

## ボールジャグリングの技を解析する方法の研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2015-04-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 磯部, 拓海, 新谷, 誠 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00008188">https://doi.org/10.14945/00008188</a>

**論文（査読論文）****ボールジャグリングの技を解析する方法の研究****The method to calculate juggling tricks**

磯部拓海

Takumi ISOBE

静岡大学大学院 情報学研究科

gs13004@s.inf.shizuoka.ac.jp

新谷 誠

Makoto ARAYA

araya@inf.shizuoka.ac.jp

**論文概要：**ボールジャグリングの技をアルゴリズム化し、動画からボールと関節の位置情報を取得して動きを解析することでボールジャグリングの技を判定するシステムの開発と評価を行った。各技をアルゴリズム化することで技を明確にすることができる、これに沿った判定方法を実装することで高い精度で技を判定することができた。

**キーワード：**ボールジャグリング、サイトスワップ、Kinect、OpenCV、技判定

**Keywords:** ball juggling, siteswap, Kinect, OpenCV, judgement of the trick

**1はじめに**

ジャグリングと呼ばれる曲芸は、路上パフォーマンスやメディアの露出、各地でのサークル設立なども相まって一般に広まってきている。これに伴いジャグリングの技を解説するWebページや動画が登場し、初心者のみならず上級者もジャグリングの練習方法や新しい技の情報を得ることができる。しかしながら依然としてジャグリングはマイナーなものであるため、初心者がジャグリングの技を練習する際に、技が正しくできているかどうかを判断することが難しい場合がある。周囲にジャグリング経験者がいる場合は間違いの指摘を受けることができるが、独学でジャグリングの練習をしている場合は困難である。そこで、ジャグリングを撮影した動画を解析して技を正しくおこなえていたか否かを示すことも彼らの参考や励みになると言える。

本論文では、ボール3個を左右交互に投げ

るボールジャグリングのみを扱うこととする。ボールジャグリングの技を明確にするために3.2節で[1]と[2]を参考に技のアルゴリズム化を行い、3.3節で各技を判定する方法を述べる。4節ではカメラ(Kinect)で撮影した動画からボールと身体の関節の座標を取得して2.1節で説明するサイトスワップを算出すると共に、3.3節で述べる方法でボールジャグリングのどの技が行われたかを判定するシステム開発について述べる。今回は動画中で各技が行われたことを判定して技名を出力することを目的とし、ボールジャグリングの技をある程度実施できるアマチュアを対象として開発したシステムの実験を行うことにした。7人に対する実験では、各技のアルゴリズムに合わせて判定方法を実装することで、ジャグリング検定の低い級の技に関して高い精度で判定することができた。

ジャグリングに関する研究は少ないようである。例えば学術情報検索データベースであるCiNii(学術情報ナビゲータ)[3]においてジャ

グリングで学術論文を検索すると 20 件程度であった。その他、ジャグリングに関する有用な情報は主に書籍、日本ジャグリング協会 [4] の Web ページ、各学校のサークルや趣味でジャグリングをする人の Web ページから得ることができる。特に、第一著者が学会等で学術的な研究 ([5],[6],[7]) を行い成果の発表を行っている。

## 2 サイトスワップとその性質

ボールなどのトスジャグリングにおいて、投げるボールなどの滞空時間(高さ)を離散化した時間軸上で表した数列はサイトスワップと呼ばれている [1]。ボールジャグリングの技にはサイトスワップのみで表される技が存在するので、技の表現方法として重要なものである。

サイトスワップに関する用語、性質について [8],[9] を参考にまとめる。

### 2.1 サイトスワップ

投げるボールの高さや早さは個人差があるため、投げ上げる物体の高さを表現する際には実時間や実際の距離を用いず、ボールを投げる度に進む時刻を用いる。

ボールは左右の手で交互に投げられ、時刻はボールを投げる度に 1 進むとする。 $f(t)$  は時刻  $t$  で投げたボールが次に投げられる時刻(到着時刻)、 $df(t)$  は時刻  $t$  で投げるボールの滞空時間とする。正の整数  $s, t$  をボールを投げる時刻としたとき、 $f(t), df(t)$  は次の式で表される。

$$f(t) = \begin{cases} s & (t \text{ で投げたボールを次に投げる時刻 } s) \\ t & (t \text{ で投げるボールが存在しない}) \end{cases}$$

$$df(t) = f(t) - t$$

また、滞空時間  $df(t)$  をボールを投げる高さということにする。

同じ技を繰り返し行うと  $df(t)$  は周期関数となる。 $df(t)$  の列がサイトスワップであるが、以降  $df(t)$  の最短の 1 周期をサイトスワップと呼ぶことにする。

例えば、表 1 はサイトスワップ「3」の時刻  $t$ ,

到着時刻  $f(t)$ 、ボールを投げる高さ  $df(t)$  を表す。 $t, f(t)$  が定まると  $df(t)$  を求めることができサイトスワップが「3」と分かる。逆にサイトスワップが「3」と分かることで  $df(t)$  が定まり、 $t$  と  $f(t)$  が表 1 のようになることも分かる。

表 1 サイトスワップ「3」

時刻	$t$	0	1	2	3	4	5	6
到着時刻	$f(t)$	3	4	5	6	7	8	9
高さ	$df(t)$	3	3	3	3	3	3	3

サイトスワップ「3」は 3 個のボールを左右交互に 3 の高さで投げ続けることで実現できる。後で述べるようにサイトスワップが「3」である技は複数あるが、特に落ちてくるボールの内側<sup>\*1</sup>を通すようにして体の正面で投げ続ける技をカスケードと呼ぶ。カスケードは 3 個のボールジャグリングの最も基本となる技である。

### 2.2 $df(t)=0,1,2$ の扱い

ボールを左右の手で交互に投げるととき、 $df(t)$  が奇数ならばボールを逆の手に、偶数ならば同じ手に落ちるように投げることを意味する。[1] では、 $df(t)=0,1,2$  は次のように扱うと述べられている。

- ・ 0…何も持たず何も投げない。
- ・ 1…逆の手にすばやく手わたす。
- ・ 2…持ったまま何も投げない。

$df(t)=0,2$  では実際にボールを投げていないが、サイトスワップでは  $df(t)=0,2$  の高さでボールを投げたものとして時刻を 1 進める。

### 2.3 ジャグリング可能

次の二つを満たすときサイトスワップはジャグリング可能であるという。

1.  $s \neq t$  ならば  $f(s) \neq f(t)$  である。
2.  $df(s) \neq 0$  ならば、ある  $t (s > t)$  に対し  $f(t) = s$  である。

条件 1,2 より  $\mathbb{Z}$  を整数の集合とすると写像  $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$

\*1 内側は、右(左)手でボールを投げる時は落ちてくるボールの左(右)側であり、外側はこの逆である。

$\rightarrow \mathbb{Z}(t \mapsto f(t))$  が全単射のときジャグリング可能であると言い換えることができる。また  $s \neq t$ ,  $f(s) = f(t)$  のとき、時刻  $f(s)$ ,  $f(t)$  でボールが 2 個以上同じ手に落ちてくるのでジャグリング可能ではない。

## 2.4 ボールの個数

$X$  をサイトスワップの各数の平均値、 $b$  をボールの個数とすると、 $b = X$  が成立する。例えばサイトスワップ「441」のボールの個数  $b$  は、 $b = (4 + 4 + 1) \div 3 = 3$  で求めることができる。よって  $df(t)$  は正の整数なので、ボールが 3 個のとき、周期 1 のサイトスワップは「3」、周期 2 のサイトスワップは「60」、「51」、「42」である。

## 3 技の説明と判定方法

本節では、開発するシステムで判定対象とするボールジャグリングの技の説明とその判定方法について述べる。対象とする技は日本ジャグリング協会のジャグリング検定 [10] から選んでいる。

### 3.1 ジャグリング検定について

日本ジャグリング協会は 2005 年に段級位認定委員会を組織し、2008 年にジャグリングの検定表を制定している。表 2 のジャグリング検定の検定表に挙げられた技は「5 ボールカスケードを最終目標としたレベル設定で、5 ボールを習得する前にぜひ身につけてほしい技」と述べられており、ボールジャグリングの基礎となる技が多い。

### 3.2 技の説明とアルゴリズム

本節ではボールジャグリングの技を [1], [2] を参考に説明すると共に、独自にアルゴリズム化を行った結果を記す。

#### 3.2.1 カスケード

カスケードは 3 個のボールジャグリングの最も基本となる、ボールを図 1, 2 のように左右

交互に同じ高さで投げる技である。

カスケードは次のアルゴリズム 1 で表すことができる。

#### アルゴリズム 1

1. 右手でボールを 2 個、左手で 1 個持つ。
2. 右手からボールを 1 個だけ左手に向かって上方向に投げる。
3. 2. で投げたボールが落ちてきたら、図 1 のように落ちてくるボールの内側を通るように左手のボールを右手に向かって上方向に投げる。
4. 落ちてくるボールを左手でキャッチする。
5. 3. で投げたボールが落ちてきたら、図 2 のように落ちてくるボールの内側を通るように右手のボールを左手に向かって上方向に投げる。
6. 落ちてくるボールを右手でキャッチする。
7. 3. から 6. を繰り返す。

アルゴリズム 1 の右手と左手の表記は入れ換えてよい。



図 1 カスケード 1



図 2 カスケード 2

#### 3.2.2 オーバー・ザ・トップ系

カスケードでは落ちてくるボールの内側を通してボールを投げるが、図 3 のように内側では

表2 ジャグリング検定検定表

級	必須技	選択技 (3つ選択)		
1	カスケード(5)	ハイ・ロー・シャワー(4)	3イン1ハンド(3)	バッククロス(3) 3up ピルエット(3)
2	カスケード(5)	シャワー(4)	キャリー(3)	バッククロス(3) 53(4)
3	ファウンテン(4)	スタチュー・オブ・リバティ(3)	チョップ(3)	シンクロ・ファウンテン(4) ハーフ・シャワー(4)
4	ファウンテン(4)	オフ・ザ・ヘッド(3)	パークス・バラージ(3)	ボックス(3) 1up ハーフターン(3)
5	ファウンテン(4)	シャワー(3)	オーバーヘッド・カスケード(3)	ミルズ・メス(3) 1up ピルエット(3)
6	ファウンテン(4)	リバースカスケード(3)	441(3)	ウインドミル(3) ボディーバウンス(3)
7	カスケード(3)	ジャグラーズ・テニス(3)	シャワー(3)	ビハインド・ザ・バック(3) フラッシュ1クラップ(3)
8	カスケード(3)	ハーフ・シャワー(3)	クロー・キャッチ(3)	1up2up(3) 423(3)
9	カスケード(3)	オーバー・ザ・トップ(3)	アンダー・ジ・アーム(3)	2イン1ハンド(2) アンダー・ザ・レッグ(3)
10	カスケード(3)	—	—	—

( )内の数字はボールの個数を表す。

なく落ちてくるボールの外側を通す投げ方をオーバー・ザ・トップという。オーバー・ザ・トップをアウター・スローまたはアウトサイド・スローということもある。

オーバー・ザ・トップでは落ちてくるボールの外側を通すボールは一つだけであるが、片方の手をすべて連続で外側から投げるとハーフ・シャワー、一つのボールに着目してこのボールを常に外側から投げるとジャグラーズ・テニス、全てのボールを外側から投げるとリバース・カスケードとなる。

オーバー・ザ・トップは次のアルゴリズム2で表すことができる。なお、以降で説明する技のアルゴリズムは、全てカスケードから各技に移行し再びカスケードに戻る表現に統一する。

## アルゴリズム2

1. カスケードを行う。
2. ボールを投げる時、図3のように落ちてくるボールの外側を通るように投げる。
3. カスケードに戻る。



図3 オーバー・ザ・トップ

またオーバー・ザ・トップ系の技であるジャグラーズ・テニスのアルゴリズムは、アルゴリ

ズム2の2を「落ちてくるボールの外側を通るように1回投げた後、内側を通るように2回投げることを繰り返す」と置き換える。同様に、ハーフ・シャワーとリバース・カスケードのアルゴリズムは、それぞれ「落ちてくるボールの外側を通るように1回投げた後、内側を通るように1回投げることを繰り返す」、「落ちてくるボールの外側を通るように投げることを繰り返す」と置き換える。

### 3.2.3 オーバーヘッド・カスケード

オーバーヘッド・カスケードは図4のように、万歳をするように両手を上げた格好をし、頭の上でカスケードする技である。両肘を開きボールを下から覗き込むようにし、腕全体の動きでボールを投げる。

オーバーヘッド・カスケードは次のアルゴリズム3で表すことができる。

## アルゴリズム3

1. カスケードを行う。
2. ボールを一つ高く投げ、反対の手を頭上に上げる。
3. 2.で上げた手でボールを投げ、もう片方の手も頭上に上げる。
4. 図4のように、ボールを下から覗き込むように頭上でカスケードを行う。
5. あるボールを投げたらすぐに両手を下げる。
6. カスケードに戻る。



図4 オーバーヘッド・カスケード

### 3.2.4 スタチュー・オブ・リバティ

スタチュー・オブ・リバティという技は日本語で自由の女神と呼ばれる。図5のように自由の女神のように片手を高くつき出し、下の手からボールを高く上げた手に落ちるようにコントロール良く投げ、高く上げた手のボールは下の手に軽く落とす技である。自由の女神像のように高く上げた手を同じ位置で固定し続ける。

スタチュー・オブ・リバティは次のアルゴリズム4で表すことができる。なお、アルゴリズム4中の右手と左手の表記を入れ換えてよい。

#### アルゴリズム4

1. カスケードを行う。
2. 右手でボールを一つ高く投げると同時に左手を頭上に真っ直ぐ上げる。
3. 左手で持っているボールを右手に向かって落とすように投げ、2.で投げたボールを左手でキャッチする。
4. 図5のように左手にめがけて右手でボールを一つ高く投げ、3.で左手で落とすように投げたボールを右手でキャッチする。
5. 3.と4.を任意の回数繰り返す。
6. 4.で左手のボールを投げたら左手を下げる、カスケードに戻る。



図5 スタチュー・オブ・リバティ

### 3.2.5 アンダー・ザ・レッグ

アンダー・ザ・レッグはボールを足の下から投げる技である。図6のように投げる手と同じ側の足の下から投げるパターンと、図7のように投げる手と反対側の足の下から投げるパターンがある。

アンダー・ザ・レッグは次のアルゴリズム5で表すことができる。

#### アルゴリズム5

1. カスケードを行う。
2. あるボールを投げる直前に片膝を上げる。
3. ボールを図6または図7のように足の下から投げる。
4. 手の位置を元の位置に戻し、膝を下げる。
5. カスケードに戻る。



図6 アンダー・ザ・レッグ1



図7 アンダー・ザ・レッグ2

### 3.2.6 アンダー・ジ・アーム

アンダー・ジ・アームは図8のようにボールを腕の下から投げる技である。右手で左腕の下から投げるパターン、左手で右腕の下から投げるパターンがある。

アンダー・ジ・アームは次のアルゴリズム6で表すことができる。

## アルゴリズム 6

1. カスケードを行う.
2. あるボールを投げる直前に、ボールを投げる手を下にして腕を交差させる.
3. ボールを図 8 のように反対の腕の下から投げ、手の交差を戻す.
4. 手の位置を元の位置に戻し、カスケードに戻る.



図 8 アンダー・ジ・アーム

## 3.2.7 ビハインド・ザ・バック

ビハインド・ザ・バックは図 9、図 10 のように背中の後ろからボールを投げ、前方でキャッチする技である。投げる手と反対側の肩を超えるように腕全体を使ってボールを投げる。左右連続で全てをビハインド・ザ・バックで投げる技をバッククロスという。

ビハインド・ザ・バックは次のアルゴリズム 7 で表すことができる。

## アルゴリズム 7

1. カスケードを行う.
2. あるボールを投げる直前に手を体の後ろに移動させる.
3. 図 9 のようにボールを体の後ろから投げる手と反対側の肩を超すように投げる.
4. 図 10 の状態からカスケードに戻る.



図 9 ビハインド・ザ・バック 1



図 10 ビハインド・ザ・バック 2

## 3.2.8 サイトスワップのみで表すことが可能な技

ジャグリング検定(表 2)では「441」、「423」、「53」のように技名を 2.1 節で述べたサイトスワップで表記している技がある。また 3 個のボールのシャワーは「51」、2 イン 1 ハンドは「42」のように、技名がついていたとしても体の正面で左右交互にボールを投げる技ならば、サイトスワップのみで表現することも可能である。今回取り扱うサイトスワップのみで表される技は「441」、「423」、「42」、「51」、「60」である。また、3.2 節内で説明した本節を除く全ての技のサイトスワップは「3」である。

## 3.3 技の判定方法

3.2 節で説明した各技をシステムで判定する方法を述べる。各技のアルゴリズムで特に特徴的な部分を判定することで技を特定する。

## 3.3.1 オーバー・ザ・トップ系

オーバー・ザ・トップ系の技では、落ちてくるボールが内側で投げるボールが外側という位置関係(アルゴリズム 2 の 2)を調べる必要がある。これを判定するために、落ちてくるボールと投げたボールの座標を利用し、投げたボールが落ちてくるボールに対して左右どちらにあるかをベクトルの外積を利用して調べる。外積はベクトルの回転方向を調べる際に広く利用されている方法である。投げたボールの座標の内最新フレームに近い二つを  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 、最新フレームの落ちてくるボールの座標を  $(x_3, y_3)$ とした時、 $z = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)$  を計算して、

- ・  $z > 0$  ならば落ちてくるボールの左 ,
- ・  $z < 0$  ならば落ちてくるボールの右 ,
- ・  $z = 0$  ならば一直線上 ,

と判断できる。この結果に左右どちらの手でボールを投げたかという情報を付加することで、落ちてくるボールの内側、外側のどちらで投げたかを判断することができる。右(左)手で投げたボールが落ちてくるボールの左(右)側を通る時は内側、右(左)手で投げたボールが落ちてくるボールの右(左)側を通る時は外側を通して投げたと判断できる。

### 3.3.2 カスケード

カスケードは、オーバー・ザ・トップ系の技とは逆に、投げたボールが落ちてくるボールの内側を通っている（アルゴリズム1の3, 5）と判断することができたときにカスケードだと判定する。また、3個のボールジャグリングの基本の技となるため、他の技が行われていないときはカスケードをしているという前提で、サイツワップが「3」かつ3.2節で述べたカスケードを除く技を検出していないと、カスケードを行っていると判定する。

### 3.3.3 オーバーヘッド・カスケード

頭上でカスケードを行っていること（アルゴリズム3の4）を判定するために、手、肘、肩の関節情報を用いる。両肘の位置が肩よりも上部にある状態でカスケードが行われたと判定したとき、オーバーヘッドカスケードを行ったと判定する。

### 3.3.4 スタチュー・オブ・リバティ

スタチュー・オブ・リバティを判定（アルゴリズム4の3, 4, 5）するために手首、肘、肩の関節情報を用いる。片手を高く上げていることを判断するために、片肘が肩よりも上部にあり、もう片肘が肩よりも下部にあることを確認する。そして肩より上部にある手首と肘を結ぶ

直線及び肘と肩を結ぶ直線とy軸との角度がおよそ等しく、垂直に近い角度で手を上げているときにスタチュー・オブ・リバティを行っていると判定する。

ボールを投げたという判定はボールが上方向または横方向に一定距離移動したときに行う。しかしスタチュー・オブ・リバティでは高く上げている手から反対の手に落とすように投げるため、4.3節のアルゴリズム8ではボールを投げたと判定することができない。そのため例外として、高く上げている手のy座標からボールが一定距離下方向に移動したときにボールを投げたと判定する。

### 3.3.5 アンダー・ザ・レッグ

アンダー・ザ・レッグを判定するために、投げたボールと膝の座標を利用する。はじめに膝を上げたこと（アルゴリズム5の2）を確認するために両膝のy座標の差を求める。膝を上げたと判断したとき、投げたボールが足の下を通ったこと（アルゴリズム5の3）を確認するためにボールを投げたときに膝の左右どちらを通したかを調べる。2フレーム前の投げたボールの座標を $(x_1, y_1)$ 、最新フレームの投げたボールの座標を $(x_2, y_2)$ 、最新フレームの上げた膝の座標を $(x_3, y_3)$ とし、オーバー・ザ・トップ系の判定と同じ式を用いて次のように判断する。

- ・  $z > 0$  ならばボールは膝の左を通った.
- ・  $z < 0$  ならばボールは膝の右を通った.
- ・  $z = 0$  ならば一直線上.

右(左)手で投げたボールが膝の左(右)を通るとき、足の下を通した（アルゴリズム5の3）と判定する。

### 3.3.6 アンダー・ジ・アーム

アンダー・ジ・アームを判定するために、投げたボールと手の座標を利用する。アンダー・ザ・レッグの判定方法のように、腕が交差して

いること(アルゴリズム 6 の 2, 3)を判定するためにボールを投げたときに反対の手の左右どちらを通したかを調べる。2 フレーム前の投げたボールの座標を  $(x_1, y_1)$ 、最新フレームの投げたボールの座標を  $(x_2, y_2)$ 、最新フレームのボールを投げなかった手の座標を  $(x_3, y_3)$  とし、オーバー・ザ・トップ系の判定と同じ式を用いて次のように判断する。

- ・  $z > 0$  ならばボールは腕の左を通った。
- ・  $z < 0$  ならばボールは腕の右を通った。
- ・  $z = 0$  ならば一直線上。

右(左)手で投げたボールが左(右)腕の左(右)を通るとき、腕の下を通した(アルゴリズム 6 の 2,3)と判定する。

### 3.3.7 ビハインド・ザ・バック

ビハインド・ザ・バックはボールを体の後ろを通して投げたこと(アルゴリズム 7 の 3)を判定する必要がある。しかし、ボールが体の後ろを通過している時はボールを画像中から認識することができない。そこで、画像中からボールを認識できないことを利用し、体の後ろを通して投げたことを判定する。以下の判定方法は[11]の記事を参考に考案した。

画像を左右の肩の y 座標の平均値で上下に分割し、上領域は首の x 座標で、下領域は左右の肩の x 座標で左右に分割して五つの領域に分ける(図 11)。

ボールを画像中から検出できた最新フレームの情報を保持しているとすると、右手でビハインド・ザ・バックを投げた時、ボールは図 11 の領域 4 から体の後ろを通って領域 2 に移動する。ボールが体の後ろを通らずに領域 4 から 2 に移動するためには、領域 1 または 5 を通過する必要があるが、体の後ろを通った時はボールを検出できないため、次にボールを検出できるのは領域 2 にボールが現れた時である。そのためボールは領域 1 や 5 を通らず領域 2 に移動し

たと認識される。これを利用し、右手で投げたボールが領域 4 から直接領域 2 に移動したと認識したとき、ビハインド・ザ・バックを投げたと判定する。

同様に、左手で投げたボールが領域 3 から直接領域 1 に移動したと認識したとき、ビハインド・ザ・バックを投げたと判定する。

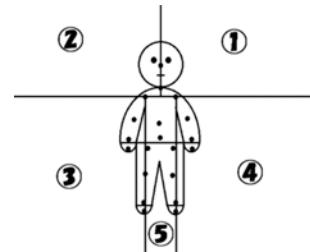


図 11 画像中の領域分割

## 4 システムの構成、実験及び評価

開発したシステムと実験方法及び実験結果と評価を述べる

### 4.1 システム構成

実験は以下のシステム構成の下で行った。

- ・ PC : FUJITSU LIFEBOOK A573/G
  - CPU : Intel Core i5-3340M(2.70GHz)
  - メモリ : 4GB
  - HDD : 500GB
  - OS : Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1
- ・ Microsoft Kinect for Windows
  - SDK : v1.8
  - 取得画像サイズ :  $640 \times 480$
- ・ OpenCV 2.2
- ・ Microsoft Visual Studio 2010 Version 10.0.40219.1 SP1Rel

また、実験で用いるボールはロシアンボールプレミアム(直径 75mm)のレッド、グリーン、ブルー(RADFACTOR 社)である。

### 4.2 ボールと関節情報の取得方法

ボールと関節情報の取得方法についてそれぞ

れ説明する。

#### 4.2.1 ボールの位置情報の取得方法

ボールの位置情報はボールの色情報を利用して取得する。各ボールの色は赤、緑、青の3種類とし、各色を検出するために二値化及びラベリングを行う。ラベリングは主に二値化を行った画像に対して用いられる手法で、同じ値を持つ隣接する画素に同じラベルを付ける処理である。図13は、図12を二値化して緑の部分を白色で表した二値画像である。ラベリングをした結果、最もラベルの数が多い領域、すなわち最も面積が大きい領域をボールの位置と判断し、領域の重心をボールの座標として取り扱う。OpenCV[12]のcvThreshold関数を用いて二値化を行った。



図12 カラー画像

#### 4.2.2 関節情報の取得方法

Microsoft社のKinectにはskeletonと呼ばれる体の20箇所(頭、首、両肩、両肘、両手首、両手、背、尻、両股、両膝、両足首、両足)の関節の座標を取得する機能があり、これを用いた。

#### 4.3 ボールを投げたと判定する方法

本節ではボールの座標の遷移を利用してボールを投げたと判定する方法について説明する。サイトスワップの算出及び3.3節で挙げた方法による技の判定の処理は、ボールを投げたと判定したときに行い、技を行ったと判定した時はその技名を出力する。サイトスワップの算出は2.1節の式を用いて行う。算出方法の詳細と実験結果は[5], [13]でも述べられている。

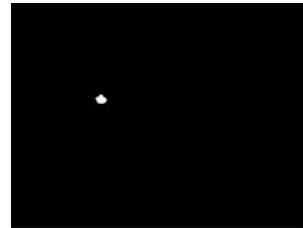


図13 二値画像

ボールを投げたと判定するアルゴリズムは以下のアルゴリズム8の通りである。

#### アルゴリズム8

1. 各ボールの座標を取得する。
2. 3個中最も上にあるボールと下にあるボールのy座標、最も右にあるボールと左にあるボールのx座標を記録し、それぞれの差を求める。
3. 各ボールが最も下にあるときのy座標と、最も右または左にあるときのx座標を記録する。
4. ボールが3.のy座標から、2.で求めたy座標の差の3/5だけ上方向に移動したとき、または3.のx座標から2.で求めたx座標の差の半分だけ横方向に移動したとき、ボールを投げたと判断する。
5. 4.で投げたと判断したボールの3.の情報を初期化する。
  
2. は図14, 15のようにx, yそれぞれの方向の最大値と最小値をフレーム毎に求める。これを基に4.でボールを投げたと判定するための移動距離を決定する。3.について、ボールが最も下にあると判断するために現在のフレームのy座標と前フレームのy座標を比較する。現在フレームのボールのy座標が前フレームよりも下の場合は記録が更新され、前フレームよりも上の場合は前フレームにおけるボールのy座標が最も下にあったと判断する。ボールが最も横にあると判断する方法も同様に前フレームと現在フレームのx座標の比較によって判断する。

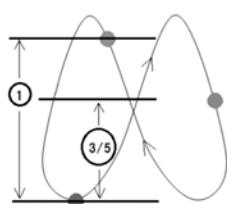


図 14 ボールを投げた判定 1

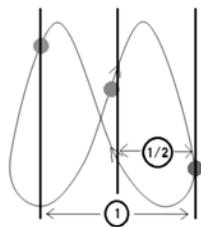


図 15 ボールを投げた判定 2

4. における  $y$  座標の差の  $3/5$  と  $x$  座標の差の半分という値は、[13] で 16 人の実験データより定めている。そのため今回の実験ではこの値を利用した。

#### 4.4 実験方法

実験の目的は、ジャグリングの技を Kinect で撮影して得られたボールと関節の座標を利用し、開発したシステムによって出力された技名の正誤を確認することである。

被験者は静岡大学及び静岡県立大学のジャグリングサークルに所属する学生合計 7 名 (大表 3)

学 1 年生 2 人、2 年生 2 人、3 年生 1 人、大学院生 2 人) である。被験者には実施可能な技を順番に行ってもらい、Kinect でこの様子を撮影する。ボールを落とした場合は拾って再度技を行ってもらう。撮影後にシステムで解析を行い、ある技を行った時の出力がその技名であった場合、期待通りに解析が行われていると人間が目視で判断する。

#### 4.5 実験結果

各技について、実施した人数に対して正しい技名を出力した人数を表 3 にまとめる。被験者が各技を実施したときに、正しく技名を出力した場合は○、正しく技名が出力されない場合でボールや関節の位置を正しく検出できていなかった場合は△、正しく検出できていた場合は×、技を実施しなかった場合は一で示す。被験者の学年を大学 1 年生は B1、大学院 1 年生は M1 のように表す。

また、実験で使用した動画から取得したボールと関節の座標情報は <http://yuki.cs.inf.shizuoka.ac.jp/juggling/> で公開する。

#### 4.6 考察及び評価

4.5 節の結果から、今回対象としたサイトスワップのみで表現できない 3.2.2 節から 3.2.7 節の技については、それぞれ一人以上で期待する出力を得ることができ、実験対象とした 14 個実験結果

技名	アルゴリズム 番号	被験者 1 (B1)	被験者 2 (B1)	被験者 3 (B2)	被験者 4 (B2)	被験者 5 (B3)	被験者 6 (M1)	被験者 7 (M2)	実施人数	○の合計
オーバー・ザ・トップ	2	○	○	○	○	○	○	○	7	7
ハーフ・シャワー	2	○	○	○	○	○	○	○	7	7
ジャグラーズ・テニス	2	○	—	○	○	○	○	○	6	6
リバース・カスケード	2	○	—	○	△	○	○	○	6	5
アンダー・ジ・アーム	6	○	○	○	○	○	○	○	7	7
アンダー・ザ・レッグ	5	○	○	—	○	○	○	○	6	6
ビハインド・ザ・バック	7	×	—	○	△	○	○	○	6	4
2 イン 1 ハンド(「42」)	8	○	○	○	△	○	○	○	7	6
「423」	8	△	—	○	△	—	—	○	4	2
シャワー(「51」)	8	△	—	○	△	○	△	○	6	3
「441」	8	△	—	○	△	△	—	○	5	2
オーバーヘッド・カスケード	3	—	—	—	△	—	—	○	2	1
スタチュー・オブ・リバティ	4	—	—	—	△	—	—	○	2	1
3 イン 1 ハンド(「60」)	8	—	—	—	△	—	—	—	1	0

の技の内 7 個で、80% 以上の人数に対して期待通りに判定できた。特にオーバー・ザ・トップ、ハーフ・シャワー、ジャグラーズ・テニス、アンダー・ジ・アーム、アンダー・ザ・レッグは被験者全員の実施の際に各技名が output された。しかしながらアンダー・ジ・アームとアンダー・ザ・レッグについては Kinect で取得した関節情報が画像中の身体の関節位置とは異なる座標を示す時があり、このようなときは技が認識されず技名が出力されない場合があった。図 16 のように Kinect が認識した手の位置を示す円と実際の手の位置が異なる状態が見られた。



図 16 実際の手の位置とは異なる位置を指し示す状況

ビハインド・ザ・バックを行った一人の被験者で、背中の後ろで投げたボールが肩を越えず肩の横辺りに投げられていたためアルゴリズム 7 の 3 に該当せず、判定されなかったケース（被験者 1）が 1 件あった。

ボールを検出するために行う二値化処理では閾値を設定するが、ボールは常に画面中を移動し、光の当たり具合やボールの移動速度などによって色が変化するため、ボールを検出できない状況が発生した。そのためサイトスワップで表現される技は、ボールの座標の取得を正しくおこなうことができていない状況があったため、実際に投げられたサイトスワップとは異なる数列が出力される部分が存在した。

実験対象とした 14 個の技の内 7 値で 80% 以上の人数に対して期待通りに判定でき、残る 7 個の技が 80% 以上の人数に対して期待通りに判定できなかった。期待通りに判定できなかつた原因として考えられるのは次の通りである。

1. ボール座標を正しく取得できなかつた。
2. Kinect による関節位置の誤検出。
3. 驚データ数の不足。

1. と 2. については前述の通りである。3. について、今回の実験では 7 人の被験者の協力を得ることができたが、この 7 人全員が実施することができた技はジャグリング検定 8 級以下の技、6 人以上が実施することができた技は 6 級以下の技であった。上位の級の技は難易度が高く、実施できる人数が減少する。上位の級の技について実験するためには被験者のジャグリングレベルに依存してしまうため、被験者の募集が困難であった。そのため、特に上位の級の技の判定についてはさらに実験を行う必要がある。

また、低い級の技のサイトスワップで表現される技を実施できないケースがある。「441」や「423」のようなサイトスワップで表現される技を理解するためには多少のサイトスワップの知識が必要となるが、ジャグリングを始めたばかりであったり、ボールではない道具を用いたジャグリングを主として行っていたりする人の場合はサイトスワップの知識を持っておらず、技を実施できなかつたと考えられる。

## 5 結論

本研究ではボールの位置と関節の位置情報を用いてボールジャグリングの技を判定するアルゴリズムを作成し、システムを実装して評価を行った。各技をアルゴリズム化してボールと関節の位置情報の特徴を解析することにより、実験対象とした 14 個の技の内 7 値が、80% 以上の人数に対して正しく判定できた。他の 7 値の技の判定についてはボールの位置や関節の位置情報の検出精度の改良によって判定能力が向上する可能性がある。

今回の実験で発生したビハインド・ザ・バックの実施の際に認識されなかつたケースのよう

に期待する投げ方とは異なる投げ方で技を行った場合、改善点などを挙げられるようにすることが将来的な目標である。そのために各技のアルゴリズムの特徴的な点をより細かく判定する方法などを検討し、基本となる各技の判定をより高い精度で行えるように改良を進める。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、実験にご協力頂いた静岡大学大道芸サークルすば、静岡県立大学ジャグリングサークル五臓六腑の皆様に感謝致します。

原稿を注意深くお読み頂き有益な助言を頂いたことに対して、匿名の査読者に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 中嶋潤一郎, 『ボールジャグリング入門第二版』, 株式会社ナランハ, 2001.
- [2] Juggling Tutorial, <http://juggling-donuts.org/tutorial/>, (2014/9/20).
- [3] CiNii Articles - 日本の論文をさがす - 国立情報学研究所, <http://ci.nii.ac.jp/>, (2014/12/23).
- [4] 日本ジャグリング協会, <http://www.juggling.jp/>, (2014/9/20).
- [5] 磯部拓海, サイトスワップを動画から算出する方法の研究, 第一回両国パフォーマンス学会, p.4, 2013.
- [6] 磯部拓海, 動画からジャグリングの技を解析する方法の研究, 第二回両国パフォーマンス学会, p.9, 2014.
- [7] 磯部拓海, 新谷誠, 動画からサイトスワップを算出する方法の研究, 第8回 エンターテイメントと認知科学シンポジウム, pp.25-28, 2014.
- [8] Joe Buhler, David Eisenbud, Ron Graham and Colin Wright, Juggling drops and descents, The American Mathematical Monthly ,Vol. 101, No. 6, pp. 507-519, 1994.
- [9] 西野順二, ジャグリングの連続技生成, 情報処理学会研究報告 . GI, [ ゲーム情報学 ]2002(27), pp.17-23, 2002.
- [10] 日本ジャグリング協会 - ジャグリング検定, <http://www.juggling.jp/certification/index.html>, (2014/9/20).
- [11] mixi サイトスワップ (Siteswaps) | (上級者編), [http://mixi.jp/view\\_bbs.pl?comm\\_id=1760889&id=14535098](http://mixi.jp/view_bbs.pl?comm_id=1760889&id=14535098), (2014/9/20).
- [12] OpenCV, <http://opencv.org/>, (2014/2/21).
- [13] 磯部拓海, 3 ボールジャグリングのサイトスワップを動画から算出する方法の研究, 2012 年度静岡大学情報学部情報科学科 CS プログラム卒業論文, 2013.