

## 2 視点からの映像を利用したサッカーボール追跡手法

石井 規弘<sup>†</sup> 北原 格<sup>††</sup> 亀田 能成<sup>††</sup> 大田 友一<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†ishii@image.esys.tsukuba.ac.jp](mailto:†ishii@image.esys.tsukuba.ac.jp)

[‡{kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp](mailto:‡{kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp)

あらまし 本論文では、2 視点から撮影したサッカーシーンの映像を利用して、ボールの 3 次元位置を推定する手法を提案する。ボールの 3 次元位置推定を行うことで、サッカーシーンにおける自由視点映像の提示や、試合解析への応用が期待される。画像中からボールを探索する際、探索手法を適応的に切り替えて、探索の効率化を図る。また、ボールの 3 次元位置が推定できない場合には、カルマンフィルタを用いて位置を予測し、観測情報を補間する。

キーワード ボール追跡 位置推定 2 視点 サッカー カルマンフィルタ

## A Tracking Method of a Soccer Ball by Using Two Viewpoint Videos

Norihiro ISHII<sup>†</sup>, Itaru KITAHARA<sup>††</sup>, Yoshinari KAMEDA<sup>††</sup>, and Yuichi OHTA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> University of Tsukuba, Graduate School of Systems and Information Engineering, Tennodai 1-1-1,

Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8577, Japan

E-mail: [†ishii@image.esys.tsukuba.ac.jp](mailto:†ishii@image.esys.tsukuba.ac.jp)

[‡{kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp](mailto:‡{kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp)

**Abstract** We propose an efficient method to estimate 3D-position of a soccer ball by using two viewpoint videos. The 3D location of a ball is essential to realize a 3D free viewpoint browsing system and to analyze of soccer games. We develop a efficient method to detect the ball by selecting appropriate algorithms according to ball states. The 3D position of the ball is then estimated by applying stereo vision algorithm to the estimated 2D position in the two captured images. When it is impossible to estimate the 3D location, the prediction by the Kalman-Filter compensates the missing location information.

**Key words** Ball Tracking, Two Viewpoints Videos, Soccer, Kalman-Filter

### 1. はじめに

映像通信技術の発展を背景に、次世代の映像メディアに関する研究開発が活発に行われている。特に、世界中の数多くの人々が関心を集めるスポーツイベントの中継は、その応用領域として注目されている。例えば、金出らは、特定のプレーヤを中心にカメラが 360 度回転する、これまでにないカメラワークによりスポーツイベントを撮影し、プレイ直後にユーザへ提供する EyeVision システムの開発に成功している [1]。このように、より斬新なカメラワークの実現を目的として、対象空間を多数の視点から撮影した映像をコンピュータで解析することにより、自由な視点位置からの見え方を再現しようという研究が盛んに行われている。視点の選択権を映像の制作者ではなく、観察者に与える点が、従来の映像メディアとは大きく異なっている。その中の 1 つとして、サッカースタジアムにおける自由視点映像の生成・提示に関する研究が行われている [2]。

我々はこれまで、大規模空間を対象とした自由視点映像の生成・提示に関する研究に取り組んできた。その中で、古山らは、サッカースタジアムにおける自由視点映像を、ネットワーク経由で遠隔地のユーザに配信可能な自由視点ライブ中継システムの上で実現している [3]。

この自由視点ライブ中継システムにおいてサッカーボールの自動位置推定は、いまだ解決されていない課題である。このような自由視点映像システムにおいて、サッカーボールの自動位置推定は必要不可欠な要素である。ユーザはボールを目で追いつながり試合を観戦することが多いため、ボールの位置を自動的に推定することができれば、ユーザが注目している領域の推定が可能となり、ユーザが見たい視点からの映像を容易に生成・提示することが可能になると考えられる [4]。また、推定されたボールの 3 次元軌跡データは、スポーツシーンの解析や、スポーツ科学への応用など、様々な分野への貢献が期待できる。しかし、ボールは選手と比べ、画像中における観測面積が小さ

く、広範囲を高速に移動し、なおかつサッカーフィールド上に常に存在するとは限らないため、これらの問題に適合する効率のよいボール追跡手法が必要とされている。本研究は、固定カメラで撮影した2視点の映像からボールを抽出し、ボールの3次元位置を推定することを目的とする。ここで、リアルタイム処理を目指すために、1つ前のフレームでの探索結果に応じて、探索範囲を絞り込む適応的手法を提案する。また、3次元位置推定をできない場合には、カルマンフィルタを用いたボールの軌跡予測を行い、観測情報の補間を行う。

## 2. 関連研究

これまで、スポーツシーンを映像から解析し、ボールの位置を求める研究は数多く行われてきた。D'Orazioらは、エッジ画像から円形ハフ変換を行い、形状からボールを抽出している[5]。Yanらは、移動物体領域から、形状、色、位置を特徴量としたSVMを利用してボール候補を算出し、確率モデルを利用してボールの位置を求めた[6]。Choiらは、テンプレートマッチングとカルマンフィルタを利用している[7]。斎藤らは、多視点を利用したラベルの面積の対応付けによりボールを抽出している[8]。しかし、これらの研究では、ボールの3次元位置は獲得できていない。また、白井らは、色や形状からボールの候補領域を抽出し、それらを複数フレームに渡り絞りこんでボールの3次元位置を求めている[9]。三須らは、移動物体領域から、面積、縦横比、色情報を利用してボール候補を抽出し、パーティクルフィルタを用いてボールの3次元位置を推定した[10]。これらの研究では、ボールの3次元位置を求めているが、計算コストが高いという問題がある。飯塚らは、ステレオカメラで撮影した画像の色情報を利用して、リアルタイム3次元計測システムを開発した[11]。しかし、このシステムでは、カメラから対象物までの距離が数メートルであり、対象物が小さいと、精度が悪化する。

本研究の撮影環境では、サッカーフィールドの半面を固定カメラで撮影しているため、テレビのサッカー中継と比べて画像中のボールの面積が小さい。したがって、そのような画像でもボールの位置を効率良く求められる手法が望まれる。

## 3. 画像からのボールの抽出

ボールの3次元位置を推定するためには、まず、2視点からの画像中におけるボールの位置を求めなければならない。本章では、画像中からボール領域を抽出する手法を述べる。

### 3.1 移動物体領域の抽出

サッカーシーンではセットプレー時などを除き、一般的に、ボールは動いている場合が多い。そこで、フレーム間差分法を用いて画像中から移動物体領域の分割を行う。ここでいうフレーム間差分法とは、撮影時刻の異なる画像間で画素値の差分をとることにより、フレーム間で移動した領域を切り出す手法である。しかし、単純に2フレーム間で差分をとると、図1中段に示すように、移動した前景領域だけではなく、その前のフレームで前景領域が存在していた背景領域までも抽出してしまう。そこで、3枚のフレームを用いたフレーム間差分処理によ

り、図1の下段に示すように、この領域を除去する。 $k-1$ フレーム目と $k$ フレーム目のフレーム間差分画像を $I_{k-1,k}$ としたとき、 $I_{k-1,k}$ と $I_{k,k+1}$ の論理積を求めることにより、 $k$ フレーム目における移動前景領域のみを抽出する。

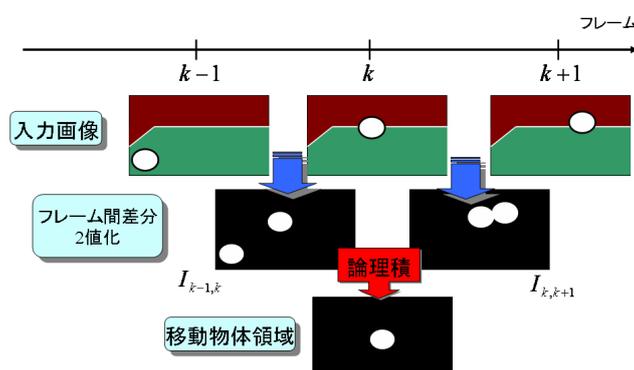


図1 3枚のフレームを用いたフレーム間差分

### 3.2 背景差分法による選手領域の検出

前節において、抽出された移動物体領域には、ボール領域と選手領域が混在している。本節では、背景差分法により別途選手領域を求め、移動物体領域から選手領域を除去する。背景差分法としては、予め撮影しておいた図2のような背景画像と、図3のような入力画像との差分をとることにより、図4に示すように、画像全体を背景領域と前景領域とに分割する。前景領域に対してラベリング処理を行った後、閾値以上の面積をもつ領域を選手領域とみなし、移動物体領域から除去する。



図2 背景画像 図3 入力画像 図4 領域分割結果

### 3.3 ボールの抽出

前節までに述べた処理を行うことにより、理想的な状況では、1つのボール領域のみが残ることになるが、実際には、ノイズの影響により、いくつかの領域が残る場合がある。そこで、この段階では、ノイズ領域を含めた全ての領域をボール候補領域とする。正確にボールを検出するためには、ボール候補領域から適切にノイズ領域を除去する必要がある。一般に映像は1秒間に30枚のフレームから成るため、たとえボールが時速100kmで移動していても、2フレーム間の移動は90cm強に収まる計算になる。一方、サッカーボールの直径は約22cmである。従って、連続する2枚の画像中におけるボール領域同士の距離は、ボールの見かけの大きさの数倍から10倍程度までいえる。そこで、現在注目しているフレーム番号を $k$ としたとき、フレーム $k$ におけるボール候補領域の近傍で、フレーム $k-1$ 中に存在するボール候補を調べる。もし存在していなけ

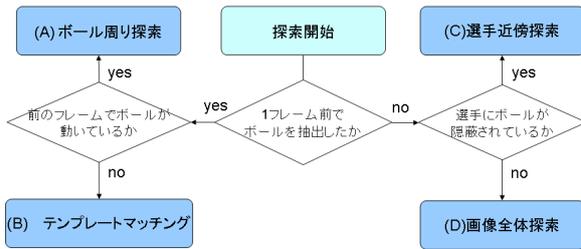


図 5 探索範囲設定の流れ

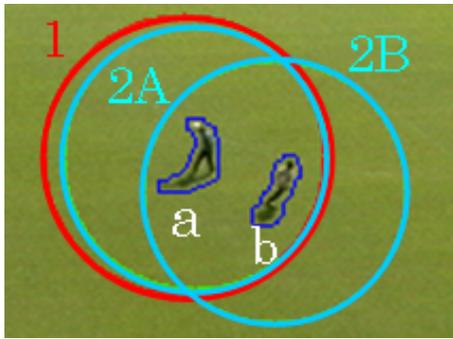


図 6 選手近傍探索

れば、フレーム  $k$  中におけるそのボール候補領域を除去する。これをフレーム  $k$  のボール候補全てにおいて行う。以上の処理を、ボール候補領域が 1 つになるまで複数フレームに渡って行い、最後まで残った領域をボール領域とする。

#### 4. 探索手法と探索範囲の適応的な切り替え

前章で述べた手法は、常に画像全体でボールを探索する手法であった。本節では、ボールを効率よく探索するため、1 つ前のフレームでの探索結果に応じて、現在のフレームでの探索方法または探索範囲を変える手法について述べる。探索範囲と手法はを以下の (A) ~ (D) であり、設定の流れを図 5 に示す。

##### (A) ボール近傍探索

前のフレームでボールを抽出に成功している場合、次のフレームでは、その抽出した位置の近傍に絞って探索する。

##### (B) テンプレートマッチング

(A) の結果、抽出に失敗した場合、フレーム間差分で抽出できない程、ボールの速度が低下している可能性がある。そこで、テンプレートマッチングで再びその範囲を探索する。

##### (C) 選手近傍探索

前のフレームでボールを抽出できなかった場合、最後に抽出したボールの近傍に選手がいたならば、その選手がボールを隠蔽している可能性が高い。そこで、次のフレームからは、その選手とその付近にいる選手の周りに探索範囲を絞りこんで探索する。図 6 は、選手近傍探索をしている様子である。円 1 は、前のフレームにおいてボールを隠蔽しているとみなした選手の位置を中心とした円である。現在のフレームでは、円 1 の中に存在する a, b の近傍円 2A, 2B の中全てにおいてボールを探索する。

##### (D) 画像全体探索

上記のいずれの条件にも当てはまらない場合は、フレーム  $k$

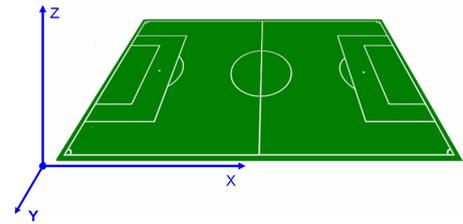


図 7 ピッチの 3 次元座標系

の画像全体を探索する。

#### 5. 2 視点画像を用いたボールの 3 次元位置推定

本節では、前節までの手法で得た 2 視点からのボールの情報を利用して、ボールの 3 次元位置推定を行う手法について述べる。ピッチの 3 次元座標系を図 7 のように定める。

図 8 に示すように、2 枚の画像から得られたボールの 2 次元座標を 3 次元座標系に投影し、3 次元座標における位置を推定する。

互いに平行ではない 2 台のカメラ  $i, j$  で撮影した 2 枚の画像においてボールの座標が既知の場合、そのボールの 3 次元座標  $M = [x, y, z]^T$  は、両カメラの射影行列から推定することができる。2 枚の画像中のボール  $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i]^T$  と  $\mathbf{m}_j = [u_j, v_j]^T$  が既知ならば、以下の式 (1)(2) が成り立つ。 $\tilde{\mathbf{m}}_i, \tilde{\mathbf{m}}_j, \tilde{M}$  は、 $\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j, M$  の同次ベクトルである。また、 $s_i, s_j$  は奥行きを表すスカラーであり、 $P_i, P_j$  は 2 つのカメラの射影行列である。

$$s_i \tilde{\mathbf{m}}_i = P_i \tilde{M} \quad (1)$$

$$s_j \tilde{\mathbf{m}}_j = P_j \tilde{M} \quad (2)$$

式 (1)(2) から、次の式が導かれる。

$$BM = b \quad (3)$$

ここで、

$$B = \begin{bmatrix} u_i p_{i31} - p_{i11} & u_i p_{i32} - p_{i12} & u_i p_{i33} - p_{i13} \\ v_i p_{i31} - p_{i21} & v_i p_{i32} - p_{i22} & v_i p_{i33} - p_{i23} \\ u_j p_{j31} - p_{j11} & u_j p_{j32} - p_{j12} & u_j p_{j33} - p_{j13} \\ v_j p_{j31} - p_{j21} & v_j p_{j32} - p_{j22} & v_j p_{j33} - p_{j23} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$b = [p_{i14} - u_i p_{i34}, p_{i24} - v_i p_{i34}, p_{j14} - u_j p_{j34}, p_{j24} - v_j p_{j34}]^T \quad (5)$$

であり、 $p_{i\alpha\beta}, p_{j\alpha\beta}$  はそれぞれ  $P_i, P_j$  の  $\alpha$  行  $\beta$  列の要素である。式 (3) から、疑似逆行列  $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$  を用いて、

$$M = B^+ b \quad (6)$$

とすることで、ボールの 3 次元座標  $M(x, y, z)$  を推定する。

#### 6. カルマンフィルタ

ボールの 3 次元位置を求めるためには、2 視点からの映像の両方からボール位置を抽出しなくてはならない。だが、選手による隠蔽などで、各画像上でボールを常に抽出するのは困難で

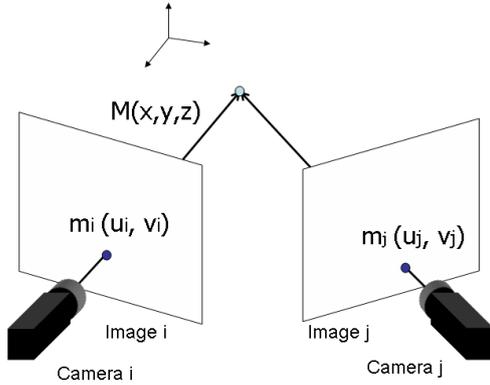


図 8 ポールの 3 次元位置推定

ある。したがって、ボールの 3 次元位置推定を行うことができない場合は、カルマンフィルタで予測したボール位置により観測情報を補間することにする。カルマンフィルタを用いることで、計測不可な物理量の予測値を観測値から算出し、予測値と物理量の平均と分散を最小にするように算出式を更新していくことができる。

本研究では、物理量をボールの 3 次元空間における状態とし、観測値を 2 視点の画像から求めた 3 次元位置とする。

### 6.1 状態モデルと観測モデル

本研究では、フレーム  $k$  におけるボールの状態を 3 次元位置とその速度、及び加速度で表し、

$$\mathbf{X}_k = [x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k, \ddot{x}_k, \ddot{y}_k, \ddot{z}_k]^T \quad (7)$$

とする。状態モデルは式 (8) で表される。

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \gamma \quad (8)$$

$\mathbf{A}$  は状態遷移行列であり、 $x$  軸、 $y$  軸方向では等速運動、 $z$  軸方向では等加速運動であると仮定する。ここで、本研究では、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

とする。なお本研究では、ボールの  $z$  軸の予測値が負になった場合は、完全弾性衝突をするように予測値を変換する。 $\mathbf{B}\mathbf{u}_k$  は状態遷移にかかる外乱であるが、本手法では零ベクトルとする。 $\gamma$  は、ガウス分布からなるプロセスノイズである。一方、フレーム  $k$  における観測ベクトル  $\mathbf{Y}_k$  を、5 節で算出したボールの 3 次元位置とし、

$$\mathbf{Y}_k = [p_k, q_k, r_k]^T \quad (10)$$

と表す。

観測モデルは式 (11) によって表される。

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{C}\mathbf{X}_k + \omega \quad (11)$$

このとき、

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

であり、また  $\omega$  は、観測時に発生するランダムノイズである。

### 6.2 カルマンフィルタの構成

カルマンフィルタで予測されるボールの尤もらしい状態を、最尤推定量  $\hat{\mathbf{X}}_k$ 、状態モデルから導いた一期先の予測値  $\tilde{\mathbf{X}}$  とする。前節で述べた状態モデルと観測モデルを用いてカルマンフィルタを構成すると、以下ようになる。

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \tilde{\mathbf{X}}_k + P_k \mathbf{C}^T \mathbf{W}^{-1} \{ \mathbf{Y}_k - (\mathbf{C}\tilde{\mathbf{X}}_k + \bar{\omega}) \} \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_k = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{B}\bar{\mathbf{u}} \quad (14)$$

$$P_k = (\mathbf{M}_k^{-1} + \mathbf{C}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{C})^{-1} \quad (15)$$

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{A}P_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{U}\mathbf{B}^T \quad (16)$$

このとき、 $\mathbf{W}$ ,  $\bar{\omega}$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\bar{\mathbf{u}}$  はそれぞれ、 $\omega$ ,  $\mathbf{u}$  の共分散行列、平均ベクトルである。このようにして、カルマンフィルタは式を更新しながら現在の観測値と 1 つ前の予測値から現在の最尤推定量を導き出し、それを用いて 1 つ先の予測値を求めている。

## 7. 実 験

### 7.1 撮影実験

国立霞ヶ丘競技場にて、撮影実験を行った。図 9 に示すように、フィールドの半面を、メインスタンド屋根上と電光掲示板側の比較的高所にある 2 視点から撮影している。Camera i と Camera j には、SONY 社製 DXC-9000 を使用する。2 つのカメラでは、GPS(Global Positioning System) から送られてくる信号を利用して撮影画像の同期撮影を行っている。また、各カメラはそれぞれ映像撮影用クライアント PC に接続され、これらの撮影用クライアント PC は、制御サーバ PC によって、遠隔制御されている。撮影する画像のサイズは 640x480 で、フレームレートは 30 fps である。ボール探索処理を実行する PC の仕様は以下の通りである。

- CPU : Pentium(R) 4 CPU 3.20GHz
- Memory : 1024 MB
- OS : CentOS 4.4

### 7.2 画像からのボールの抽出結果

実際のサッカーの試合を撮影し、ボールの抽出実験を行った。ある 1 シーンにおける Camera i, Camera j の抽出結果を表 1, 2 に示す。表 3 から分かるように、選手によりボールが隠蔽されていない場合は、全てのフレームでボールを抽出することができた。3 節で述べた探索範囲 (A) ~ (D) に対する 1 フレーム当たりの平均処理時間を計測した結果を表 4 に示す。探索範囲を絞りこむことにより、(D) と比較して、(A) ~ (C) では処理

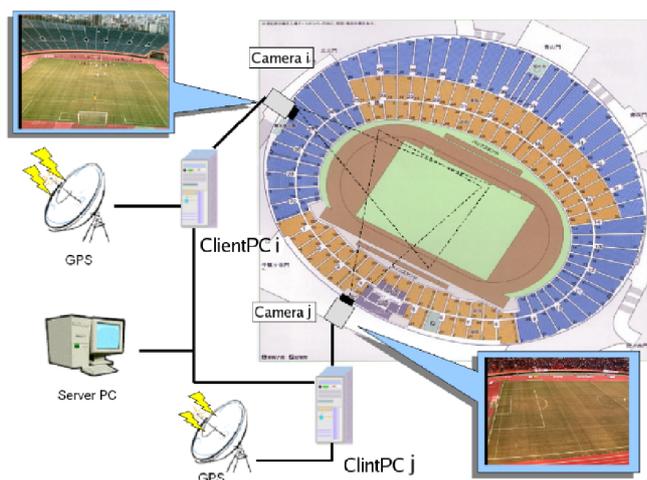


図 9 撮影システム



図 10 撮影に用いたカメラ (SONY DXC-9000)

表 1 抽出結果 (camera i 全 217 フレーム)

	探索手法	フレーム数
ボール抽出可	(A) ボール近傍探索	75
	(B) テンプレートマッチング	17
	(C) 選手近傍探索	8
	(D) 画像全体探索	1
合計		101
ボール抽出不可	(A) ボール近傍探索	7
	(B) テンプレートマッチング	0
	(C) 選手近傍探索	60
	(D) 画像全体探索	49
合計		116

時間を削減できていることがわかる。表 1, 2 からわかるように、全フレームの 76% 程度のフレームでは (A) ~ (C) を実行しているので、効率の良いボール抽出ができていているといえる。

### 7.3 ボールの 3 次元位置推定

前節の結果で、2 台のカメラで同時にボールを抽出できたのは、合計 82 フレームであった。この結果と、5 節で述べた手法を用いて、ボールの 3 次元位置推定を行った。本研究ではボールの運動モデルに基づいて予測を行っているため、Z 軸方向の予測値が負になった場合は、完全弾性衝突をするように予測を行った。図 11, 12, 13 に、X, Y, Z 軸方向それぞれの位置推定結果と、予測値を示す。X, Y 軸方向ではボールの等速運動を観

表 2 抽出結果 (camera j 全 217 フレーム)

	探索手法	フレーム数
ボール抽出可	(A) ボール近傍探索	93
	(B) テンプレートマッチング	17
	(C) 選手近傍探索	5
	(D) 画像全体探索	1
合計		116
ボール抽出不可	(A) ボール近傍探索	5
	(B) テンプレートマッチング	0
	(C) 選手近傍探索	46
	(D) 画像全体探索	50
合計		101

表 3 ボールが隠蔽されていない状態での抽出結果

	Camera i	Camera j
ボールが隠蔽されていないフレーム数	101	116
ボールを抽出したフレーム数	101	116
抽出率 (%)	100	100

表 4 探索範囲による処理時間の変化

探索範囲	処理時間の平均 (msec)
(A) ボール近傍探索	2.85
(B) テンプレートマッチング	10.49
(C) 選手近傍探索	11.247
(D) 画像全体探索	24.776

測し、予測していることが分かる。Z 軸方向では、ボールの等加速度運動を観測し、予測していることがわかるが、200 ~ 230 フレーム目以降に見られるような、観測値を十分に得られていない状況では、適切に予測が行われていないことが分かる。

図 14 に、推定結果を 3 次元的に描画した様子を示す。白色球がボールの観測値から推定した 3 次元位置、赤色のワイヤフレーム球がカルマンフィルタで予測した位置を表している。放物運動中に、位置推定結果が途切れていても、予測値で補間されていることがわかる。

## 8. まとめ

サッカーシーンを 2 台の固定カメラで撮影し、映像を解析することによって、ボールの 3 次元位置推定を行う手法を提案した。探索手法を適応的に切り替えるによって、効率の良い処理系を実現した。本手法では、画像による直接的な位置推定ができない場合でも、カルマンフィルタを利用して 3 次元位置を予測することにより、位置を補間することができる。また、国立霞ヶ丘競技場で実際のサッカーの試合を撮影し、その映像からボールの位置推定を行い、提案手法の有効性を示した。

今後の課題として、空気抵抗などを考慮した、より現実に近いカルマンフィルタの状態モデルの構築、ピッチ上に影が掛かっている場合のボールの探索手法、ボールが隠蔽されている場合の位置予測、使用カメラ台数の増加などが挙げられる。

## 謝 辞

本研究は、SCOPE の特定領域重点型研究開発の一環である。

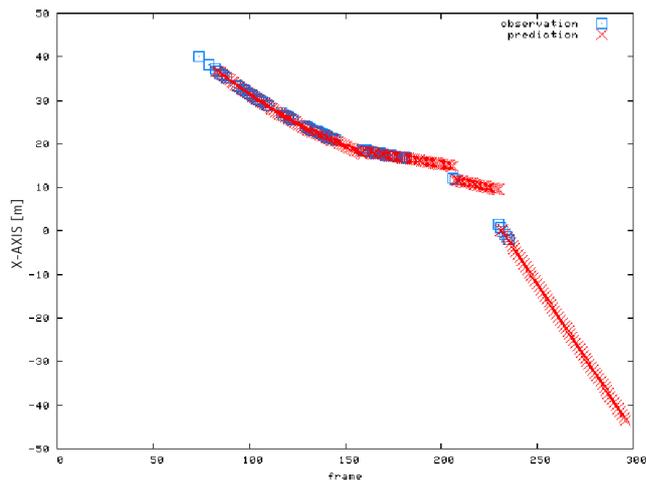


図 11 X 軸方向のボールの位置推定

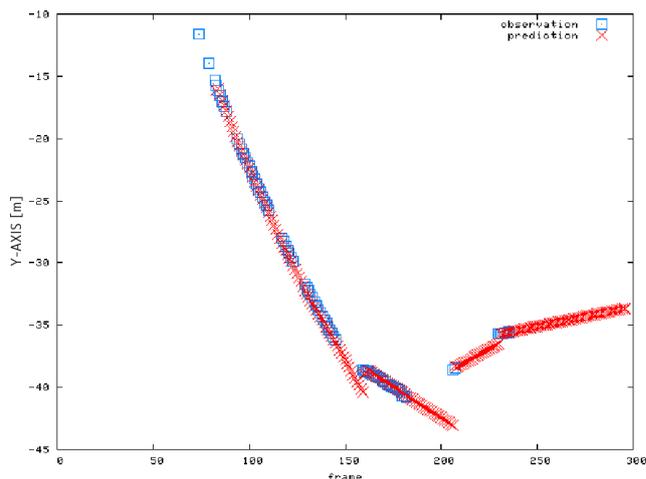


図 12 Y 軸方向のボールの位置推定

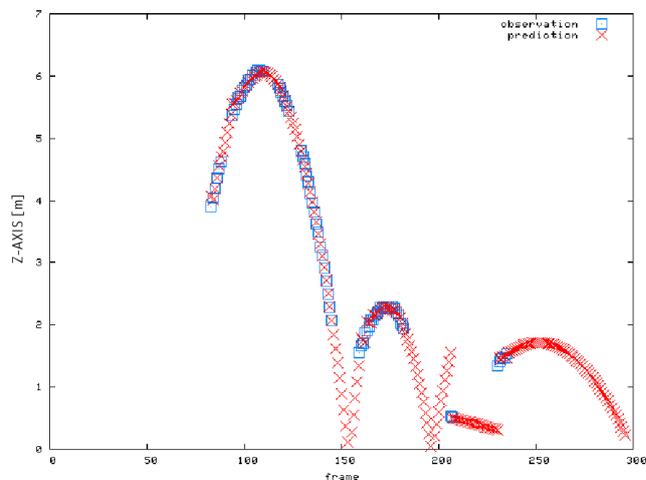


図 13 Z 軸方向のボールの位置推定



図 14 3次元空間でのボールの描画

ages from Multiple View Videos in Soccer Stadium,” IEEE International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation , 26-28, pp.220-225, 2006.

[3] T. Koyama, I. Kitahara, and Y. Ohta, “Live Mixed-Reality 3D Video in Soccer Stadium,” ISMAR 2003, pp.178-187, 2003.

[4] 北原格, 橋本浩一郎, 亀田能成, 大田友一, “サッカーの自由視点映像提示における気の利いた視点選択手法,” 信学技報 PRMU2007年1月研究会, pp.13-18, 2007.

[5] T. D’Orazio, N. Ancona, G. Cicirelli, and M. Nitti, “A Ball Detection Algorithm for Real Soccer Image Sequences,” 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR’02) - Volume 1, p.10210, 2002.

[6] F. Yan and W. Christmas and J. Kittler, “A Tennis Ball Tracking Algorithm for Automatic Annotation of Tennis Match, Proceedings of the British Machine Vision Conference,” pp.619-628, 2005.

[7] S. Choi, Y. Seo, H. Kim, and K.Hong, ”Where are the ball and players?:Soccer Games Analysis with Color-based Tracking and Image Mosaik,” Proc. of ICIAP, pp.196-203, 1997.

[8] K. Matsumoto, S. Sudo, H. Saito, and S. Ozawa “Optimized Camera Viewpoint Determination System for Soccer Game Broadcasting,” IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Nov.28-30, 2000.

[9] T. Shimawaki, J. Miura, T. Sakiyama, and Y. Shirai, “Ball Route Estimation in Broadcast Soccer Video,” Proc. ECCV-2006 Workshop on Computer Vision Based Analysis in Sport Environments, pp.26-37, Graz, Austria, May 2006.

[10] 三須俊彦, 松井 淳, 苗村昌秀, 藤井真人, 八木伸行, “センサネットワークのための分散協調型パーティクルフィルタ ~ 多視点サッカーボール追跡への応用 ~,” 信学技報, vol. 106, no. 538, PRMU2006-208, pp.11-16, 2007.

[11] T. Iizuka, T. Nakamura, T. Wada, “ステレオカメラによるリアルタイム3次元位置計測システム,” MIRU2004 ProceedingsI, pp.111-112, 2004.

[12] 有本卓, “カルマン・フィルター,” 産業図書株式会社, 1977.

研究を進めるにあたって協力していただいた, 国立スポーツ科学センター並びに国立競技場の関係者の皆様, 特に国立スポーツ科学センター吉川文人氏には深く感謝致します。

文 献

[1] <http://www.ri.cmu.edu/events/sb35/tksuperbowl.html>  
 [2] K. Hayashi, and H. Saito, “Synthesizing Free-Viewpoing Im-