

MIDI 鍵盤演奏における テンポのリアルタイム評価法に関する研究

阿部貴之^{†1} 山川晃^{†1} 臼杵潤^{†1}

近年、ピアノやキーボード楽器を趣味で演奏、練習する人が増えている。これに対し、MIDI 鍵盤を用いた演奏上達支援に関する研究などが行われている。このような中、MIDI データには記載されていない運指情報なども扱えるようにするため演奏画像を用いる検討を進めてきた。そこで、本研究では MIDI データと動画画像を同期させることでリアルタイムに打鍵フレーム画像を特定することを目指す。またリアルタイムに MIDI データを解析し、演奏中の打鍵時間の長さに着目することでテンポの抽出を行い、演奏中のテンポが速いまたは遅い場合にメトロノームの ON, OFF を繰り返す演奏技術上達支援法についても検討する。実験結果から MIDI データと動画画像の同期が可能となり、打鍵フレーム画像を特定することに成功した。また、提案手法によりリアルタイムにテンポを抽出することに成功し、演奏上達支援を行えるようになった。

Real-Time Evaluation Method of Tempo Fluctuation in MIDI Keyboard Performance

TAKAYUKI ABE^{†1} AKIRA YAMAKAWA^{†1}
JUN USUKI^{†1}

The number of piano player is increasing. Furthermore, people who have practicing in the hobby have increased. On the other hand, we have been done a research on technique support of piano playing using a MIDI keyboard. Against this backdrop, we have conducted a study on using the musical performance image because MIDI data is not listed the fingering. Therefore, we synchronize the real-time MIDI data and the video. And, we aim for the realization of specific of keystrokes image. Also, we extract tempos that were analyzed in real-time MIDI data by focusing on the length of keystroke time. And, we conduct a study of performing technique support, repeat ON / OFF of the metronome if the playing tempo is fast or slow. From experimental results, we have succeeded specific of keystrokes image that synchronized the real-time MIDI data and the video. In addition, we have succeeded extracting tempo that were analyzed in real-time. And, we have succeeded to technique support of piano playing

1. はじめに

近年、ピアノやキーボード楽器を趣味で演奏、練習する人が増えている、Y 社によると 2012 年現在国内の音楽教室において約 4,000 会場、約 50 万人の生徒が在籍している[1]。さらに海外の音楽教室においては約 1,300 会場、約 19 万 2,000 人の生徒が在籍している[1]。また、パソコンの普及や、性能向上により個人が手軽にインターネットを利用できる環境が整ってきており、2006 年 3 月から開講されている「オンライン音楽レッスン[1]」では、レッスン教室に通わずに手軽に練習することが可能になってきている。さらに PC ウィンドウ内に鍵盤・楽譜・手の画像、音程や指番号（運指情報）が出力される「ピアノ de レッスン[2]」やゲーム感覚でピアノを練習することができる「ピアニスター[3]」など、一人でピアノを練習することを可能とする様々なソフトウェアも登場し、音楽教室に通う時間をとれない人でも、自宅でも練習を行うことが可能となっている。しかしながらピアノ演奏ができるようになるまでは多くの

時間を必要とすることから、練習を継続することを断念したり、挫折してしまったりする人が後を絶たない。そこで演奏初期段階（ピアノ初心者が初見の楽曲に対して練習している段階）における敷居を下げるシステムとして、次に打鍵すべき鍵盤などの演奏支援情報を光で指示する光る鍵盤[4][5]が楽器メーカーからいくつか販売されている。これは音符が読めなくとも打鍵鍵盤を知ることができ、打鍵ミスをした場合は誤りを気付かせるために正しく打鍵をするまで次の打鍵鍵盤を掲示しないというものである。このような中、本研究では初心者の演奏におけるテンポの変化に着目し、演奏時にリアルタイムにテンポを計測しながらテンポ感の上達を支援する方法と、これを滑らかな指使いをできるようにする練習の支援に活かす方法を考える。初心者にとっては指使いを覚えてから指使いに慣れて滑らかな指の動きができるようになる上で、テンポを取り入れた練習が有効であるためである。

以下、本稿の 2 章では関連研究について述べる。3 章では指使いを認識するために演奏中リアルタイムに MIDI データと動画画像を同期させることで打鍵フレーム画像を特定する方法について述べる。4 章では演奏中 MIDI データを解析してテンポの抽出を行い、演奏中のテンポの変化に対

^{†1} 神奈川工科大学大学院
Department of Information and Computer Sciences, Kanagawa Institute of Technology

してメトロノームを用いて演奏技術の上達を支援する方法について述べる．5章では本研究のまとめを行う．

2. 関連研究

これまでピアノの演奏上達を支援する方法についてはいくつか検討されている．たとえば，演奏中に支援を行う事例として，打鍵すべき鍵盤，指使い（運指），手本映像を表示するソフトウェア[3][4][5]がある．また，演奏者の苦手な演奏を演奏結果から類推して割り出すことで集中的にトレーニングするシステム[6][7]や，演奏を自動的に評価し苦手なところのアドバイスや演奏上の誤りを譜面上に提示[8]するシステムがある．これらは，打鍵ミス，打鍵強度，打鍵タイミングなどを打鍵情報から評価している．また先生と生徒のレッスン支援[9]として，音量の変化やテンポ，スタッカートやレガートといった演奏の具合を示すシステムが提案されている．さらに，Raphael の自動伴奏システム[10]は，確率モデルを用いることにより，実時間でリズムを推定する手法を提案しているが演奏技術の上達との関係については触れていない．

3. リアルタイムでの打鍵映像の特定の限界

演奏時に指使いをビデオカメラで撮影しながらテンポを測ることを考える．そこで，まず取得する映像の中から打鍵フレーム画像を特定する方法について提案する．

3.1 テンポと音符の長さによる打鍵フレーム抽出

一般家庭で扱われるビデオカメラの性能はフル HD の 30fps から 60fps へと変わりつつある．そのため本研究では 60fps 対応のカメラを用い打鍵フレーム画像を抽出可能な曲のテンポと音程の長さの限界を算出する．まず一拍の単位を N 分音符としてテンポ T の時の n 分音符の最大の長さ t_{max} は式(1)のように表せる．

$$t_{max} = 60 \times N \div (T \times n) [sec] \quad (1)$$

ただし全音符の場合は $n=1$ とする．

そこで，式(1)を用いて打鍵時の最大の長さをテンポ 60, 120, 240 の場合に分けたものを表 1 に示す．実際の演奏時にはフェルマータ（音符や休符の定量時間が延長される）やリタルダンド（テンポを次第に落としていく）などの特別な指示がない場合は表 1 の長さよりやや短くなることがある．

表 1 テンポと音符の長さの最大値 [単位：秒]

Table 1 Relationship between tempo and note.

音符 \ Tempo	60	120	240	480
全音符	4	2	1	0.5
2分音符	2	1	0.5	0.25
4分音符	1	0.5	0.25	0.125
8分音符	0.5	0.25	0.125	0.0625
16分音符	0.25	0.125	0.0625	0.03125
32分音符	0.125	0.0625	0.03125	0.015625

また 60fps 対応カメラの場合 0.016秒ごとにフレーム画像が変わっていく．そこで表 1 のどこまで打鍵フレーム画像を抽出できるかについて練習用の楽譜の一部を用いて検証

実験を行った．MIDI データのデルタタイムから時間を取得し打鍵フレーム画像を抽出した結果を表 2 に示す．

表 2 フレーム抽出結果

Table 2 Result of frame extraction.

音符 \ Tempo	60	120	240	480
全音符	4 [O]	2 [O]	1 [O]	0.5 [O]
2分音符	2 [O]	1 [O]	0.5 [O]	0.25 [O]
4分音符	1 [O]	0.5 [O]	0.25 [O]	0.125 [O]
8分音符	0.5 [O]	0.25 [O]	0.125 [O]	0.0625 [O]
16分音符	0.25 [O]	0.125 [O]	0.0625 [O]	0.03125 [Δ]
32分音符	0.125 [O]	0.0625 [O]	0.03125 [Δ]	0.015625 [×]

表 2 において，○印は打鍵フレーム画像を抽出可能できたことを示す．また△印は打鍵フレーム画像を抽出したものの画像にブレが発生していたことを示し，×印は打鍵フレーム画像を抽出できなかったことを示している．△のついた 0.03125[s]の音符では 2 音目以降の打鍵映像にブレが生じ（図 1），0.015625[s]の音符では打鍵中のフレーム画像を抽出することができなかった．



図 1 打鍵時の画像にブレが生じた時

Figure 1 Blurred of image.

これは 60fps のカメラではフレーム 1 枚当たり 0.01666[s] であるため 0.015625[s]の音符は画像として記録されず，0.03125[s]の音符は打鍵フレーム画像の抽出をすることができたもののブレが起きてしまったと考えられる．この様子を図 2 のタイムチャートに示す．

また，図 2 より打鍵フレーム画像の抽出可能範囲は 60fps の 2 フレーム本の値を用いて(2)式で示すことができる．

$$t > 0.0334 \quad (2)$$

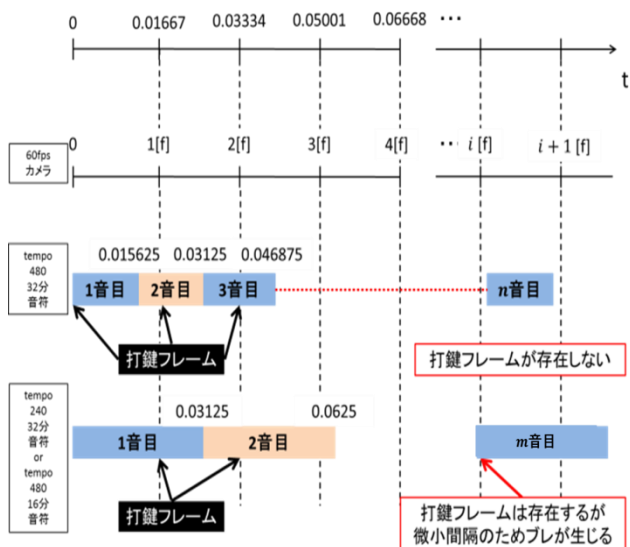


図2 画像取得のタイムチャート

Figure 2 Time chart of image-capturing.

3.2 MIDI 鍵盤を用いた打鍵フレームの自動取得

3.2.1 演奏映像の自動取得

MIDI 鍵盤のノートオン情報をトリガーとしてカメラ撮影を自動的に開始することを考える。ここで、ノートオン情報を受け取る時間と撮影した映像の記録が開始するまでのタイムラグを ΔT_{start} と置き、この値を調べる。 ΔT_{start} の計測を行う環境を図3と表3に示す。

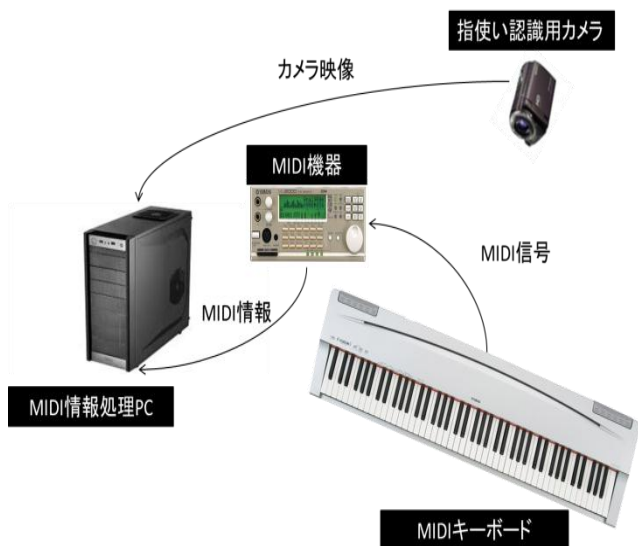


図3 計測を行う環境

Figure 3 Experiment environment.

表3 計測を行う機器

Table 3 Lab ware.

MIDI	
MIDI鍵盤	Electronic piano p-70
MIDI機器	MU2000
処理用PC	
マザーボード	Intel DX79TO
CPU	Intel Core-i7 3930K
メモリ	16GB
記憶媒体	SSDSC2CW120A3 × 2 (RAID0)
キャプチャーボード	MonsterXX
カメラ	SONY HDR-CX590V
ケーブル長	
MIDIケーブル長	2.5[m]
HDMIケーブル長	2[m]
カメラ用HDMIケーブル長	0.5[m]

なお、使用する MIDI 鍵盤は GHS 鍵盤といった低音部と高音部の微妙な鍵盤の重さの違いを指先に感じることができるものである。調査結果よりカメラの電源を ON にした状態であればノートオンイベントが発生する 5 フレーム前から映像の記録を開始できることが分かり、 $\Delta T_{start} = -5$ となった。自動録画した映像からフレーム番号を参照して画像（打鍵フレームの画像）を抽出する際は、フレームは(指定するフレーム番号) - ΔT_{start} で算出できる。そのため、演奏映像から任意のフレーム画像を抽出するためには指定フレーム番号に 5 を加算すれば良いことになる。

3.2.2 MIDI データを用いた打鍵フレーム画像抽出法

MIDI データの情報にはノートオン、ノートオフ、デルタタイム、鍵盤番号などのさまざまなメッセージ情報が含まれている（表2）。ここではこれらの MIDI データのメッセージ情報を用いて打鍵フレームの画像を抽出する。

表2 MIDI データの情報

Table 2 MIDI event data.

デルタタイム	ノートオン・オフ	鍵盤番号	ペロシティ
247916	144	38	35
664062	128	38	0
278645	144	40	40
609375	128	40	0
283854	144	41	38
606770	128	41	0
248437	144	43	39
591666	128	43	0
272916	144	45	35
744270	128	45	0
94791	144	47	46
756250	128	47	0
91666	144	48	40
1013020	128	48	0
739062	144	60	34
659895	128	60	0

(1) ノートオン時のフレーム画像抽出法

MIDI データのノートオン情報を用いてノートオン時のフレーム画像を打鍵フレームとして抽出する。このとき、

打鍵フレームのフレーム番号 f はノートオン時間を $T_{on}[sec]$ としてこれにフレームレート $F[fps]$ 数を掛け合わせて得られる。ただし、ノートオンの時間 T_{on} において画像フレームが存在しないことがあるため、算出するフレーム番号は小数点以下を切り上げる必要がある(図 4)。

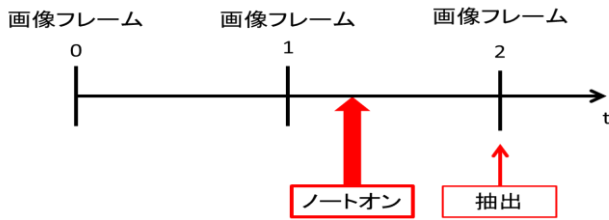


図 4 フレーム抽出法

Figure 4 Frame extraction method.

そのため、打鍵フレームのフレーム番号の算出式は式(3)となる。

$$f = \text{roundup}(T_{on}[\text{sec}] \times F[\text{fps}]) \quad (3)$$

(2) 譜面上の指定音符の打鍵フレーム抽出法

ピアノ練習をする際、譜面上の音符を何小節目の何拍目の何分音符と指定することがある。これと同様に指定した音符の打鍵フレームを演奏映像から抽出するために、図 5 に示すように MIDI イベント情報を用いる。

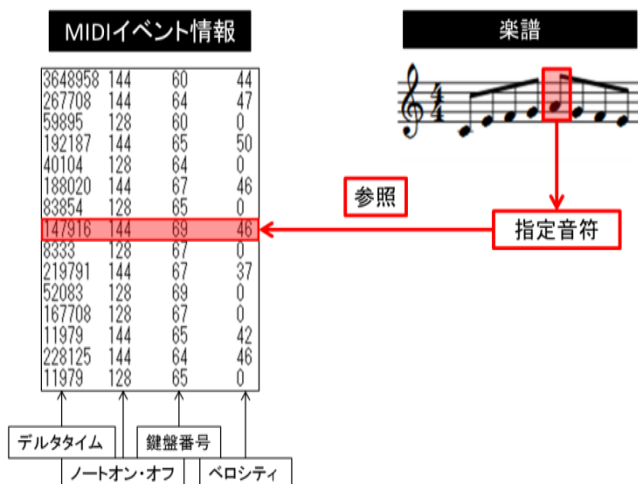


図 5 音符の指定と MIDI イベントの抽出

Figure 5 Note and MIDI event extraction method.

ここで、一拍の単位が N 分音符、 C 拍子、テンポ T の譜面において、 b 小節目の c 番目にある N 分音符のノートオン時間 T_{on} は、アウフタクトで弱拍が n 分音符 m 個ある場合に式(4)で表せる。

$$T_{on} = \frac{C}{T} \times (b-1) + \frac{c}{T} + \frac{60 \times N}{T \times n} \times m$$

$$= \frac{(C \times (b-1) + c) \times n + 60 \times N \times m}{T \times n} [\text{sec}] \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入すれば、指定音符の打鍵フレーム f を算出できる。

3.3 指使い認識法との連携

ここで式(3)や式(4)を用いて演奏映像から打鍵フレームを抽出することで、リアルタイムに打鍵している指を追跡できるようになる。そして、打鍵フレームの画像から指を認識する研究とつなげる(図 6)ことで、指使いとテンポを用いた指の動きの上達過程を把握できるようになる。



図 6 リアルタイム打鍵フレーム抽出とその活用

Figure 6 Real-time image extraction method.

4. テンポによる演奏技術上達支援法

ピアノ演奏時にテンポを一定に保てるように意識することは大切なことである。ここでは練習中にテンポを測ることで演奏上達を支援する方法を検討する。

4.1 演奏中のテンポ算出

練習曲の譜面上には様々な長さの音符が存在する。ここで一拍の単位が N 分音符からなる練習曲において譜面上 i 番目の n 分音符 ($n(i)$ 分音符) を演奏する時間の長さを $\Delta T_{on}(i)$ とすると、これは式(5)で表せる。

$$\Delta T_{on}(i) = T_{on}(i+1) - T_{on}(i) \quad (5)$$

ただし MIDI のノートオン情報を使用するため次に休符が来る i 番目の音符について式(5)は適用しない。

この $\Delta T_{on}(i)$ を用いて連続する 2 音からテンポ $T(i)$ を算出すると式(6)になる。

$$T(i) = \frac{60 \times N}{\Delta T_{on}(i) \times n(i)} \quad (6)$$

ただし、式(5)を用いるため、次に休符がくる i 番目の音符にはこの式は適用しない。

4.1.1 音符単位のテンポ変動の抽出

曲を演奏するテンポは一曲内で変動する。この変動の中で特にテンポの速い箇所と遅い箇所を音符単位で次の式(7)で抽出する。

$$\begin{cases} \text{テンポが速い: } T(i) > \mu + \alpha \times \sigma \\ \text{テンポが遅い: } T(i) < \mu - \alpha \times \sigma \end{cases} \quad (7)$$

ただし, $i \geq 3$

ただし, μ と σ はそれぞれ $T(1) \sim T(i)$ の平均値と標準偏差であり, いずれも $T(j)$ の次が休符の場合は $T(j)$ を除く. また α は定数である. ここで $\alpha = 2.0$ とした場合の例を図7に示す.

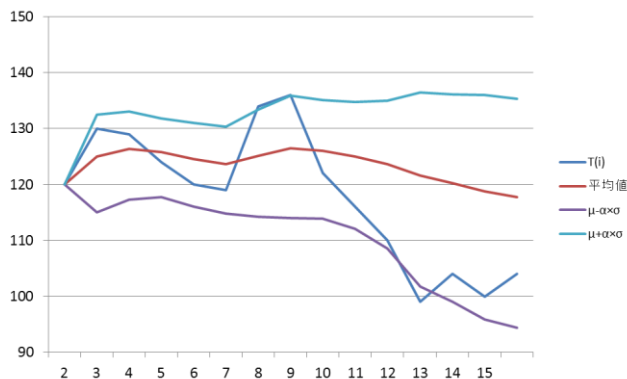


図7 速い(遅い)テンポの音符の抽出 ($\alpha = 2.0$)

Figure 7 Detection of faster/slower tempo (per; note).

4.1.2 小節単位のテンポ変動傾向の抽出

ここでは, 音符毎のテンポを1小節単位で平滑化し, 1小節単位でテンポが速くなる(または遅くなる)傾向をリアルタイムに抽出する. 一拍の単位がN分音符でC拍子の強拍から始まる休符のない練習曲の場合, b小節目に該当する音符は式(8)を満たし, かつ左辺が最大値となる $i = K_{(b-1)} + 1$ から $K_{(b-1)} + k_{(b)}$ 番目の $n(i)$ 分音符である.

$$\sum_{k(b)=1}^{K(b)} \frac{1}{n(K_{(b-1)} + k_{(b)})} < \frac{C}{N} \quad (8)$$

ただし, $k_{(b)} = 1, 2, 3 \dots K_{(b)}$ であり $k_{(b)}$ はb小節目の音符の数, $K_{(0)} = 0$ である. そのためb小節目のテンポの平均値 $T_{ave}(b)$ は式(9)で表せる.

$$T_{ave}(b) = \sum_{i=K_{(b-1)}+1}^{K_{(b-1)}+k_{(b)}} \frac{T(i)}{k_{(b)}} \quad (9)$$

このとき, 1小節目のテンポ $T_{ave}(1)$ を基準にしてテンポが β 倍以上変化する $T_{ave}(b)$ の小節を式(10)にて検出する.

$$\begin{cases} \text{テンポが速くなっている: } T_{ave}(b) > (1 + \beta) \times T_{ave}(1) \\ \text{テンポが遅くなっている: } T_{ave}(b) < (1 - \beta) \times T_{ave}(1) \end{cases} \quad (10)$$

図8は $\beta = 0.08$ とした例であり, 式(10)により4小節目でテンポが遅くなっていることを検出している.

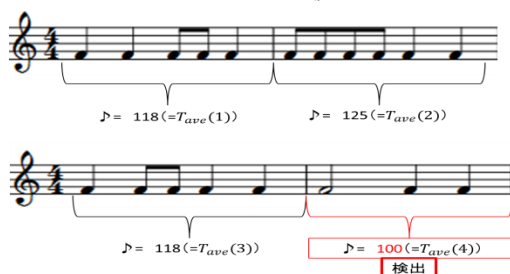


図8 速くなる(遅くなる)テンポの抽出法

Figure 8 Detection of faster/slower tempo (per; bar).

4.2 テンポを用いた演奏技術上達支援法

テンポに注目して練習中にリアルタイムに演奏技術上達支援を行う方法を以下に示す.

4.2.1 音符単位のテンポ変動の指摘による上達支援

式(7)を用いることによりリアルタイムにテンポの変動を指摘する. 指摘は次の2通りで行う.

(指摘a) 音で指摘する.

テンポが速い場合は Beep 音を1回, 遅い場合は2回鳴らす.

(指摘b) テンポの変化を数値で示す.

コンピュータ画面上にどの程度テンポが速い(遅い)かを表示する.

4.2.2 メトロノームを用いた小節単位のテンポ変動に対する上達支援

式(10)の判定式を用いることによりリアルタイムにテンポが変わり始めていることを指摘する. ここではテンポが変わり始めたらメトロノームをONにし, テンポが合い始めたらメトロノームをOFFにする(図9).



図9 テンポの変化とメトロノームのON/OFF

Figure 9 ON/OFF switch of metronome.

4.3 テンポを用いた演奏技術上達支援法の実験

本研究で提案した演奏技術上達支援法についてハノン第1部1番[12]の曲を片手のみ表現した図10の楽譜を用いて実験を行う.

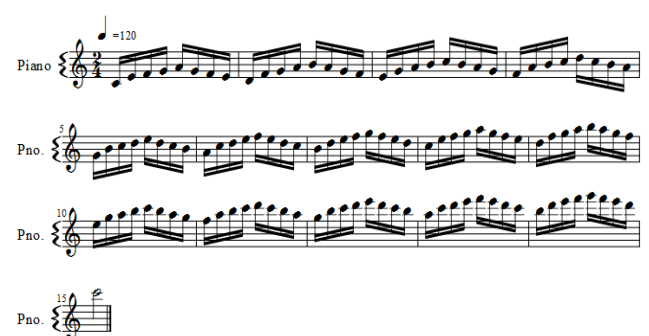


図10 使用する楽譜

Figure 10 Created musical score.

4.3.1 音符単位のテンポ変動の指摘による上達支援

音符単位のテンポ変動の指摘による上達支援結果を図 11 に示す。図 11 において、A と B はそれぞれ式(7)の $\mu - \alpha \times \sigma$ と $\mu + \alpha \times \sigma$ であり ($\alpha = 1.5$)、ノートオンイベントが生じるたびにテンポ、A、B の値と共に式(7)の判定結果を表示している。

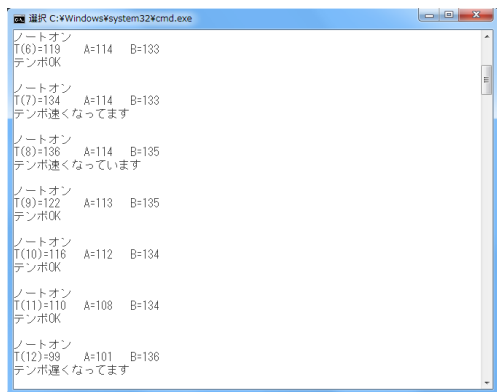


図 11 演奏時のテンポ変動検出結果(音符単位)

Figure 11 Result of tempo fluctuation(note).

図 11 からテンポが大きく変動した時にテンポが変わっていることを指摘されていることが分かる。このような α を設定することで、演奏者のレベルに合わせて上達支援が行えることが可能となったことを確認できた。

4.3.2 メトロノームを用いた小節単位のテンポ変動に対する上達支援

メトロノームを用いた小節単位のテンポ変動に対する上達支援の結果を図 12 に示す。図 12 において、A と B はそれぞれ式(10)の $(1 - \beta) \times T_{ave}(1)$ と $(1 + \beta) \times T_{ave}(1)$ であり ($\beta = 0.08$)、各小節単位でテンポの平均値、A、B の値と共に式(10)の判定結果とメトロノームの ON/OFF の切り換えを示している。

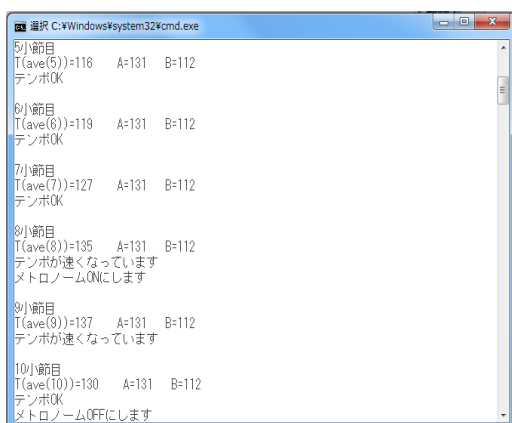


図 12 演奏時のテンポ変動検出結果(小節単位)

Figure 12 Result of tempo fluctuation(ber).

図 12 に示すように、テンポが合わなくなるとメトロノームが ON になり、テンポが合い始めるとメトロノームが OFF になることを確認できた。このことから β を設定することで、演奏者のレベルに合わせて上達支援が行えることが可能となった。

5 まとめ

本研究では初心者がピアノなどの鍵盤楽器を弾く練習を支援することを考え、MIDI 鍵盤を用いて演奏中リアルタイムに演奏情報を解析することを目指した。まず演奏中に指の動き等を MIDI データと同期させてビデオカメラで撮影し、打鍵フレームの画像を特定する方法を提案し、実際に打鍵フレームを自動的に抽出できることを示した。この成果は指使いの認識など様々な研究にも活用できるものである。続いて演奏データからリアルタイムに演奏テンポを算出する計算式を提案し、これを用いて初心者の演奏練習を支援する方法を示した。初心者の場合は演奏中にテンポが変わりやすく、この変化を指摘する方法と、弾き始めた時のテンポに合わせてテンポの変化に応じてメトロノームの ON/OFF を行う方法である。この研究成果は、初心者の指使いを覚えてから指が滑らかに動くようにする際に行うテンポにあわせる訓練などの役立てることができる。

参考文献

- 1) ヤマハ音楽教育システム (ヤマハ音楽教室).
http://www.yamaha-mf.or.jp/edu_system/
- 2) ピアノ de レッスン, KAWAI
<http://www.kawai.co.jp/cmucic/download/updatepl.htm>
- 3) 河合楽器製作所: ピアノマスター.
<http://www.kawai.co.jp/cmucic/products/pm/index.htm>
- 4) CASIO: 光ナビゲーションキーボード.
http://casio.jp/emi/key_lighting/
- 5) ヤマハ株式会社: 光る鍵盤 EZ-J210.
<http://www.yamaha.co.jp/product/piano-keyboard/ez-j210/index.html>
- 6) 大島千佳, 井ノ上直己: 不得手要素を克服させるピアノ学習支援システムにむけて, 情報処理学会研究報告 (音楽情報科学研究会), Vol. 2007, No81, pp. 185-190 (2007)
- 7) 北村 環, 三浦雅展: ピアノ導入教育のための学習支援支援システムの実現を目指して, 日本音楽知覚認知学会平成 18 年度秋季研究発表会資料, pp115-120 (2006)
- 8) 森田慎也, 江村伯夫, 三浦雅展, 秋永晴子, 柳田益造: 演奏特徴の協調およびアドバイス呈示によるピアノ基礎演奏の独習支援, 日本音響学会平成 20 年度秋季研究発表会, Pp933-934 (2008)
- 9) Smoliar, S., Waterworth, J. and Kellock, P.: pianoFORTE: A System for Piano Education Beyond Notation Literacy, *Proc. 3rd ACM International Conference on Multimedia*, pp.457-465 (1995)
- 10) Raphael, C.: A Bayesian Network for Real-Time Musical Accompaniment, *Proc. NIPS*, pp.1433-1439 (2001)
- 11) 竹川佳成, 寺田 努, 塚本 晶彦: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No2, pp917-927 (2011)
- 12) 全音楽譜出版社: 全訳ハノンピアノ教本