

Estimation of Rotational Velocity of Baseball Using High-Speed Camera Movies

Takuya Inoue Non-member (Keio University, Faculty of Science and Engineering., inoue@hvrl.ics.keio.ac.jp)

Yuko Uematsu Non-member (Keio University, Faculty of Science and Engineering., yu-ko@hvrl.ics.keio.ac.jp)

Hideo Saito Member (Keio University, Faculty of Science and Engineering., saito@hvrl.ics.keio.ac.jp)

Keywords: sports analysis, parametric eigenspace method, posture estimation

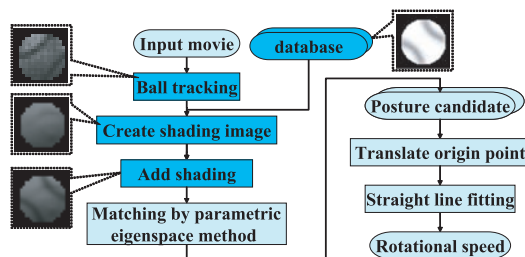


Fig. 1. Flowchart

Recently, in the field of sports science, movies are being used to analyze a player's performance and improve his/her skills. For example, the rotational velocity and rotational axis vector of the baseball can be determined on the basis of movies recorded by using high-speed cameras; this information is useful in determining the ball's trajectory because this trajectory is dependent on the rotational velocity. In a previous study on the estimation of the rotational velocity of a baseball, some lines and markers were drawn on the surface of a baseball, and the rotational matrix was determined by pattern matching. However, such markers cannot be drawn on a ball being used in a real baseball game.

In our proposed method, we consider the seam patterns on the surface of the baseball as markers for pattern matching; a database including CG images of the ball recorded at different angles was used for pattern matching. To improve the processing time required for pattern matching, we determine the ball's posture in each frame by employing the parametric eigenspace method. Finally, we use the time continuity to perform linear approximation of the rotational pattern of the ball.

Fig. 1 shows the flowchart of our method. The ball area in the input movie is tracked by linear interpolation. Then the ball area is compared with the images in the database to obtain the rotational parameters. However, the shadings of the input image are different from those of the database CG images. Therefore, we then create the shading image by averaging the ball area in the input images and

add the shading image to the database. This method has a serious drawback; the ball images recorded from different positions appear similar because the ball is symmetric, and a result, the estimation of the rotational parameters on the basis of the image information alone is difficult. Therefore, in this method, we consider the ball's rotation to be linear and resolve the problems of noise and symmetry.

We demonstrate the effectiveness of our method by performing two types of experiments. In the first experiment, we use the proposed method to estimate the rotational velocity of a baseball by using real movies shot in a baseball stadium. The results are shown in Fig. 2. The similar image corresponding to the input ball image which could be any frame of the movie, can be selected from the database. In the second experiment, we use a movie consisting of CG images of the baseball as the input movie. As shown in Table 1, our method can be used to estimate the ball's rotational velocity accurately.

In this paper, we present a new method for estimating the rotational velocity of a baseball by using only the ball's seam pattern. No additional markers have to be drawn on the ball's surface, and the processing speed of pattern matching is enhanced threefold by adopting the eigenspace method. Therefore, our method is well-suited for practical applications.

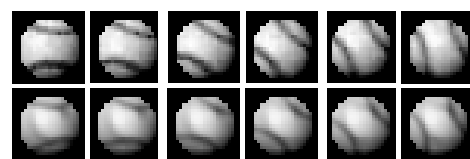


Fig. 2. Experimental result (upper image: input ball area, lower: estimation result)

Table 1. Experimental result by CG sequence

	Rotational vector	Rotational velocity
Actual values	(0.577, 0.577, 0.577)	20.83 rps
Estimated values	(0.578, 0.578, 0.578)	21.37 rps

高速カメラ映像を用いた硬式野球ボールの 回転速度推定システム

非会員 井上 卓也* 非会員 植松 裕子*
正 員 斎藤 英雄*

Estimation of Rotational Velocity of Baseball Using High-Speed Camera Movies

Takuya Inoue*, Non-member, Yuko Uematsu*, Non-member, Hideo Saito*, Member

Movies can be used to analyze a player's performance and improve his/her skills. In the case of baseball, the pitching is recorded by using a high-speed camera, and the recorded images are used to improve the pitching skills of the players. In this paper, we present a method for estimating of the rotational velocity of a baseball on the basis of movies recorded by high-speed cameras. Unlike in the previous methods, we consider the original seam pattern of the ball seen in the input movie and identify the corresponding image from a database of images by adopting the parametric eigenspace method. These database images are CG Images. The ball's posture can be determined on the basis of the rotational parameters. In the proposed method, the symmetric property of the ball is also taken into consideration, and the time continuity is used to determine the ball's posture. In the experiments, we use the proposed method to estimate the rotational velocity of a baseball on the basis of real movies and movies consisting of CG images of the baseball. The results of both the experiments prove that our method can be used to estimate the ball's rotation accurately.

キーワード：スポーツ解析，パラメトリック固有空間法，姿勢推定

Keywords: sports analysis, parametric eigenspace method, posture estimation

1. はじめに

スポーツ指導の現場では，選手の技術を定量的に解析することが求められている⁽¹⁾。その中でも，解析のための手段として，スポーツシーンを撮影した映像を使用する試みに注目が集まっている⁽²⁾。

スポーツの技術解析の手段としては，選手がセンサを装着するシステムがある⁽³⁾。しかし，センサの装着には選手への負担が伴い，実際の試合では使用することができないといった問題がある。一方で，映像を用いたスポーツ解析は選手への負担が少なく，より実践的である⁽⁴⁾。

スポーツを硬式野球に限定した場合，投球されたボールの回転速度を解析することで，定量的な投球練習が可能となる。これは，ボールの回転速度が変化した場合に，マグヌス効果等の影響によりボールの軌跡が変化し，それに伴いバッター位置におけるボール位置が変化することに起因する。従って，ボールの運動解析に対する需要は高く，これまでにも運動モデルを設定することでボールの微細な運

動を推定する研究などが行われている⁽⁵⁾。

動画像を用いて硬式野球ボールの回転推定を行う従来研究では，ボール表面に存在するテクスチャを用いたパターンマッチングが行われており⁽⁶⁾，隣接フレーム間において，テクスチャの移動量を基に回転速度を推定している。ここで，硬式野球ボールの表面に存在するテクスチャは微細なものであるため，従来研究ではボールの表面に新たに線を描画することで精度を確保していた。

しかし，勝手に線を追加したボールは，実際の試合で使用できないため，センサを用いたシステム同様に，練習時の映像解析にしか利用することが出来ない。よって，精度を確保しつつ，実際の試合で使用できる回転推定手法の提案が求められている。加えて，実践的な使用に向け，高速に処理可能であることが必要とされている。

本論文では，硬式野球ボールに存在する縫い目のテクスチャのみを手がかりとしたボールの回転速度推定手法を提案する。高速カメラによって撮影された映像を基に，パラメトリック固有空間法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いることで，毎フレームでボールの姿勢を高速に推定し，回転の時間的連続性を用いることで回転速度を推定する。最終的に実映像，及びCG映像を用いた実験を通じ，目視による結果との比較等の評価を行うことで，提案手法の有効性を示した。

* 慶應義塾大学理工学部

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Keio University, Faculty of Science and Engineering,

3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522

なお本論文で想定しているシーンは0.02秒程度と極めて短い時間であるため、ボールは直線運動をし、回転軸ベクトルは一定であり、等速度で回転するという運動モデルを仮定している。ここで、微小な時間を対象として処理を行うことにより、各種の変化球に関しても同様の運動モデルを適用することができるため、回転軸ベクトル及び回転速度を推定することが可能である。

2. 提案手法

提案手法のフローチャートをFig.1に示す。まず、高速カメラによる撮影動画の中からボール領域を追跡する。その後、毎フレームでボール姿勢の候補を推定し、時系列情報を用いることで各フレームのボールの回転角度を決定し、最終的に微小時間におけるボールの回転速度を推定する。

本手法では、ボールの運動モデルは直線運動と想定している。そのため、初期フレーム、及び最終フレームにおけるボールの位置、サイズを手動指定することで、直線運動に従った拘束条件を基にボールを探索し、追跡することができる。

次に、パラメトリック固有空間法を用いて、CGで作成した姿勢に関するデータベースと、入力動画の中から追跡したボール領域との間でマッチングを毎フレーム行い、各フレームにおけるボール姿勢の候補を推定する。なお、入力動画は屋外など様々な照明環境下で撮影されていることを想定しているため、マッチングを行う際には、入力動画中のボール領域に発生している陰影の影響を考慮しなければならない。そのため本手法では、入力動画から陰影画像を作成し、データベースに付加することで陰影の問題を解決する。

このとき、硬式野球ボールの縫い目の見え方に関しては対称性があり、同一の見え方をする姿勢が最大で4通り存在する。そのため、データベースとのマッチングを行うと、複数の候補が選択され、回転を一意に決定することは難しい。また、入力画像中のボール領域は非常に小さいため、ボールの微細なテクスチャを扱うことになり、マッチング結果にはノイズによる誤差の影響が多分に含まれていることが予想される。そこで本研究では、ボールの回転速度が一定であるという仮定に基づき、回転運動をLMedS法の概念を用いて直線近似することにより、対称性及び誤差の問題の解決を試みる。

なお、CGによりデータベースを作成した際には、3自由度の回転によってボールを表現しているが、実際の投球におけるボールの回転は、1つの回転軸周りの回転で表現できる。そこで本研究では、クォータニオンを用いて回転を表現し、その回転軸周りの回転を等速とみなすこととする(付録参照)。

〈2・1〉 ボール追跡 本研究では、ボールが直線運動を行っているという仮定に基づき、初期フレームと最終フレームでのボール領域を手動で入力することで、ボールの初期位置、及び最終位置の2点を結ぶ直線軌跡上から各フ

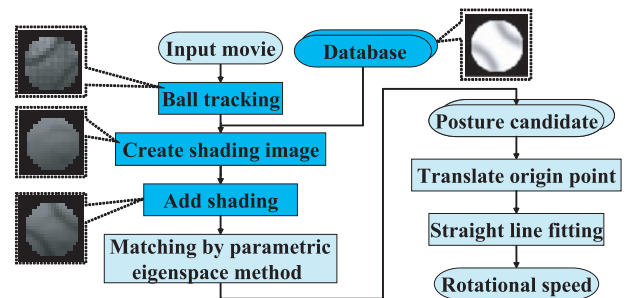


Fig. 1. Flowchart.

レームにおけるボールの位置を自動探索できる。

前提とするシーンは微小時間であるとしているため、映像内でボールの急激な速度変化はないものとみなすことができる。そこで、ボールは等速運動に近いと想定し、フレーム $t(0 \leq t < n)$ におけるボール領域候補の位置 q_t を、

$$q_t = q_0 + \frac{t+z}{n-1}(q_{n-1} - q_0) \cdots \cdots (1)$$

と設定する。ただし、 $-0.5 \leq z \leq 0.5$ である。また、映像中のボールサイズは一定ではないため、初期フレームと最終フレームにおけるボールサイズの間の範囲内の値を取るものとして、各フレームでボール候補領域の面積を順次変化させながら探索を行う。

探索は、初期フレームと最終フレームで手動指定されたボール領域を、次の式で重み付けた画像 C_t と、(2) 式で表される位置のボール候補領域の画像とのテンプレートマッチングで行う。

$$C_t = \left(1 - \frac{t}{n-1}\right) C_{start} + \left(\frac{t}{n-1}\right) C_{goal} \cdots \cdots (2)$$

ここで C_{start} 及び C_{goal} はそれぞれ、初期フレームと最終フレームにおけるボール領域の画像である。テンプレートマッチングの評価基準にはNCCを用い、ボール候補領域の面積を、初期フレームのボール領域の面積と等しくなるようにリサイズした上で探索を行うものとする。探索を毎フレーム行うことで、ボールの追跡を行う。

〈2・2〉 データベースの作成 入力動画中のボールの姿勢を推定する上で、姿勢が既知のデータベースを事前に作成する必要がある。今回はCGを用い、ボールを様々な位置から見た際の画像をデータベースとして保持した。データベース中の画像の作成時におけるCG空間中の座標系をFig.2に示す。まず、 θ , ϕ , ψ の値をそれぞれ変化させた際の見え方を画像化する(Fig.3(a))。本研究では各パラメータを10度ずつ変化させ、総画像数23328枚のデータベースを作成した。その後、フィルタサイズ3のガウシアンフィルタを10回適用し、縫い目形状が入力動画中のボール画像(Fig.3(d))に近い画像(Fig.3(b))を得た後にデータベースに組み込む。なお、ボール領域と背景領域の境界部分に関しては、ガウシアンフィルタの適用範囲外とした。

〈2・3〉 陰影画像の作成 Fig.3(d)に示すように、入力

動画中のボール上には陰影が発生しており、データベースとのマッチングを行う上で誤差の大きな要因となる。

陰影の付加状況に関しては、撮影環境における光源推定を行うことで特定することが可能である。しかし実際の場面を考えた場合、野球は光源が複数存在する環境で行われることが多く、光源の推定が難しいといった問題がある。

そこで本研究では、入力動画中の全フレームにおけるボール領域の平均を取ることで陰影画像とみなす (Fig. 4)。これは、ボール領域の平均画像を作成することで縫い目のテクスチャが平滑化され、陰影の付加状況のみを抽出できるためである。陰影画像の作成後、データベースに対して次の式による重み付けを行う。

$$L' = L \frac{I}{255} \dots \dots \dots (3)$$

なお、 L' は陰影が付加されたデータベース中の画像を、 L は縫い目の平滑化が行われたデータベース中の画像を、 I は陰影画像を表している。(3) 式より各画素に対し重み付けを行うことで、陰影が付加された新たなデータベースを得ることが出来る (Fig. 3(c))。また、この手法を適用する場合、同一投球シーケンスの中で照明条件が一定である、といった前提が必要である。

〈2・4〉 パラメトリック固有空間法によるマッチング

一般に画像は高次元で表現されるため、入力画像とデータベースの間で、全画素についてテンプレートマッチングを行うと処理時間が膨大となる。そこで、陰影を付加したデータベースに対して主成分分析を行い、縫い目の特徴をよく表現した低次元ベクトルを用いてマッチングを行うことで処理の高速化を図る。

まず、データベース中の各画像を次に示すベクトルで表す。

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_d]^T \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 x_i はデータベース内画像における i 番目の画素の明度値を表し、 d はデータベース内画像の画素数、つまり次元数を表す。ここで、データベース中の j 番目の画像を (4) 式で変換したものを $\mathbf{x}_j$ とおくと、データベースの平均ベクトル $\mathbf{m}$ は、

$$\mathbf{m} = E\{\mathbf{x}_j\} \dots \dots \dots (5)$$

と表せる。ただし、 $1 \leq j \leq N$ であり、 N はデータベース

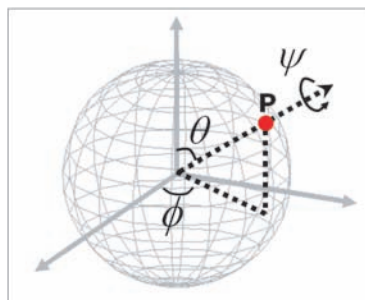


Fig. 2. Coordinate system into CG space.

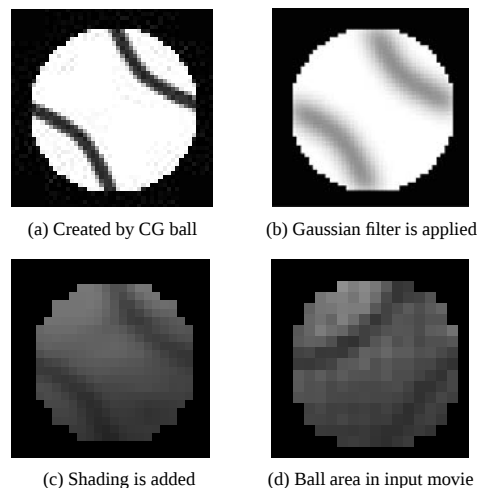


Fig. 3. Processing of creating database.

のサイズである。その後、共分散行列

$$\mathbf{S} = \frac{1}{N} \sum \{(\mathbf{x}_j - \mathbf{m})(\mathbf{x}_j - \mathbf{m})^T\} \dots \dots \dots (6)$$

を求める。

次に、 $\mathbf{S}$ について固有値問題を解き、得られた固有ベクトル $\mathbf{u}$ を上位 k 個保存する。その後、 d 次元であったデータベース内画像を、 k 次元に削減する。次元削減後のベクトルを $\mathbf{y}$ とすると、

$$\mathbf{y}_j = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_k)^T (\mathbf{x}_j - \mathbf{m}) \dots \dots \dots (7)$$

とおける。

次元削減後の次元数と処理速度は、トレードオフの関係にある。次元数が小さくなるほど高速なマッチング処理が可能となるが、同時に精度も下がってしまう。次元削減の程度に関しては、累積寄与率 $\sum_p^k (\lambda_p / \Lambda)$ を計算することで定量的に調整可能である。ただし λ_p は $\mathbf{u}_p$ に対応する固有値を表し、 Λ は $\mathbf{S}$ に対応する固有値の総和を表す。累積寄与率は、元のデータをどの程度の割合で表現しているかを表す数値である。

入力動画中のボール領域とデータベースのマッチングであるが、入力動画中のボール領域から (4) 式によりベクトル $\mathbf{v}$ を作成し、

$$\|(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_k)^T (\mathbf{v} - \mathbf{m}) - \mathbf{y}_j\| \dots \dots \dots (8)$$

を最小化する j_{min} を得ることによって達成される。

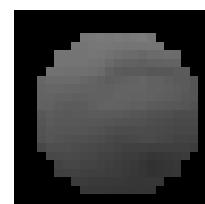


Fig. 4. Shading image created by average ball area.

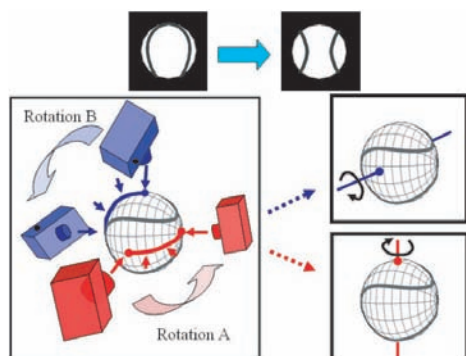


Fig. 5. Plural possibility of rotational pattern.

なお、同一照明環境下において撮影された、複数の映像を用いる場合には、陰影画像が変化せず、データベース中の画像も変化しないため、主成分分析は一度だけ行えばよい。

〈2・5〉 回転速度の推定 マッチングにより現フレームにおける姿勢が推定されるが、野球ボールの対称性のため、同じ見え方をする姿勢が高々4通り存在する。よって、Fig. 5に示すように、ボールの姿勢変化を一意に特定できないため、マッチングにより得られた姿勢候補から直接回転の様子を推定することは難しい。また、姿勢推定の結果には、ノイズの影響による誤差が含まれていると考えられる。

そこで本研究では、回転角の時間変化は一定であるとみなし、直線近似することで、対称性を考慮するとともに誤差の軽減も行った上での回転速度の推定を行う。

まず、回転角および回転軸の定義をFig. 6に示す。Oは、CG座標系での初期姿勢 $(\theta, \phi, \psi) = (0, 0, 0)$ を持つ画像の中心位置であり、D、E、Fはそれぞれ、frame0（初期フレーム）、frame1、frame2において、ボールの中心として画像に現れる位置を示している。つまり、Fig. 6においては、ボールの見えがD、E、Fと変化し、ボールが回転軸Vについて回転していることを示している。このとき、初期フレームDでの姿勢 (θ, ϕ, ψ) を基準としてE、Fへの回転角を表すと、時間（フレーム）に対して比例すると考えられ、同時に回転軸であるVを一意に決定することが可能になる（付録参照）。従って、回転速度の推定を行う際には、CGを作成したときの始点位置Oではなく、初期フレームでの姿勢

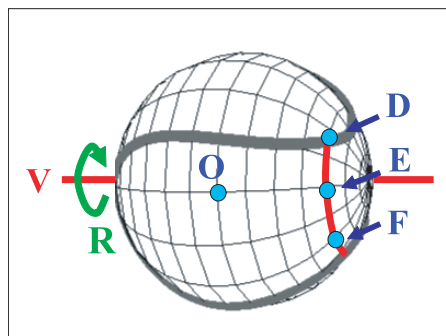


Fig. 6. Definition of rotational axis and angle.

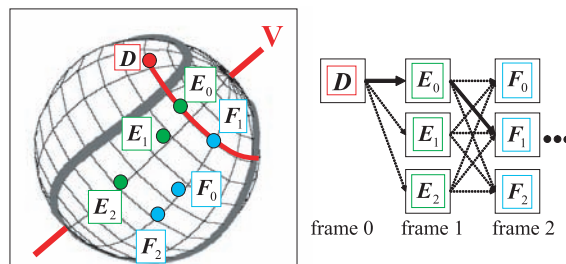


Fig. 7. Estimation of rotational path.

を始点として回転角を求める。

回転角推定の様子をFig. 7に示す。まず、初期フレームにおいてマッチングにより求められた候補の中から1つ(D)を選択する。ここでは、入力画像中のボールの見えに近い候補を手動で選択する。そして、その選択された候補(D)を始点として1つの回転軸で回転しているとみなせる候補を、次フレーム以降で探索していく。Fig. 7では、D、E₀、F₁の順に回転するパスが、1つの回転軸周りの回転として最も妥当であるとして選ばれることになる。

このときの妥当性の評価は、Fig. 8で示されるような空間中での直線近似で行う。この空間は、フレーム数、回転軸ベクトルV、回転角から成り立っており、回転軸Vの自由度が2であるため、4次元空間となる。このとき、前述のように、ボールの回転角が時間に対して比例し、かつ一意に決定された回転軸ベクトルに従って回転しているため、V軸周りの回転Rは、Fig. 8の空間では直線上に並ぶと考えられる。実際には、ボールの見えの対称性のために、Fig. 5で示したように、別の回転を表す姿勢変化もFig. 8の空間中にプロットされることになる。しかし、それらの回転の回転軸は、始点であるDを通る回転軸とは異なるため、始点であるDを通る回転は一意に決定することができる。

そこで、空間中にプロットされた点群に対して、始点Dを通る回転を表す直線を推定し、直線の変化の割合を計算することで回転速度を推定する。今回、Fig. 8中における自乗誤差の範囲が不明なため、直線フィッティングにはLMedS法の概念を用いた。ここで、ボールの対称性のために、同じ見え方をするボールの姿勢が高々4通り存在する。そのため、Fig. 7の中でD、E₀、F₁の順に回転するパスを示す

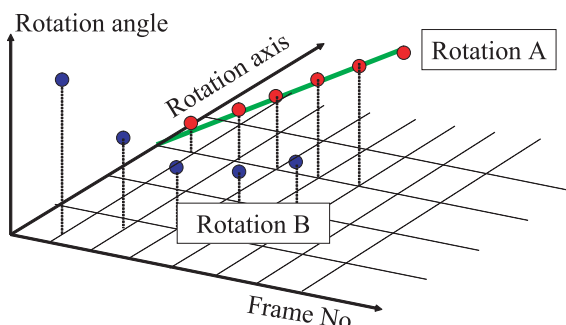


Fig. 8. 4 dimensional space expressing rotation.

点群中の候補点は、候補点全体の 25% までの中に多数属していると考えられる。よって今回は LMedS 法の中で、自乗誤差の中央値ではなく、第 1 八分位点の値が最小となる直線をフィッティングする。

なお、本論文で述べる実験では、対称性及び誤差の影響を加味し、フレーム毎にマッチング結果の上位 30 個の候補を探索に用いる。

3. 実験

本手法の有効性を確認するため、2 種類の実映像シーケンスによる実験、及び CG による精度評価実験を行った。実映像による実験では、固定された高速カメラを用いて、2500 fps で撮影を行った。実験で用いた 2 つのシーケンスの一部を Fig. 9(a) 及び Fig. 9(b) に示す。

入力動画のサイズは 512×384 であり、パラメトリック固有空間法を用いる際の累積寄与率は 90% に設定した。なお今回は対象となるシーンのフレーム数が 40 フレーム程度であり、プロット点の総数は約 1200 個であった。これらを全て用いても、直線フィッティングの処理を 10 秒以内に完了できるため、今回は全ての姿勢候補のプロット点を LMedS 法の点候補として用いた。

処理に要する時間は、データベースに対する主成分分析が 3 分程度、マッチングから回転速度算出までが 10 秒程度であった。処理に際しては、Intel Core2 Duo 2.80 GHz の CPU、3.2 GB のメモリ、Windows XP Professional のマシンを用いた。

〈3・1〉 実験結果

〈3・1・1〉 Fig. 9(a) に対する実験結果 Fig. 9(a) のシーンに対して本手法を適用した。総フレーム数は 40、つまり 0.016 秒間のシーケンスを処理に用いた。ボール領域のサイズは約 18×18 画素であった。Fig. 8 と同様に、フレーム数、回転軸ベクトル、回転角に関するグラフを作成し、直線フィッティングを行った結果を Fig. 10 に示す。表記に当たり、回転軸に関するグラフ上の軸は、(付 4) 式における V_2 軸を対象として示した。

この結果では、直線の傾きは 2.98 となり、これは回転角速度 (degree/frame) を表している。つまり、秒間約 20.7 回転していることになる。また、この実験結果を可視化すると、Fig. 11 のようになり、上段が入力画像を、下段が推定値から合成した画像を示している。

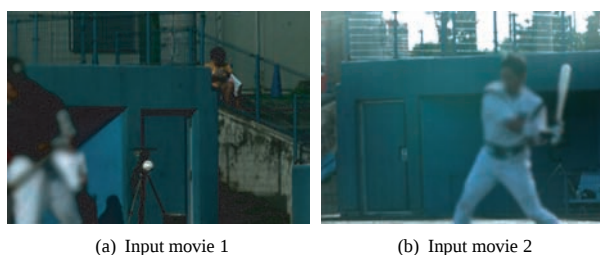


Fig. 9. Input movies.

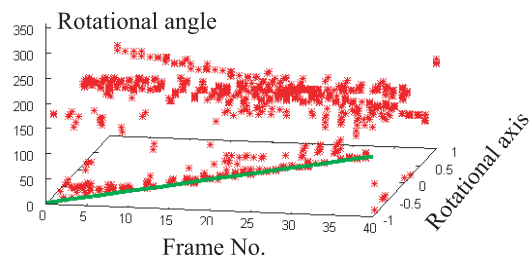


Fig. 10. Result of Fig. 9(a) experiment.

なお本実験では、累積寄与率を 90% と設定することで、次元数を 29 次元に圧縮できた。その結果、パラメトリック固有空間法を用いない場合、つまり画像における全ての画素において SSD によるテンプレートマッチングを行った際の処理速度は 9.16 fps であったのに対し、本手法では 33.1 fps となり、データベースとのマッチング処理を、約 3 倍に高速化できた。

〈3・1・2〉 Fig. 9(b) に対する実験結果 Fig. 9(b) に示したシーンに対して本手法を適用した。総フレーム数は 40、ボール領域のサイズは約 18×18 画素である。〈3・1・1〉節と同様のグラフを作成し、直線フィッティングを行った結果を Fig. 12 に示す。

この結果より、ボールが秒間約 21.2 回転していると推定できた。また、実験結果を可視化したものを Fig. 13 に示す。

なお、次元数に関しては、31 次元に圧縮できた。データベースとのマッチング処理速度に関しては、テンプレートマッチングを行った際は 9.20 fps であったのに対し、パラメトリック固有空間法を適用することで 32.7 fps となり、前述の実験と同様、約 3 倍の高速化に成功した。

〈3・1・3〉 実映像シーケンスによる実験の心理評価

〈3・1・1〉節、及び〈3・1・2〉節の実験結果の妥当性の評価のために、提案手法により推定された結果から合成した画像と入力画像の縫い目のテクスチャが類似していることを確認する、数名の被験者の目視による心理評価実験を行った。

ここでは、20 代の男女 6 名を被験者とし、Fig. 14(a) 列にあるような入力画像をそれぞれの被験者に見せた。そして、データベース中の全画像 (23328 枚) から入力画像に最も似ていると判断した画像を選択させたところ、Fig. 14(c) 列のような画像が選択された。一方で、本手法により推定した結果から合成した画像を Fig. 14(b) 列に示す。

この実験を各被験者で 2 回ずつ行い、計 12 枚の画像を得た後、被験者が選択した画像 (Fig. 14(c) 列) と、推定値から

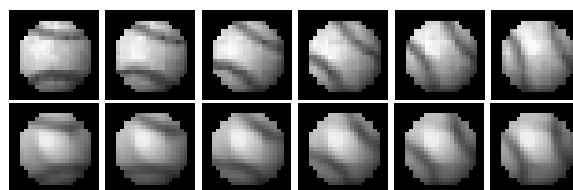


Fig. 11. Visualized result for Fig. 9(a) (upper image: input ball area, lower: estimation result).

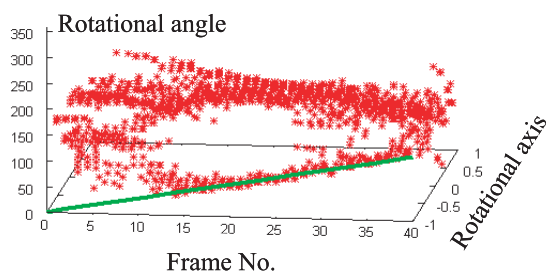


Fig. 12. Result of Fig. 9(b) experiment.

合成した画像 (Fig. 14(b) 列) のそれぞれについて、入力画像 (Fig. 14(a) 列) との類似度を、画像全体における明度値の自乗誤差の総和により評価した。この結果、被験者が選択した画像と入力画像との 1 画素当たりの平均自乗誤差は 269.6 であり、提案手法による推定結果から合成した画像と入力画像との 1 画素当たりの平均自乗誤差は 254.3 であった。このように、提案手法により得られる推定結果から合成した画像は、データベース中の全画像から人間が選んだものよりもわずかながら入力画像に近いものであり、提案手法による推定結果が妥当なものと考えることができる。

〈3・1・4〉CG による精度測定実験 本手法の精度を定量的に評価するために、真の値が既知である CG を用いて作成した映像を基にシミュレーション実験を行った。実験にあたっては回転軸ベクトル、及び回転速度が既知のボールの回転をシミュレーションし、〈3・1・1〉節の実験を行った際の陰影画像を付加したものを入力動画として用いた。実験の結果を Table 1 に示す。結果より、回転角に関して 2.6% 程度の誤差率であることが分かり、高い精度での推定が行われていることから、本手法の妥当性が示された。

4. まとめ及び今後の課題

本論文では、硬式野球ボールに存在する縫い目のテクスチャのみを用いたボールの回転速度推定システムを提案した。本手法は、固定高速カメラを 1 台用いることで処理を行うことが可能であり、実践的なシーンで適用が可能である。データベースとのマッチング処理に関しては、パラメトリック固有空間法を適用することで、テンプレートマッチングにより総当たりで計算した場合に比べて、3 倍程度的高速化に成功した。実験では、様々なシーケンスに対して評価を行うことで、本手法の有効性を示した。

今後は、ユーザの手動入力の箇所を削減するために、ボ-

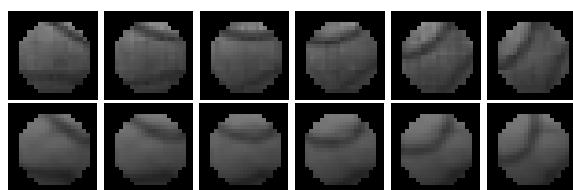


Fig. 13. Visualized result for Fig. 9(b) (upper image: input ball area, lower: estimation result).

Table 1. Accuracy evaluation experiment using CG movie.

	Rotational vector	Rotational velocity
Actual values	(0.577, 0.577, 0.577)	20.83 rps
Estimated values	(0.578, 0.578, 0.578)	21.37 rps

ールの位置検出の自動化を行っていききたい。しかし、動画中のボール領域が小さいこと、また位置ずれが発生した際の推定精度低下の問題から、高精度なボール追跡を行う手法の適用が望まれる。また、1 画素あたりの 3 次元的なボールの進行距離がほぼ一定であるという仮定に基づきボールの追跡を行っているため、ボールの進行方向とカメラの光軸が直交している必要があるが、自動ボール追跡を行うことでこのようなカメラ位置の制限がなくなり、より実用的な手法となる。加えて、スポーツ指導の現場で使用されることを考慮すると、使用しやすいインタフェースの開発も行っていきたい。

謝 辞

本研究に当たり、資料の提供及び助言を頂いた早稲田大学スポーツ科学学術院の矢内利政教授に感謝する。この研究は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の高度通信・



Fig. 14. Resulting images in user evaluation. (a) Input images. (b) Selected by our method. (c) Selected by users.

放送研究開発委託研究「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術の研究開発」の一環としてなされたものである。

(平成22年6月22日受付, 平成22年10月22日再受付)

文 献

- (1) T. Asano, K. Sato, H. Hamano, and H. Hara: "Analysis and evaluation of tennis swings using computer vision", *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.73, No.2, pp.281-285 (2007) (in Japanese)
浅野敏郎・佐藤邦彦・浜野博行・原 肇:「テニス・スウィングの解析と定量評価」, 精密工学会誌, Vol.73, No.2, pp.281-285 (2007)
- (2) D. Ring and A. Kokaram: "Online Parsing of Sports Coaching Video Through Intrinsic Motion Analysis", *Proc. International Conference on Image Processing*, Vol.4, pp.541-544 (2007)
- (3) M.G. Kelly, K.M. Curtis, and M.P. Craven: "Fuzzy Recognition of Cricket Batting Strokes based on Sequences of Body and Bat Postures", *Proc. IEEE SoutheastCon*, pp.140-147 (2003)
- (4) H. Ida, K. Fukuhara, M. Takahashi, M. Ishii, and T. Inoue: "Perception of Tennis Ball Flight in an Immersive Three-dimensional Visual Display", *Japanese Journal of Sport Psychology*, Vol.37, No.1, pp.1-11 (2010) (in Japanese)
井田博史・福原和伸・高橋まどか・石井源信・井上哲理:「没入型3次元映像呈示におけるテニス打球に対する知覚」, スポーツ心理学研究, Vol.37, No.1, pp.1-11 (2010)
- (5) N. Okada, T. Yabuuchi, T. Funatomi, K. Kakusho, and M. Minoh: "Estimating Unobserved Motion of a Ball by Acquiring Its Physical Model from Image Sequences", *IEICE*, Vol.J91-D, No.12, pp.2950-2960 (2008) (in Japanese)
岡田尚基・籾内智浩・松富卓哉・角所 考・美濃導彦:「映像からの運動モデル獲得によるボールの未観測運動推定」, 信学論, Vol.91-D, No.12, pp.2950-2960 (2008)
- (6) H. Shum and T. Komura: "Tracking the Translational and Rotational Movement of the Ball using High-speed Camera Movies", *Proc. International Conference on Image Processing*, Vol.3, pp.1084-1087 (2005)
- (7) H. Murase and S.K. Nayar: "3D Object Recognition from Appearance-Parametric Eigenspace Method", *IEICE*, Vol.J77-D2, No.11, pp.2179-2187 (1994) (in Japanese)
村瀬 洋・シュリーナイヤー:「2次元照合による3次元物体認識-パラメトリック固有空間法」, 信学論, Vol.77-D2, No.11, pp.2179-2187 (1994)
- (8) M. Obata, T. Nishida, H. Miyagawa, and F. Ohkawa: "Simultaneously Execution of Target Detection, Posture Estimation, and Tracking of 3D Objects by Parametric Eigenspace Method Embedded Particle Filter", *IEEEJ*, Vol.129-C, No.5, pp.838-845 (2009) (in Japanese)
小畑昌之・西田 健・宮河秀和・大川不二夫:「パーティクルフィルタを組み込んだパラメトリック固有空間法による三次元物体の検知・姿勢推定・追跡の同時実行」, 電学論, Vol.129-C, No.5, pp.838-845 (2009)

付 録

1. クォータニオンによる回転軸の決定

クォータニオンとは, 4 個の数からなる回転の表記法である。回転軸ベクトルが (α, β, γ) で, 回転角が ω で表される回転は, クォータニオンを用いて,

$$R = \left(\cos\left(\frac{\omega}{2}\right), \alpha \sin\left(\frac{\omega}{2}\right), \beta \sin\left(\frac{\omega}{2}\right), \gamma \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \right) \dots\dots\dots (付 1)$$

と表現される。ただし回転軸ベクトルのノルムは 1 に正規化されている。

また, 複数回のシングルローテーションを行った場合でも, 個々の回転を表すクォータニオンを積算することにより, 単一のクォータニオンで表される回転として扱うこと

ができる。つまり, R_1 から R_2 と表される回転を行った場合, $R_1 R_2$ を計算することにより回転が表現できる。クォータニオンの積算は, 次の式で行うことができる。

$$AB = (ab - \mathbf{f} \cdot \mathbf{g}, a\mathbf{g} + b\mathbf{f} + \mathbf{f} \times \mathbf{g}) \dots\dots\dots (付 2)$$

ただし $A = (a, \mathbf{f}), B = (b, \mathbf{g})$ である。

2. 始点位置変換の必要性

Fig.6 において, O は CG を作成した際における座標系の始点とする。このとき, フレーム毎に $D \rightarrow E \rightarrow F$ といった姿勢位置の変化で表されるボールの回転を表すクォータニオン R について考える。点 O から D の姿勢位置への回転を表すクォータニオンを OD と書くとする。このとき, OD 間の回転角を θ' , 回転軸ベクトルを (U_x, U_y, U_z) とすると, OD は

$$\left(\cos\left(\frac{\theta'}{2}\right), U_x \sin\left(\frac{\theta'}{2}\right), U_y \sin\left(\frac{\theta'}{2}\right), U_z \sin\left(\frac{\theta'}{2}\right) \right) \dots\dots\dots (付 3)$$

と表せる。同様に R の回転を ϕ' (rad/frame) で, 回転軸ベクトル (V_x, V_y, V_z) を基に回転しているとすると, R は

$$\left(\cos\left(\frac{p\phi'}{2}\right), V_x \sin\left(\frac{p\phi'}{2}\right), V_y \sin\left(\frac{p\phi'}{2}\right), V_z \sin\left(\frac{p\phi'}{2}\right) \right) \dots\dots\dots (付 4)$$

と表せる。ただし p はフレーム番号を表す。ここで, 始点から R の軌跡上に存在する p フレーム目の姿勢へのクォータニオンの第 1 成分は, (付 2) 式より $s = U_x V_x + U_y V_y + U_z V_z$ とすると,

$$\cos\left(\frac{\theta'}{2}\right) \cos\left(\frac{p\phi'}{2}\right) - s \cdot \sin\left(\frac{\theta'}{2}\right) \sin\left(\frac{p\phi'}{2}\right) \dots\dots (付 5)$$

とおける。これは $\theta' = 0$, もしくは $s = \pm 1$ のときに $\cos\left(\frac{p\omega'}{2}\right)$ の形で表され, 回転角がフレーム増加に対して比例関係にあるといえる。つまり $\theta' = 0$ の際に回転角が時間に比例するとみなすことができる。これを達成するために, 始点の位置を変換する必要がある。

井 上 卓 也 (非会員) 2010 年 3 月慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科前期博士課程に在学中。コンピュータビジョン, 特にスポーツ映像解析に関する研究に従事。



植 松 裕 子（非会員） 2004 年 3 月慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2009 年 3 月同大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。博士（工学）。2009 年より，同大理工学部情報工学科助教。コンピュータビジョン，複合現実感に関する研究に従事。



斎 藤 英 雄（正員） 1987 年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1992 年 3 月同大学院理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。1992 年同大学助手。同講師，同助教授を経て，2006 年同教授。博士（工学）。主としてコンピュータビジョンに関する研究に従事。

