

高速度カメラを利用したボールの回転推定

Estimating the rotation of a ball with high speed camera

鎌田 泰毅[†] 竹内 義則[‡] 松本 哲也[†] 工藤 博章[†] 大西 昇[†]

要旨 競技においてボールの運動解析は、選手にとってどのようにして技能を向上させたいかを知る上で重要である。本研究は、ボールの回転軸と回転数を高速度カメラ画像の処理で推定する手法を提案する。本推定手法では、ボールに付加されたマーカのエッジ点をフレーム毎に抽出し、連続するフレーム間の回転軸と回転数を、ICP アルゴリズムを用いて推定する。本推定手法の精度を確認するため、卓球競技のサーブを対象に実測実験を行い、平均誤差 7% という結果を得た。

1 はじめに

球技において、ボールの運動解析は選手がどのようにして技能を向上させたいかを知る上で重要である [1]。小關らは、高速度カメラ画像の処理により、投手が投げた野球ボールの回転を解析した [2]。玉木らは、卓球競技において、ラケットによるインパクト前後の映像を高速度カメラで撮影し、回転数を出力するシステムを開発した [3]。しかしながら、これらの手法では、隣接フレーム間で共通する特徴点や、初期フレームでボール表面の特徴点または中心点をユーザが指定する必要がある。そこで本研究は、ユーザが特徴点を指定することなく、自動でボールの回転軸と回転数を、高速度カメラ画像の処理により推定する手法を提案する。提案手法の精度を調査するために、卓球競技のサーブを対象に実測実験を行った。

2 ボールの回転推定

2.1 推定手法の概要

本推定手法は、高速度カメラで撮影した画像を入力とし、回転軸の 3 次元成分と軸周りの回転数を出力する (図 1)。本推定手法は大きく 2 つのモジュールに分けられる。1 つは、高速度カメラの画像からボールを検出するモジュールであり、もう 1 つは、検出したボールの回転軸・回転数を推定するモジュールである。

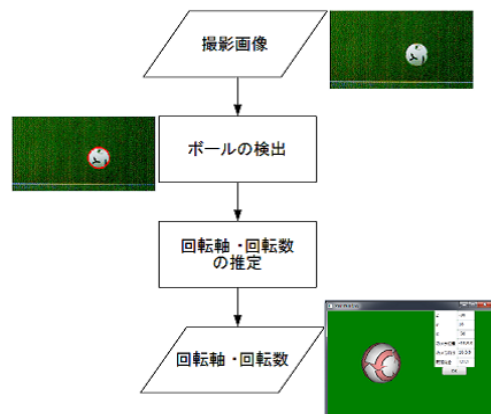


図 1: 推定手法の概要

2.2 ボールの検出

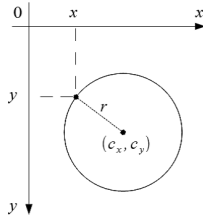
ボールの解析を行うために、撮影された画像からボールを検出することが必要である。ボールの検出の主な流れは、まず、各フレームそれぞれに対して、ボールの候補となり得る円を複数検出する。次に、複数フレームを通して、検出された円すべての軌跡を追跡し、最もボールらしい軌跡を描く円をボールと判断する。以下にこの二つの処理の詳細を述べる。

2.2.1 ボール候補の探索

ボール候補の探索は、全フレームに対して独立に処理を行う。まず、ソーベルフィルタ [4] を利用してエッジ検出を行う。次に、得られたエッジ点に対して円を検出する Hough 変換 [4] を行い、閾値以上の投票数を獲得した円 $C_{ki} = (c_x, c_y, r)$ をそのフレームでのボール候補と

[†]名古屋大学 大学院情報科学研究科 メディア科学専攻

[‡]名古屋大学 情報連携統括本部 情報戦略室

図 2: (x, y) と (c_x, c_y, r) の関係

する。ここで、 k はフレーム番号、 i は k フレームでの円の番号、 (c_x, c_y) は円の中心座標、 r は円の半径である。Hough 変換とは、画像中の点 (x, y) を通るすべての円は次式、

$$r^2 = (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 \quad (1)$$

の関係により (図 2)、中心座標 (c_x, c_y) と半径 r に変換できることを利用した円の検出法である。

2.2.2 ボールの検出

本推定手法は、実際の競技練習場面で使用されるため、背景をコントロールできない場合、ボールに似た背景物体が撮影され、ボールとして検出される可能性がある。また、選手の体も同時に撮影され、服の様子がボールとして検出される可能性もある。更に、照明等の影響により、ボールが検出されないフレームがある可能性もある。したがって、2.2.1 の処理で検出された複数のボール候補の各円を複数フレームにわたって追跡することで、最もボールらしい軌跡を描く円の系列を検出する。検出は以下のステップに従って行う。

1. 5 フレーム毎に区切り、各 5 フレームの先頭フレームに存在する各円 $C_{l,0}, C_{l,1}, \dots, C_{l,m}$ を親とする局所リスト LL_0, LL_1, \dots, LL_m を生成する (l はフレーム番号 (5 の倍数+1)、 m はそのフレームで検出された円の総数)。
2. k フレーム ($l + 1 \leq k \leq l + 4$) 中の円 $C_{k,0}, C_{k,1}, \dots, C_{k,m'}$ それぞれに対して以下の操作を行う。
 - (a) $k-1$ フレームまでの処理で生成された各局所リストの最後尾の円の中心座標との距離を求める。
 - (b) 最も距離が小さく、かつ、距離が閾値以下である場合、比較対象の円が属する局所リストに追加する。

- (c) 閾値以下でない場合、その円を親として新たな局所リストを生成する。
 - (d) a.~c. を 5 フレーム分繰り返すか、最後のフレームまで処理した場合、3. 以降に進む。
3. 長さが 3 未満の局所リストを破棄し、長さが 3 以上の局所リストについて以下の操作を行う。
 - (a) 連続する 3 つの要素について、真ん中の要素に含まれる円の中心座標を原点とする。
 - (b) 原点から両隣の要素に含まれる円の中心座標へのベクトルをそれぞれ a, b とする。
 - (c) $a \cdot b > 0$ の場合、ボールの軌跡ではない判断し、その局所リストを破棄する。
 4. $l = 1$ のとき、残った局所リストそれぞれを全体リスト AL に置き換える。
 5. 残った局所リストそれぞれに対して以下の操作を行う。
 - (a) 先頭の要素に含まれる円の中心座標と、すべての全体リストの最後尾の要素に含まれる円の中心座標との距離を求める。
 - (b) 最も距離が小さく、かつ、距離が閾値以下である場合、比較対象の円が属する全体リストに追加する。
 - (c) 閾値以下でない場合、その局所リストを親として新たな全体リストを生成する。
 6. 一番長い全体リストをボールの軌跡とする。

2.3 ボールの回転軸・回転数の推定

ボールの回転軸・回転数を推定するために、本推定手法では ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを利用する。ICP アルゴリズムは対応が取れていない 2 つの点集合 X, Y のマッチングを取る手法であり、以下の操作を繰り返す。

1. X の各点 x_i に最も近い Y の点 y_j を求め、仮の対応を与える。
2. 目的関数 $\|Y - (RX + t)\|$ の最小化

ここで、 R は回転行列、 t は並進ベクトルである。本手法では、検出された円すべてに対して原点を、円の中心と定めるため、並進ベクトルは考慮する必要がない。し

たがって、本手法の目的関数は $\|Y - RX\|$ となり、 R の推定問題と考えることができる。本手法では R を推定するために特異値分解 (Singular Value Decomposition, SVD) [5, 6] を利用する。

まず、Frobenius norm と trace の関係から、目的関数は以下のように変形できる。

$$\|Y - RX\|_F^2 = \text{tr}(Y^T Y) + \text{tr}(X^T X) - 2\text{tr}(Y^T R X) \quad (2)$$

ここで、最適化に関係しない前2項を無視し、符号を反転すると、元の最小化問題は以下の関数の最大化問題に置き換えることができる。

$$\text{tr}(Y^T R X) \quad (3)$$

XY^T の SVD を $XY^T = U\Sigma V^T$ とすると、上の目的関数は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} \text{tr}(Y^T R X) &= \text{tr}(RXY^T) = \text{tr}(RU\Sigma V^T) \\ &= \text{tr}(V^T RU\Sigma) \leq \text{tr}(\Sigma) \end{aligned} \quad (4)$$

したがって、 $V^T RU = I$ のとき目的関数は最大となり、そのときの解 $R = VU^T$ が求める回転行列となる [7, 8]。

これらを利用した本推定手法のボールの回転軸・回転数の推定の流れを以下に示す。

1. $k, k+1$ フレーム中のボールに付加したマーカのエッジ点集合をそれぞれ X, Y とする。
2. X の各点に対して、 Y の中で最も距離が最小となる対応点を求める。
3. X と Y の対応点間の距離の和 D を求める。
4. D が3回連続で更新されなかった場合、または、繰り返し回数が閾値以上となった場合、8. の処理へ移る。
5. XY^T の SVD から回転行列 R を求める。
6. 求めた回転行列 R から、 $X = RX$ として X の値を更新する。
7. 2. の処理に戻る
8. 求めた回転行列 R から、 $k, k+1$ フレーム間の回転軸 u の成分と、回転角 α を以下のように求め、得られた回転角から回転数を求める。

$$u = (r_{32} - r_{23}, r_{13} - r_{31}, r_{21} - r_{12})$$

$$\alpha = \cos^{-1}((\text{tr}(R) - 1)/2)$$

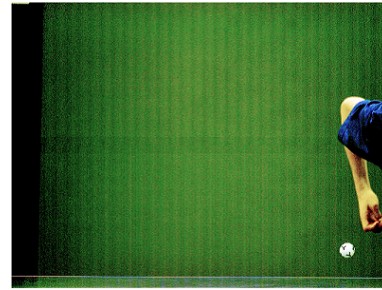


図 3: 撮影画像

9. 1. ~ 8. を各フレームについて繰り返す。

以上の処理により、隣接するフレーム間の情報から、回転軸成分・回転数が $N-1$ 個得られる。本推定手法は得られたすべての回転軸・回転数の中央値を最終的な出力とする。ここで注意すべきことは、ボールの境界付近では、次のフレームで現れるマーカエッジ点と消えるマーカエッジ点があることと、マーカの変形が大きいことである。これらの問題を解決するために、本推定手法では、 k フレーム (対応元のフレーム) のエッジ点をボールの中心から半径 60% の範囲で取得し、 $k+1$ フレーム (対応先のフレーム) のエッジ点をボールの中心から半径 80% の範囲で取得している。

3 実験

本推定手法の精度を調査するため、高速度カメラを利用した実測実験を行った。使用した高速度カメラは、Vison Reserch 社の Phantom V310 であり、2000[fps] で卓球台の横から撮影を行った。撮影サイズは 1280×800 である。実験は、9人の選手を対象に2種類のサーブを5球ずつ撮影した。そのうち各種サーブの一球目、全18球について、本推定手法で回転数・回転軸を計測した。実際に撮影した画像を図3に示す。本実験では背景に卓球台を設置し、余分なエッジが検出されないように工夫した。その結果、ボールの検出段階で、卓球ボールの検出に失敗することはなかった。

回転数を計測した結果を表1に示す。表1中の目視の値は、ボールが1回転するまでにかかったフレーム数から、筆者が計算した回転数である。結果から最大誤差18%、平均誤差7%の精度で測定出来ている事がわかる。目視による誤差は最大1フレームであり、最大約3%に相当する。実験では、得られたテキスト形式の結果を入力とし、回転の様子を3Dアニメーションとして出力す

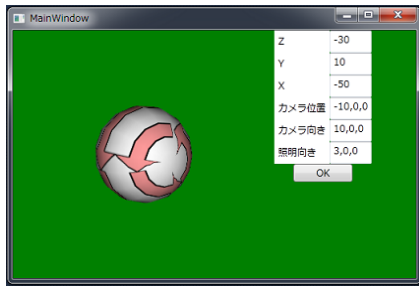


図 4: 3D アニメーションの例

ることで選手にフィードバックした。3D アニメーションの例を図 4 に示す。

表 1: 回転数の推定結果

被験者	試技	推定値 [rps]	目視 [rps]	誤差 [%]
A	a	56	59	5
	b	40	49	18
B	a	50	57	12
	b	41	44	8
C	a	47	48	1
	b	43	49	12
D	a	52	53	1
	b	56	56	1
E	a	42	50	16
	b	57	57	0
F	a	50	57	12
	b	51	60	15
G	a	52	51	1
	b	52	50	4
H	a	56	63	10
	b	67	65	4
I	a	41	47	4
	b	69	65	7

今回、試技によって精度のばらつきが生じた。本推定手法では、フレーム間の対応をとるための特徴点として、ボールに付加したマーカのエッジ点を利用している。したがって、精度はエッジ抽出の結果に大きく左右される。例えば、ボールの中心付近にマーカのないフレームが連続するとき、対応点数が十分に取れず精度が低下する場が見られた。このことは推定に適したマーカを考慮することで回避可能である。しかしながら、それ以外の要因で精度が低下している場合もあった。今後調査し、精度

を向上させる必要がある。

4 まとめ

本研究では、高速度カメラ画像の処理により、ボールの回転軸・回転速度を測定する手法を提案した。本推定手法の有効性を調査するため実測実験を行った。結果として、平均誤差 7% の精度が得られた。今後、実験結果の考察を深め、更なる精度の向上を目指す必要がある。

謝辞 本研究に協力頂いた、国立スポーツ科学センター 太田憲氏、玉城将氏、静岡大学教育学部教授 吉田和人先生、NPO 法人卓球交流会 山田耕司氏、JOC エリートアカデミーの卓球選手に感謝する。

参考文献

- [1] Hubert Shum and Taku Komura. Tracking the translational and rotational movement of the ball. *Image Processing*, Vol. 3, pp. 1084–1087, Sept. 2005.
- [2] 小關泰広, 狩野宗徳, 子安大士, 前川仁, 永見智行, 茶川剛史, 大室康平, 彼末一之. 野球のピッチングにおけるボールの画像解析. ジョイント・シンポジウム講演論文集, Vol. 2007, pp. 91–96, Nov. 2007.
- [3] 玉木徹, 牛山幸彦, 八坂剛史. スポーツ選手の技能向上のための動画処理とその実用化. 信学技報 PRMU2005-116, pp. 13–18, Nov. 2005.
- [4] 谷口慶治. 画像処理工学-基礎編-. 共立出版, 1996.
- [5] 柳井晴夫, 竹内啓. 射影行列・一般逆行列・特異値分解. 東京大学出版, 1983.
- [6] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. NUMERICAL RECIPES in C C 言語による数値計算のレシピ. 技術評論社, 1993.
- [7] 玉木徹. 姿勢推定と回転行列. 信学技報 SIP2009-48, SIS2009-23, pp. 59–64, Sept. 2009.
- [8] Paul J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, Feb. 1992.