

探索手法の切り替えを用いたサッカー映像におけるボール追跡システム

矢野 一樹[†] 滝口 哲也^{††} 有木 康雄^{††}

[†] 神戸大学自然科学研究科 〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

^{††} 神戸大学自然科学系先端融合研究環 〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

E-mail: [†]yano@me.cs.scitec.kobe-u.ac.jp, ^{††}{takigu,ariki}@kobe-u.ac.jp

あらまし 本論文では、全画面探索法と局所探索法の二つの探索法の切り替えを用いて、サッカー映像においてボールを追跡するシステムを提案する。全画面探索法には、正規化相互相関法によるテンプレートマッチングを用いた。これによって、最初のフレームで画像からボールを検出する。ボール検出すると、次のフレームからは探索法をパーティクルフィルタを用いた局所探索法に切り替えてボール追跡を行う。また、追跡中にボールを見失ってしまった場合は、探索法を全画面探索法に切り替え、ボールを検出した後、再び局所探索法によって追跡を行う。全画面探索法のみ追跡システム、局所探索法のみ追跡システム、そして提案した切り替え型追跡システムとでボール追跡の比較実験を行い、良好な結果を得た。

キーワード ボール追跡, 正規化相互相関法, パーティクルフィルタ, 切り替えシステム

Ball Tracking System for Soccer Video by Switched Searching Method

Kazuki YANO[†], Tetuya TAKIGUCHI^{††}, and Yasuo ARIKI^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Kobe University Rokkodai-cho 1-1, Nada-ku,
Kobe-shi, Hyogo 657-8501 Japan

^{††} Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University Rokkodai-cho 1-1, Nada-ku,
Kobe-shi, Hyogo 657-8501 Japan

E-mail: [†]yano@me.cs.scitec.kobe-u.ac.jp, ^{††}{takigu,ariki}@kobe-u.ac.jp

Abstract In this paper, we propose a ball tracking system for soccer videos by switching search methods between global search and local search. At first, the global search is employed to detect a ball on the first frame using a normalized cross correlation method. Then the search method is switched to the local search of the ball using a particle filter. While tracking, when the ball is lost, the search is switched to the global search method and the ball is tracked by the particle filter again. We carried out three ball tracking experiments; global search, local search and the proposed switching search method. As a result, the experiments showed the effectiveness of the proposed method.

Key words Ball tracking, normalized cross correlation, particle filter, switched system

1. はじめに

近年、様々な新しい放送サービスが始まっている。特にチャンネル数の増加による放送コンテンツの増大は、大きな注目を集めている。しかし、チャンネル数の増加には、様々なコストの問題を解決する必要がある。そこで今日、映像の自動生成技術が求められている。

そのための技術の一つとして、デジタルカメラワークを用いたスポーツ映像の自動撮影という研究が進められている [1][2]。デジタルカメラワークとは、高解像度の固定カメラにより映像を撮影し、各フレームをデジタル処理してクリッピ

ングを行い、擬似的なカメラワークを実現するものである。ただし、多くのスポーツではボールの動きによって試合が展開されている。そのため、スポーツ映像の自動撮影には、精度の高いボールの追跡技術が不可欠になる。本論文では、世界中で最もポピュラーなスポーツの一つであるサッカーの映像を対象としている。

従来のサッカー映像におけるボール追跡の研究では、まず画像からボールを検出し、それから追跡を行う方法が一般的である。ボールの検出には、テンプレートマッチングを用いた手法や、物体の円形度を用いて検出を行う CHT 法等が提案され、その有効性が確認されている [7]。そして、ボールの追跡にお

いては、カルマンフィルタやパーティクルフィルタを用いる手法が、近年ではよく用いられている。[4][5][6][8][9] ただし、これらの研究のほとんどは、実際にテレビで放映された映像を対象としている。このような映像はほとんどが複数台のカメラによって撮影され、また撮影しているカメラ自身も移動していることも多い。一方で、単一の固定カメラによって撮影されたサッカー映像を対象としている研究は少ない。

そこで本稿では、単一の固定カメラによって撮影されたサッカーの試合におけるボール追跡システムを提案する。図1に提案するボール追跡システムの構成を示す。このボール追跡システムは、ボールの追跡状態に応じて、全画面探索法と局所探索法とで探索法を自動的に切り替えるシステムである。全画面探索は、正規化相互相関法を用いたテンプレートマッチングによって行う。また、局所的探索法は、パーティクルフィルタを用いた手法によって、ボールの追跡を行う。

以降では、各探索法やシステムの詳細について述べ、その後の実画像を用いた比較実験の結果を示す。

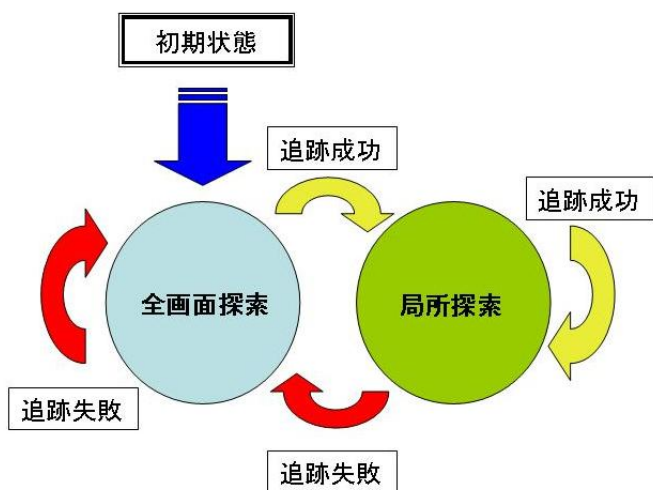


図1 ボール追跡システムの全体図

2. 正規化相互相関法

物体追跡の最も一般的な手法の一つとして、テンプレートマッチング、特に正規化相互相関法を用いたものが挙げられる。これは探索領域内 $I(x, y)$ に対して、テンプレート画像 $T(i, j)$ との相関値を求め、最も値の高い領域を対象物体領域とする手法である。相関値 $R(x, y)$ は次式によって表される。ただし、 \bar{T} と \bar{I} は、テンプレートと相関を求める対象領域の平均輝度値とする。また、 (\hat{x}, \hat{y}) は抽出領域の先頭座標である。

$$R(x, y) = \frac{\sum_{i,j} \{T(i, j) - \bar{T}\} \cdot \{I(x+i, y+j) - \bar{I}\}}{\sqrt{\sum_{i,j} \{T(i, j) - \bar{T}\}^2 \cdot \sum_{i,j} \{I(x+i, y+j) - \bar{I}\}^2}}$$

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max_{x, y} R(x, y)$$

本研究で対象とする映像データはカラー画像である。入力画像、テンプレート画像を赤、緑、青の色画像に分解し、それぞ

れの色画像に対して正規化相互相関法を適用する。そして、それぞれの色画像の相関値の積を最終的な画像の相関値とする。その結果、最も相関値の高い領域をボール領域とし、その領域の中心座標をボール座標とする。ただし、いずれかの色画像の相関値が負の値をとる場合、その他の色画像の相関値に関わらず、最終的な画像の相関値は0としている。

また、本研究では、テンプレート画像はあらかじめ用意している。

3. パーティクルフィルタ

サッカーの試合の自動的な映像生成を目的とする従来研究では、ボールの追跡を行う対象映像は、複数のカメラを用いる場合や、ボールを中心に視点が移動している場合が多かった[5][6]。一方、本研究では、視点固定の単一カメラを用いた映像を想定している。しかし、単純なテンプレートマッチングによる手法では、画像にノイズが多い場合や、テンプレートの特徴が乏しく、類似した形状の物体が複数ある場合、誤認識が発生しやすくなる。特に、撮影距離が長い映像では、映像中のサッカーボールは、単なる白色の丸い点になり、追跡対象としては特徴が乏しい。また、追跡対象の物体が、他のオブジェクトの影に入る等して、画面から見えなくなってしまうオクルージョンと呼ばれる問題に対応することも困難である。

このような状況にも頑健な追跡ができる手法としてパーティクルフィルタ (CONDENSATION 法) が提案され、その有効性が報告されている [3]。これは状態量と尤度を持つ多数の粒子によって確率分布を離散的に近似し、確率モデルを伝播させることで、ロバストな追跡を実現させる手法である。

時刻 t における追跡対象の状態量を x_t 、同時刻の画像特徴を z_t とする。また、時刻 t までに得られる画像特徴の系列を $Z_t = (z_1, \dots, z_t)$ とする。このとき、 x_t の事後確率分布 $p(x_t|Z_t)$ はベイズの定理により、次式ようになる。

$$p(x_t|Z_t) = k_t p(Z_t|x_t) p(x_t|Z_{t-1})$$

ここで、 k_t は正規化項であり、 $p(Z_t|x_t)$ は x_t の尤度、 $p(x_t|Z_{t-1})$ は事前分布である。このとき、 $p(x_t|Z_{t-1})$ は前の時刻 $t-1$ の事後分布 $P(x_{t-1}|Z_{t-1})$ と、時間が経過するときの分布の推移確率 $p(x_t|x_{t-1})$ から、次のように求めることができる。

$$p(x_t|Z_{t-1}) = \int_{x_{t-1}} p(x_t|x_{t-1}) p(x_{t-1}|Z_{t-1}) dx_{t-1}$$

この手法では、事前分布に基づいてランダムサンプリングを行い、各サンプルに対して尤度を求めることによって、離散的に事後確率分布を推定する。これは、各時刻 t における、 N 個のサンプル群 $s_t^{(n)} (n = 1, \dots, N)$ とその尤度評価によって得られる重み $\pi_t^{(n)}$ を用いて次式のように表される。

$$p(x_t|Z_t) \approx \sum_{n=1}^N \pi_t^{(n)} \delta(s_t^{(n)})$$

ただし、 δ はディラックのデルタ関数である。

以下、パーティクルフィルタによる物体追跡のアルゴリズムを示す。

Step1 $t - 1$ 時刻の事後確率 $p(x_{t-1}|Z_{t-1})$ に基づき、粒子をリサンプリング。
 Step2 各粒子をモデルに基づいて状態遷移させる。
 Step3 各粒子の尤度を求め、事後確率 $p(x_t|Z_t)$ を求める。
 Step4 次のフレームに移り、Step1 に戻る。

3.1 状態空間

本論文では、各時刻 t における、各粒子の状態量を表す状態ベクトル $x(t)$ を以下のように定義する。

$$x(t) = [p_x(t), p_y(t), v_x(t), v_y(t)]^T$$

時刻 t の対象映像における、画像上の 2 次元座標の横軸の座標を $p_x(t)$ 、縦軸の座標を $p_y(t)$ とする。 $v_x(t)$ は横方向の速度、 $v_y(t)$ は縦方向の速度とする。

また、粒子の状態のダイナミクスは、運動方程式によって以下のようにモデル化した。

$$x(t) = \begin{bmatrix} I & I \\ 0 & I \end{bmatrix} x(t-1) + \omega(t)$$

ただし、粒子の位置や速度の上限には制限を課している。これは、物理的に通常あり得ない状態の粒子が生じることを防ぐためである。

サッカーの試合において、ボールが非線形な運動をすることは珍しくない。その原因となるのは、キックやヘディング、トラップといったプレイヤーの行動によるものや、空気抵抗や風、ピッチの凹凸といった試合環境によるものである。これらは外乱と考え、ノイズ ω によって吸収することにした。なお、 ω はガウスノイズとした。

3.2 尤度評価

粒子の尤度は、その粒子の座標において、2 章で述べた正規化相互相関法を適用したテンプレートマッチングの評価値とする。その結果、最も尤度の高い領域をボール領域とする。そして、そのボール領域の中心座標をボール座標とする。

ただし、この手法をそのまま適用すると、粒子が背景物体をボールと誤認識した場合、そこから粒子が動かなくなってしまう可能性がある。本手法ではそれを防ぐために、背景画像と現画像との差分をとり、それを 2 値化することによって動物体領域の抽出を行った。図 2 に、この方法によって得られる差分画像の例を示す。

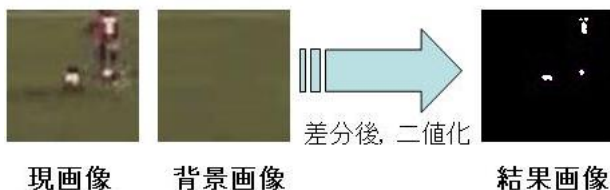


図 2 差分画像

2 値化を行うのは、ボール領域と他の領域との差を鮮明にするためである。動物体領域上にある粒子のみを評価することによって、ボールやライン、観客席といった背景物体への誤認識を防ぐことができる。

なお、背景画像は、元の映像データからランダムに複数枚の画像データを取り出し、それを平均することによって、あらかじめ求めておくものとする。図 3 に、5 章で実験に用いる映像から、この方法によって求めた背景画像を示す。



図 3 背景画像

4. ボール追跡システム

正規化相互相関法を用いたテンプレートマッチングによる全画面探索法は、常に対象領域の全画面を探索することができる。しかし、この手法では、オクルージョンが生じた時刻のフレームにおいて、ボールを検出することができない。特に、固定カメラで撮影をする場合、ボールとカメラの間に選手が入り込むことによって、オクルージョンが生じることは珍しくない。また、キックやヘディング等によって、ボールの形状が大きく変化するフレームでは、ボールとテンプレートとの差が大きくなり、検出が難しくなる。更に、対象領域を全て探索するので、処理時間が長くなってしまいう問題もある。

一方、パーティクルフィルタを用いた局所探索法による追跡は、短時間であればオクルージョンが生じた場合でも、ボールの位置を推定することができる。ただし、本研究のパーティクルフィルタによる追跡手法では、白い背景上（ライン上や観客席の一部等）に沿ってボールが移動する場合、ボールを追跡することが難しい。これは現画像と背景画像の差分を行っても、ボールと背景の色情報が似ているため、動物体領域が抽出できないからである。さらに、一度ボールを完全に見失ってしまった場合、再び追跡することも困難である。

このように全画面探索法、局所探索法にはそれぞれメリットもあるがデメリットもある。これらのデメリットを解決するためには、ボールの追跡状態に応じて、ボール追跡システムが適切な探索法を取るように、探索法の切り替え制御をすればよい。また、そうすることによって、ボール追跡システムがボールを見失ってしまった場合でも、その後、自動的に追跡状態を回復することができる。

4.1 全画面探索から局所探索

全画面探索時に、一定の尤度を超える対象領域を発見した場合、ボール追跡システムはその領域をボール領域と見なす。ここで複数のボール領域の候補が出た場合には、最も尤度の高い領域をボール領域とする。そして、その領域の中心座標をボール座標として、次のフレームでは局所探索に切り替えてボールの追跡を行う。

また、一定の尤度を超える領域を発見できなかった場合は、次のフレームでも全画面探索法によって、再びボールの検出を試みる。

なお、本研究における、ボール追跡システムがとる探索法の初期状態は、全画面探索法としている。

4.2 局所探索から全画面探索

局所探索時に、一定時間連続で、尤度の低いフレームのみが続いた場合、ボール追跡システムはボールを見失ったものと判定する。その場合、次のフレームからは、探索手法を局所探索法から全画面探索法に切り替えてボール検出を試みる。

一方、そうでない場合は、次のフレームでも、局所探索法のままでボール追跡を行う。

5. 実験

本研究では、これまでに述べた3種類の探索法によるボール追跡システムについて、それぞれボール追跡の実験を行った。本実験で用いた映像は1280 × 720画素、1 pixelが24ビット、800フレーム(30フレーム/秒)のカラー映像である。この映像は、第83回全国高校サッカー選手権大会京都府大会決勝 京都朝鮮高級学校 対 桂高等学校の試合を撮影した。処理を行った計算機の性能はXeon(3.06GHz)、メモリは1024Mbytesである。

表1に、それぞれのボール追跡システムにおける実験結果を示す。表中の検出率とは、ボール追跡システムがボールの座標を正しく検出できたフレームの回数を、対象映像の全フレーム数で割った値である。表中の再設定とは、ボール追跡システムがボールの位置を見失うことによって、ボールが検出できなくなってしまった時、手でボールの位置を再びボール追跡システムに与え直すことである。処理時間は1フレームあたりの平均処理時間である。

表1 実験結果

手法	検出率	再設定	処理時間(秒) / 1フレーム
全画面探索法のみ	61.125%	不要	3.28
局所探索法のみ	91.500%	必要	0.87
切り替えシステム	91.750%	不要	0.91

5.1 全画面探索法だけのボール追跡システム

正規化相互相関法を用いた、テンプレートマッチングによる、全画面探索法だけのボール追跡システムにて実験を行った。図4に、本実験で用いるボールのテンプレートを示す。テンプレートは15 × 15画素、1pixelが24ビットのカラー画像であ

る。なお、テンプレートはどの探索法においても同じものを用いる。



図4 ボールのテンプレート

図5に追跡結果の例を示す。色の着いた実線がボール追跡結果の軌跡である。これは、尤度の高い座標のみを繋ぐことによって描画した。図中の黒枠は探索対象となる領域である。実験の結果、追跡システムは最後まで連続して追跡を行うことができた。しかし、表や図からも分かるように、ボールの追跡精度に関しては低い。また、1フレームあたりの処理時間も3つのボール追跡システムの中で、最も長い。



図5 ボールの追跡結果の例：正規化相互相関法(追跡開始から300フレーム分)

5.2 局所探索法だけのボール追跡システム

パーティクルフィルタを用いた、局所探索法だけのボール追跡システムで実験を行った。図6に粒子の分布の例を示す。これは、あるフレームでのボール付近を拡大した画像である。ボールと推定されたものが赤い点であり、黄色い点は各粒子である。なお、パーティクル(粒子)の総数は100個に設定し、ボール座標の初期値は手で与えた。



図6 粒子の分布例

図7に追跡結果の例を示す。実線の描画方法は前節と同じである。また、黒枠の外側の領域には、粒子が配置されないように設定した。実験の結果、全画面探索法のボール追跡システムと比較して、大幅に追跡精度が向上し、詳細な追跡を行うことができた。これはオクルージョン等の問題が生じた際にも、上手く対応できているからであると考えられる。更に、1フレームあ

たりの処理時間も全画面探索法と比較すると、大幅に短くなっている。しかし、ボール追跡システムが一旦ボールを見失ってしまった場合は、再設定を行わなければ追跡を続けることができなかった。



図 7 ボールの追跡結果の例：パーティクルフィルタ（追跡開始から 300 フレーム分）

5.3 探索法の切り替えを用いたボール追跡システム

全画面探索法と局所探索法の切り替えを用いた、切り替え型のボール追跡システムで実験を行った。局所探索法から全画面探索法への切り替えは、4.2 節で述べた条件が、40 フレーム続いた場合に行われるよう設定した。また、全画面探索法から局所探索法への切り替えは、全画面探索法における評価値が、確実にボールであると判断できる値以上である場合にのみ、切り替えが行われるように設定した。これらのパラメータは経験的に求めたものである。

実験の結果、ボール追跡システムは高い検出精度のまま、最後まで連続して追跡を行うことができた。僅かながらも局所探索法より検出率が上がっているのは、局所探索法では追跡できなかったところまで、全画面探索法に切り替えることによって、追跡が可能になったからであると考えられる。そのため、3つの追跡システムの中で、検出率が最も高くなった。また、処理時間についても両方の手法が使われているのにも関わらず、局所探索法と比較してほとんど変わらなかった。これは追跡のほとんどが局所探索法で行われているため、処理時間全体で考えると、全画面探索法による処理時間の割合が低いので、その影響が薄れてしまうからである。

6. 終わりに

本論文では、単眼固定カメラによって高解像度で撮影されたサッカーの試合における、探索手法切り替え型のボール追跡システムを提案した。探索手法には、正規化相互相関法によるテンプレートマッチングを用いる探索法と、パーティクルフィルタによる探索法を用いた。ボール追跡システムがボールの追跡状態を自動的に判断し、その状態に適した探索法を用いることによって、連続で安定したボールの追跡ができることを実験結果より示した。

今後の展開は、ボールの追跡状態による切り替え型のシステムから、更に一段階進んだ、試合のシーンによる切り替え型の

ボール追跡システムの開発である。例えばゴールキーパーがキャッチングをして、長時間ボールを抱え込んでしまうような時、現在のボール追跡システムでは、ボールを見失ってしまう。しかし、システム側が、「キーパーがボールを抱え込んでいる」と判断できるようになれば、キーパーを追跡することによって、ボールの位置を推定できるようになる。更に、このようなシステムはサッカーの試合だけでなく、柔軟性があるので、他のスポーツにも応用できる可能性もある。

また、各探索法による追跡精度の向上、システムの切り替え条件や各種パラメータの設定、処理時間の短縮等も、今後の課題として検討する必要がある。

参考文献

- [1] 窪田進太郎, 有木康雄, 塚田清志, "嗜好分類に基づく個人適応型サッカー映像の自動生成技術", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2005-115, pp. 7-12, 2005.
- [2] Yasuo Ariki, Shintaro Kubota, Masahito Kumano, "Automatic Production System of Soccer Sports Video by Digital Camera Work Based on Situation Recognition", ISM (MIPR2006), pp. 851-858, Decm 2006.
- [3] Michael Isard and Andrew Blake, "Condensation-Conditional density propagation for visual tracking", Int. J. Computer Vison, vol. 29(1), pp. 5-28, 1998.
- [4] 三須俊彦, 高橋正樹, 藤井真人, 八木伸行, "逐次モンテカルロ法による実時間サッカーボール追跡", 電子情報通信学会総合大会, D-12-39, pp. 171, March 2006.
- [5] 三須俊彦, 高橋正樹, 藤井真人, 八木伸行, "パーティクルフィルタによる単眼動画からのサッカーボール3次元軌道推定", 第5回情報科学技術フォーラム (FIT2006), LI-002, pp. 167-170, 2006.
- [6] 石井規弘, 北原格, 亀田能成, 大田友一, "2視点からの映像を利用したサッカーシーンにおけるボールの位置推定", 電子情報通信学会総合大会, D-12-41, pp. 157, March 2007.
- [7] T.D'Orazio, N.Ancona, G.Cicirelli, M.Nitti, "An Ball Detection Algorithm for Real Soccer Image Sequences", Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, vol. 1, pp. 210-213, 2002.
- [8] Xiao-Feng Tong, Han-Qing Lu, Qing-Shan Liu, "An Effective and Fast Soccer Ball Detection and Tracking Method", Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, vol. 4, pp. 795-798, 2004.
- [9] Dawei Liang, Yang Liu, Qingming Huang, Wen Gao, "A Scheme for Ball Detection and Tracking in Broadcast Soccer Video", Advances in multimedia information processing (PCM 2005), Part1, LNCS3767, pp. 864-875, Jeju Island, Korea, November 13-16, 2005.