

パーティクルフィルタとカルマンフィルタを補完的に利用した バドミントン映像からのシャトル軌道推定

○ 宍戸 英彦†, 北原 格‡, 亀田 能成‡, 大田 友一‡

○ Hidehiko SHISHIDO † Itaru KITAHARA ‡ Yoshinari KAMEDA ‡ and Yuichi OHTA ‡

†: 筑波大学 大学院システム情報工学研究科, shishido@image.iit.tsukuba.ac.jp

‡: 筑波大学 システム情報系, {kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

バドミントン競技映像におけるシャトルの軌跡を推定し、シャトルが地面に落下する前にイン・アウトの判定(以下ライン判定)を行う手法を提案する。打ち返される前にシャトルのライン判定が可能となるため、ライン内に入る打球を打つ感覚を確認しながら、効果的なトレーニングの実現が期待される。複数視点で撮影した映像に対しカルマンフィルタを適用することにより、シャトルの軌跡を高精度に推定する。しかし、バドミントンでは、打ち返された直後のシャトルは高速に移動するため、動きブレが発生しやすく、また選手による隠れも頻発するなど、カルマンフィルタでの追跡が困難となる状況がしばしば発生する。本手法では、そのような状況下においても物体追跡が可能なパーティクルフィルタを併用することにより、安定したシャトルの追跡を実現する。

<キーワード> バドミントン, シャトル追跡, パーティクルフィルタ, カルマンフィルタ

1. はじめに

映像撮影・解析技術の発達に伴い、スポーツ競技判定への導入が進んでいる[1]。また、スポーツ競技映像を解析することにより、練習効率の向上を目的とした研究開発にも注目が集まっている[2]。バレーボールやバドミンツンのように空中でボールを打ち合う競技の場合、地面に落下する前にボールが打ち返されてしまうため、実際にはイン・アウトどちらであったかを判定するのは困難である。バドミンツンの練習では、イン・アウトに関わらずラリーを続けることが多く、各打球の落下点が正確にわからないことがほとんどである。我々は、バドミンツン映像を解析し、シャトルの軌道をオンラインで推定することにより、打ち返される前にシャトルのライン判定を行うことを目的とした研究に取り組んでいる。

打ち返される前にシャトルのライン判定が可能となれば、コート内に入る打球を打つ感覚を身に付けながら練習することができる。また、相手の打ったシャトルが自身に届く前にシャトルのライン判定が可能となれば、相手の軌道を判定する感覚が向上すると考えられる。

スポーツ競技映像を用いた移動物体追跡手法としては、階層状のデータ配置から組み合わせ最適化アルゴリズムを使用したテニスボールの追跡[3]や、パーティクルフィルタやカルマンフィルタを用いてサッカーボールを追跡する研究が行われている[4][5][6]。いずれも比較的大規模な空間で行われる競技を対象としているが、我々が撮影対象とするバドミンツンコートサイズは、幅 6.1m、奥行き 13.4m と小さく、その結果、映像中で選手とシャトルが重なって観測されるケースが多く発生するため、既存の手法では、安定した追跡が困難である。また、バドミンツンのシャトルは、観測サイズが小さく、ラリー中の速度差が大きいため、急激に移動方向が変化するというような追跡を困難とする状態が頻発する。一方で、一度空中に飛び出した後は、物理法則に基づいた放物線運動をするため、高精度な軌跡推定が可能という特徴も有する。

本研究では、追跡精度はそれほど高くないが、状態変化に頑健なパーティクルフィルタと、観測環境の変化には対応が難しいが、正確な追跡処理が可能なカルマンフィルタを補完的に利用することにより、バドミンツン競技映像から安定してシャトルの軌跡

を推定し、その結果を用いたライン判定システムの実現を目指す。

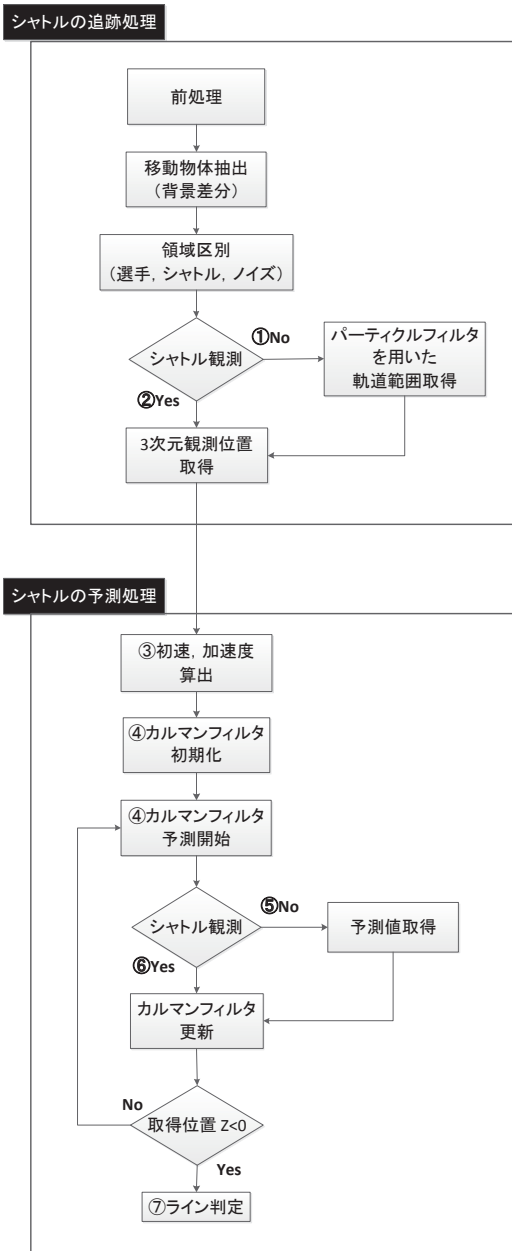
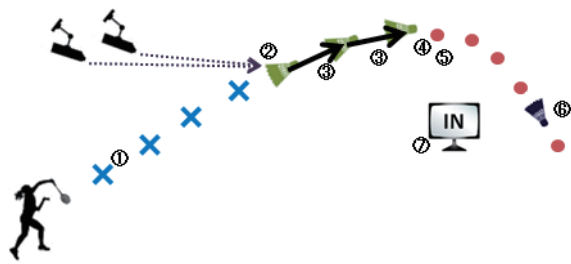


図 1：シャトルの軌跡推定によるライン判定

2. シャトルの軌跡推定

図 1 に示すように、バドミントン映像を解析し、シャトルの追跡と予測処理から地面に落下する前にライン判定を行う処理について説明する。背景差分処理と観測面積を用いたノイズ除去処理により移動物体（シャトル）を抽出する。本手法では、2 視点で撮影した映像から抽出したシャトル領域に対してステレオ法を適用することにより、その 3 次元座標を取得する。この 3 次元位置をシャトルの観測値とし、カルマンフィルタを用いてシャトルの軌道を推定する。カルマンフィルタによって良好に追跡できているフレームでは、構築した状態モデルを用いて、シャトルの軌跡推定が行われる。良好な追跡が困難なフレームでは、パーティクルフィルタを用いたシャトルの追跡結果を観測値としてカルマンフィルタに与える。この場合の検出位置には、パーティクル分布モデルに伴う誤差が生じるが、全く観測が行えない状態に比べると軌跡推定精度が向上することが期待される。

2.1 シャトルの検出

背景差分法を用いて画像中から移動物体領域を抽出する。コートやネットなどシャトル以外の移動物体が存在する領域にマスク処理を加えることにより、シャトルだけを移動物体として検出する。2 視点画像で観測されたシャトルの位置から、ステレオ法によって 3 次元位置を算出する。

2.2 シャトルの軌跡推定

カルマンフィルタは、センサを用いて直接的に計測が困難な物理量（例えばシャトルの位置や速度）の予測値を観測値から算出することができる。本手法では、シャトルの軌道を斜方投射の運動方程式から状態モデルを導き出し、カルマンフィルタを構成する。カルマンフィルタは、行列演算により予測値を算出するため、計算コストが少なく、かつ、常に一定の計算コストで処理されるため、予測処理速度が速い。また、物理運動モデルを状態モデルの方程式に当てはめて構成するため、物理運動モデルを有するシャトルの軌道予測に適している。本研究では、状態変数をシャトルの 3 次元空間における位置、速度、加速度とし、観測値を 2 視点画像からステレオ法によって求めた 3 次元位置とする。

2.3 カルマンフィルタの状態モデルと観測モデル

本研究では、フレーム k におけるシャトルの状態を 3 次元位置とその速度、及び加速度を用いて、

$$X_k = \{x_k \dot{x}_k \ddot{x}_k y_k \dot{y}_k \ddot{y}_k z_k \dot{z}_k \ddot{z}_k\} \quad (1)$$

と表す。また、カルマンフィルタの状態モデルは式(2)で表される。

$$X_k = AX_{k-1} + Bu_k + \omega_k \quad (2)$$

ここで、 A は状態遷移行列であり、シャトルは斜方投射の運動であることから、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-c}{m}\delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-c}{m}\delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-g}{m}\delta_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表せる。 δ_t は 2 フレーム間の時間差である。 Bu_k は状態遷移にかかる制御入力である。 m は質量であり、 c は空気抵抗量を表す。 z 方向にかかる重力加速度 g は、 A の状態遷移行列に含められないことより、

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g \end{bmatrix} \quad (4)$$

として B を定義する。 ω_k 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、算出したシャトルの 3 次元位置を z_k とすると、観測モデルは式(5)によって表される。

$$z_k = HX_k + v_k \quad (5)$$

ただし、

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

とし、 v_k は観測時に発生するランダムノイズとする。手動による観測軌道と観測ノイズなしの軌道の観測誤差から、算出した共分散行列を観測ノイズに当てはめる。

以上のように構築したカルマンフィルタを用いて、シャトルの軌跡を推定する。

2.4 パーティクルフィルタを用いた追跡処理

カルマンフィルタと並行して、背景差分処理によって抽出した移動物体領域に対し、色情報を尤度としたパーティクルフィルタを適用して追跡を行う。シャトルが高速に移動する場合、各フレームでは、動きブレの影響で白い筋として観測される。一方、移動速度が低下すると、白い点として観測される。このような見え方の変化を統一的にフィルタリング処理するために、4 フレーム分の背景差分画像の論理和をとり、移動速度に関わらずシャトルが白い筋として観測されるようにする。初期状態では、サービス時にシャトルが必ず通過するネット周辺にパーティクルを分布させる。パーティクルフィルタを適用することにより、パーティクルを分布した範囲内での観測誤差は発生するものの、隠れや不規則な動きが生じた場合でも、シャトルの 3 次元位置を観測することが可能となる。

2.4.1. パーティクルフィルタの尤度関数

本研究では、パーティクルフィルタの尤度に色情報を用いる。事前に手動で抽出したシャトルのサンプル画像 30 枚からシャトルの観測色を求めると、

$$RGB(r, g, b) = (53.2, 61.4, 90.1)$$

であった。

この $RGB(r, g, b)$ からのユークリッド距離 d に対して、分散を σ^2 として持つような正規分布を尤度関数 $L(d)$ として以下に定義する。

$$d = \sqrt{(53.2 - r)^2 + (61.4 - g)^2 + (90.1 - b)^2} \quad (7)$$

$$L(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

ここで、分散 σ^2 は、シャトルの大きさの平均より算出した30.0とする。また、パーティクル数は1000とする。

2.4.2. パーティクルフィルタの状態モデル

一視点の動画像に対して、パーティクルフィルタを用いた追跡処理を行う。シャトルの状態を2次元位置（画像上での観測位置）とその速度とし、等速直線運動の状態モデルを構築する。動画像の横軸を x 、縦軸を y とした場合、状態ベクトルは位置 (x, y) と各軸方向の速度 (u, v) の4次元となる。シャトルはネット周辺を必ず通過するため、初期状態では、ネット周辺にパーティクルを分布させ、式(9)のような状態モデルとすることで、シャトルが付近を通過するまで待機させる。

$$\begin{pmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ u_{t+1} \\ v_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ u_t \\ v_t \end{pmatrix} \quad (9)$$

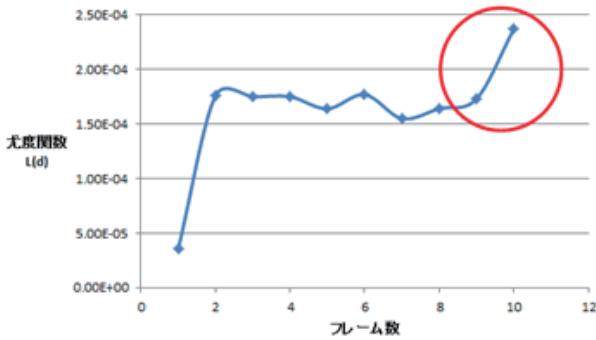


図2：初期状態からシャトルの捉え始めまでのパーティクルの分布

初期状態からシャトルを捉え始めまでのパーティクルの分布を図2に示す。丸線内部に示すように、尤度が単調増加を始めた段階で、式(10)のように速度ベクトルを加えた状態モデルに変更する。

$$\begin{pmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ u_{t+1} \\ v_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ u_t \\ v_t \end{pmatrix} \quad (10)$$

シャトルが打ち返された場合、図3のように、状態モデルで予測されたパーティクル分布の範囲外にシャトルが移動する。その結果、パーティクルが拡散し、追跡処理の継続が困難になる。そこで、パーティクルの分布状態を観測し、大きく拡散した場合、一定フレーム前のパーティクル位置に再初期化することにより、追跡処理を継続する。併せて、パーティクルが拡散したタイミングで、シャトルを打ったタイミングの検出も行う。

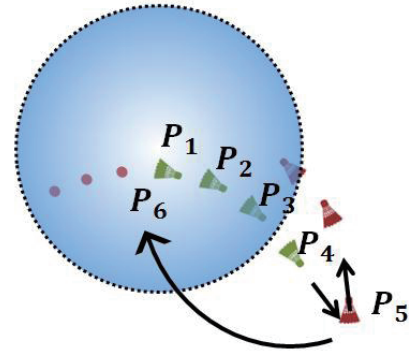


図3：パーティクルの初期化位置 ($P_1 \sim P_4$: パーティクル追跡位置, P_5 : パーティクルがはじけたときの位置, P_6 : パーティクルの初期化位置)

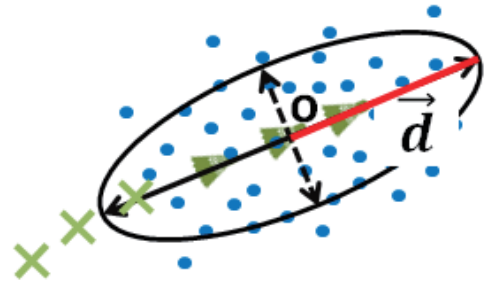


図4：シャトル追跡領域の算出方法

2.4.3. パーティクルフィルタによるシャトルの領域推定

パーティクルフィルタを用いたシャトルの追跡では、一意にシャトルの位置が定まらない。従って、パーティクルの領域を計算し、その中心をシャトルの位置とする。

図4に示すようにパーティクルの楕円領域の中心 o と長軸 d を求め、2視点で捉えたそれぞれのシャトルの領域の中心 o からステレオ法にて3次元位置を算出する。それぞれの長軸から、論理積 d' を求め、 d' は、3次元位置を原点とした球体の半径とする。この球体の領域を、パーティクルフィルタに

よる推定されたシャトルの領域とする。

3. シャトルの追跡及び軌跡推定実験

2 台のカメラで撮影した動画像を用いて、本手法の軌跡推定を行った。本研究では以下のカメラと PC を使用した。

撮影カメラ：Sony BRC-300

解像度：640×480 pixel

フレームレート：30 fps

映像信号：NTSC

実験 PC

CPU：Intel(R) Core(TM)2 Duo E6550
@2.33GHz

Memory：2024MB

OS：Windows7 Professional

一往復分の比較的ゆるやかな軌道の映像を実験で使用した。実験で用いた映像シーンの軌道とカメラ配置を図 5 に示す。正解データは、一往復分の軌道映像の数フレームを手動で抽出したものをを用いる。

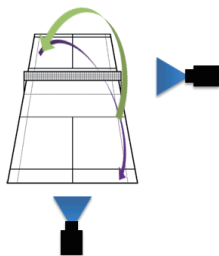


図 5： 実験で用いた映像シーンの軌道方向とカメラ配置

図 6 のように、パーティクルフィルタを用いて、シャトルの追跡を実現した。また、本手法によるシャトルの 3 次元位置推定結果を図 7 から図 10 に示す。

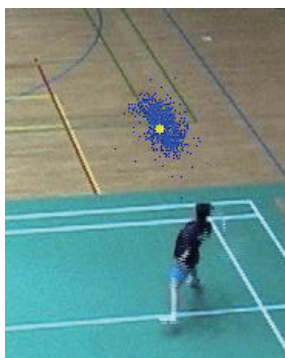


図 6： パーティクルフィルタによる追跡

このとき、シャトルの質量は $m = 5.2 \times 10^{-3} \text{kg}$ とする。3 点の観測値から、2 点間の距離と各地点での速度、加速度を求め、空気抵抗量： $k = 2.8$ を算出する。初速 22.26m/s は、最初に観測された 2 点間の距離より算出した速度である。角度 8.26° はその次の 2 点間の距離の角度である。以上のように初期状態を与え、実際の映像を用いて軌道推定を行った。一つの軌道の x, y, z 軸の値と、カルマンフィルタによって予測したシャトル位置推定結果から分かるように、欠落したシャトルの位置を、カルマンフィルタの予測値が補完し、さらに地面落下直前の予測値まで推定していることがわかる。しかし、一視点での追跡値に誤検出がある場合、それを観測値としてカルマンフィルタをかけると誤検出した値の影響を受けてしまう。この問題が発生した場合、パーティクルフィルタの追跡結果を、観測値としてカルマンフィルタに与えることにより、推定精度を向上することができる。

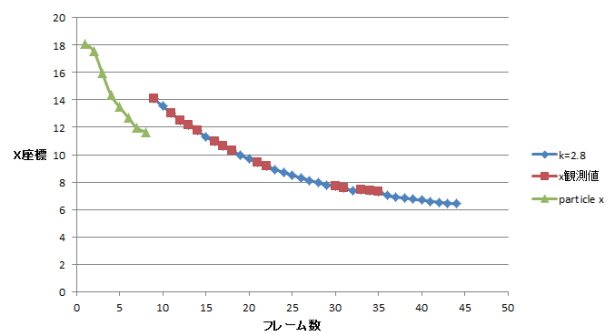


図 7： X 座標の 3 次元位置推定結果

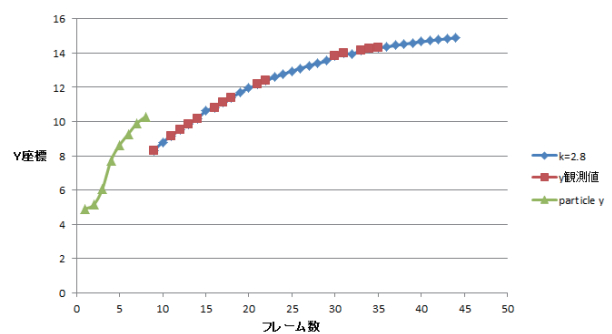


図 8： Y 座標の 3 次元位置推定結果

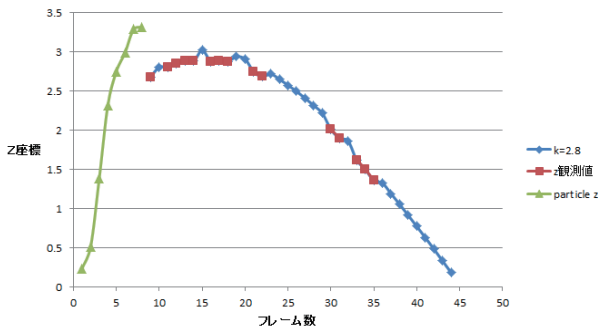


図 9： Z 座標の 3 次元位置推定結果

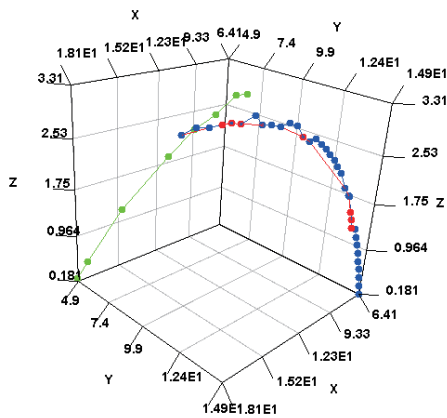


図 10： 3 次元空間における位置推定結果

4. まとめ

本研究では、バドミントン競技を 2 台のカメラで撮影した映像を用いて、シャトルの軌道推定を行う手法を提案した。観測物体の見え方の変化にロバストなパーティクルフィルタと、正確な追跡処理が可能なカルマンフィルタを補完的に利用することにより、安定したシャトルの軌跡の推定を実現した。

本研究では、パーティクルフィルタを 2 次元画像上で構築しているため、3 次元空間中の物理現象を根拠に構築されたカルマンフィルタとの整合性が低い。今後の課題として、3 次元のパーティクルフィルタを構築し、シャトルの推定精度の向上を目指す。また、本研究の最終目的であるシャトルのライン判定を行う為に、多くの軌道パターンに対応する推定手法を考案していく予定である。

参考文献

- [1] Hawk-Eye Innovations “Tennis”,
<http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/>
- [2] 西田 義人, 田中 成典, 和泉 紘介, 上野 友里

恵：“テニスのダブルスにおける戦術獲得に関する研究”，映像情報メディア学会誌, 65, 7, pp.983-993 (2011)

- [3] F.Yan , W. Christmas and J. Kittler：“Layered Data Association Using Graph-Theoretic Formulation with Application to Tennis Ball Tracking in Monocular Sequences”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.30, no.10, pp.1814-1830 (2008)
- [4] M. Isard, A. Blake：“CONDENSATION — Conditional Density Propagation for Visual Tracking”, Int.J.Computer Vision, vol.29, no.1, pp.5-28 (1998)
- [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”, 情報科学技術レターズ(FIT2006), vol.5, 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 2007 年総合大会講演論文集, D-12-41 (2007)