてよいと思われる。

5.3 手位置算出結果の評価

先の譜面 I に対する、指割当て、手と指位置の算出結果を図 10 に示す。4.3 節で示した方法により、すべての手の存在可能範囲を通り、かつその変位量を最小化した曲線が手の移動経路として得られている。なお 3 次自然スプライン曲線は制御点の間隔が広い場合には各点間をなめらかに接続するが、間隔が狭く、かつ変位が大きくなると、オーバーシュートを生じ手の動きを左右に波打たせてしまうことがある。特に難曲になるほど手の急激な動作が要求されるため、この現象が多発することになる。これには緩衝成分を含んだ関数形を用いる等の対策が必要と考えている。

図 10 の左側に示した 5 本の折れ線は、指先を打点位置に合わせるために各指に要求される変位量を示している。指の位置は打鍵中 (太線部分) しか特定できないため、非打鍵時の指位置は、打鍵の前後を直線で補間することにより求めている。しかしこの方法では指はつねにゆっくり動いていることになり、人の指の動きとしてはやや不自然なものになる。人の動作に近づけるには、動作の開始時刻の決め方や、打鍵終了後

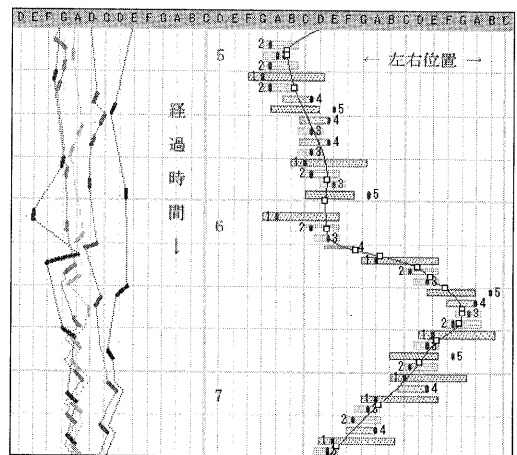


図 10 指割当てと手の移動経路算出結果

Fig. 10 Results of fingering and hand movements.

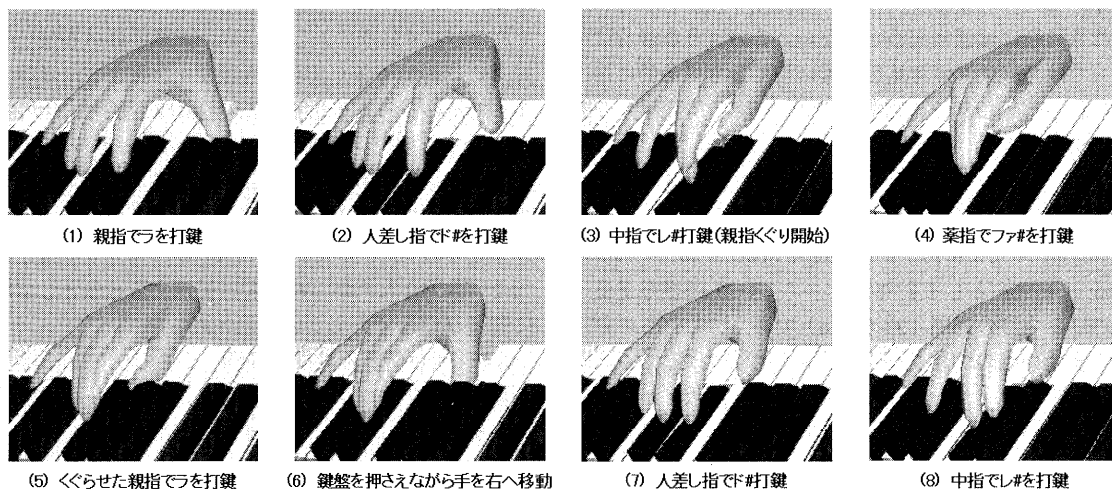


図 11 連続画像による演奏動作表示

Fig. 11 A series of produced images during performance.

の弛緩状態への復帰等について、さらに考慮する必要がある。

以上の算出結果より生成した一連の演奏動作を図 11 に示す。演奏範囲は、表 1 に示した譜面 I の 6 小節目、先頭音から 7 音目レ#までである。ここに示す範囲では手の小指方向への移動、親指の指くぐり動作が行われている。

5.4 処理時間

最後に今回作成した動作生成アルゴリズムの処理時間について述べる。以上の処理は 3 次元表示処理も含めて PentiumII[®] プロセッサ (300 MHz) を搭載したパーソナルコンピュータ上で行った。OS には WindowsNT[®] 4.0、開発言語には C++を用いた。

指使いは曲の先頭から 1 音ごとに求めていく方法をとっている。すなわち音符 i に対する指使いが確定しているとき、音符 i から n 音先までの区間コスト累積値を最小にする一連の指使いをまず算出し、その中の音符 $i+1$ に対する指使いを次の音符に対する指使いとして採用する。残りの音符 ($i+2 \sim i+n$) に対する指使いは、音符 $i+n$ が曲の最後になる場合を除き、使用せずに破棄する。

次の指の選択肢は現在使用中の指を除く 4 本となるため、計算範囲の音符数 n に対し、指使いの組合せの数は n^4 となる。理論上の全処理時間はこれに各指使いのコスト計算量を掛けた n^5 のオーダーとなる。実際には区間コストの累積値がすでに求めた累積コストの最小値を超えた時点で計算を打ち切っているため、実際の計算時間のオーダーはこれより小さくなる。

254 音の音符列に対する指使い算出に要した時間は、

6 音先まで計算した場合で 18 秒、7 音先では約 70 秒となった。すなわち計算範囲の音符数を 1 増やすごとに処理時間は約 4 倍になる。このように音符数に対して計算時間は指数的に増加するため、計算範囲は計算時間と指使い精度とのトレードオフを慎重に考慮して決定する必要がある。

単音の旋律に対しては 6 音先まで考慮すれば指使いはほぼ収束することが実験的に分かっているため、ここでは指使いの計算区間を基本的に 6 音とした。この場合の指使いの割当て速度は毎秒約 14 音符となり、処理速度として十分実用的な範囲内にあると考えられる。

手の位置決定については、同データに対する全区間の最短折れ線を求める処理に 6 秒、この折れ線をスプライン曲線に変換する処理に 8 秒要した。この処理時間はその原理上、音符数に比例するため、このオーダーの処理時間であれば特に問題にはならない。

6. おわりに

指使い選択、手位置、指開き角の算出から構成される、演奏動作生成アルゴリズムを考案した。これを用いて、仮想空間における演奏シミュレーションを行った。上級レベルのピアノ曲に対しても、ほぼ譜面どおりの演奏結果が得られていることから、本アルゴリズムの妥当性と実用性が検証できたと考えている。また手指の動作速度を加減することにより、人の演奏に類似したタイミング変動を含む演奏結果が得られることを確認した。

しかしピアノ演奏における手指の動きは非常に複雑であり、手首の回転や手の上下位置変化等、今回考慮

対象としなかったパラメータも数多く存在する。これらについては順次対応を行い、より自然かつリアルな人の手の動きに近づけていきたいと考えている。

今後は、(1) 生成される動作の信頼性を高め、教育用ツールとしてのクオリティを持たせること、(2) 手指動作特性の変化を介して、より豊かな演奏表現を実現すること、の2点についてさらに研究を進めていく。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究補助金奨励研究 A (課題番号 09780329) によるものである。

参 考 文 献

- 1) 八村：身体動作コード表現のライブラリ化と実行制御環境の開発，H7 科研費補助金研究成果報告書，06680375 (1996)。
- 2) 大塚，椿野，村中，今西：バーチャルリアリティを用いたピアノ教育支援システムの一考察，H6 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集，G-336 (1994)。
- 3) 大塚，袖山，吉田，村中，今西：VR を用いたピアノ教育支援システムの構築 II，信学会'95 全国大会講演論文集，A-266 (1995)。
- 4) 大塚，袖山，吉田，村中，今西：VR を用いたピアノ教育支援システムの構築 III，H7 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集，G-350 (1995)。
- 5) 袖山，小川，林，村中，今西：VR を用いたピアノ教育支援システムの改善，H8 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集，G-401 (1996)。
- 6) 関口，英保：3 次元 CG を利用した鍵盤楽器演奏シミュレーション，信学会'97 全国大会講演論文集，A-15-32 (1997)。
- 7) 関口，英保：仮想空間における鍵盤楽器演奏動作の自動生成，第 41 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集，pp.585-586 (1997)。
- 8) 関口，英保：鍵盤楽器演奏動作の解析とシミュレーション，3 次元画像コンファレンス'97 講演論文集，pp.210-214 (1997)。
- 9) 関口，英保：鍵盤楽器演奏における手指動作モデル，信学会'97 情報・システムソサエティ大会講演論文集，分冊 D，p.262 (1997)。
- 10) 関口，英保：計算機処理による理想的な鍵盤楽器演奏動作の生成と表示，第 55 回情報処理学会全国大会論文集，分冊 2，pp.6-7 (1997)。
- 11) 関口，英保：音符データからのピアノ演奏動作の再現と表示，第 15 回パソコン利用技術研究発表会講演論文集，pp.31-34 (1998)。
- 12) 関口，英保：鍵盤楽器演奏シミュレーションシステム，信学会'98 全国大会講演論文集 (D-11)，p.189 (1998)。
- 13) 楠元，関口，英保：計算機処理による鍵盤楽器演奏動作の自動生成，第 56 回情報処理学会全国大会論文集，分冊 2，pp.46-47 (1998)。
- 14) 関口，英保：仮想空間における鍵盤楽器演奏動作の自動生成，第 42 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集，pp.585-586 (1998)。
- 15) 関口，英保：音符列データからのピアノ演奏動作の生成，3 次元画像コンファレンス'98 講演論文集，pp.207-211 (1998)。
- 16) Sloboda, J.A., Clarke, E.F., Parncutt, R. and Raekallio, M.: Determinants of Finger Choice in Piano Sight-Reading, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.24, No.1, pp.185-203 (1998)。
- 17) Parncutt, R.: Modeling piano performance: Physics and cognition of a virtual pianist, *Proc. ICMC97*, pp.15-18 (1997)。
- 18) Parncutt, R., Sloboda, J.A., Clarke, E.F., Raekallio, M. and Desain, P.: An Ergonomic Model of Keyboard Fingering for Melodic Fragments, *Music Perception* Vol.14 No.4 pp.341-382 (1997)。
- 19) 太田昌孝ほか：アスキー・ラーニングシステム「応用グラフィックス」，アスキー出版局 (1986)。

(平成 10 年 8 月 10 日受付)

(平成 11 年 3 月 5 日採録)

関口 博之 (正会員)



1961 年生。1988 年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年日立製作所 (株) 入社。医用画像処理の研究開発に従事。1992 年より京都大学工学部助手。医用画像，3 次元画像関係の研究に従事。第 55 回情報処理学会全国大会奨励賞受賞。電子情報通信学会，日本医用画像工学会各会員。

英保 茂 (正会員)



1942 年生。1966 年京都大学大学院電子工学科電気工学専攻修士課程修了。1987 年工学部教授。工学博士。医用画像情報システムの研究に従事。計測自動制御学会論文賞，医用画像工学会論文賞受賞。システム制御情報学会，電子情報通信学会，日本 ME 学会，計測自動制御学会，日本医用画像工学会等会員。