

# マーカレス運指認識と音列照合による ピアノ演奏スキル評価システムの提案

岡 明也<sup>1</sup> 有賀 治樹<sup>1</sup> 杉山 健太郎<sup>1</sup> 橋本 学<sup>1,a)</sup> 長田 典子<sup>2,b)</sup>

**概要:** ピアノ演奏の練習において、特に初心者の場合には正しいキーを正しい運指で弾くという基本的な練習が重要であることから、演奏状況をモニタリングし、客観的な誤りをタイムリーに提示するピアノ演奏スキル評価システムが望まれている。本研究では、2つの要素技術を組み合わせることによってこれを実現した。1つめは、楽譜上の音符と実際に打鍵されたキーを照合する音列照合技術である。練習時には未打鍵や余打鍵の発生に加えて、正しい演奏でも多少の揺らぎが発生するため、DP マッチングに基づいて柔軟な照合を実現した。2つめは運指認識であり、練習中の自然な演奏を妨げないために、距離センサで得られた動画像列に汎用 3D-ハンドモデルを適用する仮説検証型手法を提案した。実際の楽曲を用いた実験評価により、単純マッチングに比べ検出数約 83%削減でき、処理時間 0.6 秒を確認した。

## 1. はじめに

ピアノ演奏スキルの向上には、正しく打鍵する技術、連続した音符をスムーズに演奏する技術、芸術的な表現を持たせながら演奏する技術を段階的に習得することが重要である。近年、ピアノ演奏と脳機能は深く関連していることが報告されている [1][2]。脳機能を発達させるためには、楽譜にて指定された鍵を正しい指で弾く練習が効果的であるといわれている。そこで、本研究では、スキル向上の初期段階として、正しく打鍵する技術の習得を支援するためのシステムを提案することを目的とする。そのために必要な要素技術は2つある。

1つめは、楽譜と演奏情報を照合する技術である。従来手法として、竹川らによる研究があるが、照合には単純な音名比較を利用しているため、音長の揺らぎや弾き直しに対応できていなかった [3]。また、柔軟な照合手法である DP マッチングを用いた Hoshishiba らの研究があるが、これを運指判定に利用する枠組みは提案されていなかった [4]。

2つめは、打鍵指を認識する技術である。ピアノ演奏においては、通常、手指にデータグローブなどの特殊な装置を装着することはできないため、カメラ等を用いた非接触手法として画像処理ベースの手法が適していると考えられ

る。従来、手指の肌色領域を抽出する方法 [5] があるが、手指と白鍵の色相差やコントラストが十分ではないため、安定した指先検出には困難が予想される。また、多視点カメラで撮影することによって手指の3次元位置を計測するモーションキャプチャの応用が報告されており、リアリティの高いCG生成の分野で優れた成果を挙げている [6]。さらに、単眼カメラによる手法も提案され [3]、精度的には実用的な性能を達成している。しかしながら、どちらの手法も手指になんらかのマーカの装着が必要なために、ピアノ練習時においては演奏者への負荷が懸念される。

楽譜と演奏情報を照合するためには、多少の音長の揺らぎや部分的な弾き直しが頻繁に起こるため、これらを許容する柔軟なアルゴリズムが求められる。打鍵指を認識する技術においては、演奏時に一切のマーカを使用することなく演奏者に依存しないアルゴリズムが求められる。

これまで、著者らはそれらの要素技術をそれぞれ開発した。楽譜と演奏情報を照合する技術としては、DP マッチングを用いた [7]。これにより、演奏者が誤打鍵した場合においても、正しくマッチング可能である。打鍵指を認識する技術としては、一切のマーカを使用することなく演奏者に依存しない仮説検証型手法を開発した [8]。これにより、演奏者に負担のかからない運指認識が可能である。

従来は、単純マッチングに起因して弾き間違いが発生したときに誤対応が続発する問題点と演奏者の手にマーカを付けなければいけない問題点があった。本稿では、弾き間違いが発生した場合においても柔軟にマッチングできるスキル評価システムを提案する。その際、マーカを用いるこ

<sup>1</sup> 中京大学  
Chukyo University

<sup>2</sup> 関西学院大学  
Kwansei University

a) mana@isl.sist.chukyo-u.ac.jp

b) nagata@kwansei.ac.jp

となく運指間違いを検出することができる。提案システムを利用することによって、楽譜にて指示された鍵を正しい指で弾く練習において誤打鍵があった場合においても、正しく演奏を評価することができる。さらに、本システムは初見演奏の能力向上にも有用であると考えられる。初見演奏では、楽譜を見て、どの指を使うかを演奏しながら決めていかなければならない [1]。それは、ほぼ無限にある指使いのパターンから適切なものを瞬時に選ぶという高度な情報処理を要するプロセスである。そのため、無限にある指使いのパターンを体で覚える必要がある。提案システムを用いることによって、正しい指使いを身に付けることができるため初見演奏の能力向上にもつながると考えられる。

以下、2章では本研究で提案するピアノ演奏スキル評価システムについて述べ、3章では楽曲を用いた提案手法の性能に関する評価実験の結果を示す。最後に4章にて本研究の成果をまとめる。

## 2. ピアノ演奏スキル評価システム

### 2.1 設計

ピアノ演奏スキルの習熟過程を調査したところ、正しく打鍵する技術、連続した音符をスムーズに演奏する技術、芸術的な表現を持たせながら演奏する技術を段階的に習得する必要がある。中でも、我々は正しく打鍵する技術に着目した。初期段階におけるピアノ演奏の練習には、弾き間違いや運指間違いが含まれている。演奏者にそれらの項目を習得させることで、初期段階としてピアノ演奏の上達につながると考えた。ただし、音の強弱やテンポは演奏者の表現力に関わるため、本手法では評価しないものとした。

弾き間違いや運指間違いは、演奏音列データと電子楽譜を照合することにより検出される。演奏音列データとは、演奏によって MIDI インタフェース搭載の電子ピアノから取得した時系列に並んだ MIDI 信号列のことである。電子楽譜とは、汎用的なスタンダード MIDI ファイルに正解運指を埋め込んで、時系列に並べ作成される。正解運指は、楽譜上で指定されている場合はそれを用い、指定されていない場合は自然な演奏になるように運指を決定した。

### 2.2 システムの構成

スキル評価までの流れを図1に示す。まず、電子ピアノから MIDI インタフェースを通して演奏音列データを取得する。その際、鍵盤の上部に取り付けられたレンジセンサから演奏時の手指の距離画像を取得し、打鍵指を特定し演奏音列データに付随する。次に、得られた演奏音列データを用いて電子楽譜と照合することにより、演奏している箇所を特定し、弾き間違いを検出する。電子楽譜には正解運指が格納されているため、運指認識結果と比較することで運指間違いを検出する。

以上の処理で、弾き間違い計5項目に運指間違いを加え、

計6項目を検出し評価する。弾き間違いとしては、音名誤り、音の抜け、余分な打鍵、音長誤り、タイミングのずれを扱う。

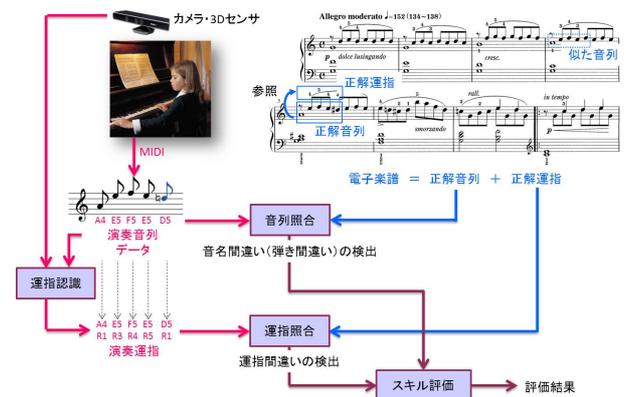


図1 スキル評価までの流れ

Fig. 1 Flow of skill evaluation.

### 2.3 音列照合

弾き間違いが発生した場合においても柔軟にマッチングするために、DP マッチングを用いる。DP マッチングは、ある2つの時系列パターンに対し、パターンの順序関係を保存しつつ、時間軸の非線形な伸縮を許容する対応付けを求める手法である。これにより、楽譜音列データと演奏音列データを用いて、音名をもとにマッチングする。MIDI 信号には、音名情報のほか、音強情報が含まれており、この信号を受信した時にコンピュータ側で時刻を計算することで、打鍵時間を求めることができる。音名には音長、打鍵時間が付加されており、DP マッチングにより位置合わせされたデータ列より弾き間違いと運指間違いを検出する。なお、音長、打鍵時間については、ノートオン、ノートオフの発生時刻から求める。図2に演奏音列データと電子楽譜の DP マッチングの例を示す。まず、2つの音名列を用いてノードとアークからなるネットワークを作成する。次にアークに、コストを与える。与えるコストの決め方は、音名誤りの場合は3、音名の位置ずれ場合は1を与えるとする。その際、ノードに到達する最小コストを、アークのコストとする。電子楽譜においてドレミの順序で8分音符を演奏すべきところを、演奏時にドドレミの順序で演奏した場合において、各ノードにコストを割り振る。その結果を図2に示す。すべてのコストを計算した後、最小コストの経路を求め、比較することで余分な打鍵を検出できていることがわかる。

### 2.4 運指認識

運指は、著者らが開発した仮説検証型の運指認識技術を用いて認識される。図3に運指認識手法の流れを示す。まず、MIDI 信号から得られる打鍵タイミング (ノートオン) をレンジセンサのトリガーとし、打鍵した瞬間の距離画像を取得する。そして、指先画像を用いたテンプレートマッ

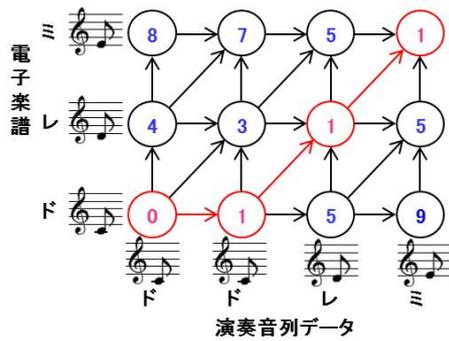


図 2 演奏音列データと電子楽譜を用いた DP マッチングの例  
Fig. 2 Example of the DP matching using electronic music score and sound data of column played.

チングを施すことにより、指先候補位置を複数検出し、ピアノキーと指の対応を確率的に表現したものを仮説群として生成する(仮説)。次に、各仮説から手の3次元姿勢を推定して画像化し、実際の入力距離画像との整合性をもとに最尤仮説を決定する(検証)。この際、手指の関節と形状をモデル化した汎用3-Dハンドモデルを用いて仮説の画像化をオンライン化する。また、手指関節の運動学モデルを利用した手形状の「自然さ」を評価することによって検証をさらに効率化する。以上の処理により、最尤仮説を最終的な認識結果とし運指を認識する。この手法は演奏者固有の手の大きさに影響されにくい手法である。さらに、指に一切のマーカを装着することなく認識できるため演奏者に負担のかからない状態で運指認識可能である。

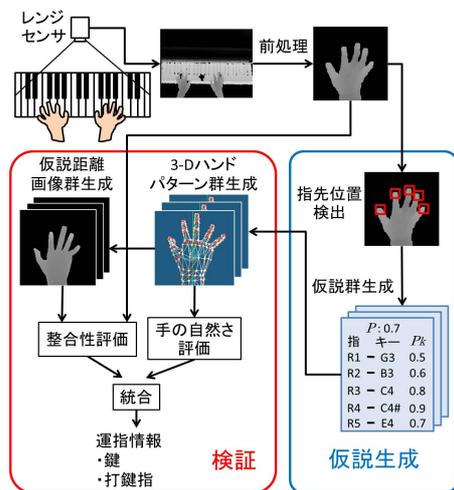


図 3 運指認識手法の流れ  
Fig. 3 Flow of piano fingering recognition.

### 3. 実験

#### 3.1 実験環境

2章で述べたピアノ演奏スキル評価システムのプロトタイプを構築した。ピアノ鍵盤として、88鍵デジタルピアノを用いてデータを取得した。このピアノにはMIDIインタ

フェースが搭載されており、PCとの接続により各種MIDIイベントを読み取ることができる。また、レンジセンサとしては、Microsoft社製のKinectを用いた。図4に実験装置の外観を示す。Kinectセンサは鍵盤の直上70cmの高さに設置した。これにより約4オクターブ程度の範囲の鍵盤が計測可能である。実験には、J.S.BachのMenuetを用いた。図5にMenuetの楽譜を示す。Menuetはさまざまな演奏要素が含まれており、初心者の練習曲に向いているといわれている。次節以降の実験においては、右手パートのみ(全32小節128音)を自然に演奏した距離動画像と演奏音列データを用いた。運指については指定されていない場合は、自然な演奏になるように運指を決定した。なお、装飾音は演奏していない。



図 4 実験環境  
Fig. 4 Experiment environment.



図 5 Menuet(J.S.Bach)の楽譜 [9]  
Fig. 5 Music score of Menuet(J.S.Bach).

#### 3.2 音列照合の性能評価実験

音列照合の性能を評価するために右手演奏のMenuet(J.S.Bach)の演奏音列データを用いて実験を行った。演奏音列データには、音名誤り、音の抜け、余分な打鍵の3種類の弾き間違いを含んでいる。そのデータを用いて、単純マッチングとDPマッチングの比較結果を表1に示す。単純マッチングでは、音の抜けが発生した後、連続的に誤マッチングが続発したため、誤り検出回数が多くなっていることがわかる。しかし、DPマッチングでは、誤り検出回数が単純マッチングよりも大幅に低減できたことを確認できた。さらに、検出された位置については、正解データ

と同じ位置を正しく検出できていることから、本手法で用いる音列照合の有効性を示すことができた。

表 1 単純マッチングと DP マッチングの誤り検出回数

Table 1 The error detection frequency of DP matching and simple matching.

検出項目	単純マッチング	DP マッチング	正解データ
音名誤り	102	1	1
音の抜け	/	1	1
余分な打鍵	/	1	1
音長誤り	13	14	0
タイミングのずれ	10	4	0
合計	125	21	3

### 3.3 運指認識の性能評価実験

運指認識の性能を評価するために被験者 3 人 (A,B,C) を対象に運指の認識成功率を評価した。実験には、F3 から B5 までの 18 鍵をそれぞれの指で打鍵した 90 枚の画像を用いた。結果を表 2 に示す。本システムで用いる運指認識手法では被験者によらずに認識成功率が高く、平均値は約 90 % であり、演奏者に依存しない手法であることを確認した。図 6(a)(b)(c) に入力画像を示し、それぞれの画像に対応して最も整合性が高かった仮説距離画像を (d)(e)(f) に示す。

表 2 複数の演奏者に対する認識成功率 [%]

Table 2 Recognition rates for the performance of the multiple player [%].

	認識成功率
被験者 A	96
被験者 B	88
被験者 C	84

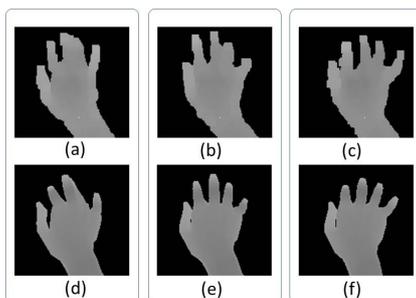


図 6 入力距離画像 (a)-(c) と最も整合性の高い仮説距離画像 (d)-(f)  
Fig. 6 Input depth images (a) to (c) and hypothesis depth images which have high consistency (d) to (f).

### 3.4 音列照合と運指認識の統合実験

音列照合と運指認識を統合し、Menuet(全 32 小節 128 音) の右手演奏において実験を行った。実験データには、弾き間違いとして音の抜けを 1 回含ませた演奏したデータを用いた。実験の結果を、表 3 に示す。単純マッチングでは、弾き間違いに起因して運指ミスの検出数が多くになっているが、提案手法では柔軟にマッチングできていることが

分かる。今後は、運指認識モジュールの認識精度を向上させる必要がある。

表 3 提案手法における誤り検出回数

Table 3 The error detection frequency when using the proposed method.

検出項目	単純マッチング	提案手法	正解データ
音名誤り	90	0	0
音の抜け	/	1	1
余分な打鍵	/	0	0
音長誤り	8	18	0
タイミングのずれ	15	0	0
運指ミス	88	16	0
合計	201	35	1

## 4. おわりに

DP マッチングによる音列照合とマーカレス運指認識技術を組み合わせることで、ピアノ演奏スキル評価システムを構築した。実際の楽曲を用いた実験評価により、単純マッチングに比べ検出数約 83%削減でき、処理時間 0.6 秒を確認した。

今後は、検出項目を増やしスキル評価し、グラフィカルな情報提示に取り組む予定である。

謝辞 本研究の一部は科研費 B (24300088) の助成を受けて遂行されたものである。

## 参考文献

- [1] 古屋晋一：ピアニストの脳を科学する 超絶技巧のメカニズム，春秋社，(2012).
- [2] 御木本澄子：正しいピアノ奏法，音楽之友社，(2004).
- [3] 竹川佳成，寺田努，塚本昌彦：運指認識技術を活用したピアノ演奏学習支援システムの構築，情処学論，Vol.52, No.2, pp.917-927, (2011).
- [4] Takayuki Hoshishiba and Susumu Horiguchi : Improved DP matching between a musical score and its performance using interpolation, Proc. Acoustical Science and Technology, pp.13-19, (2001).
- [5] 子安大士，木村慎二，前川仁：ピアノ演奏動作解析のための 3 次元手指追跡，情報科学技術フォーラム，pp.171-172, (2011).
- [6] 釘本望美，山本和樹，武田晴登，片寄晴弘，長田典子，巳波弘佳：モーションキャプチャを用いたピアノ演奏動作の CG 表現と音楽演奏インタフェースへの応用，情処研報 2007-MUS-72, pp.79-84, (2007).
- [7] 岡明也，杉山健太郎，内田駿，橋本学：ミスタッチ検出と運指評価機能を有するピアノ演奏スキル評価システム，動的画像処理実用化ワークショップ (DIA2013) , pp.62-65, (2013).
- [8] 有賀治樹，岡明也，橋本学：3-D ハンドパターンのオンライン生成に基づく仮説検証型ピアノ運指認識手法，動的画像処理実用化ワークショップ (DIA2013) , pp.336-340, (2013).
- [9] Notenbuechlein fuer Anna Magdalena Bach, G. Henle Verlag, (1983).