

カメラを用いた楽器プログラムの提案と演奏可能性の検証

田中 純之介¹ 勝間 亮^{1,a)}

概要：本稿では，カメラとマーカを利用した楽器演奏システムを提案する．このシステムに沿った楽器演奏プログラムを実装し，距離，角度，マーカサイズの3つの条件について調べることで既存楽器の奏法での演奏可能性の検証を行うとともに，既存楽器とは異なる三次元モーションによる演奏法を提案する．本稿では，スマートフォンのカメラを用いた楽器演奏アプリの開発を目指し，その前段階としてカメラとPCのみで演奏できる楽器の実装について述べる．これは既存楽器としてカメラの画面内に仮想のピアノ鍵盤を設定し，既存のマーカ位置特定ツールである QPToolkit を用いて指の位置を認識することで鍵盤を鳴らすというものである．このプログラムの楽器として演奏可能な条件を検証した結果，腕の使い方やマーカの大きさ，角度の違いによる演奏可能性の違いを確認することができた．また三次元モーションによる新たな楽器演奏法を実現できることが確認できた．

Proposal of New Musical Instrument Program Using Camera and Verification of Playability.

JUNNOSUKE TANAKA¹ RYO KATSUMA^{1,a)}

1. はじめに

近年，スマートフォンの普及は著しく，その利便性や携帯しやすさ故に現代生活になくてはならないものになりつつある．スマートフォンにおけるアプリケーション開発は非常に盛んであり，アイデア次第では今までにないようなアプリケーションが開発可能である．例えば LINE[6] は既読やスタンプなどのシステムを導入し，Eメールとは異なる新たなコミュニケーションアプリとして多くの人に利用されている．またスマートフォンにはカメラ，ジャイロセンサー，GPS といったさまざまなインプットデバイスが内蔵されている．そこでスマートフォンのカメラに着目し，カメラを用いた楽器演奏プログラムの開発ができないかと考えた．

楽器を演奏するには当然楽器を持っていなければならない．そこで，本研究ではスマートフォンを用いて手軽に演奏できるようにすることで，楽器を持参せずともすぐ演奏できる環境を作ることを目的とする．

楽器の種類は多数存在するが，本研究では一般的な楽器であるピアノをベースにして新たな演奏形式を提案した．スマートフォンで用いられている単眼カメラの映す画面内に仮想の鍵盤を設定し仮想の鍵盤上に指があれば音が鳴って弾くことができるという手順のプログラムを開発することにした (図 1)．既存のピアノを再現した楽器演奏アプリは画面をタッチすることで音が鳴るというものである [5]．これは2次元的な演奏法であり，スマートフォンの画面の小ささゆえに表現可能な音域が狭い問題がある．それに対し，カメラを用いれば三次元モーションによる演奏法が可能である (図 2)．さらに，カメラを用いることでスマートフォンという持ち運びし易い小さなデバイスであるにもかかわらず本物のピアノのような大きな範囲での演奏が可能になると考えた．

カメラと行動認識に関する研究は近年になって研究されてきている．Goncalves らはマーカを用いず単眼カメラのみを用いて腕の実時間で位置追跡を行う手法を提案した [2]．竹川らはカメラを用いてピアノを演奏する際の運指，打鍵位置を認識し，正確な打鍵位置や楽譜と照らし合わせて演奏を支援するシステムを提案した [1]．これらより本稿で提案するシステムがマーカを用いずに実現する可

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
^{a)} ryo-k@mi.s.osakafu-u.ac.jp



図 1 カメラ画面内の仮想鍵盤のイメージ

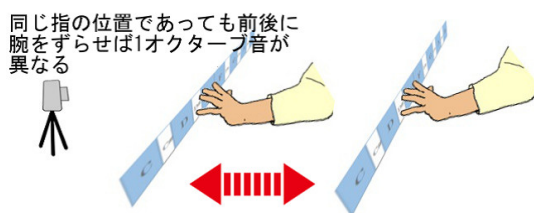


図 2 三次元的な指の位置認識のイメージ

能性があることが窺える。

このようなシステムをつくるために、プロトタイプとしてパソコンと Web カメラを用いた楽器演奏プログラムを開発することにした。カメラ内の座標のある特定の範囲を仮想の鍵盤とし、カメラ内に映る指の座標を調べる。範囲内に指があれば座標ごとに割り振られた鍵盤上の音が鳴るというプログラムである。カメラ内に映る指の座標を認識するために QPToolKit というアプリケーションを用いる。これはカメラ内に映るマーカを認識し、その座標値を返すというものであり、二次元座標、三次元座標どちらも得ることができる。このマーカを指に取り付けて演奏を行う。

このプログラムの演奏可能性を検証するために以下の実験を行った。

- 実験 1
異なる腕の使い方における演奏可能なカメラ-マーカ間の距離測定
- 実験 2
異なるマーカサイズにおける演奏可能なカメラ-マーカ間の距離測定
- 実験 3
演奏可能なカメラに対するマーカの角度測定
- 実験 4

三次元モーションによる演奏法の検証

実験 1 から 3 では二次元的なマーカの位置座標を用いたプログラムを使用しており、実験 4 はプログラムに改良を加え、三次元的なマーカの位置座標を用いて実験を行った(図 2)。

実験により、カメラとマーカを利用した楽器演奏プログラムにおける腕の使い方やマーカの大きさ、角度の違いによる演奏可能性の違いを確認することができた。また三次元モーションによる新たな楽器演奏法を実現したものの、

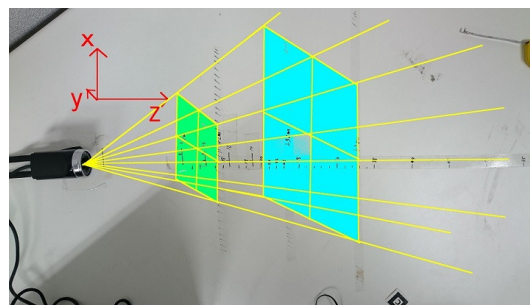


図 3 三次元座標系のイメージ

設定した位置でしか演奏が出来ないという課題が残った。

2. 問題設定

パソコンと Web カメラを用いた楽器演奏プログラムの演奏可能性を検証するための問題設定について述べる。

検証に用いるプログラムはカメラの映す画面内に仮想の鍵盤を設定し、カメラ内に映る指の座標を調べ、範囲内に指があれば座標ごとに割り振られた鍵盤上の音が鳴るというものである(図 1)。

カメラによって指の位置を常に取得可能であるとし、その座標を (x, y, z) で表す。図 3 の座標系において、カメラに映る範囲の xy 平面上の線分 $x = a_1$ を $y = b_1(z)$, $y = b_2(z)$, $y = b_3(z)$, $\dots$, $y = b_n(z)$ で区切り、それぞれの領域に対してピアノ鍵盤の音階の順になるように音を割り当てる。ただし、 $y = b_i(z)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) は指の位置の z 座標によって決定される値である。ピアノ鍵盤の音階とは、C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#, B の順列であり、B の次は C に、C の前は B となる。本稿では、予備実験により決定した $y = b_i(z)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) において、演奏可能であるかどうかを明らかにする。

3. 提案システム

実際に楽器演奏に用いるプログラムについて述べる。実装は Windows 10 (TOSHIBA 社 dynabook satellite CPU: Intel Core i7 2.40GHz RAM: 8.00GB) 上で Visual Studio 2015 を用いて行った。使用したプログラミング言語は C++ である。

3.1 QPToolkit

今回のプログラムはプロトタイプであるために実装が簡易なマーカを用いた指の位置認識を利用することにした。そこで QPToolkit を用いた。QPToolkit とは Web カメラを用いて専用のマーカを認識し、画面内における二次元位置座標や三次元位置座標の値を返すプログラムである。

専用のマーカは QPToolkit の Web サイト [3] で提供されているマーカのデータを紙に印刷することで使用できる。マーカデータの中央部には何も描かれておらず、いくつかの条件はあるが、自由にマーカのデザインを決めることが



図 4 QPToolkit が表示するマーカの座標情報

出来る。

QPToolkit は接続されたカメラから得られるビデオ画像の中からマーカを認識し、その座標情報を QPServer と呼ばれるサーバを用いて TCP/IP 経由で送信する。他のプログラムはそのデータを TCP/IP 経由で受信することで座標情報の取得が可能となる (図 4)。ビデオのフレーム毎に座標情報を送信し続けるので 1 秒間にフレームレート個の座標情報が送られる。

QPToolkit の二次元座標系はカメラ画面の左上を原点としたものであり、三次元座標系はカメラの光学中心を原点としたものである。

3.2 二次元モーションを用いた演奏プログラム

二次元モーションを用いた演奏プログラムの大まかな流れはカメラ内の座標のある特定の範囲を仮想の鍵盤とし、カメラ内に映る指の二次元的な座標を調べ、範囲内に指があれば座標ごとに割り振られた鍵盤上の音が鳴るというものである。このとき同時に鳴らせる鍵盤の個数は 1 つとする。

位置座標の取得には QPToolkit を使い、音を鳴らすシステムとして OpenAL[4] を使用する。OpenAL は wav などの音声ファイルを読み込み、C++などのプログラム上で再生、停止などが出来る API である。これらを用いた楽器演奏プログラムのアルゴリズムを以下に示す。

- (1) QPServer が動いているサーバの IP アドレスとポート番号を指定し、QPServer に TCP ソケットを接続。用意した 1 オクターブ分 (12 個の異なるピアノ音) の音声ファイルを読み込み。
- (2) プログラムを続けるなら (3)、そうでなければ終了。
- (3) サーバからデータを受信。
- (4) 認識したマーカの個数が 1 個ならば (5)、0 個なら (2)。
- (5) マーカが仮想鍵盤上にあれば (6)、仮想鍵盤上になければ (7)。
- (6) ひとつ前に受信したマーカの位置が今と同じでなければ鍵盤の位置に対応した音を再生し (2)。位置が同じ

であれば停止し (2)。

- (7) ひとつ前に受信したマーカが仮想鍵盤上にあれば今、再生している音を停止し (2)。仮想鍵盤上になればそのまま (2)。

3.3 三次元モーションを用いた演奏プログラム

QPToolkit から得られた光学中心を原点とした三次元位置座標は二次元座標と座標系が異なる。二次元座標系はマーカの z 軸方向の移動にまったく影響を受けず xy 座標の範囲は常に 640×480 であるのに対して、三次元座標系は図 3 に示すように z 軸方向の移動によって xy 座標の範囲が変動する。つまり z 軸方向の変動によって xy 座標系が変動する座標系である。よって二次元モーションを用いたプログラムに対して改良が必要である。

ひとつの手法として三次元座標系に対して座標変換処理を行い、 z 軸方向の変動によって xy 座標系が変動しない絶対的な三次元座標系を得て、それをプログラムに利用するというものが考えられる。この手法だと一秒間にフレームレート回 (30fps なら 1 秒間に 30 回)、座標変換処理を行う必要があるので計算に時間がかかり演奏にタイムラグが生じることが予想される。

もうひとつの手法はいくつかの地点における 3 次元位置座標データを測定し、2 つの仮想鍵盤の設置位置における座標系のみあらかじめわかっているものとしてプログラムを実装するというものである。本稿ではこの手法を用いる。

二次元モーションを用いた演奏プログラムからの改良点は

- 測定した 3 次元位置座標データをもとに 2 つの仮想鍵盤の位置を設定する
 - 1 オクターブ異なる 2 つの仮想鍵盤の音を用意
 - どちらの鍵盤のどこを弾いたかに合わせて音声ファイルを再生
- である。

4. 実験

実験の内容とその結果、考察について述べる。専用のマーカを印刷したものを図 5 のように指に貼り付け使用した。Web カメラには解像度 640×480 、SanwaSUPPLY 製 CMS-V37BK を使い、机のような平らな面の場所に設置し、設置面からの高さを 3cm に固定して使用した (図 6)。カメラ-マーカ間の距離測定には Web カメラのレンズ面から指に取り付けられたマーカ面までの距離をメジャーで測定したのを用いた (図 7)。これらを共通の設定として次の 4 つの実験を行った。

4.1 異なる腕の使い方における演奏可能なカメラ-マーカ間の距離測定 (実験 1)

指だけを使った場合、指と手首を使った場合、指と手首



図 5 使用したマーカとその取り付け方



図 6 使用した Web カメラ

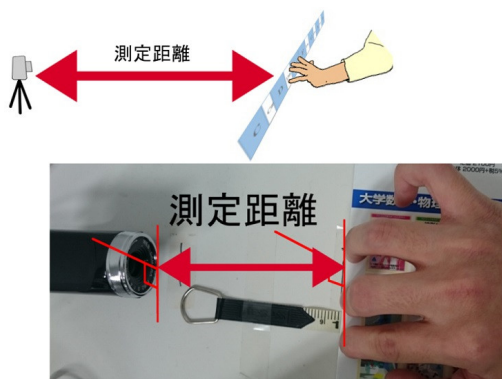


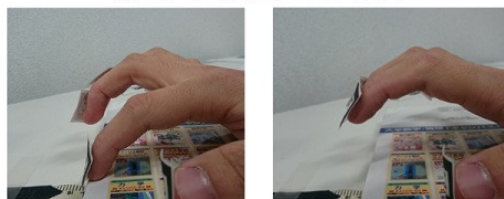
図 7 カメラとマーカ間の測定距離

と肘を使った場合の演奏可能なカメラ-マーカ間の距離測定を行った。

4.1.1 実験方法

カメラ-マーカ間距離を 10cm に設定し、指だけを使った場合、指と手首を使った場合、指と手首と肘を使った場合、それぞれの場合 (図 8) で仮定のピアノ鍵盤のすべての音 (1 オクターブ分) をマーカで押さえ、音階ごとに弾けるかどうか記録した。このとき片手 5 本の指全てにマーカを取り付け、どの指でどの鍵盤を弾いたか記録した。カメラ-マー

指だけを使った場合



指と手首を使った場合



指と手首と肘を使った場合



図 8 3 つの場合の実験状況

カ間距離を結果に合わせて適宜 1cm 刻みで増減させながらこれらの行程を繰り返し、正確な演奏可能距離を求めた。

演奏可能距離の定義は全ての音が弾けるときのカメラ-マーカ間の距離とした。弾けるかどうかの定義は 10 回鍵盤を押さえて、その鍵盤の音が鳴った回数が、8 回以上であれば弾けたものとした。

指だけを使った場合、手首と肘は完全に固定した。指と手首を使った場合、肘は完全に固定した。指と手首と肘を使った場合、肩は固定した。カメラ-マーカ間距離に合わせて測定条件が同じになるように、仮想鍵盤の範囲や手を置く場所の高さを調整した。

4.1.2 実験結果および考察

● 指だけを使った場合

指だけでは全ての音を鳴らすことが出来なかった。カメラ-マーカ間の距離が 14cm 以上でなければ、一番端の鍵盤を弾くときマーカが画面からはみ出してしまった。そしてカメラ-マーカ間の距離が 14cm のとき、手首を動かすことが出来ないために指が鍵盤に届かず、演奏は不可能だった。

よってマーカを認識できる最小の距離で指が届かなけ

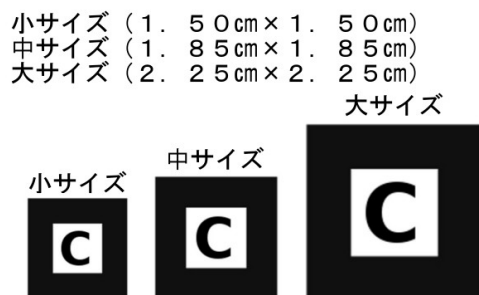


図 9 マーカサイズの定義

れば、そこから距離を長くしていても指は届かないので、指だけでは全ての音を鳴らすことが出来ないと判断した。

- 指と手首を使った場合

14cm-32cm で演奏可能であることが分かった。指と手首だけ使用すると 32cm あたりで腕の構造上どうしてもマーカが斜め向きになり、ある程度遠くなると認識しなくなるため演奏不能になった。

- 指と手首と肘を使った場合

14cm-53cm で演奏可能であることが分かった。指と手首を使った場合よりも演奏可能距離が伸びた。これは腕の可動域が格段に広がったことによってカメラ面に対して平行にマーカを向けることが常に可能となったためであると考えられる。

つまりカメラの認識精度だけで演奏可能距離が決まるということだと推察される。

4.2 異なるマーカサイズにおける演奏可能なカメラ-マーカ間の距離測定 (実験 2)

マーカの大きさを変えた場合 (大中小) の演奏可能なカメラ-マーカ間の距離測定を行った。

4.2.1 実験方法

実験 1 のマーカを中サイズとして大、小サイズそれぞれのマーカに対して実験 1 と同様の距離測定を行った。マーカサイズの定義は小サイズ (1.50cm × 1.50cm)、中サイズ (1.85cm × 1.85cm)、大サイズ (2.25cm × 2.25cm) とした (図 9)。

4.2.2 実験結果および考察

- 大マーカ
 - － 指だけを使った場合-演奏不能
 - － 指と手首を使った場合-演奏可能距離 (17cm-33cm)
 - － 指と手首と肘を使った場合-演奏可能距離 (17cm-61cm)
- 小マーカ
 - － 指だけを使った場合-演奏不能
 - － 指と手首を使った場合-演奏可能距離 (12cm-30cm)
 - － 指と手首と肘を使った場合-演奏可能距離 (12cm-

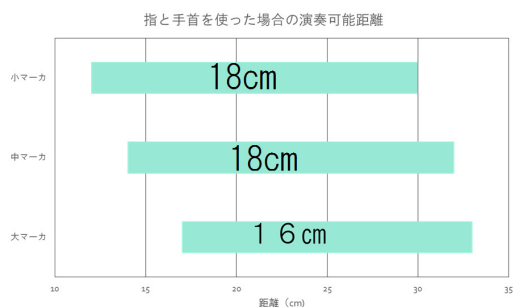


図 10 指と手首を使った場合の演奏可能距離

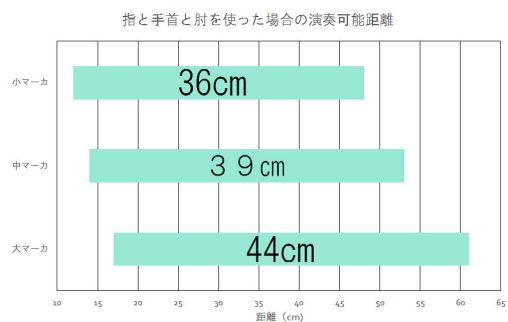


図 11 指と手首と肘を使った場合の演奏可能距離

48cm)

実験 1, 2 の結果を次のグラフにまとめた (図 10, 図 11)。これよりマーカの大きさに比例して演奏可能距離は大きくなることが見て取ることが出来る。

また棒グラフ内の数値は演奏可能距離の上限と下限の差である。これを演奏可能範囲とすると、指と手首を使った場合の演奏可能範囲はほぼ同値である。このことより指と手首を使った場合、演奏不能になるのは腕の構造上の問題でマーカが斜めになるときだとすれば、マーカが演奏不能な角度になるまでの距離は一定であることが推察される。

もうひとつ分かることとして、指と手首と肘を使った場合の演奏可能範囲は徐々に大きくなっている。このことより指と手首と肘を使った場合、演奏可能距離がカメラの認識精度のみによって決まるとすれば、演奏可能範囲は単純にマーカサイズに依存することが推察される。

指だけを使った場合の演奏可能距離はどのマーカでも全ての音を鳴らすことが出来なかったため求めることが出来なかった。手の構造上の問題と画面内に収まるマーカサイズの限界から指だけを使った演奏は不可能に近いと考えられる。

4.3 演奏可能なカメラに対するマーカの角度測定 (実験 3)

演奏可能なカメラに対するマーカの演奏可能角度の測定を行った。カメラ-マーカ間の距離を変えながら距離別の演奏可能角度を測定した。

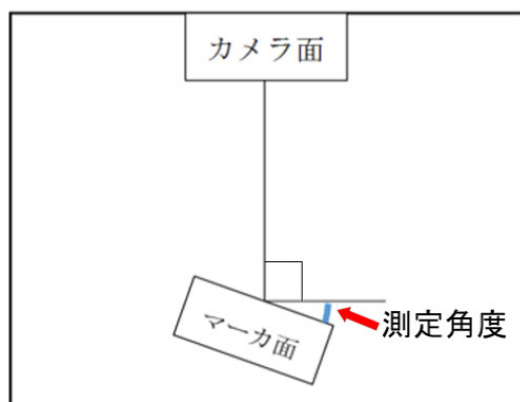


図 12 測定角度のイメージ

4.3.1 実験方法

カメラに対するマーカの角度を平行状態からどこまでずらせば演奏可能であるか検証した。

音を鳴らすのはカメラの軸線上の一音のみとした。このとき指と手首のみを使用し、マーカサイズは中とした。

カメラに対するマーカの角度を平行状態から 10 度ずつずらしていき、音が弾けなくなった時点で、1 度ずつ最初とは逆の方向にずらしていくことで演奏可能角度を求めた(図 12)。この行程をカメラとマーカの距離を 14cm から実験 1 の指と手首のみを使った場合の演奏可能距離まで 3cm 刻みで増やしながらい繰り返した。これにより距離別の演奏可能角度を求めた。

演奏可能角度の定義はマーカ面がカメラ面に対してある角度で傾いているときに 10 回鍵盤を押さえて、その鍵盤の音が鳴った回数が、8 回以上であればその角度は演奏可能とした。

4.3.2 実験結果および考察

結果は 14cm-17cm で演奏可能角度は 52 度、20cm-32cm で演奏可能角度は 45 度となった。若干少ないデータではあるが、このことから演奏可能角度は距離に反比例して小さくなると考えられる。

4.4 三次元モーションによる演奏法の検証 (実験 4)

三次元モーションを利用した楽器演奏プログラムの演奏可能性を検証した。2つの仮想鍵盤をカメラ画面内に三次元的に設定した。2つの鍵盤において、カメラに近い方の鍵盤がもう一つの鍵盤に対して全ての音が 1 オクターブ高い音が鳴るように設定した。カメラ-マーカ間の距離を変えながら 2つの鍵盤のどちらが演奏可能かを検証することで 2つの鍵盤の境界を求めた(図 2)。

提案システムより三次元座標系の座標データを測定し 2つの仮想鍵盤の位置と境界を決定する過程を実験 4-1 とした。実験 4-1 をもとに 2つの仮想鍵盤の演奏可能性の検証と 2つの仮想鍵盤の境界の測定を行う過程を実験 4-2 とした。

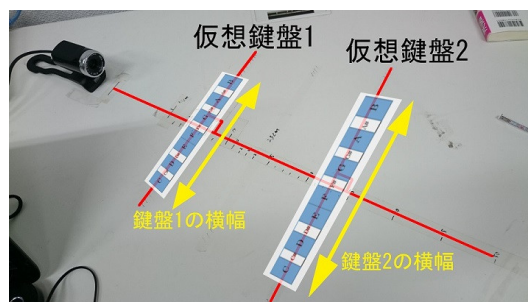


図 13 2つの仮想鍵盤の設置イメージ

4.4.1 実験 4-1

まず実験 1, 2 の結果をもとに演奏可能距離の中から適当に 14cm, 23cm, 32cm の三つを選びそれぞれのカメラ-マーカ間距離においてマーカを鍵盤上の端から端まで平行移動させた。そのときの三次元位置座標データを出力した。このときのマーカサイズは中であり、指と手首と肘を使った。このデータをもとに仮想鍵盤の横幅、仮想鍵盤とそうでないところの境界、2つの仮想鍵盤の境界を適当に設定した。

結果としてカメラ-マーカ間距離 14cm と 32cm の位置に仮想鍵盤を設置することにした(図 13)。

4.4.2 実験 4-2

実験 4-1 の結果をもとに実装した楽器演奏プログラムを用いて次の実験を行った。

まず 2つの仮想鍵盤が演奏可能か確かめるためにカメラ-マーカ間距離 14cm と 32cm の位置での演奏可能性を検証した。次にカメラ-マーカ間距離を 14cm から 32cm まで 1cm 刻みで適宜増減させて 2つの仮想鍵盤の境界位置を求めた。また 14cm から 32cm の間の各カメラ-マーカ間距離における演奏可能性を検証した。

結果として 2つの仮想鍵盤は演奏可能であった。また仮想鍵盤の境界はカメラ-マーカ間距離 18cm の位置であった。カメラ-マーカ間距離 18cm の位置ではどちらの鍵盤の音も鳴るパターンが存在し、18cm 以前では高い音の鍵盤、18cm 以降では低い音の鍵盤が鳴ったため境界は 18cm とした。またカメラ-マーカ間距離 19cm から 23cm の範囲では両端の鍵盤が鳴らず、演奏不能であった。

この原因を探るために 2つの仮想鍵盤の境界と範囲を図 14 にまとめた。黄色の線がカメラの映す範囲、緑の領域が一つ目の仮想鍵盤の音が鳴る範囲、水色の領域が二つ目の仮想鍵盤の音が鳴る範囲である。

図 14 よりカメラの画面内から仮想鍵盤がはみ出しているためにカメラ-マーカ間距離 19cm から 23cm の範囲が演奏不能となったことが分かる。また 17cm の位置では画面に対して鍵盤範囲が小さく狭い範囲での楽器演奏となることが分かる。このことより今回提案した手法はあらかじめ設定された 2つの仮想鍵盤の位置でのみ演奏可能である限定的なシステムであると言える。

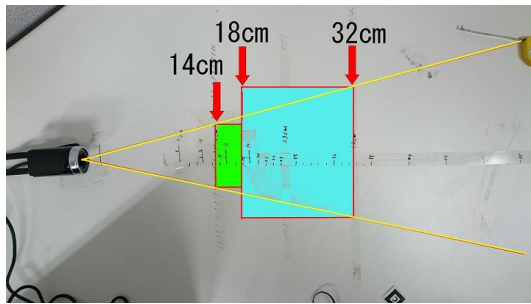


図 14 2つの仮想鍵盤の境界と範囲

もう一つの提案手法である座標系に対して座標変換を行うシステムを用いれば、 xy 座標系が絶対的なものとなるので今回提案した手法よりもさらに自由な演奏システムが実現できるのではないかと考えられる。しかしこの手法には座標変換処理にかかる時間の短縮という課題があると予想される。

5. まとめ

本稿では、web カメラとパソコン、マーカを用いてピアノをモデルとした楽器演奏プログラムを提案し、腕の使い方、距離、マーカサイズ、角度の観点から演奏可能性の検証実験を行った。結果として、演奏可能なカメラ-マーカ間の距離は腕の可動域およびマーカサイズに比例すること、演奏可能なマーカの傾き角度は演奏可能距離に反比例することが分かった。

また既存のピアノの平面的な演奏法に前後の動きを加えることで三次元モーションを用いた新たな楽器演奏法を提案した。演奏可能性の検証実験の結果、あらかじめ設定された2つの仮想鍵盤の位置でのみ演奏可能である限定的なシステムであることが分かった。今回の提案手法とは別の三次元座標変換を用いたシステムを用いればさらに自由な演奏システムの実現が予想される。

参考文献

- [1] 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, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.2, 917-927 (Feb.2011) (参照 2017-04-22).
- [2] L.Goncalves, E.Di Bernardo, E.Ursella, P.Perona: Monocular tracking of the human arm in 3D, IEEE(2002) (参照 2017-05-03).
- [3] Sunao Hashimoto: 工学ナビ QPToolkit Web カメラを使った簡単位置計測 (online), 入手先 (<http://kougaku-navi.net/QPToolkit/>) (2011.01.05) (参照 2017-05-01).
- [4] Free Software Foundation: LGPL, OpenAL Soft(online), 入手先 (<http://kcat.strangesoft.net/openal.html>) (参照 2017-05-01).
- [5] Gismart: Real Piano App(online), 入手先 (<https://gismart.com/project/gismart-piano-app/>) (参照 2017-05-10).
- [6] LINE Coporatrion: LINE(online), 入手先 (<https://line.me/ja/>) (参照 2017-05-10).