

## 高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定法

著者	宍戸 英彦
発行年	2016
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2015
報告番号	12102甲第7713号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00143866">http://hdl.handle.net/2241/00143866</a>

# 高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定法

2016年 3月

宍戸 英彦

高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定法

宍戸 英彦

システム情報工学研究科  
筑波大学

2016年 3月

## 概要

本研究では、大規模空間で撮影された映像から、観測サイズが小さく、低速から高速まで大きな速度変化を伴いながら変則的に移動する観測物体に注目し、そのような物体を安定して追跡する手法について論ずる。物体追跡処理は、スポーツ競技映像を対象としたコンピュータビジョンの応用事例として注目されていること、バドミントン競技で使用されるシャトルコックは、高速かつ変則的に移動する特徴を顕著に有する物体であることから、本論文では、バドミントンシャトルを対象とした追跡手法を実現することにより、研究目的達成を目指す。

観測解像度が低いことによって追跡を困難とさせている問題は、2視点で撮影した映像を使用し、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相補的に利用し、解決を図る。また、色情報を用いた単純なパーティクルフィルタでは追跡が困難である問題を、バドミンントンの競技特性を利用して解決する。

対象物体の移動速度がラリー中で低速から高速まで大きく変化することによって追跡を困難とさせている問題は、モーションブレンダーを活用した物体の移動速度の観測により対応する。また、背景色を考慮したシャトルの観測色情報の妥当性及び、モーションブレンダーから得られる移動速度の妥当性を検証し、提案手法に有効に活用することを実証する。

これらの手法では、同期撮影された映像を使用することを前提とし、3次元位置を推定しているが、非同期撮影された映像を用いる場合、撮影時刻の不一致により3次元位置を推定することが困難である。さらに、シャトルは打ち返した瞬間に、高速かつ変則的な軌道となり、観測形状が多様に変化する。従って、非同期撮影映像を用いること、観測形状が多様に変化することによって軌跡推定を困難とさせている問題に対して、露光時間の異なる複数台のカメラで撮影した映像を利用し、解決を図る。露光時間を長く設定したカメラで撮影した画像を用いてシャトルの3次元軌道を復元し、そこに短い露光時間で撮影した画像で観測されたシャトル領域を投影することにより、変則的に移動する物体の3次元位置推定を可能とする。

このように、映像情報を用いて被写体の軌跡を推定する上で問題となる、対象物体が低解像度、高速に移動、変則的な移動の問題を解決するために、実際に体育館においてバドミントン練習風景を、複数台のカメラを用いて撮影し、多様なショットを含む一連のラリー映像を用いてシャトルの3次元位置推定に関する実証実験を実施する。高速かつ変則的な移動を伴う物体の事例としてシャトルの打ち始めの数フレームを取り上げ、実写画像とCGシミュレーション画像を用いた実証実験により、提案手法の有効性を確認する。

# 目次

第1章	序論	1
第2章	映像情報を用いた移動物体の追跡及び軌跡推定法とその関連研究	4
2.1	映像情報を用いた軌跡推定法	4
2.2	様々な撮影方式による軌跡推定法の違い	5
第3章	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跡推定法	7
3.1	移動物体（シャトル）領域の検出	7
3.2	カルマンフィルタを用いた軌跡推定法	8
3.3	パーティクルフィルタを用いた軌跡推定法	8
3.4	シャトルの軌跡推定実験	11
第4章	モーションブレンダーを活用したバドミントンシャトル追跡手法	12
4.1	移動物体（シャトル）領域の検出	13
4.2	移動速度に対応するカルマンフィルタの構築	13
4.3	色情報を用いた尤度計算	15
4.4	確率的処理を用いた物体の3次元位置と速度の推定	17
4.5	時間を遡りながらの物体の3次元位置と速度の推定	18
4.6	提案手法の実証実験	19
第5章	異なるシャッタ速度で撮影した映像を用いたバドミントンシャトル軌跡推定法	31
5.1	異なるシャッタ速度で撮影した映像を用いた バドミントンシャトルの3次元位置推定法	32
5.1.1	提案手法を適用するための撮影条件	37
5.2	提案手法の実証実験	38
5.2.1	撮影実験環境	38
5.2.2	CGシミュレーションを用いた提案手法の実証実験	39
5.2.3	CGシミュレーションを用いた比較実験	41
5.2.4	実環境の実証実験及びCGシミュレーションを用いた実証実験	41
5.2.5	野球を対象とした実環境の実証実験	48
第6章	結論	51
	謝辞	53
	参考文献	54
	研究業績	58

# 目次

図 1-1	バドミントンのシャトルを打ち返した瞬間に観測される 高速かつ変則的な軌道の例 左：240fps 右：30fps（赤色線：観測されたシャトルの軌道）	3
図 1-2	カメラの撮影方向，室内環境の背景色， シャトルの速度差が及ぼすシャトルの写り方	3
図 1-3	シャトルの移動特性毎の軌跡	3
図 3-1	背景差分処理とマスク処理を用いたバドミントンシャトル検出手法	7
図 3-2	ステレオ法を用いて 3 次元位置を取得	8
図 3-3	パーティクルフィルタの流れ	8
図 3-4	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	10
図 3-5	パーティクルの初期化位置（ <b>P1~P4</b> : パーティクル追跡位置， <b>P5</b> : パーティクルがはじけたときの位置， <b>P6</b> : パーティクルの初期化位置）	10
図 3-6	左：実験で用いた映像シーンの軌道方向とカメラ配置 右：パーティクルフィルタによる追跡	10
図 3-7	3 次元空間におけるシャトルの位置推定結果 緑：パーティクルフィルタを用いた位置推定 青：背景差分処理とマスク処理を用いたシャトル検出手法による位置推定 赤：カルマンフィルタ予測値による補完	11
図 4-1	モーションブレンダーを活用した大きな速度変化を伴いながら 高速で移動する物体を安定して追跡する提案手法	12
図 4-2	世界座標系と原点の位置	13
図 4-3	外積を用いたコート内外判定	16
図 4-4	観測色の異なる領域の分割位置 (茶系色の壁床とそれ以外の灰色のコンクリートの領域)	16
図 4-5	(a)：室内環境の背景色によるシャトル領域の輝度値の分布 (b)：輝度値クラスタリング結果（上段：背景色灰色，下段：背景色茶系色）	17
図 4-6	粒子群の初期散布，尤度計算，粒子群の再配置，位置と移動速度の推定	18
図 4-7	時間 $-tk$ における推定位置	19
図 4-8	(a) 粒子の散布範囲内にシャトルが存在しない問題 (b) 粒子の探索候補領域の拡大	19
図 4-9	コートマットの色の種類 (a) グリーン (b) ブルー	20
図 4-10	様々な背景色とシャトル領域の観測色を比較した実証実験	22
図 4-11	尤度関数の閾値別によるシャトル領域内外の粒子数	23
図 4-12	粒子を用いたシャトル領域判別法から得られる速度の分布と真値との比較	24
図 4-13	粒子を用いたシャトル領域判別法の閾値別の粒子の状態と 粒子を各画像上へ投影した結果	24
図 4-14	キャリブレーションマーカスタンドの設置箇所	25
図 4-15	(a) 2 台のカメラ配置 (b) 組み立てたキャリブレーションマーカスタンド	25
図 4-16	フレーム毎の 3 次元位置推定誤差	27
図 4-17	提案手法による推定したシャトルの 3 次元位置を各画像上へ投影 (コートマットなし)	28
図 4-18	提案手法による推定したシャトルの 3 次元位置を各画像上へ投影 (コートマットグリーン)	28
図 4-19	提案手法によるシャトルの 3 次元位置推定結果	30
図 4-20	シャトルの 3 次元位置推定結果によるヒットポイントが交わらない問題	30
図 5-1	異なるシャット速度の非同期撮影画像を用いた 3 次元位置推定	31

図 5-2	カメラ配置と撮影画像のシャトルの写り方 .....	32
図 5-3	背景差分処理を用いてモーションブラー領域を推定 .....	33
図 5-4	3次元ボクセル空間を定義.....	33
図 5-5	ボクセルの要素を Camera1 に投影, 観測線が存在している要素だけを残す. ...	34
図 5-6	ボクセルの要素を Camera3 に投影, 観測線が存在している要素だけを残す. ...	34
図 5-7	ボクセルの要素を Camera1, Camera3 に投影, 観測線が両方の画像上に存在している要素だけを残す. ....	35
図 5-8	3次元ボクセル空間を定義.....	36
図 5-9	ボクセルの要素を Camera1, 3 に投影, 観測線が存在している要素だけを残す. .	36
図 5-10	Camera2 の観測位置とレンズ中心を通る直線が 3次元線と交わる点 (シャトルの 3次元位置) .....	37
図 5-11	各カメラの露光時間 ( <b>Ep1, Ep2, Ep3</b> ) とシャッタータイミング .....	38
図 5-12	各カメラのシャッター速度設定値による撮影画像例 .....	39
図 5-13	左: シャトルの剛体シミュレーション (正解値), 右上: 露光時間を長く設定した CG モデル (シャトル) シミュレーション, 右下: 露光時間を短く設定した CG モデル (シャトル) シミュレーション.....	39
図 5-14	CG モデルシミュレーション画像を用いた提案手法の実証実験結果.....	40
図 5-15	提案手法と従来手法の推定誤差の比較実験結果 .....	41
図 5-16	【Camera1】 上: 実環境におけるシーケンスデータ, 下: 実環境のシーケンスと同様の軌道の CG シミュレーション .....	43
図 5-17	【Camera2】 上: 実環境におけるシーケンスデータ, 下: 実環境のシーケンスと同様の軌道の CG シミュレーション .....	43
図 5-18	【Camera3】 上: 実環境におけるシーケンスデータ, 下: 実環境のシーケンスと同様の軌道の CG シミュレーション .....	44
図 5-19	CG シミュレーションの真値の軌道.....	44
図 5-20	実環境のシーケンスデータに対して提案手法を適用した結果 .....	45
図 5-21	実環境のシーケンスと同様の軌道の CG シミュレーション画像に 提案手法を適用した結果 .....	45
図 5-22	図 5-21 の実験結果より従来手法との比較 .....	46
図 5-23	変則的なシャトルの CG シミュレーション, 上段: 真値, 中段: 短露光時間シミュレーション, 下段: 長露光時間シミュレーション ....	46
図 5-24	図 5-23 のシミュレーション画像に提案手法を適用した結果の位置推定誤差 ...	47
図 5-25	図 5-23 のシミュレーション画像に提案手法を適用した結果の例.....	47
図 5-26	カメラ配置及び撮影風景 (東京大学本郷キャンパス) .....	48
図 5-27	各カメラのボールの写り方 (Scene1: 5 フレーム) .....	49
図 5-28	Scene 1 を提案手法に適用した推定結果 .....	49
図 5-29	各カメラのボールの写り方 (Scene2: 5 フレーム) .....	50
図 5-30	Scene 2 を提案手法に適用した推定結果 .....	50

# 第1章 序論

映像情報を用いた移動物体の軌跡推定は、コンピュータビジョンの研究における重要な研究テーマの一つである。近年は、戦術の理解や構築レベルの向上を目的としたスポーツ競技への応用が進みつつある[1]-[9]。スポーツシーンにおける物体追跡処理では、体育館やサッカー場のような大規模空間において撮影した映像から、選手やボールなど高速で複雑な動きを伴う複数の物体を同時に検出・追跡することが求められ、多くの課題を含有している。我々は、それらの課題のうち、大規模空間で撮影された比較的解像度の低い映像から、低速から高速まで大きな速度変化を伴いながら移動する観測物体を検出し、安定して追跡することを目的とした研究に取り組んでいる。

上述した状況が頻繁に発生する観察対象としてバドミントン競技におけるシャトルコック（以下、シャトル）を取り上げる。シャトルは、半球状のコルクに水鳥等の羽を接着剤で固定することで形成され、他の競技用ボールに比べて極めて軽量である。機器を観測対象に取り付けて位置を計測する接触型の方法の場合、装着機材がシャトルの移動軌道に影響を及ぼす問題が存在するため、非接触観測が可能な映像センサの導入が期待されている。しかし、一般的なビデオカメラを用いてバドミントンコート全体を撮影する場合、映像中で観測されるシャトルの解像度が著しく低下するため、画像特徴のような詳細な見え方を用いた追跡処理が困難である。一方で、他のスポーツ競技で使用されるボールの形状は円形が多く、位置姿勢の変動による見かけの形状変化が少ないが、シャトルは上述したように複雑な形状を有するため、その位置姿勢の変動によって見かけの形状が大きく変化する。また、シャトルは、その初速が毎時 400km 以上にもなるスポーツ競技の中で最も高速な移動物体であるが、一方で軌道の頂点付近ではほぼ静止状態となり、移動速度の変化が極めて大きいという特徴を有する。さらに、シャトルはその偏心性により、回転を伴う移動中は位置姿勢が変則的に変化するといった問題が存在する。本論文では、上述した三つの困難な課題を含有するシャトルの移動軌跡推定の実現を通じて、高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定法を確立する。

移動物体を撮影した映像では、観測像はモーションブラー（動きによるブレ）を伴って観測される。追跡対象物体が、ビデオカメラのシャッタ速度に対して低速で移動している場合、モーションブラーは比較的発生しないため、観測像からその位置を精度良く推定することが可能である。カメラのシャッタ速度に比べ高速に移動する場合、その観測像は、移動方向にぼけた状態で観測されるため、推定された位置には、その方向の不確実性が含まれてしまう。この問題を解決するために、モーションブラーの領域形状を解析し、移動速度や方向を推定する手法が提案されている[10]。映像情報を用いた移動物体の軌跡を推定する上では、移動する物体の速度とカメラのシャッタ速度に相関関係がある。高速に移動する物体は、上述したようにモーションブラーが発生するが、移動速度が遅い物体に対して、比較的遅いシャッタ速度で撮影するとモーションブラーが発生する。逆に、移動速度が速い物体に対して、比較的速いシャッタ速度で撮影するとモーションブラーは発生しない。このように、撮影方式によって高速に移動する物体の条件が変化することより、本研究で対象としている高速に移動する物体を定義する。

本研究において高速に移動する物体とは、撮影した画像にモーションブラーが観測される物体を高速に移動する物体とする。

このように、高速に移動するシャトルを大規模空間にて撮影した場合、図 1-2 に示すように、シャトルの羽の正確な形状は観測されないといった物体の観測解像度が低い問題が存在する。本研究では、観測解像度が低い問題を、2 視点で撮影した画像に対して、シャトル以外の移動物体と輝度振幅が激しい領域をマスク処理する手法、運動モデルに基づくカルマンフィルタ及び、確率モデルに基づくパーティクルフィルタを適宜併用する手法を組み合わせることで解決を図る。



さらに、高速に移動するシャトルを大規模空間にて撮影した場合、移動速度が低速から高速まで大きく変化する問題が存在する。これまでに、速度が一定であることを条件とした追跡手法が提案されているが、シャトルは図 1-2 に示すように、低速から高速まで一連の速度が含まれ、シャトルの形状は、移動速度によって見かけの形状が大きく変化している。従って、本研究では、空気抵抗を多く受けるシャトルの構造[11]により、移動速度がラリー中で低速から高速まで大きく変化する問題を、モーショントラッキング領域の形状から推定される物体の“移動情報（速度と方向）”を活用することによって解決を図る。

また、シャトルは、球技の中では珍しく非球状の被写体であるため、図 1-1 に示すように、打ち返した瞬間に高速かつ変則的な軌道となり、その観測形状が多様に変化する。シャトルの変則的な軌道は、空気抵抗を多く受けるシャトルの構造とラケットの構造、室内環境に起因する。通常、シャトルに加えるラケットの力と、シャトルの回転数から求められる空気抵抗量を得ることでシャトルの軌道を表現するが、図 1-1 右に示すように、一般的なバドミントン競技映像からラケットの形状は観測できない。また、シャトルの構造に対称性があることから、回転する角度によって同じ見え方となり、映像情報からシャトルの回転数を取得することが困難である。このように、様々な画像特性の中で、本研究で対象としている変則的に移動する物体を定義する。

本研究において変則的な移動とは、対象物体の外部から働く力によって急激な移動を伴う状態とする。

従って、本論文では、高速かつ変則的に移動する物体をバドミントンシャトルとする。

このように、高速かつ変則的に移動するシャトルを大規模空間にて撮影した場合、回転を伴う移動中は位置姿勢が変則的に変化する問題が存在する。さらに、観測解像度が低い問題や移動速度が低速から高速まで大きく変化する問題の解決方法では、同期された撮影映像を使用することを前提とし、3次元位置を推定しているが、非同期撮影した映像を用いた場合、撮影時刻の不一致により3次元位置を推定することが困難である。本研究では、非同期撮影映像を用いて観測形状が多様に変化する物体の3次元位置を推定する問題を、露光時間の異なる複数台のカメラで撮影し、撮影画像の対象物体領域に存在する範囲（視体積）の積を求めて被写体の3次元形状を復元する手法を用いることにより解決を図る。

本研究では、図 1-3 (a) (b) (c) に示す撮影方式及びシャトルの移動特性が異なる状況において、シャトル移動軌跡を連続情報として推定することを目的とする。

図 1-3 (c) に示すようにシャトルが比較的低速に移動する場合、モーショントラッキングが少ない状態でシャトルが観測されるため、シャトルの見え方を利用したプレートマッチング処理によってシャトルの重心位置を推定する。シャトルの位置変化に比べて十分に細かい間隔で位置推定（標本化）が可能であるため、連続情報として移動軌跡（原信号）を復元することができる。図 1-3 (b) に示すように、シャトルが比較的高速に移動すると原信号の復元に十分な標本間隔の維持が困難となるため、運動モデルを用いてシャトルの移動軌跡の連続情報を推定する。具体的には、状態遷移モデルにシャトルの運動モデルを当てはめたカルマンフィルタを用いて追跡処理を行う。モーショントラッキングによりシャトル位置の観測精度が低下するが、ブラー形状を用いて速度を観測することにより、高い追跡精度を実現する。図 1-3 (a) に示すように、シャトルが高速かつ変則的に移動する場合、変則的な移動変化を伴うモーショントラッキングが観測されるため、上述した運動モデルの当てはめが困難となる。そこで、Shape from Silhouette法を用いてシャトルの移動軌跡そのものを3次元的に復元することにより、連続情報として推定する。

以下、本論文では、第 2 章で映像情報を用いた物体追跡及び軌跡推定法の従来手法と、本研究のアプローチについて述べる。第 3 章では、高速に移動する物体に対して、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跡推定法について述べる。多くの追跡処理に利用される代表的なパーティクルフィルタとカルマンフィルタを適用するだけでは、シャトルの軌跡推定は困難である。従って、移動速度が低速から高速まで大きく変化する問題に対応するために、モーショントラッキングを活用した軌跡推

定手法を第 4 章で述べる。また，実証実験により背景色を考慮したシャトルの観測色情報の妥当性及び，モーショントラッカーから得られる移動速度の妥当性を検証し，提案手法に有効に活用することを実証する。第 5 章では，露光時間の異なる複数台のカメラで撮影した映像を用いることにより，バドミントンシャトル特有の動きである高速かつ変則的に移動する領域に焦点を当てた軌跡推定手法を述べる。そして最後に第 6 章において本論文の結論を述べる。



図 1-1 バドミントンのシャトルを打ち返した瞬間に観測される高速かつ変則的な軌道の例  
左：240fps 右：30fps （赤色線：観測されたシャトルの軌道）

Background color	brown		gray	
shuttle speed	high	low	high	low
image (front camera)				
image (side camera)				

図 1-2 カメラの撮影方向，室内環境の背景色，シャトルの速度差が及ぼすシャトルの写り方

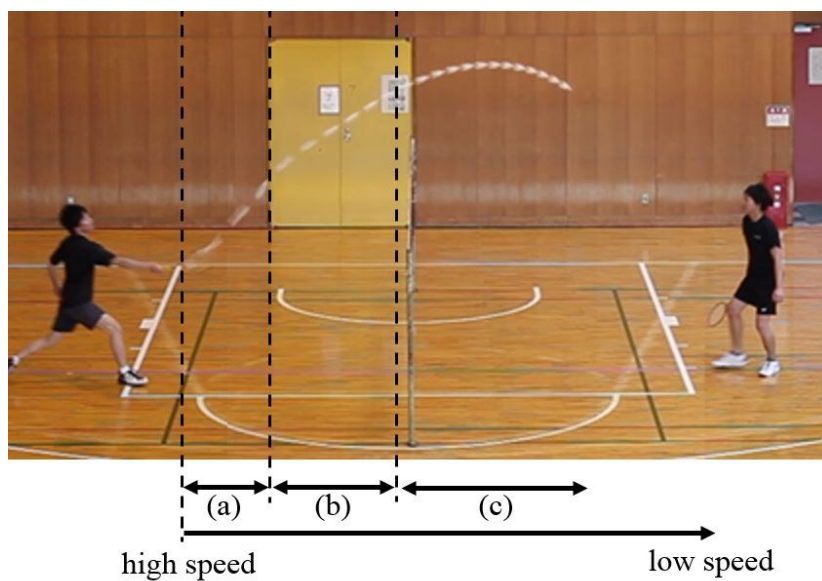


図 1-3 シャトルの移動特性毎の軌跡

## 第2章 映像情報を用いた移動物体の追跡及び軌跡推定法とその関連研究

### 2.1 映像情報を用いた軌跡推定法

本節では、これまでに提案された物体追跡手法を紹介し、本研究で対象としている高速かつ変則的に移動する物体を追跡するために従来手法では解けない問題を指摘し、提案手法の新規性を述べる。

微生物やボールのような小さな被写体の高速な移動を対象とした物体追跡処理実現のアプローチとして、超高速カメラの利用が考えられる[12][13]。しかし、安定した追跡処理のためには、近距離で撮影した比較的高解像度の映像が必要であること、背景領域のテクスチャは均一とするなど追跡を困難とする要因が少ない撮影条件を設定する必要があること、さらに、一般的には入手困難な機材での撮影の必要があることなど、我々が撮影対象としている、汎用ビデオカメラを用いてバドミントン競技の様子を記録した映像への適用は困難である。

被写体の観測解像度が低い映像を用いた物体追跡処理は、人物や車を対象に活発な研究が行われている[14]-[23]。これらの研究では、対象とする映像は低解像度でありながら、観測対象を特定し、それらに特徴的な（例えば、人物であれば顔や腕、自動車であればミラーやタイヤの）見え方特徴を確率的に表現することにより追跡処理を実現している。観測可能な情報量がより少ない物体の追跡処理としては、スポーツ競技、特に球技を対象とした研究事例がある[3]-[9]。映像中のボールは、観測サイズが小さく高速に移動する上に、色や形状の特徴も少ないが、運動が力学モデルにおおよそ従っていること、撮影方向に依存せず常に円形に観測されるといった物理モデル的な特性を利用することにより、追跡処理を実現している。バドミントンのシャトルを対象とした追跡処理では、上述した問題に加え、物体の運動中の速度差が大きく、また、図 1-2 に示すように、映像中での観測形状が多様に変化するといった問題が存在する。

画像処理における追跡手法の研究では、パーティクルフィルタやカルマンフィルタをベースに複数の特徴量を統合した手法 [24]-[30] や、運動モデルに基づくカルマンフィルタと確率モデルに基づくパーティクルフィルタを適宜併用する手法[31, 32] など、複数の運動モデルや確率モデルを併用することにより、物体追跡の精度の向上に成功した例が報告されている。一旦上空に舞い上がった後のシャトルの運動は、単純な物理モデルで表現可能である[33]が、打ち返された直後は、回転や空気抵抗などの影響を受け不規則な運動となる。本稿では、カルマンフィルタを用いた運動モデルベースの追跡処理と、パーティクルフィルタで実現される確率的な追跡処理を、シャトルの状態変化に応じて使い分けることにより、観測状態の変化に対応可能な追跡処理を実現する。

単一視点から撮影した映像のみを用いて 2 次元空間内での追跡処理を行う場合、物体間の隠れや、低解像度化など観測条件の悪化などによって物体が観測されない状況が発生した場合、追跡処理が困難となる。複数視点から撮影した画像を利用することにより、そのような問題を解決することが可能である[34, 35]。本研究においても、2 視点から撮影した映像を用いることにより、観測解像度が極端に低く、観測形状が変化するシャトルを安定して追跡する手法を実現する。

## 2.2 様々な撮影方式による軌跡推定法の違い

本節では、様々な撮影方式によって得られる画像特性を利用した物体追跡手法を紹介し、本研究で対象としている高速かつ変則的に移動する物体を追跡するために従来手法では解けない問題を指摘し、提案手法の新規性を述べる。

高速移動物体を撮影した映像において、しばしば発生するモーションブラーへの対策として、観測画像からモーションブラーを推定し、それを除去した画像に対して位置推定を行う手法が提案されているが[36]-[39]、モーションブラーを物体追跡処理の情報源として直接観測・利用する例は提案されていない。本研究では、高速に移動する物体の位置推定処理は、モーションブラーによって物体の“位置”の推定精度が低下する反面、ブラー領域の形状から物体の“移動情報（速度と方向）”を推定できる点に注目する。

物体を3次元的に追跡するためには、多視点映像を同期させて撮影するのが一般的である。近年、高解像度化や高速撮影などカメラ性能は急速に向上しているが、汎用的なビデオカメラで、同期撮影が可能な機種はほとんど存在しない。また、たとえ外部同期信号による同期撮影が可能な機材が利用可能であったとしても、体育館のような大規模空間において多数台のビデオカメラを用いて同期撮影を行うのは、同期信号の分配など依然課題が多い。複数の非同期カメラを用いて、撮影時刻のずれを推定し、3次元物体位置を推定する研究が行われているが[40]、利用するビデオカメラは、すべて同じフレームレート、同じシャッタ速度、そして各カメラの撮影時刻を一致させる前提条件（フレーム番号のずれのみ）を必要としている。それに対し、撮影時刻を一致させることなく、複数の非同期撮影画像から3次元位置を推定する手法が提案されている[41]。被写体にマーカを付与することでカメラ間の位置関係を推定し、マーカの軌跡のずれから撮影時刻のずれを推定し、3次元位置を推定する。また、音声情報と画像情報を同期させ、音声情報の波形を解析することで、撮影時刻の一致を必要とすることなく、3次元復元する研究例や[42]、2台のRGBカメラを用いてRGB画像上の軌跡を検出し、1台のRGB-Dカメラを用いてDepth画像内のボールを検出することでボールの3次元位置を取得する研究[43]が存在する。しかし、いずれも、シャトルのような回転を含む高速移動物体は対象としていない。このように、物体の見かけの形状や運動モデルを仮定し、物理モデルをあてはめることができれば、非同期撮影映像からでも3次元物体追跡が可能であるが、シャトルのような変則的な動きに対応した追跡処理は多くの例を見ない。

高速撮影カメラを用いれば、図1-1左に示すように、モーションブラーを伴わないシャトルの観測像が利用可能となるため、その2次元位置を正確に推定することは可能である。しかし、複数台の映像を統合して3次元復元を行う場合、撮影速度の高速化に伴い、同期ずれの影響が大きくなる。その結果、各カメラにおける2次元的な追跡処理の結果は正確であるが、それらを3次元的に統合した3次元追跡処理の結果は、精度が大きく低下してしまう。

高速に移動する追跡対象物体が、ビデオカメラのシャッタ速度に比べ高速に移動する場合、その観測像は、移動方向にぼけた状態で観測されるため、推定された位置には、その方向の不確実性が含まれてしまうが、逆にそのブラー領域の形状を解析することで球状物体の位置、速度、回転ベクトルを取得する研究が行われている[44, 45]。我々も、モーションブラーの領域形状を解析し、位置と移動速度情報を活用した追跡手法を提案している[46, 47]。しかし、いずれも同期撮影を前提とした手法であり、非同期撮影映像の問題は解決していない。本稿では、打ち返し時の非常に高速かつ変則的に移動するシャトルを非同期撮影した映像から、その3次元位置を推定する手法を提案する。

高速に移動する物体に対して、非同期撮影映像を用いた3次元位置推定法の研究は、複数のカメラから撮影された画像から被写体（ボール）のモーションブラー領域を各画像から検出し、モーションブラー画像を重ね合わせ、被写体の観測像の共通部分の中心を推定位置とした研究が行われている[48, 49]。しかし、提案されている手法では、重ね合わせたモーションブラー画像の共通部分の中心を推定位置と定義していることから、撮影した瞬間に、その3次元位置に物体が存在していることを実証するのは困難である。清水らは、同じシャッタ

速度で撮影する3台の非同期カメラのシャッタタイミングを1/90秒ずつずらして物体の3次元位置を推定する手法を提案している[50]. 具体的には, 画像平面上で検出された物体の位置からなる光線群を生成し, それらをスプライン補間することにより3次元曲面を求める. その曲面と位置推定用カメラ画像で観測された対象物体の光線の交点を物体の3次元位置として推定している.

一方, 本手法では, 露光時間を長くすることで, その間の移動情報を(スプライン補間を用いることなく)画像化し, それを活用して3次元軌道を推定するため, 補間が困難な変則的な軌道でも対応可能となる. また, 短露光時間撮影ではブレのない鮮明な像が観測されるため, 高い位置推定精度の実現が期待できるが, 撮影同期ずれの影響を受けやすい. 長露光時間撮影では, 多少撮影同期がずれている場合でも3次元位置推定が可能であるが, 動きブレによって観測像が不鮮明になるため, 位置精度が低下する, という問題を補うことができる.

# 第3章 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跡推定法

本稿では、観測解像度が低い問題を、2 視点で撮影した画像に対して、シャトル以外の移動物体と輝度振幅が激しい領域をマスク処理する手法、運動モデルに基づくカルマンフィルタ及び、確率モデルに基づくパーティクルフィルタを適宜併用する手法を組み合わせることで解決を図る。

2 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、バドミントン競技では、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。

## 3.1 移動物体（シャトル）領域の検出

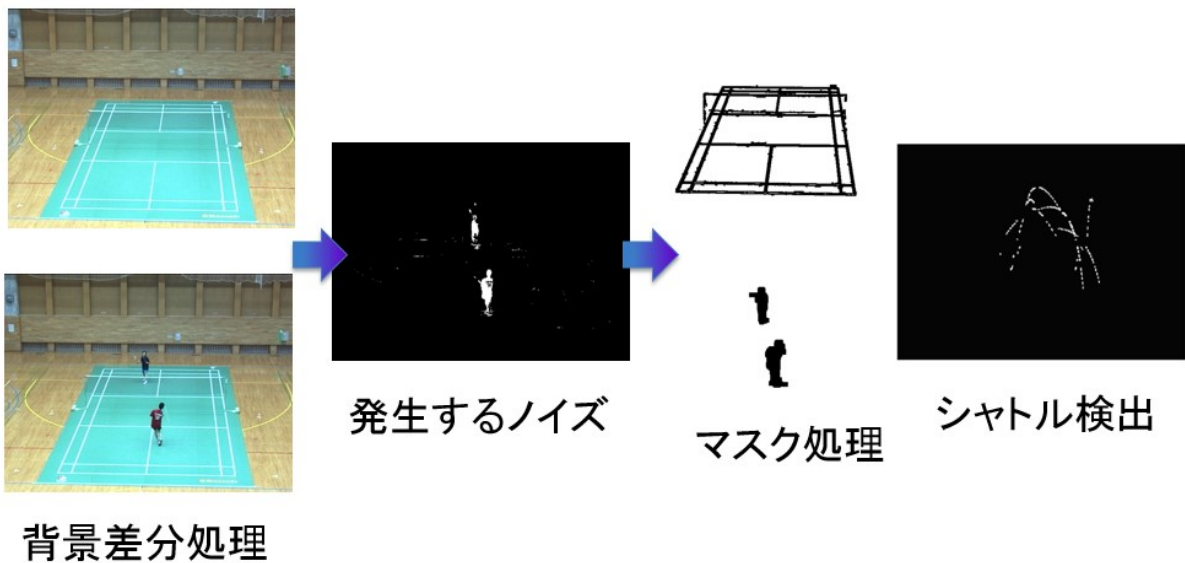


図 3-1 背景差分処理とマスク処理を用いたバドミントンシャトル検出手法

図 3-1 に示すように、始めに背景差分処理により移動物体候補領域を切り出す。その内、プレイヤー領域は、面積情報を用いて除外する。白色のように輝度値が大きい領域は、カメラノイズにより輝度値が大きく振幅する。その影響を軽減するために、輝度値の大きいコートラインとネットラインを手動で切り出し、ビデオシーケンス中では、マスク処理を施し処理対象外領域とする。この処理を2 視点から撮影した画像に対して行い、図 3-2 に示すように、シャトルの3次元位置座標をステレオ法によって算出する。背景差分処理によるマスク処理を施した領域は、シャトルの検出は行わず、カルマンフィルタの予測点のみを用いてシャトル位置を推定する。マスク領域以外でも、背景色とシャトルの輝度値が同等となる場合は、処理対象領域から除外し、同様の処理を施す。



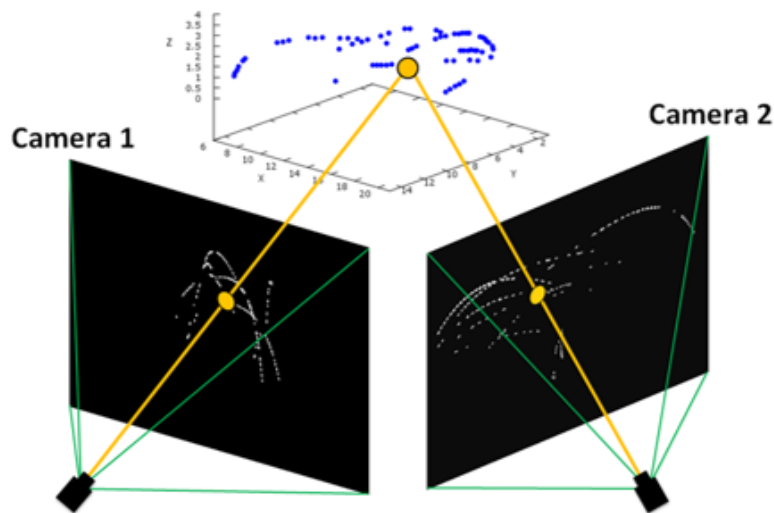


図 3-2 ステレオ法を用いて 3 次元位置を取得

### 3.2 カルマンフィルタを用いた軌跡推定法

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。

### 3.3 パーティクルフィルタを用いた軌跡推定法

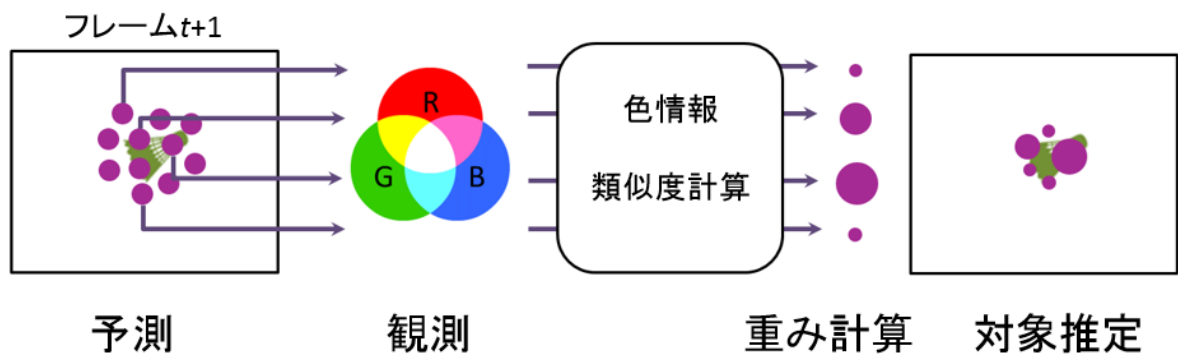


図 3-3 パーティクルフィルタの流れ

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。パーティクルフィルタとは、確率分布による時系列データの予測手法である。図 3-3 に示すように、始めに、前の状態の重み付きパーティクルを元に散布する。次に、各パーティクルを状態方程式に基づいて移動させる。現在の観測とパーティクルの状態を元に尤度を計算し、状態の重み付きパーティクルを元に再び散布する。この処理を繰り返すことによって対象物体の位置を推定する。

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。本研究では、パーティクルフィルタの尤度に、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た色情報を用いる。

単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(3.1)のように速度ベクトルを与えないことで、パーティクルをシャトルが付近を通過するまで待機させる。

$$\begin{pmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ u_{t+1} \\ v_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ u_t \\ v_t \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

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3-4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(3.2)のように速度ベクトルを加えた状態モデルに変更する。

$$\begin{pmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ u_{t+1} \\ v_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ u_t \\ v_t \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

シャトルが打ち返された場合、図3-5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。

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。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。



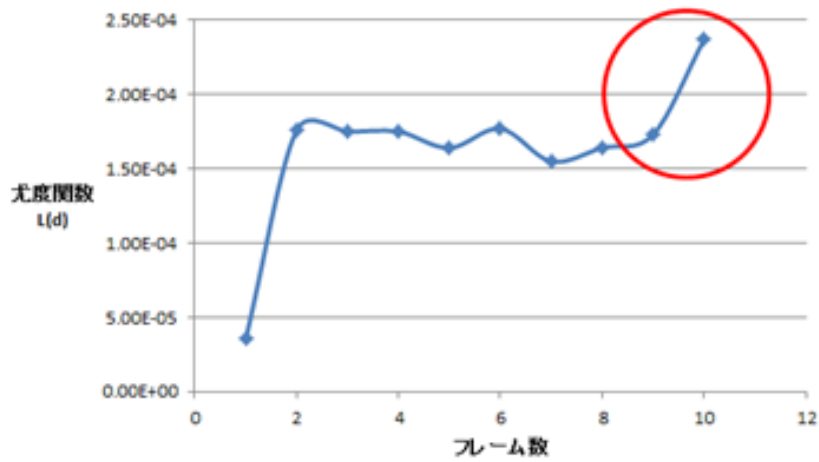


図 3-4 初期状態からシャトルの捉え始めまでのパーティクルの分布

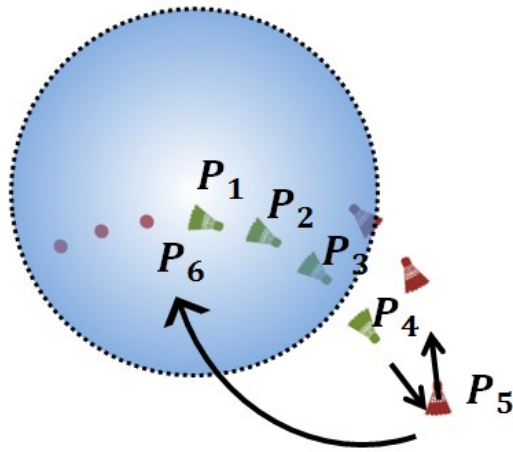


図 3-5 パーティクルの初期化位置 ( $P_1 \sim P_4$ : パーティクル追跡位置,  $P_5$ : パーティクルがはじけたときの位置,  $P_6$ : パーティクルの初期化位置)

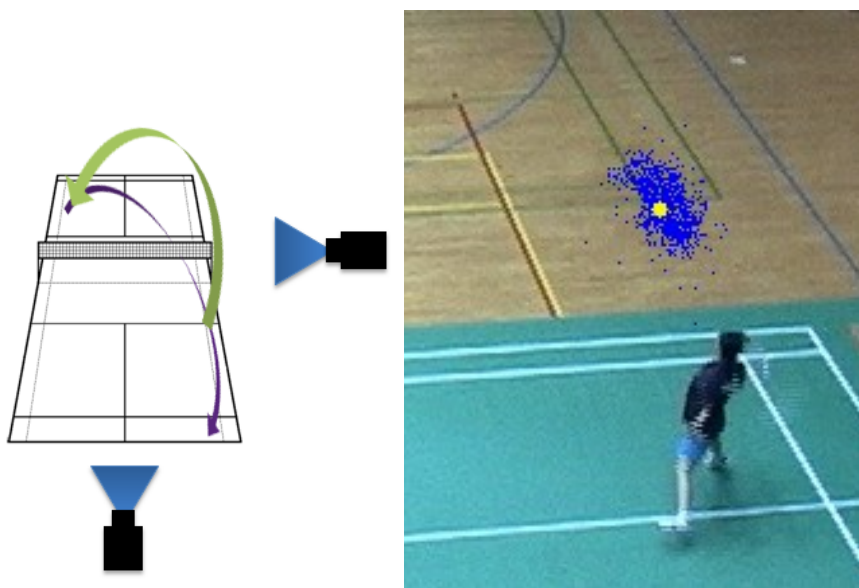


図 3-6 左: 実験で用いた映像シーンの軌道方向とカメラ配置  
右: パーティクルフィルタによる追跡

### 3.4 シャトルの軌跡推定実験

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。

撮影に用いたカメラは、Sony BRC-300で、解像度は640画素×480画素、フレームレートは、30 fpsである。実験に使用したPCは、CPU Intel(R) Core(TM)2 Duo E6550 @2.33GHz, Memory: 2024MB, OS: Windows7 Professionalである。

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。カメラ配置を図3-6左に示す。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。

本手法によるシャトルの3次元位置推定結果を図3-7に示す。図3-6右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。

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 $22.26 \text{m/s}$ 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 $8.26^\circ$ 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わかるように、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まで位置推定していることが確認できる。しかし、単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。

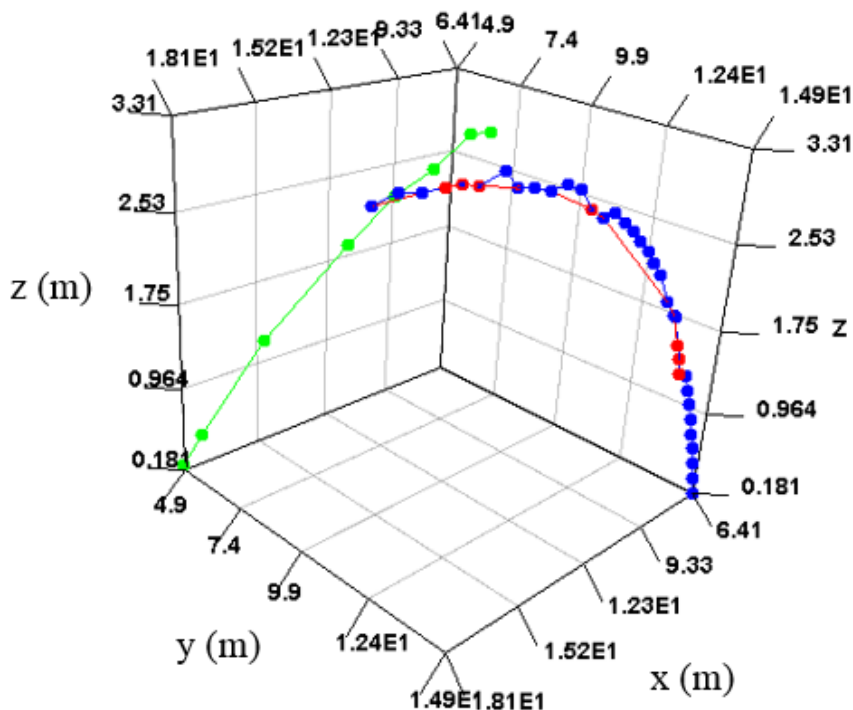


図 3-7 3次元空間におけるシャトルの位置推定結果

- 緑：パーティクルフィルタを用いた位置推定
- 青：背景差分処理とマスク処理を用いたシャトル検出手法による位置推定
- 赤：カルマンフィルタ予測値による補完

## 第4章 モーションブラーを活用した バドミントンシャトル追跡手法

本稿では、空気抵抗を多く受けるシャトルの構造により、移動速度がラリー中で低速から高速まで大きく変化する問題を、モーションブラー領域の形状から推定される物体の“移動情報（速度と方向）”を活用することによって解決を図る。

シャトルの移動速度が遅い場合、観測像にはブラーがほとんど発生しないため、位置を精度良く観測できることから、図 4-1 に示すように、“観測位置”と“前フレームと現在フレームでの観測位置の差分によって算出した速度”をカルマンフィルタに与える。移動速度が速い場合は、モーションブラーによって観測位置の推定精度が低下することが予想される反面、4.4 節で述べる手法により、モーションブラーから移動速度の観測が可能であるため、“観測速度”と“観測位置”を同時に観測し、カルマンフィルタに与える。シャトルの観測形状の大きな変化に対しては、カルマンフィルタに加えパーティクルフィルタの考え方に基づく確率的な追跡処理を併用することにより対応する。

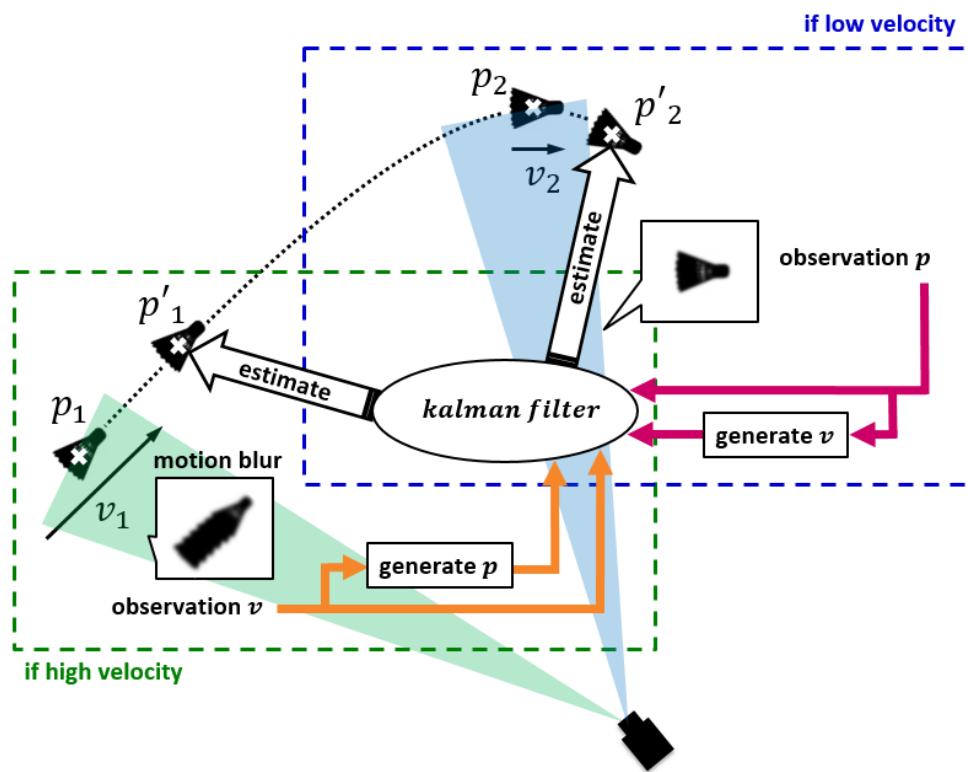


図 4-1 モーションブラーを活用した大きな速度変化を伴いながら高速で移動する物体を安定して追跡する提案手法

## 4.1 移動物体（シャトル）領域の検出

追跡開始フレームやシャトルを見失った直後のフレームでは，3.1 節で述べた手法を用いてシャトルを検出する．本研究では，この算出したシャトルの3次元位置を，後述するカルマンフィルタの観測位置情報とする．

## 4.2 移動速度に対応するカルマンフィルタの構築

本研究では，図4-2のように世界座標系を定め，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，

$$X_k = \{x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k, z_k, \dot{z}_k, \ddot{z}_k\} \quad (4.1)$$

と表す．このとき，カルマンフィルタの状態モデルは式(4.2)で表される．

$$X_k = AX_{k-1} + Bu_k + \omega_k \quad (4.2)$$



図 4-2 世界座標系と原点の位置

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、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c}{m}\delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c}{m}\delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{c}{m}\delta_t & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -g \end{bmatrix}$$

と表す。ここで、 $\delta_t$  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、式 (4.3) として  $B$  を定義する。 $\omega_k$  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  $k$  において、獲得したシャトルの観測値を  $p_k$  とすると、観測モデルは式 (4.4) によって表される。

$$p_k = \hat{H}_k X_k + \varepsilon_k \quad (4.4)$$

ただし、

$$\hat{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$p_k = \begin{cases} x_k, y_k, z_k(BD), \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k(IV) & \text{if Low Speed} \\ x_k, y_k, z_k(PCG), \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k(BV) & \text{if High Speed} \end{cases}$$

*BD: background difference*  
*IV: interframe velocity*  
*PCG: particle center of gravity*  
*BV: blur velocity*

とし、 $\varepsilon_k$  は観測時に発生するランダムノイズとする。この観測ノイズは、手動で獲得した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として求める。後述

する処理で獲得される速度に応じて、カルマンフィルタに与える観測情報を選択することにより、移動速度に応じた観測モデル  $p_k$  を得る。式 (4.4), (4.5) で示すように、獲得した速度が遅い場合、観測位置と、前フレームと現在フレームで観測された位置の差分（観測速度）を観測モデル  $p_k$  の要素に与える。獲得した速度が速い場合は、モーションブラーを活用して得られる観測位置と観測速度を観測モデル  $p_k$  の要素に与える。

### 4.3 色情報を用いた尤度計算

本研究で扱う映像では、被写体の観測解像度が低いため、画像特徴やテクスチャのような輝度値のパターンを用いて注目領域のシャトルらしさを評価することが困難である。そこで我々は、低解像度でも獲得可能な色情報を用いてシャトルらしさ（尤度）を算出する。手動で切り出した 30 枚のシャトル領域の輝度値（学習用データ）の分布を図 4-5(a)に示す。シャトルの観測輝度値は、モーションブラーの影響を受けて背景の色と混合して観測されていることがわかる。一般的な体育館における背景領域は、床や壁（茶系色）とそれ以外の領域（灰色）で構成されるため、それらの領域の代表色の RGB 値との比較により、学習用データを床や壁の領域とそれ以外の領域に分割する。また、モーションブラーが観測色に与える影響は速度に依存しているため、k-means 法を用いて、学習データを三つのクラスに分割し、各々をシャトルの速度が“速い”、“遅い”、“中間の速さ”の速度域に対応するものとして、各速度域の尤度モデルを設定する。学習データに対して、上述した分割処理を適用した結果を図 4-5(b)に示す。図 4-5 (b)に示すように、シャトルの速度が速い場合は、背景色の色合いが強いクラス（ピンク色）に属する。遅い場合は、背景色の色合いが弱い（オレンジ色）のクラスに属する。中間の速度の場合は、中間クラス（シアン色）に属する。

以上の対応関係より、シャトルの観測色を床や壁（茶系色）で観測される場合の 3 クラスと、それ以外の領域（灰色）で観測される場合の 3 クラス、合計 6 クラス分の RGB 値との差分値を尤度とする。このとき、シャトルの予測位置と速度を用いて、比較を行う重心を選択する。そのため、シャトルが撮影画像中で、壁や床といった茶系色の背景領域で観測されるか、それ以外の灰色の背景領域で観測されるかを判定する。

本方式では、環境に固定したカメラで撮影を行い、背景色（茶系色）領域の四隅の位置（2次元座標） $P_1, P_2, P_3, P_4$ をあらかじめ求めておく。図 4-4 の四角形  $P_1, P_3, P_4, P_2$  の内部において、カルマンフィルタから得られるシャトルの 3 次元予測点の各画像への射影点  ${}^vA(x_a, y_a)$  の存在有無の判別は、各辺のベクトルと各頂点から  ${}^vA(x_a, y_a)$  に向かうベクトルの外積を計算することで判定する。

このとき図 4-3 のように、

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1A} &< 0, \\ \overrightarrow{P_1P_3} \times \overrightarrow{P_1A} &> 0, \\ \overrightarrow{P_3P_4} \times \overrightarrow{P_3A} &> 0, \\ \overrightarrow{P_2P_4} \times \overrightarrow{P_2A} &< 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

を満たす場合、射影点  ${}^vA(x_a, y_a)$  は背景色（茶系色）領域内に、満たさない場合は背景色（茶系色）領域外に存在すると判定する。

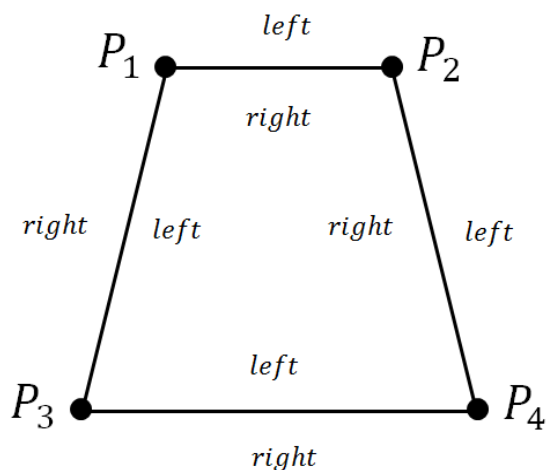


図 4-3 外積を用いたコート内外判定

式 (4.7) , (4.8) に尤度関数  $L(d)$  の出力式を示す.

$$L(d_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(d_a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.7)$$

$$L(d_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(d_b)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.8)$$

尤度関数  $L(d)$  は, 上述した各クラスの重心からのユークリッド距離  $d$  の関数であり, 分散  $\sigma^2$  となる正規分布関数とする. 分散  $\sigma^2$  は, サンプル画像群を参考に設定する. シャトルの予測位置が床や壁 (茶系色) の場合の尤度関数を  $L(d_a)$  , それ以外の領域 (灰色) における尤度関数を  $L(d_b)$  とする.

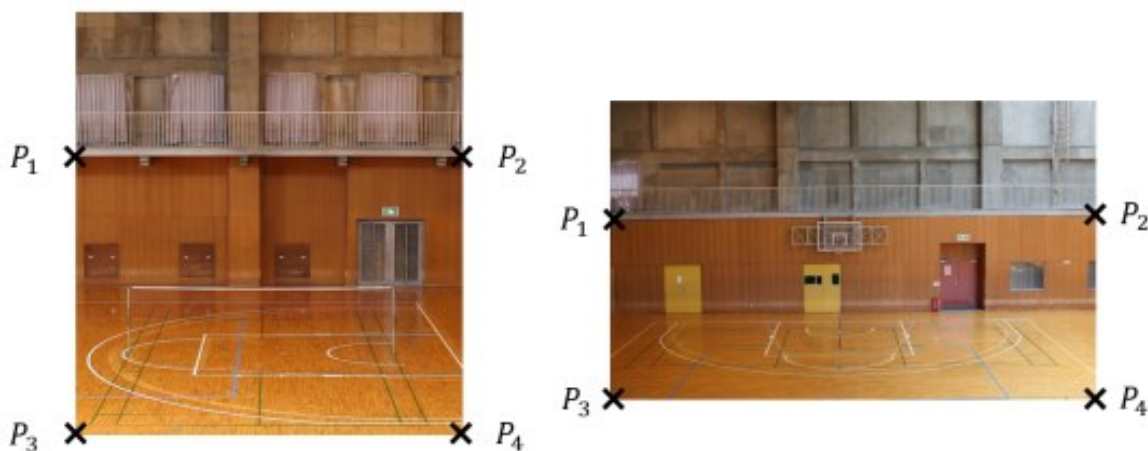


図 4-4 観測色の異なる領域の分割位置  
(茶系色の壁床とそれ以外の灰色のコンクリートの領域)



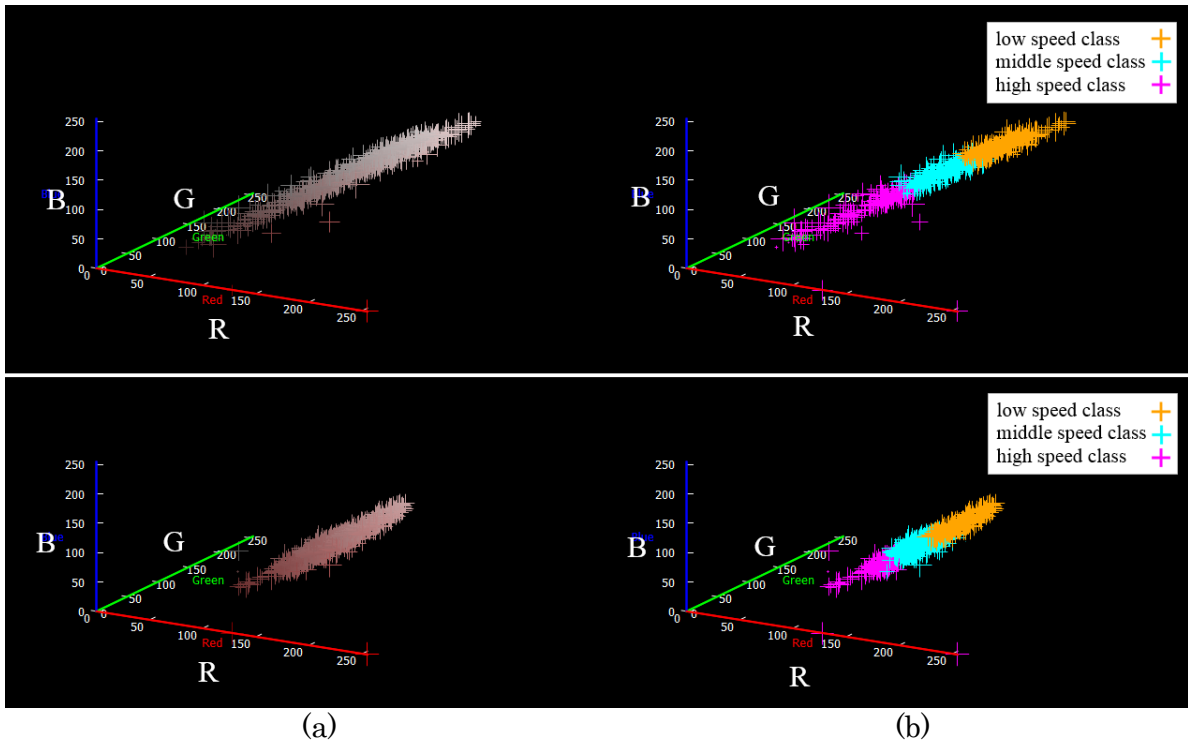


図 4-5 (a) : 室内環境の背景色によるシャトル領域の輝度値の分布  
 (b) : 輝度値クラスタリング結果 (上段 : 背景色灰色, 下段 : 背景色茶色系)

#### 4.4 確率的処理を用いた物体の 3 次元位置と速度の推定

図 4-6 に、確率的処理を用いた物体の 3 次元位置と速度の推定処理の流れを示す．本手法では、粒子を用いて観測対象の物体の 3 次元位置と速度情報を確率的に表現する．まず、図 4-6 (a) に示すように、カルマンフィルタで予測された 3 次元位置周辺に粒子を散布する．初期の散布は、プロセスノイズ  $\omega_k$  の範囲（球状）とする．次にカルマンフィルタで予測された速度ベクトルの範囲（楕円体）内の粒子を残す．この範囲は、予測速度ベクトルを  $v'$  と式 (4.9) より長軸の長さ  $l$  を算出し、長軸に直交する二つの短軸の長さは、前フレームにおける楕円体を当てはめ時の値を用いることで求める．この処理により、モーションブラーが影響を与える範囲に、粒子を効率的に配置することが可能となる．

$$v = l / t \quad (4.9)$$

次に、図 4-6 (b) に示すように、式 (4.7)、(4.8) の尤度関数の値が、ある閾値以上である場合、粒子の位置にシャトルが存在している可能性が高いという仮定に基づき、図 4-6 (c) に示すように尤度の高い粒子だけを残す．この閾値の設定法については、図 4-11 を用いて後述する．

最後に、粒子に対して図 4-6 (d) のように楕円体を当てはめ、粒子の確率的分布モデルを生成する．楕円体の重心をシャトルの 3 次元位置として獲得し、その楕円体の長軸の長さ  $l$  を、シャッタ開放時間  $t$  中にシャトルが移動した距離とする．長軸の長さ  $l$  とシャッタスピード（開放時間）から、式 (4.9) を用いて、シャトルの 3 次元位置  $q$  におけるシャトルの移動速度  $v$  を算出する．



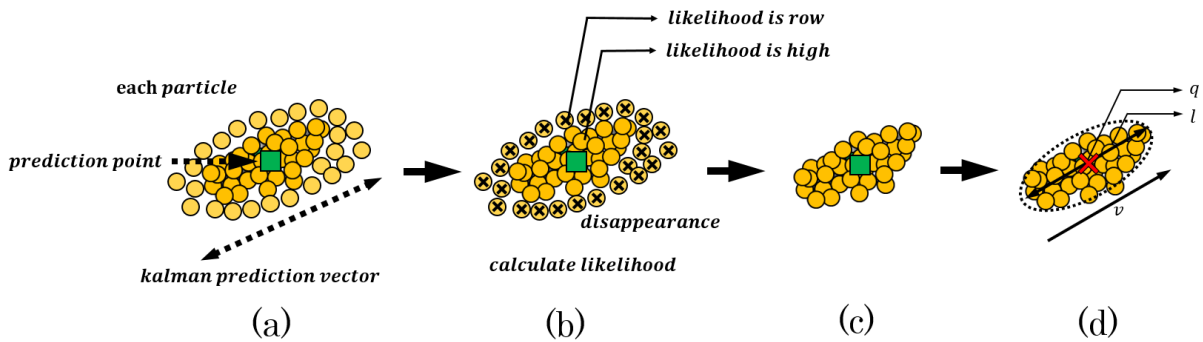


図 4-6 粒子群の初期散布，尤度計算，粒子群の再配置，位置と移動速度の推定

## 4.5 時間を遡りながらの物体の 3 次元位置と速度の推定

非常に高速にシャトルが移動する打ち始めのフレームでは，上述した背景差分処理において，カルマンフィルタの構築に必要な数の観測点が検出できないため，追跡処理が困難である．そこで，初期観測フレーム（最初にシャトルの検出に成功したフレーム）から時間を遡りながら，4.4 節で述べた追跡処理を適用することにより，それら検出が困難なフレームに対しては，検出したフレームより時間を遡って位置を推定する．図 4-7 に示すように，3.1 節で述べた手法において導き出された運動方程式より，時間  $-t$  における位置を推定することができる．この位置に対して前述した物体の 3 次元位置を確率的に獲得する手法を適用する．

このようなフレームでは，シャトルの運動が不規則であるため，映像中で観測される物体形状が大きく変動するといった問題が存在する．さらに，過去に遡るにつれ推定位置に誤差が蓄積し推定精度が低下してしまう．具体的には，図 4-8 (a) に示すように，過去に遡るにつれ推定位置の誤差が蓄積した結果，粒子の散布範囲内にシャトルが存在しない状況が発生し，推定処理が困難となる．そこで本手法では，図 4-8 (a) に示すように，時間を遡る探索処理において最後に検出に成功した位置（位置 A）と，シャトルがラケットで打たれた位置（位置 B）を直線で結び，その直線を軸とする円柱領域を粒子散布領域とすることで，探索領域を拡大し，上記問題の解決を試みる．この円柱は，最後に検出に成功した時刻を  $t_a$ ，シャトルがラケットで打たれた時刻を  $t_b$  とすると，時刻  $t_a$  における観測結果から予測される時刻  $t_b$  におけるシャトルの予測位置（位置 B'）と，位置 B の間の距離を底面の半径  $r$  として定義する．ラケットで打たれる直前のシャトルは低速で移動しているため，背景差分処理により 3 次元位置の推定が可能である．本手法では，背景差分処理による 3 次元位置推定が失敗したフレームを，シャトルが打ち返された時刻  $t_b$  とし，そのフレームにおけるカルマンフィルタの予測 3 次元位置をシャトルが打ち返された位置 B と定義する．従って，図 4-8 (b) に示す円柱領域に粒子散布領域を拡大することで，非常に高速に移動する物体から低速に移動する物体まで，様々な形状変化を伴う物体の位置推定を実現する．

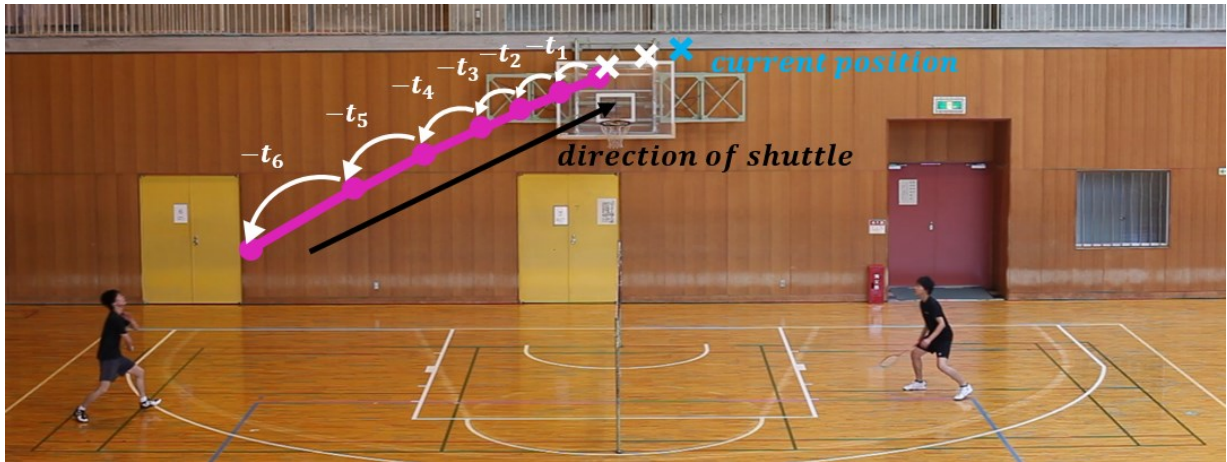


図 4-7 時間  $-t_k$  における推定位置

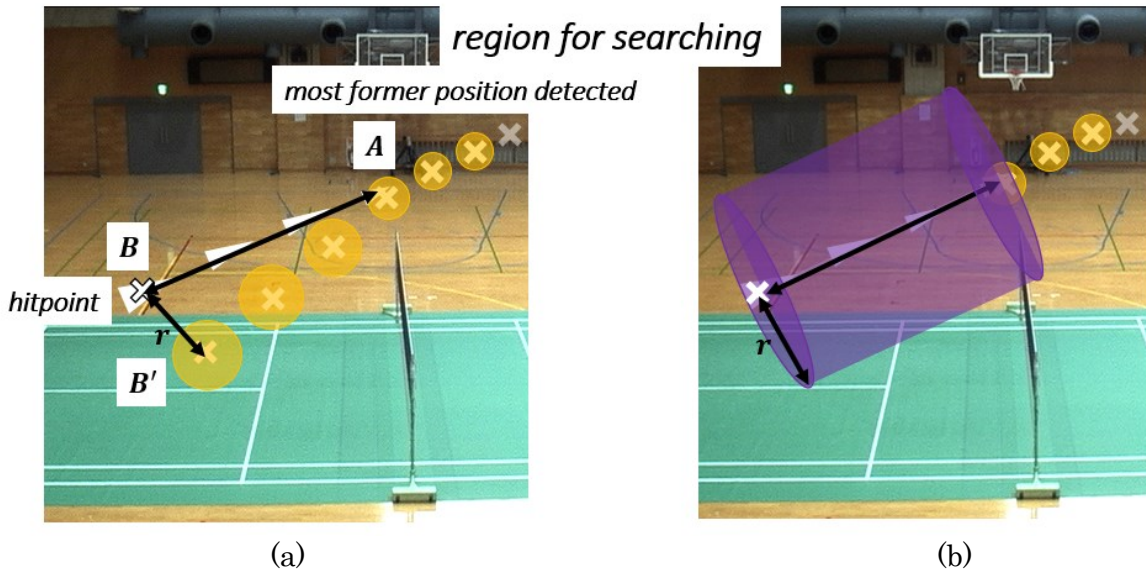


図 4-8 (a) 粒子の散布範囲内にシャトルが存在しない問題  
(b) 粒子の探索候補領域の拡大

## 4.6 提案手法の実証実験

バドミントン競技映像の背景領域には、コートや壁など、異なる色特徴を有する領域が存在しているため、各々について、適切な尤度を設定する必要がある。ここでは、図 4-9(a)に示すようなコートマットがグリーンで、それ以外が青色の背景の画像を例に、背景色の判断基準について述べる。図 4-10(a1)のようなバドミントンコートの輝度値を RGB 色空間にプロットすると、図 4-10(a2)のような分布が得られる。この分布に基づき RGB 輝度値の代表色（図 4-10(a1)の場合は、2 種類の代表色）を設定する。代表色の数は、ユーザが図 4-10(a1)の画像を見ながら判断する。代表色に基づきクラスタリングした結果を図 4-10(a3)に、2 種類の代表色を図 4-10(a4)に示す。このようにして各領域における背景色を設定する。

次に、上記処理によって得られる代表色が、バドミントンシャトルの尤度計算に効果があることについて述べる。モーションブラーを伴って観測されるシャトル領域の観測色は、シャトル自体の色（白色）と図 4-10(a4)に示す各領域の代表色がブレンドされた色となり、図 4-10(a5, a6)に示す RGB 色空間においては、代表色と白色を結ぶ直線上に存在す

る。本提案手法では、ブレンディングの結果生じる色が観測された場合、その位置にシャトルが観測されている尤度が高くなるように、代表色と白色を端点とする楕円体領域内をシャトルの観測色としてモデル化する。図 4-10 (a5)に「コート外で観測されるシャトル領域」と、図 4-10 (a6)に「コート内で観測されるシャトル領域」を各々30点手動で獲得し、その観測色を RGB 空間にプロットした結果を示す。各領域ともシャトルの観測色がモデル化した範囲内に収まっていることが確認できる。より多様な背景色に対して有効に働くことを確認するため、コートマットがブルー、それ以外がオレンジ色の背景の画像に対する処理結果を図 4-10(b1-b6)に、体育館（茶系色の床・板壁と灰色のコンクリート壁）の場合に対する処理結果を図 4-10(c1-c6)に示す。双方において、RGB 値の分布が上述したケースと同様であることより、提案手法が有効に機能すると考察できる。

背景色に両方の色が含まれている場合、分割処理による影響が生じることが懸念されるが、バドミントン競技会場の特性上、背景領域を校正する色が明確に異なること、ある領域の代表色が他の領域に含まれるとしても、その観測サイズは小さくなることから、カルマンフィルタによる補間処理によって対応可能である。

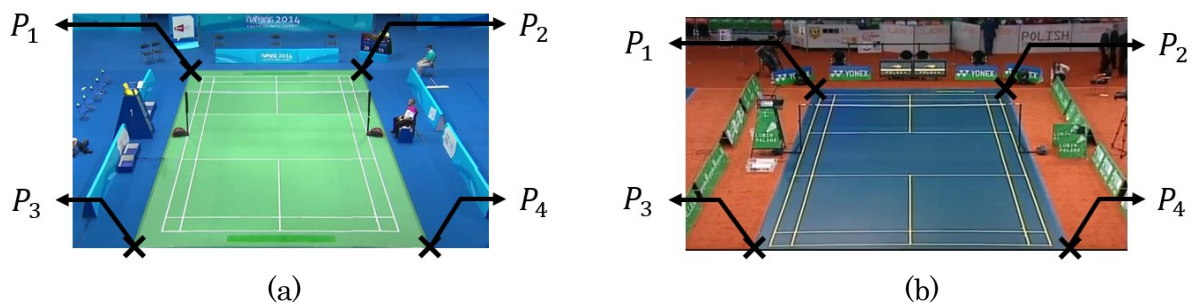
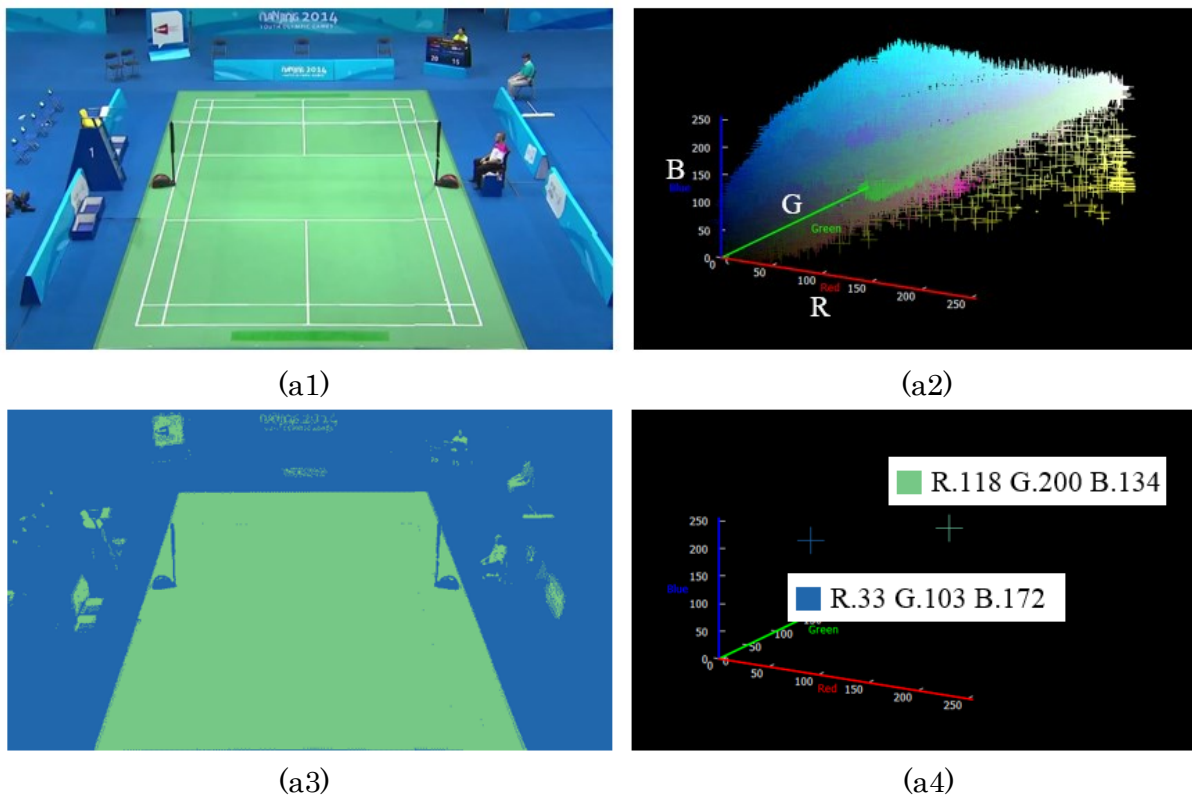
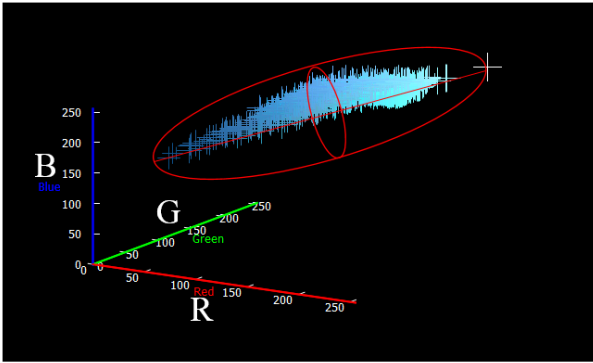


図 4-9 コートマットの色の種類 (a) グリーン (b) ブルー

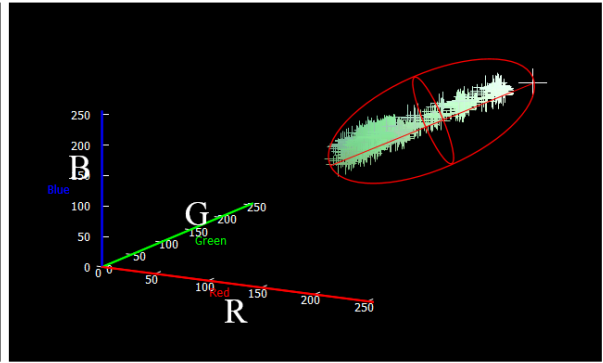
【コートマットグリーンの場合】 閾値 R:81 G:156 B:166







(a5)

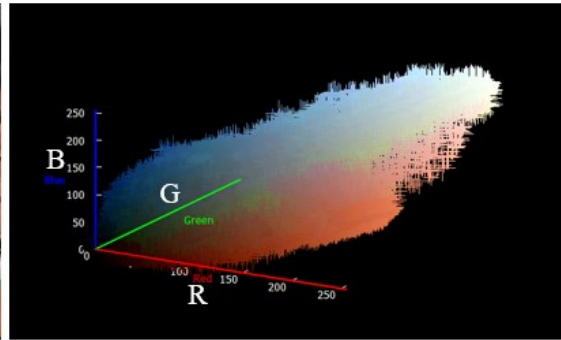


(a6)

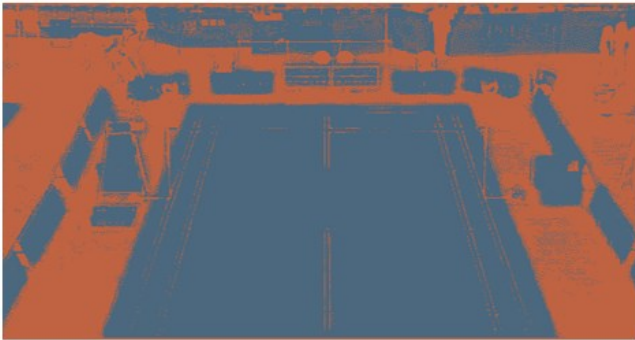
【コートマットブルーの場合】 閾値 R:119 G:76 B:90



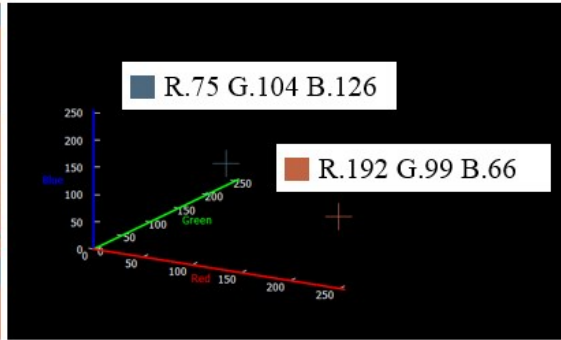
(b1)



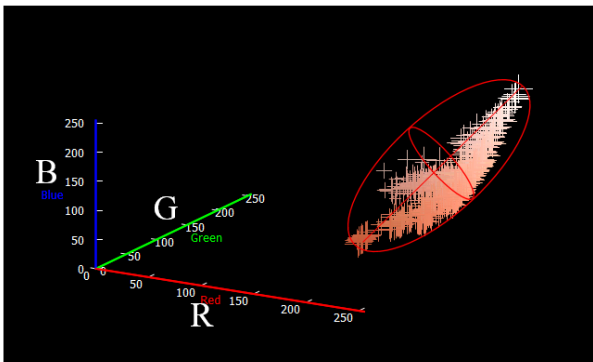
(b2)



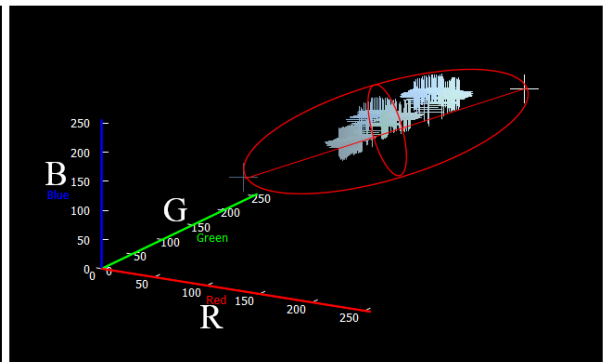
(b3)



(b4)

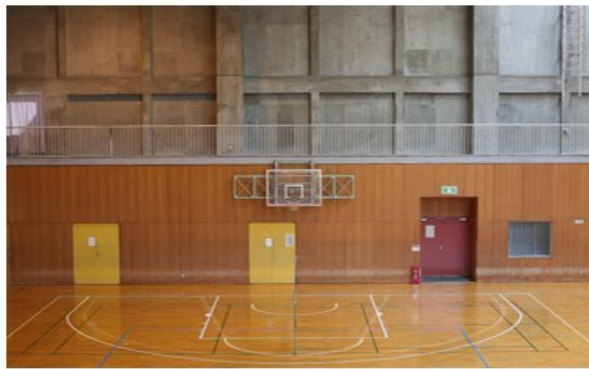


(b5)

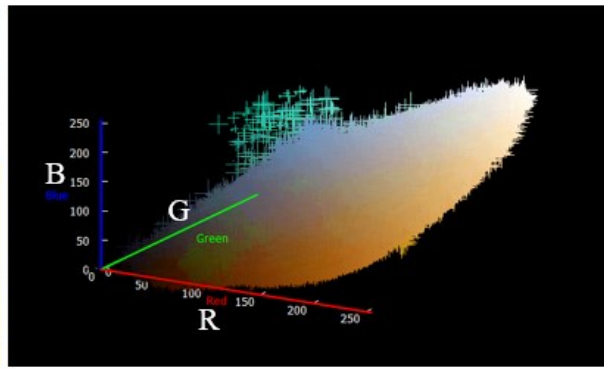


(b6)

【体育館の場合】 閾値 R:146 G:116 B:98



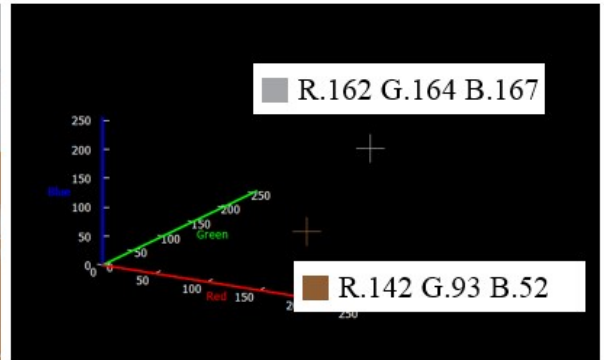
(c1)



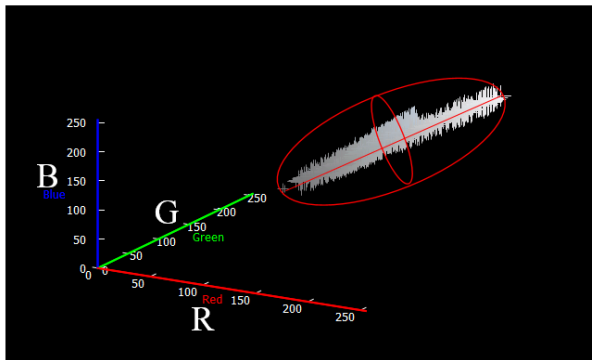
(c2)



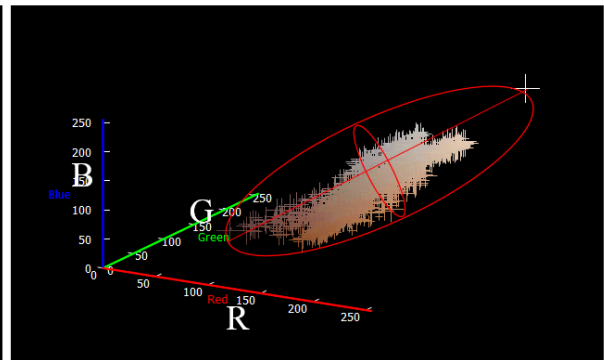
(c3)



(c4)



(c5)



(c6)

図 4-10 様々な背景色とシャトル領域の観測色を比較した実証実験  
コートマットグリーンの背景色に対する実証実験 (a1-a6) ,  
コートマットブルーの背景色に対する実証実験 (b1-b6) ,  
体育館の背景色に対する実証実験 (c1-c6)

次に、4.4 節で述べた粒子を用いた物体追跡処理に利用する尤度関数の妥当性を検証する。サンプル画像に対して、5 種類の尤度の閾値を用いて追跡処理を行った。図 4-13 に示すように、閾値を小さくするにつれ粒子がシャトルの 3 次元形状に近づいていることが確認できる (赤強調表示)。また、粒子を各画像上に投影した位置が、シャトルの領域内に収まっていることが確認できる。尤度関数の閾値を  $1.0 \times 10^{-30} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  まで変化させ、各閾値において粒子を 2 台の撮影画像上へ投影し、粒子がシャトル領域内外のどちらに存在するか実験を行った。2 台の撮影画像ともにシャトル領域内に粒子があることをシャトル領域の内側と定義する。図 4-11 に示すように、横軸は尤度関数の閾値 (色要素のユークリッド距離) を表し、縦軸は粒子数を表す。ピンク色の領域は、シャトルの内側に存在する粒子数を表し、青

色の領域は、シャトルの外側に存在する粒子数を表す。図 4-11 に示すように粒子数は、閾値を高くするごとにシャトル領域外に存在する粒子数が減少する。  $1.0 \times 10^{-5}$  より高い場合、シャトル領域外に粒子が存在しないことが確認されたため、本実験では閾値を  $1.0 \times 10^{-5}$  とした。これらの結果より、本提案手法の尤度関数は、シャトルを判別するにあたり有効であるといえる。本実験結果より、閾値は、  $1.0 \times 10^{-5}$  とした。

次に、モーショントラッカーから推定される速度の正確性の検証実験を行った。図 4-12 に示すように、モーショントラッカーの発生具合が異なるラリー映像を比較実験用データとする。まず、各フレームにおいてシャトルの位置を手動で取得し、ステレオ法を用いて 3 次元位置を算出する。それらの 3 次元点群に斜方投射の曲線をあてはめ、シャトルの軌跡を導出し[33]、比較用の速度データ（以下、比較データ）を求める。提案手法の速度は、モーショントラッカー領域の幅の長さから、シャトル 1 つ分 (6.8cm) を差し引いた値で算出する。横軸がフレーム番号、縦軸が速度 (m/s) を示す。比較データと提案手法で求めた速度を比較すると、打ち始めから 32 フレーム付近まで、ほぼ一致している。これは、シャトルが高速に移動している場合、モーショントラッカーから得られる速度の正確性が高いことを示している。しかし、速度が低下するに連れて比較データと提案手法で求められる速度の差異が大きくなる傾向がある。これは、モーショントラッカーが発生しなくなるに伴い、提案手法で推定される速度情報の正確性が低下しているためである。

これらの結果から、シャトルの速度が速い場合は、モーショントラッカーを活用した速度情報を採用し、速度が低下している場合には、フレーム間の速度を採用することが望ましいことがわかる。本実験結果より、低速は 10m/s 以下と定義し、低速時は、フレーム間速度情報を採用する。各軌道の始めに観測されたシャトルの速度を高速と定め 10m/s までの速度幅を二分し、高速と中間の速度を定義する。

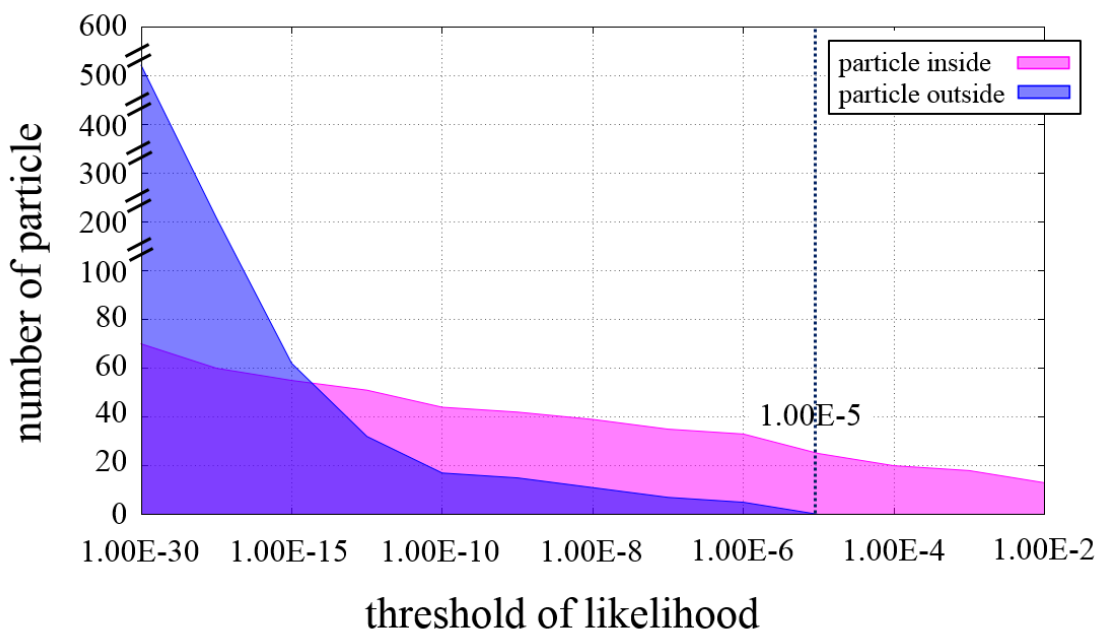


図 4-11 尤度関数の閾値別によるシャトル領域内外の粒子数

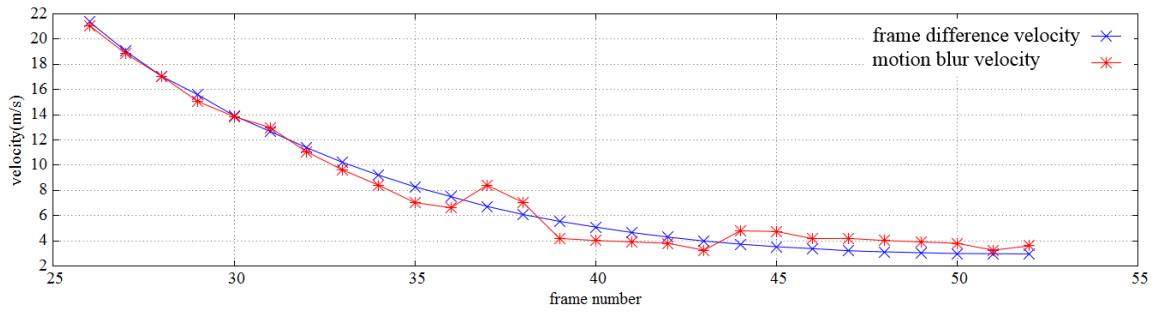


図 4-12 粒子を用いたシャトル領域判別法から得られる速度の分布と真値との比較

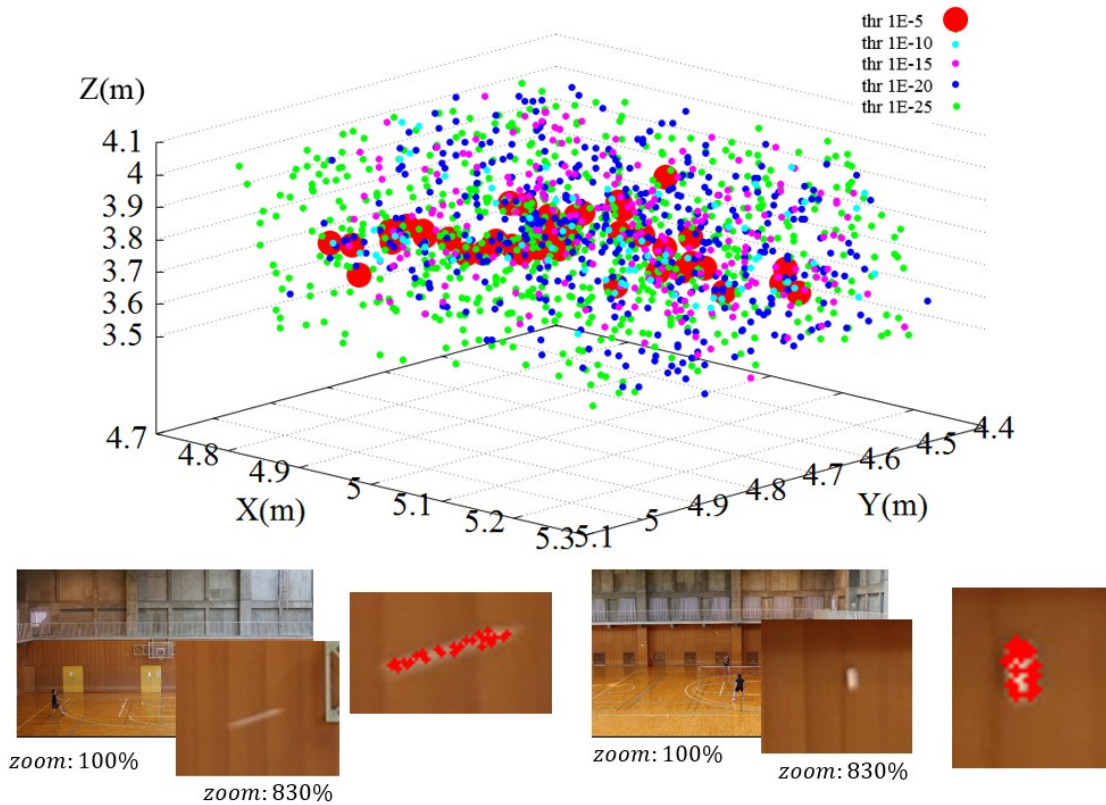


図 4-13 粒子を用いたシャトル領域判別法の閾値別の粒子の状態と粒子を各画像上へ投影した結果





図 4-14 キャリブレーションマーカスタンドの設置箇所

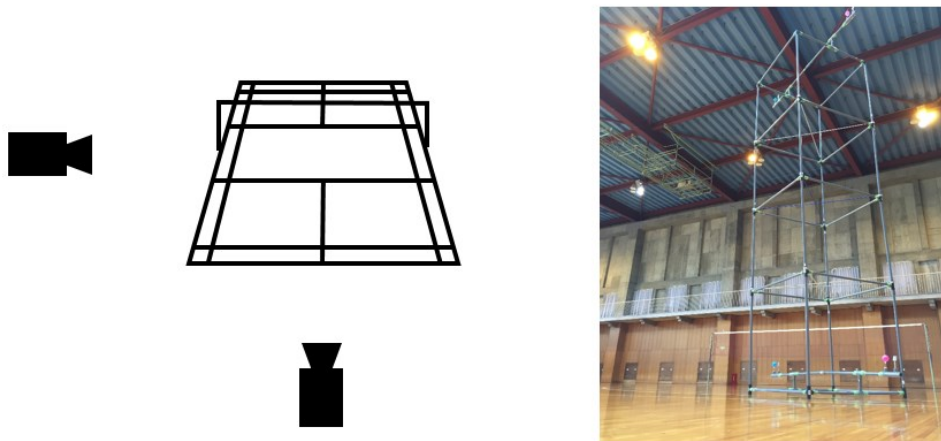


図 4-15 (a) 2 台のカメラ配置 (b) 組み立てたキャリブレーションマーカスタンド

次に、2 台のカメラで同期撮影した映像を用いて、提案手法による物体追跡処理を行った結果を図 4-17, 18, 19 に示す。1 フレーム当たりの処理時間を計測したところ、位置情報だけを観測データとしてカルマンフィルタに与えた場合は、平均 0.368 秒（標準偏差 0.003 秒）、位置情報と速度情報を観測データとしてカルマンフィルタに与える場合（提案手法）は、平均 0.622 秒（標準偏差 0.029 秒）であった。この際使用した計算機の CPU は Intel (R) Core i7-3770 3.40GHz であり、8.00GB のメモリを搭載し、プログラムは Windows 8 上で動作する。この実験では、キヤノン社製のビデオカメラ Canon EOS 5D Mark2 を用いて、1920 画素×1080 画素の解像度の映像を、毎秒 30 枚撮影した。その際シャッタースピードは 60 分の 1 秒に設定した。撮影した映像シーケンスは、バドミントンにおけるシャトルの様々な飛び方を再現した。具体的には、クリアが 2 種類、サーブ、スマッシュ、ドライブ、ロブ、ドロップが各 1 種類、ヘアピンが 3 種類の計 10 種類の軌道に対する 357 フレームの映像を撮影した。使用し



たカメラ配置は図 4-15 (a) に示すように、世界座標系の Y 軸, X 軸と直交するように各 1 台設置する. 図 4-15 (b) に示すように、作成したキャリブレーションマーカスタンド (高さ 4 m : 1m の立方体を縦に 4 段, 測量用反射板を最上段と最下段部分の左右に 2 箇所) を設置する. このようなキャリブレーションマーカスタンドを図 4-14 に示す 12 箇所を設置し, 測量器にて反射板の位置を測定する. 測定したデータと 2 台のカメラから観測される画像上の位置を用いて, 射影変換行列を算出する. カルマンフィルタのガウス分布からなるプロセスノイズは, 平均  $\mu = 0$  分散  $\sigma^2 = 1.5$  と定義する.

図 4-16 に結果を示す比較実験では, 手動で取得したシャトルの位置情報をカルマンフィルタへ与えた場合の予測値と, 位置情報だけを観測データとしてカルマンフィルタに与えた場合の予測値の差異, 及び, 位置情報と速度情報を観測データとしてカルマンフィルタに与える場合 (提案手法) の予測値の差異を比較する. 真値データは, 実証実験に使用した撮影データ (全 360 フレーム) の各フレームにおいてシャトルの位置を手動で取得する (2 次元位置). 2 台分の撮影データに対して各フレームのシャトルの位置を手動で取得し, それらにステレオ法を適用して推定される 3 次元位置を真値とする. 記号  $\times$  は, 観測された位置とフレーム間の速度情報を観測データとしてカルマンフィルタに与えた場合の予測値の差を表し, 記号  $*$  は, 位置情報と速度情報を観測データとしてカルマンフィルタに与える場合 (提案手法) の予測値の差を表す. 記号  $+$  は, 過去の軌道の推定位置に粒子を用いて本提案手法を適用した位置の誤差を表す. ピンク色の棒グラフは, 手動で取得したシャトルの位置情報より求めたシャトルの速度を表す. 図 4-12 に示すように, モーションブレンダーから推定される速度の正確性の検証実験結果より得られたシャトルの移動速度に対する閾値を 10m/s に設定し, 低速は 10m/s 以下, 高速を 10m/s 以上と定義した. カルマンフィルタは, 観測情報を用いて注目事象の状態を逐次的に更新することで, 誤差の少ない予測を実現する手法である. 従来のカルマンフィルタを用いた物体追跡処理では, 対象物体の位置情報を観測データとして物体の運動状態を構築し予測を行う. 一方, 提案手法では, 対象物体の位置と速度情報の両方を同時に観測データとしてカルマンフィルタへ与え, 物体の運動状態を構築し, 予測を行う. 図 4-16 に示すように, 観測位置の差分として観測速度の情報を与えていた従来手法よりも, モーションブレンダーの形状から推定してカルマンフィルタに与える提案手法は, 誤差を低減していることが確認できる. 速度情報は, 観測位置の差分以外にも, オプティカルフローから得られる速度情報が用いられることがあるが, 本研究の対象物体のような, 誤差を大きく含むシャトルの位置情報を利用した場合, 信頼性が低いオプティカルフローとなる. そこで本手法では, 信頼性の低いオプティカルフローの速度情報ではなく, モーションブレンダー領域の形状から推定される速度情報を利用する. これらの結果から, 提案手法を用いることにより, サーブ, クリア, スマッシュ, ドライブ, ヘアピンといった, シャトルのスピードや軌道が様々に変化する一連のラリーへの対応が可能となることが確認できる. このような条件のもとで提案手法の追跡推定精度は, 誤差平均距離 0.31m を示した. さらに, シャトルの速度が約 3m/s ~ 約 90m/s の実験データによる図 4-16 の比較実験では, 時間を遡りながらの物体の 3 次元位置と速度の推定処理の効果は実験データ範囲内の速度に対応することを確認した. 3.1 節の手法から得られる観測点が多い軌道は, 提案手法と比較手法の差異はほとんどみられず, 観測点が多く, 提案手法によって得られた観測点が多い場合, 提案手法は大きく誤差が低減している. 表 1 に軌道毎の観測点数を示す. 3.1 節の手法で得られる観測点は, 鮮明なシャトル像の観測が可能で, シャトルの速度が遅い場合, 背景差分処理によってシャトル領域の検出が可能である. 一方, シャトルの速度が高速に移動する場合, モーションブレンダーにより, 背景差分処理ではシャトル領域の検出が困難となるため, 観測点が減少する. その結果, 図 4-16 の軌道 3 のようなスマッシュ (シャトルが高速に移動) の場合, 表 1 の軌道 3 のように観測点が少ないが, 図 4-16 の軌道 1, 6 のようなサーブやクリア (シャトルの減速区間が多い) の場合, 表 1 の軌道 1, 6 のように観測点が多くなる. 観測点が多い場合, 提案手法と比較手法の差異はほとんどみられないが, 観測点が減少するに伴い, 提案手法では推定誤差が大きく低減していることがわかる.

表1に提案手法の誤差低減率を示す。誤差低減率は、平均30%を示した。これらの結果から、モーションブレンダーを直接観測する提案手法が、推定処理の精度向上に有効であることが確認できる。また、従来手法では、モーションブレンダーの影響によりシャトルの観測が難しいフレームにおいても、提案手法を用いれば、図4-16赤+プロットに示すように、シャトルの観測が可能となるため、従来手法よりも高速に移動するシャトルに対しても位置と速度の観測情報をカルマンフィルタに与えることができるため、予測誤差が低減している。従って、シャトルの速度に対し、適切な方法で観測したデータをカルマンフィルタに適用することは、速度変化の大きな物体の追跡に有効な手法であるといえる。また提案手法は、すべてのフレームにおいてシャトルの3次元位置推定を可能とした。

図4-17, 18, 19に本提案手法による推定した位置を各画像上へ投影した結果(コートマットグリーンとコートマットなしの撮影環境)と推定したシャトルの3次元位置を示す。本提案手法において、良好に追跡できていることが2次元画像上においても確認できる。

本実験では、ラインの色を白、背景色を灰色または茶系色としているが、それとは異なるライン色やコート色を有する環境への適用について説明する。バドミントン競技では、審判によるインアウト判定を助けるために、コートとラインの色が大きく異なるよう設定するのが一般的である。例えば、図4-10(b1)示すようにラインが黄色の場合、コート色は補色に近い青色が設定される。このようにライン領域が画像上でシャトルやコートと十分異なる色で観測される場合、ライン領域は、上述した背景色のクラスタリング処理によって、背景領域中の新たなクラスとして分類され、同様の枠組みで追跡処理が可能である。我々は、これまでの実証実験により、提案手法が、図4-10(a1)に示すようなライン色やコート色を有する環境においても有効に機能する事を確認している[46]。

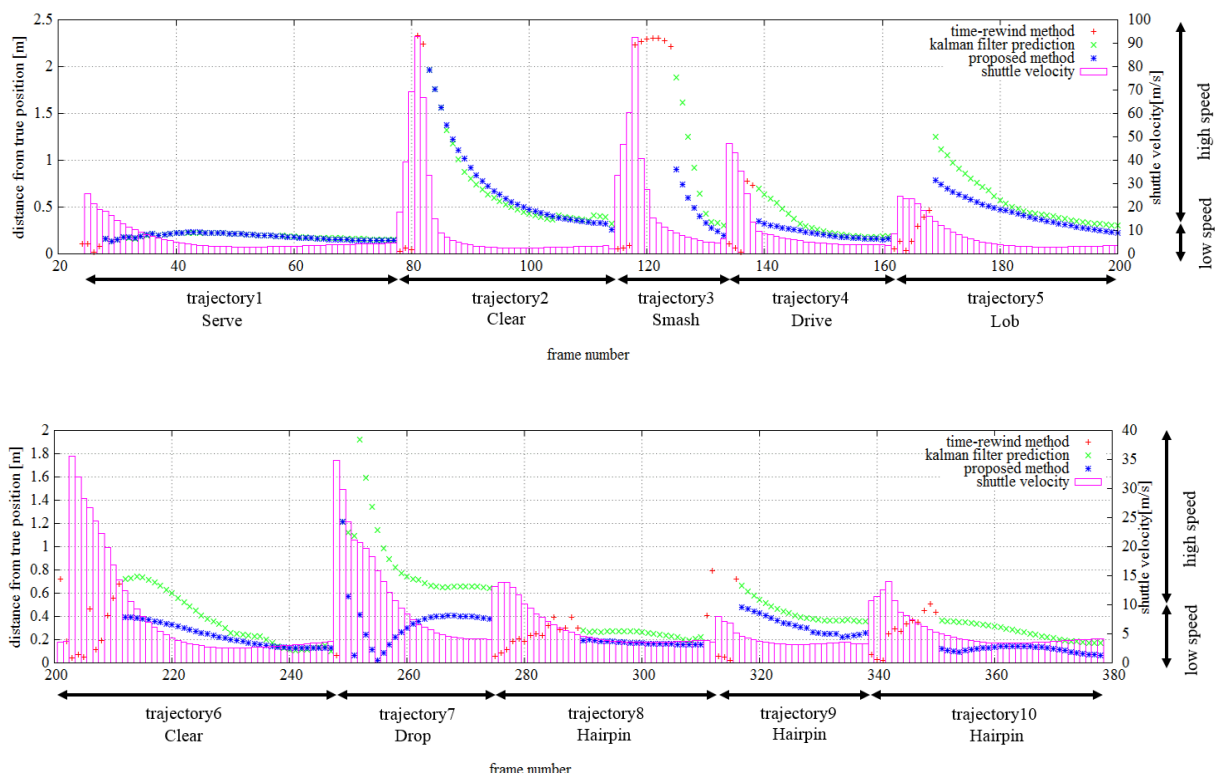


図 4-16 フレーム毎の3次元位置推定誤差

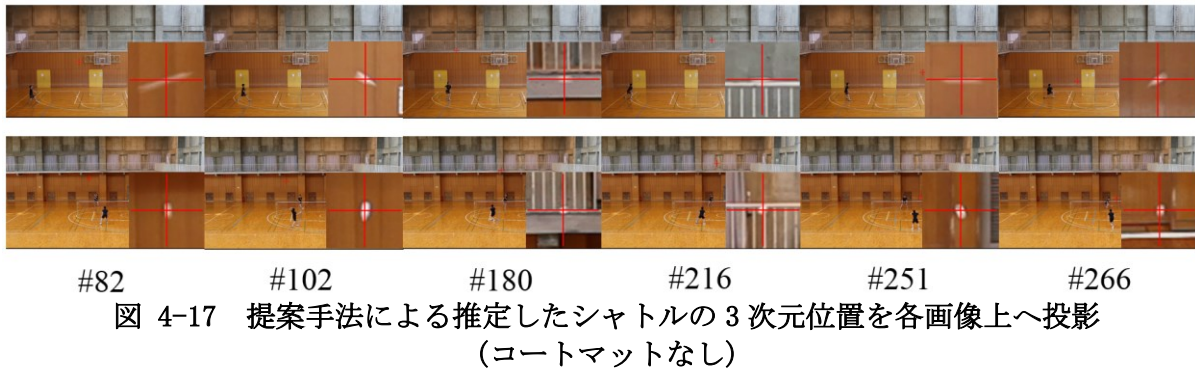


図 4-17 提案手法による推定したシャトルの3次元位置を各画像上へ投影  
(コートマットなし)

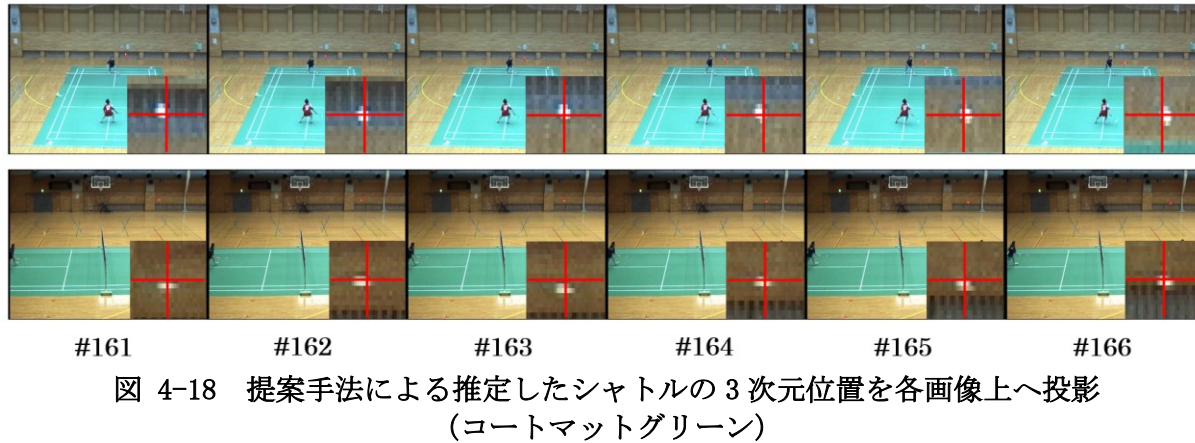


図 4-18 提案手法による推定したシャトルの3次元位置を各画像上へ投影  
(コートマットグリーン)

表 1 位置推定誤差の低減率と軌道毎の観測点数

	×PEA [m] (SD)[m]	*PMEA [m] (SD) [m]	RR	OP/FN
Trajectory1	0.19 (0.03)	0.18 (0.03)	-2%	39/55
Trajectory2	0.67 (0.43)	0.69 (0.44)	4%	18/37
Trajectory3	0.86 (0.56)	0.46 (0.23)	-45%	4/19
Trajectory4	0.32 (0.16)	0.22 (0.06)	-31%	19/28
Trajectory5	0.56 (0.26)	0.43 (0.16)	-23%	23/40
Trajectory6	0.36 (0.22)	0.23 (0.10)	-36%	25/46
Trajectory7	0.88 (0.33)	0.35 (0.22)	-60%	14/27
Trajectory8	0.25 (0.03)	0.17 (0.01)	-31%	19/36
Trajectory9	0.43 (0.09)	0.32 (0.08)	-26%	14/28
Trajectory10	0.27 (0.07)	0.11 (0.02)	-57%	28/40
<b>average</b>	<b>0.44 (0.22)</b>	<b>0.31 (0.14)</b>	<b>-30%</b>	

PEA : prediction error average  
PMEA : proposal method error average  
RR : reduction rate  
OP : observation points  
FN : number of frame

本研究では、追跡を困難とさせている要因である、対象物体の観測解像度が低い問題、そして、対象物体の移動速度がラリー中で低速から高速まで大きく変化する問題について取り組んだ。観測解像度が低い問題は、室内環境の背景色を考慮したシャトルの観測色情報を活用し、2視点で撮影した映像を用いることにより安定した追跡を実現した。対象物体の移動速度が低速から高速まで大きく変化する問題は、モーションブレンダーを活用して物体の移動速

度を観測することにより対応を試みた。具体的には、3次元空間中の粒子を用いて、粒子の形状をモーションブレンダーの3次元形状とさせることで、シャトルの位置と速度を獲得した。また、シャトルの速度に対し、適切な方法で観測したデータをカルマンフィルタに適用することにより、低速から高速まで大きく変化するシャトルの安定した追跡処理を実現した。さらに、算出した運動方程式より、時間を遡ることで、非常に高速に移動するシャトルの位置推定をも可能とした。

提案手法の実証実験を実施し、室内環境の背景色を考慮したシャトルの観測色情報を用いた尤度関数の妥当性を確認した。また、モーションブレンダーから得られる速度は、シャトルの速度が速い場合には、比較データと差異が認められず、シャトルの追跡処理に有効に機能することが確認された。シャトルの移動速度が低速な場合は、モーションブレンダーから得られる速度情報の信頼性は低く、フレーム間速度の信頼性が高くなることを確認した。

提案手法を実際のバドミントンのラリー映像に適用した結果、位置情報だけを観測データとしてカルマンフィルタに与えた場合よりも、約30%の誤差を低減できることを確認した。これらの実験結果から、モーションブレンダー情報を活用し、位置と速度情報を観測データとしてカルマンフィルタへ与える提案手法は、移動速度の大きな変化、速度差によって観測形状が変化、追跡対象物体の低い観測解像度に対して有効であることを確認した。

近年、スポーツ競技に情報処理・解析技術を導入し、トレーニングの効率化や戦術分析の実現を進める動きがある。バドミントン競技においても、シャトルの3次元位置情報を提供する技術の実現が期待されている。特に、打ち方のフォームによってどのような軌道となるかを判明することで戦術分析を行っている。具体的には、①エースを取るパターン②エースを取るための布石のラリー③エラーをしやすいショット④苦手なパターンの4種類に戦術分析データが分けられる[51]。①～④の戦術分析データは、ラリーの詳細な情報までは求められてないが、コート幅6.1×13.4m、ネット高さ1.55m、シャトルの軌道の高さ約5mのバドミントン競技における施設の環境では、推定誤差が1mを超えるとラリーの種類が変わるため、戦術分析に影響を与えると考えられる。本手法による3次元位置推定精度は、誤差平均31cmであるので、戦術分析データとして十分に活用できる範囲内であると考えている。

一方で、本研究で撮影実験に使用したカメラ解像度は1920画素×1080画素であり、空間分解能は画像のコート手前側が1画素あたり0.8cm、コート奥側で1.3cmである。今後、カメラの高解像度化が一層進むことにより、本提案手法の3次元位置推定精度の向上が見込めるため、戦術分析への応用の可能性が高まることを期待している。

このように、提案手法の有効性を示し、様々な軌道に対して安定した軌跡推定を実現したが、図4-16では、打ちはじめの誤差が大きいことが確認できる。また、図4-20に示すように、推定した2つの軌道の交点が、シャトルのヒットポイントでないことを確認した。それは、図1-1で示すように、シャトルの軌道が変則的に移動していることに起因する。従って、打ちはじめの高速かつ変則的に移動するシャトルに焦点を当てた軌跡推定法を第5章で述べる。

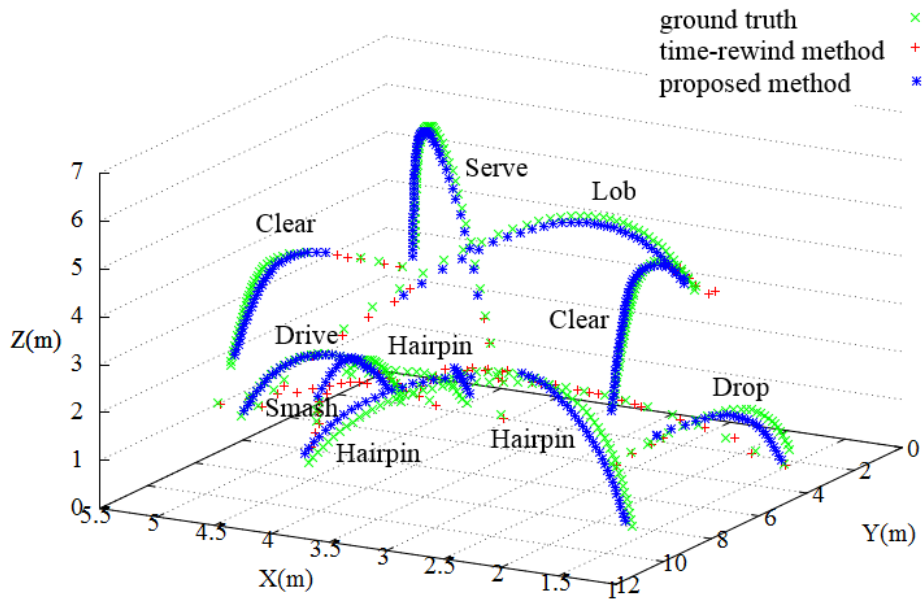


図 4-19 提案手法によるシャトルの3次元位置推定結果

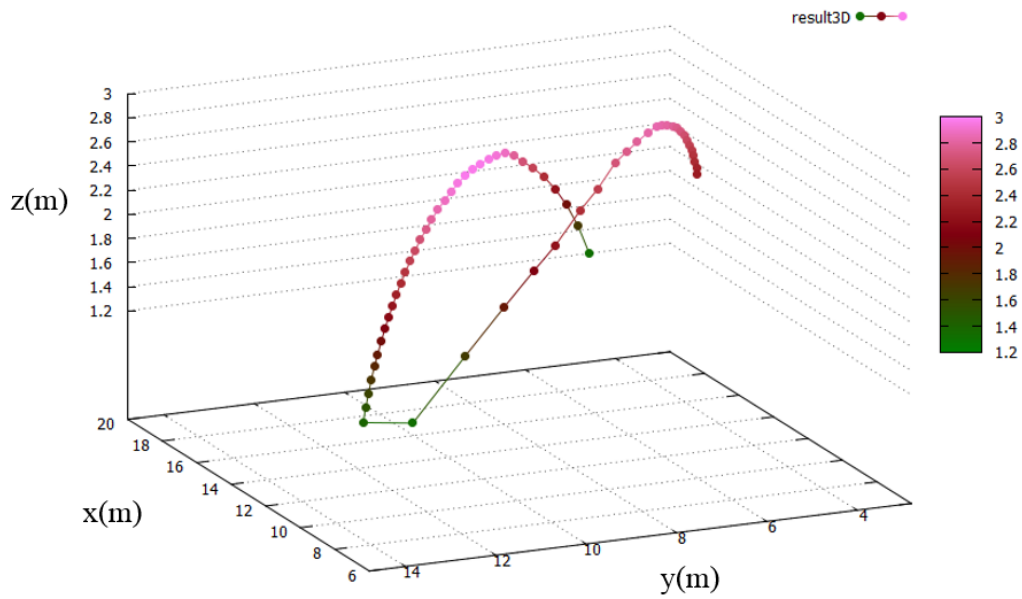


図 4-20 シャトルの3次元位置推定結果によるヒットポイントが交わらない問題



## 第5章 異なるシャッタ速度で撮影した映像を用いたバドミントンシャトル軌跡推定法

複数視点から撮影した映像を用いて注目物体の3次元位置を推定する場合、各画像が同期撮影されていることが前提となるが、大規模空間で同期撮影が困難となるケースが頻出する。運動モデルを仮定すれば3次元位置を近似的に推定することができるが、被写体が高速かつ変則的に移動する場合はモデルのあてはめが困難である。さらに、高速かつ変則的に移動するシャトルを大規模空間にて撮影した場合、回転を伴う移動中は位置姿勢が変則的に変化する問題が存在する。

本稿では、非同期撮影映像を用いること、観測形状が多様に変化することによって軌跡推定を困難とさせている問題に対して、露光時間の異なる複数台のカメラで撮影した映像を利用し、解決を図る。

図5-1に示すように、まず長露光時間撮影で、動きブレによる精度低下はあるものの物体が存在していた3次元位置（軌道）を推定し、その上に短露光時間撮影したブレのない鮮明な像を投影することにより、高精度で3次元位置を推定する。さらに、本手法は、非同期撮影された短露光時間画像が追加されると、高精度で推定される3次元位置が増加するという特長も有する。実写画像とCGシミュレーション画像を用いた実証実験により、提案手法の有効性を確認する。

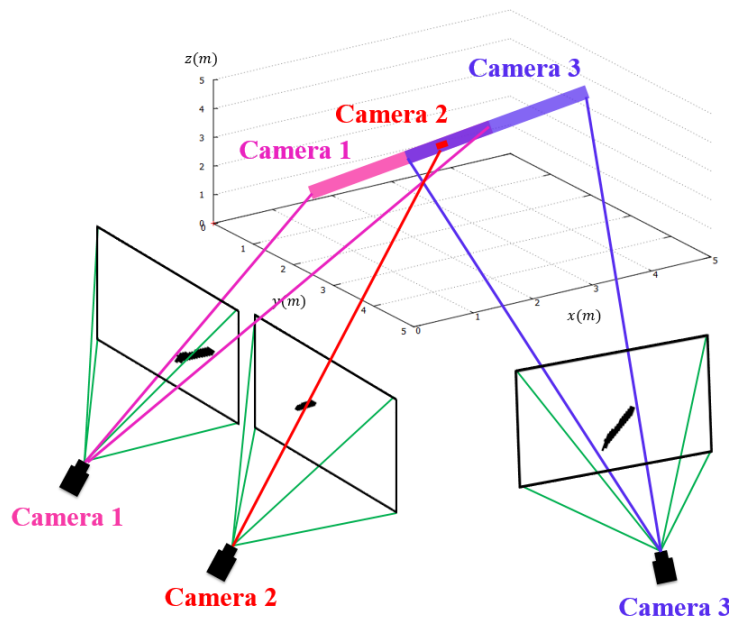


図 5-1 異なるシャッタ速度の非同期撮影映像を用いた3次元位置推定

## 5.1 異なるシャッタ速度で撮影した映像を用いたバドミントンシャトルの3次元位置推定法

以下では、図 5-2 に示す長露光時間のカメラ 2 台 (Camera1 と Camera3: 同じシャッタ速度) と短露光時間のカメラ 1 台 (Camera2) を用いて、高速かつ変則的に移動するシャトルを非同期撮影する状況を例に説明を行うが、カメラ台数が増加しても同様の議論が適用可能である。まず、Camera1 と Camera3 で撮影した映像を用いて、シャトルの 3 次元移動軌跡 (3 次元観測線) を得る。次に、Camera2 の画像から検出されたシャトルの 2 次元位置を、3 次元観測線上に投影し、それらが交わる位置として、シャトルの 3 次元位置を推定する。

本節では、長露光時間に設定された 2 台の非同期撮影画像から分割したシャトルの 2 次元像を、3 次元空間中で重ね合わせることで 3 次元観測線を得る手法について述べる。図 5-3 に示すように、背景差分と 2 値化処理により各画像中のシャトル領域を分割する。この処理では、[46] の手法を利用することで、シャトルの存在範囲を一定領域内に限定している。それらの領域に対し、Shape-From-Silhouette [52] を適用し、領域の 3 次元形状を推定する。Shape-From-Silhouette [52] とは被写体を複数のカメラで撮影し、撮影画像の対象物体領域に存在する範囲 (視体積) の積を求めることで被写体の 3 次元形状を復元する手法である。

図 5-4 に示すように、シャトルのおおよその 3 次元位置の周辺に 3 次元ボクセル空間を定義し、ボクセルのある要素 (注目画素) を各画像上へ投影し、その位置に前処理として求めたシャトル領域が存在するか否かを調べる。Camera1 に、ボクセルの要素を投影し、画像上に観測線が存在している要素だけを残した結果を図 5-5 に示す。同様の処理を、Camera3 に対して行なった結果を図 5-6 に示す。図 5-7 は、図 5-5, 6 の処理結果を重ね合わせたものである。各画像から得られる観測曲面の交点が、図 5-7 の赤プロットで示す 3 次元観測線となって求まることがわかる。

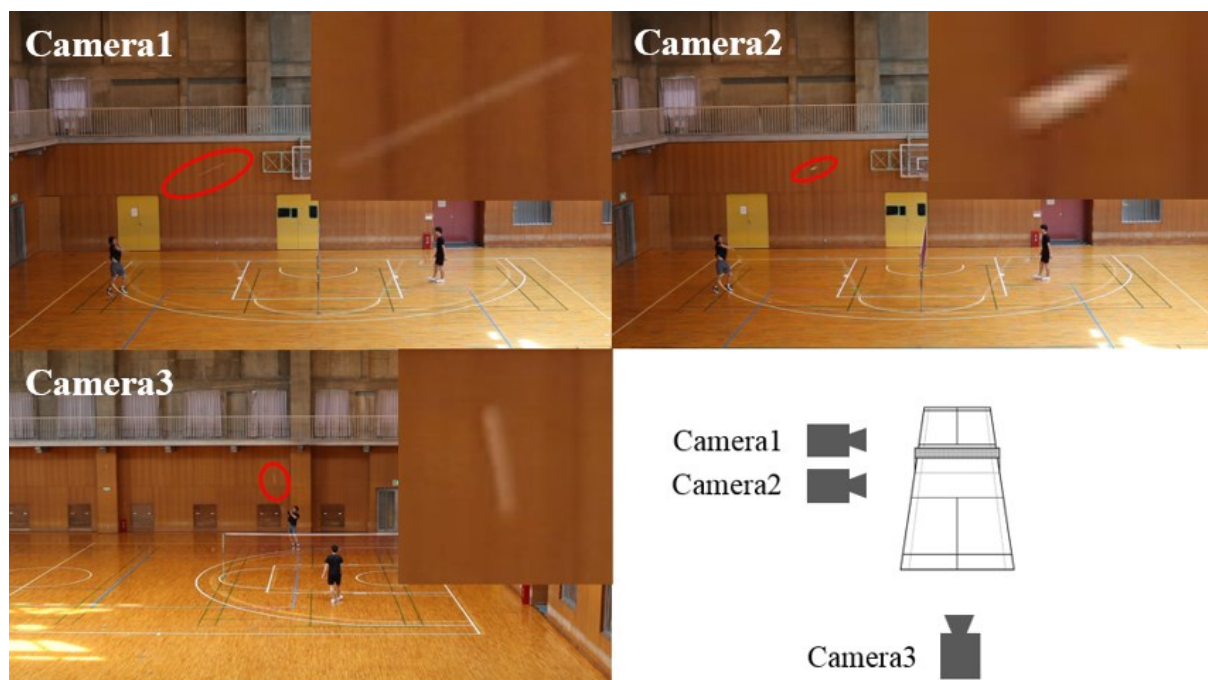


図 5-2 カメラ配置と撮影画像のシャトルの写り方

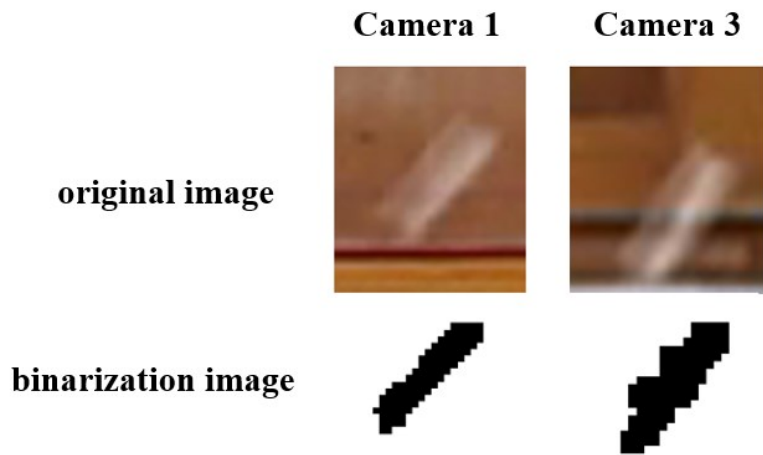


図 5-3 背景差分処理を用いてモーションブラー領域を推定

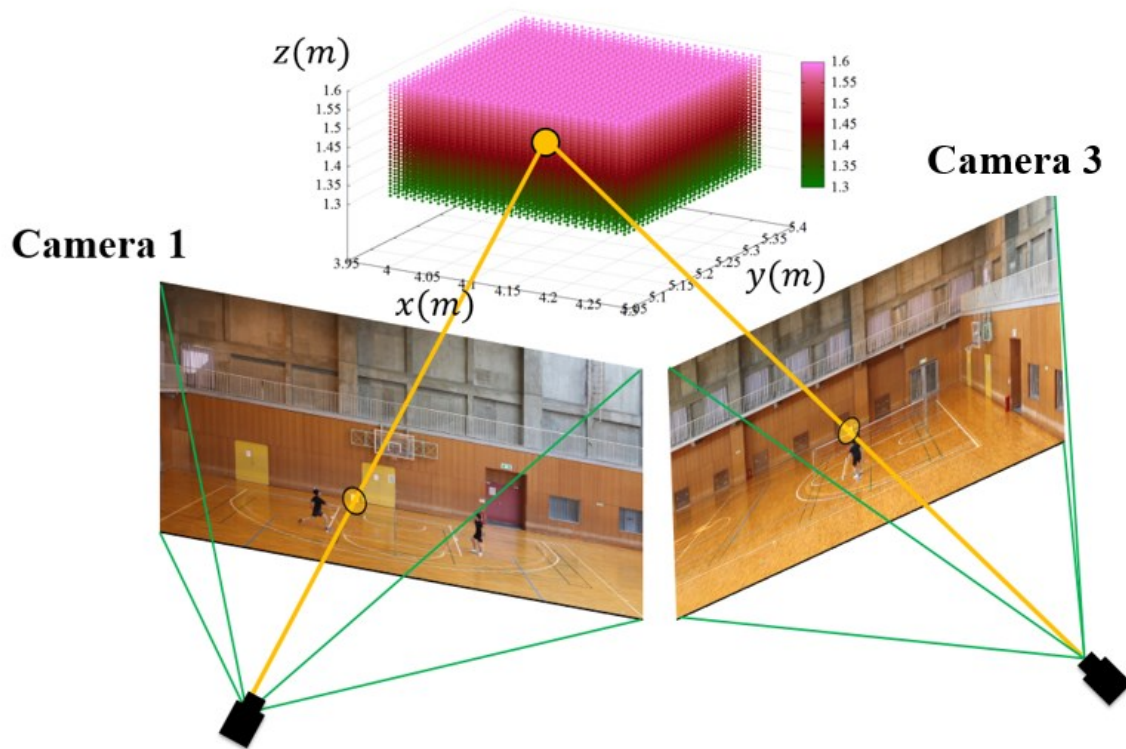


図 5-4 3次元ボクセル空間を定義



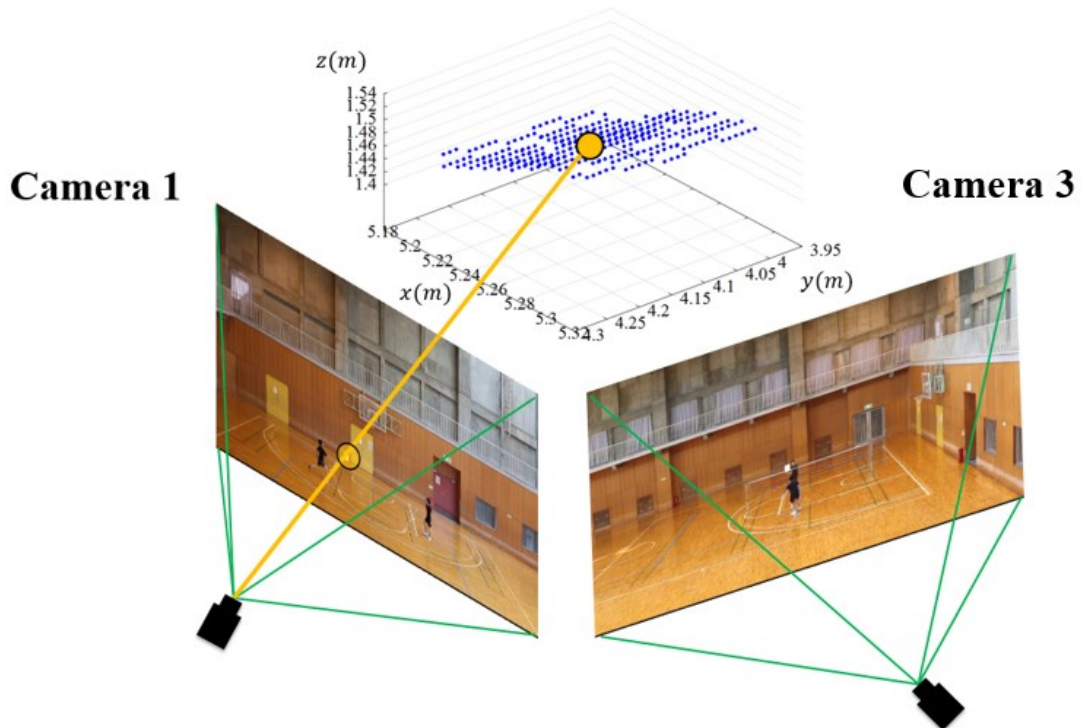


図 5-5 ボクセルの要素を Camera1 に投影，観測線が存在している要素だけを残す.

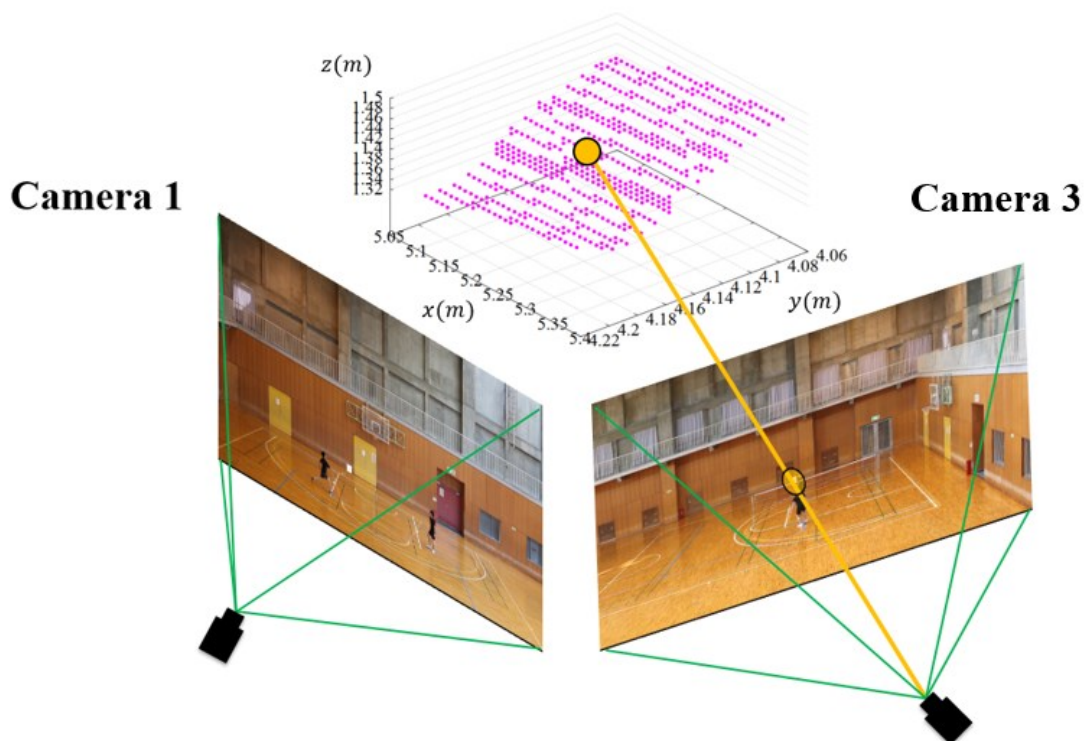


図 5-6 ボクセルの要素を Camera3 に投影，観測線が存在している要素だけを残す.

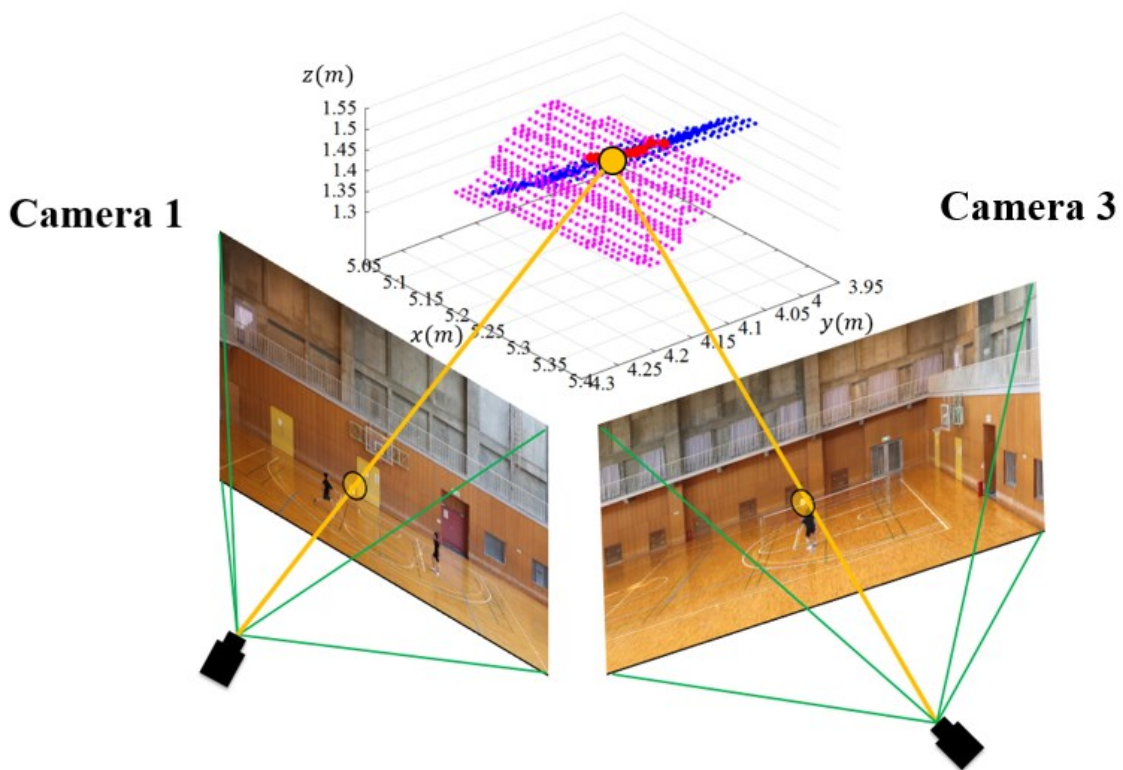


図 5-7 ボクセルの要素を Camera1, Camera3 に投影,  
観測線が両方の画像上に存在している要素だけを残す.

本節では、長露光時間に設定された 2 台の非同期撮影画像と、短露光時間に設定された 1 台の非同期撮影画像を用いて、シャトルの 3 次元位置を求める手法を述べる。

図5-9に示すように、図5-8のボクセルの要素を用いて、長露光時間画像の観測像から推定されたシャトルの 3 次元観測線を得る。次に、図5-10に示すように、Camera2で撮影した短露光時間画像からシャトル領域を検出する。検出したシャトル領域からシャトルの観測点を求め、その点とレンズ中心を通る直線を算出する。この直線と前述した 3 次元観測線との交点として、Camera2の撮影時刻における、シャトルの 3 次元位置を推定する。

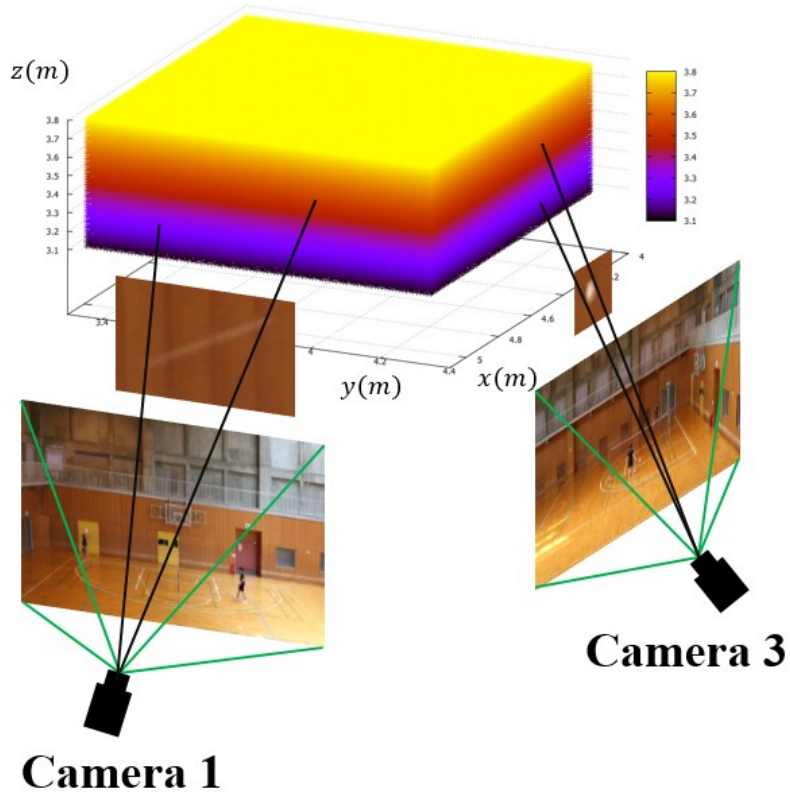


図 5-8 3次元ボクセル空間を定義

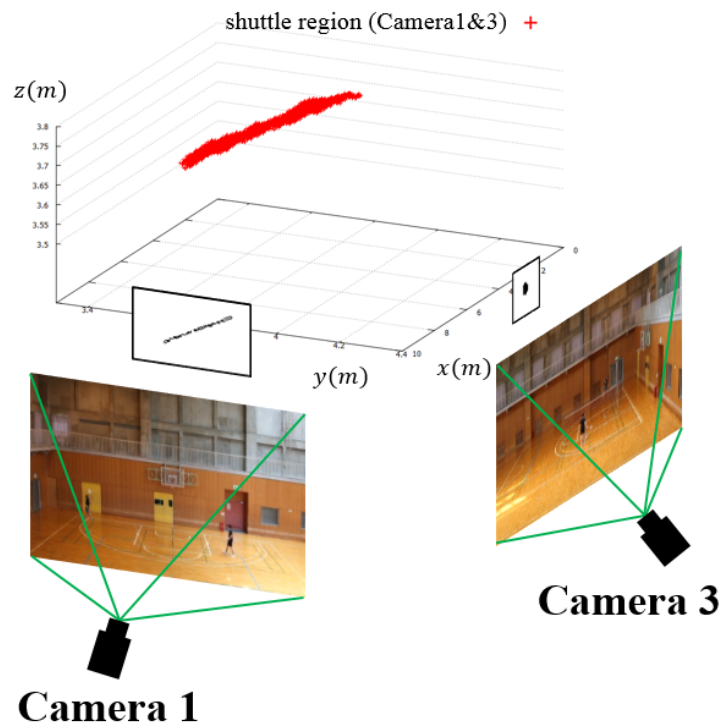
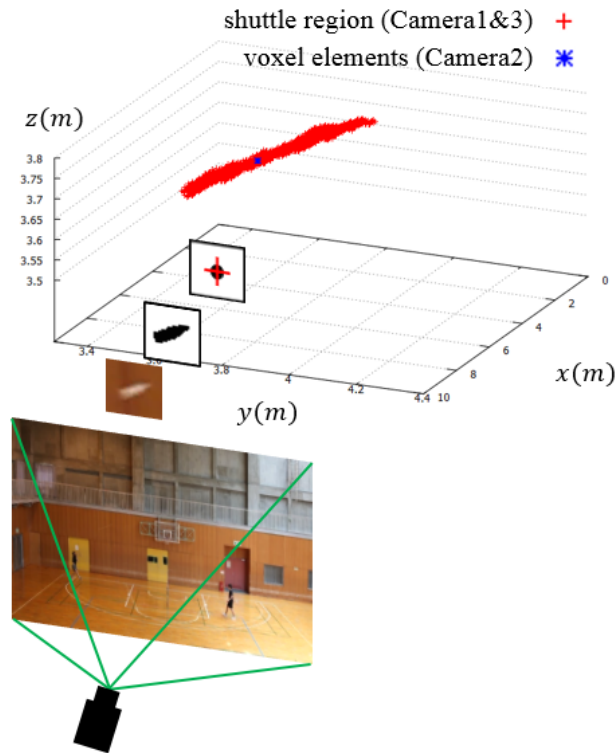


図 5-9 ボクセルの要素を Camera1, 3 に投影, 観測線が存在している要素だけを残す.



## Camera 2

図 5-10 Camera2 の観測位置とレンズ中心を通る直線が 3 次元線と交わる点 (シャトルの 3 次元位置)

### 5.1.1 提案手法を適用するための撮影条件

非同期撮影映像を用いた場合、カメラのシャッタを切るタイミングにより、複数のカメラからの観測像の共通部分が異なる。

図 5-11 に示すように、複数台の長露光時間カメラを同じフレームレート  $f_r$  , シャッタ速度  $ss1, ss3$  とすると、前提条件より、長露光時間の間隔  $t$  は、

$$t = ss1 = ss3 = 1 / f_r \quad ( 5.1 )$$

として表される。提案手法を適用するためには、長露光時間カメラのシャッタ速度は、フレームレート  $f_r$  で取りうる最大値  $(1 / f_r)$  とし、短露光時間カメラのシャッタ速度  $ss2$  は、以下の式を満たすように設定する。

$$ss2 < ss1 = ss3 \quad ( 5.2 )$$

非同期撮影を行う場合、各カメラのシャッタタイミングにずれが生じるが、提案手法を適用するためには、複数の長露光時間カメラの重複する期間内 (図 5-11  $E_{p1}$  &  $E_{p3}$ ) に短露光時間カメラの撮影が行われる必要がある。図 5-11 に複数の長露光時間カメラ (Camera1 と Camera3) のシャッタタイミングのずれが最大  $(1 / (2f_r))$  の場合を図示する。図 5-11 の下 2

段に示すように、短露光時間カメラのシャッタタイミングがどのようにずれても、長露光時間カメラの重複する期間内 ( $E_{p1}$  &  $E_{p3}$ ) に撮影が行われることがわかる。

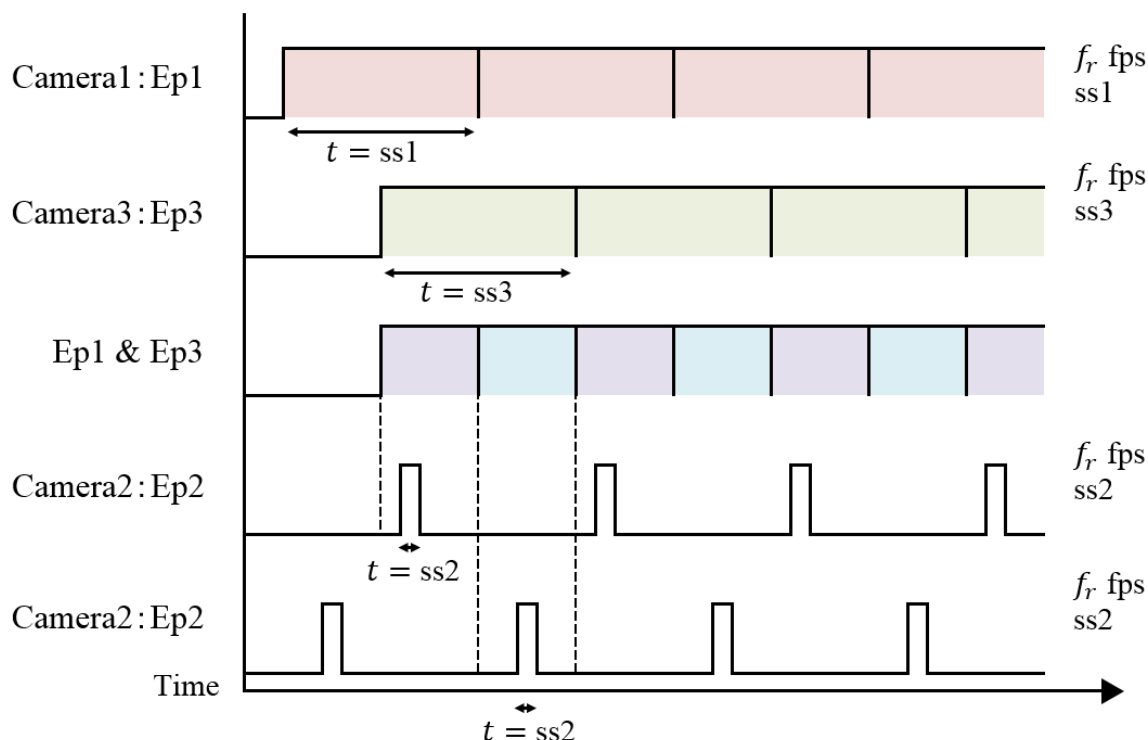


図 5-11 各カメラの露光時間 ( $E_{p1}, E_{p2}, E_{p3}$ ) とシャッタタイミング

## 5.2 提案手法の実証実験

### 5.2.1 撮影実験環境

実際に体育館においてバドミントン練習風景を、複数台のカメラを用いて非同期撮影し、それらの映像を用いてシャトルの 3 次元位置推定に関する実証実験を実施した。本研究では、多視点カメラとしてキヤノン社 EOS 5D Mark II を用いて、1920画素×1080画素の解像度の映像を毎秒30枚撮影する。図5-2に示すように、長露光時間カメラをY軸、X軸と直交するように各1台、短露光時間カメラをY軸と直交するように1台設置する。シャッタ速度（露光時間）は各々1/30秒（図5-12 Camera1, 3）と1/200秒（図5-12 Camera2）に設定する。バドミントン競技は体育館施設での競技であり、シャッタ速度を1/200秒以上速く設定して撮影すると、不十分な光源環境により、5.1節で述べた画像上のシャトル領域を求めることができない。従って、本研究で設定する短露光時間を1/200秒と定義する。各カメラは事前にキャリブレーションを行っている。また、提案手法で用いる背景差分処理は、照明環境の影響を受けることから、処理対象となるシーケンスを撮影する直前に背景画像を撮影した。撮影開始タイミングの同期（頭出し）は手動で行う。

バドミントンシャトルは非常に高速に移動するが、図5-12に示すように、短露光時間で撮影された画像では、ブラーのない像が観測されている。一方、長露光時間カメラで撮影した画像では、大きなモーションブラーが発生し、シャトルは線として観測されている。このような観測像を用いて推定された 3 次元位置には、ブラーによる不確実性が存在するが、撮影時刻の非同期性の影響を軽減することができる[46]。

図5-8, 9, 10に示すように、露光時間を長く設定したCamera1, 3で撮影した画像から得られた、シャトル領域の 3 次元形状（3 次元線）のボクセル要素を、露光時間を短く設定したCamera2



で撮影した画像上に投影し，観測線が存在するか否かを判定した．その結果得られた 3 次元位置を，図5-10 青※プロットで示す．非同期で撮影した多視点映像のみを用いているにも関わらず，短露光時間で検出されたブラーの少ない観測像を用いた精度の高い 3 次元位置の推定が実現されていることが確認できる．

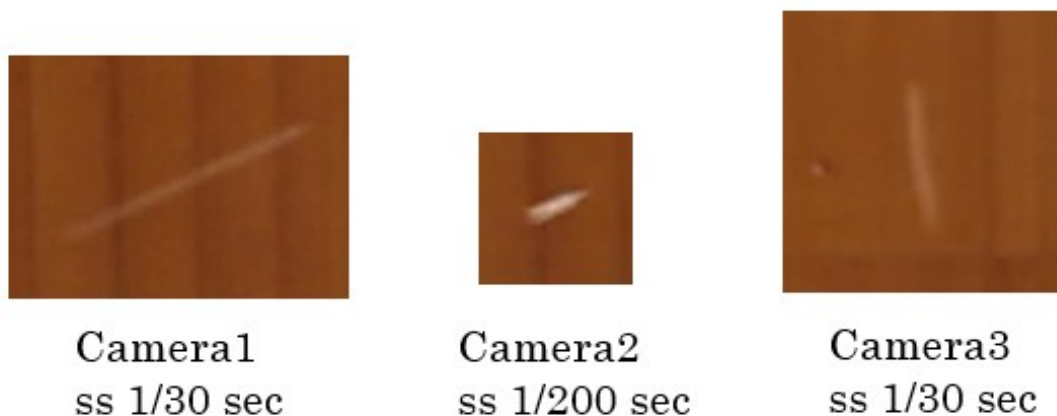


図 5-12 各カメラのシャッタ速度設定値による撮影画像例

### 5.2.2 CG シミュレーションを用いた提案手法の実証実験

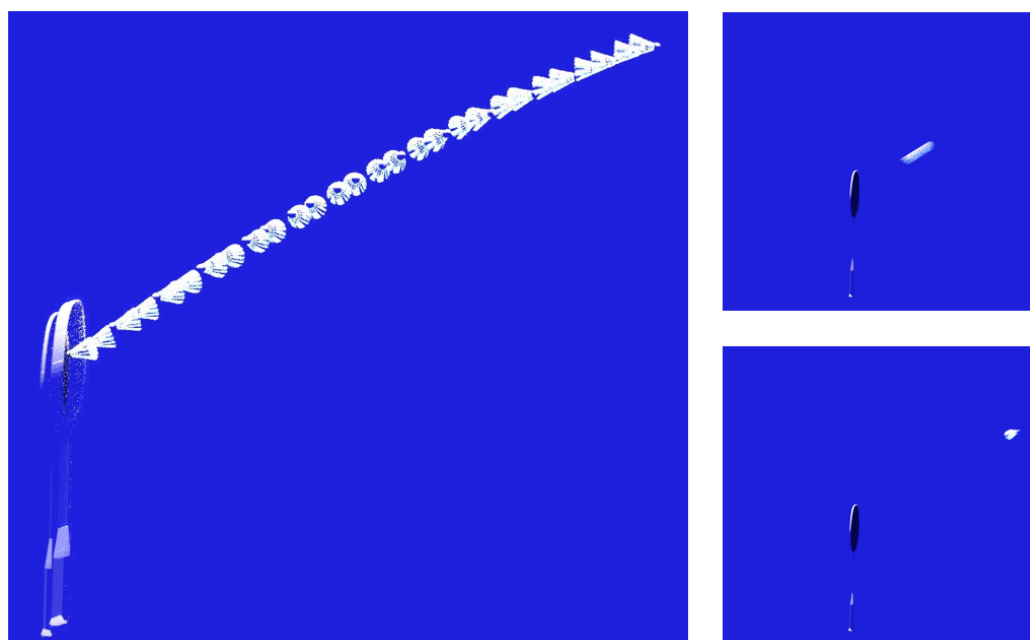


図 5-13 左：シャトルの剛体シミュレーション（正解値），  
右上：露光時間を長く設定したCGモデル（シャトル）シミュレーション，  
右下：露光時間を短く設定したCGモデル（シャトル）シミュレーション

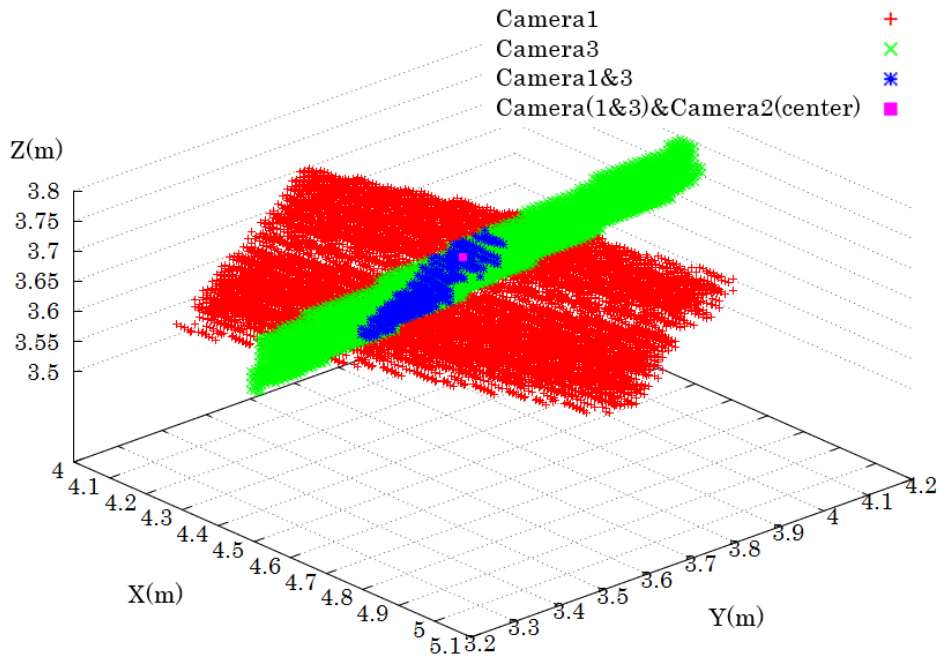


図 5-14 CG モデルシミュレーション画像を用いた提案手法の実証実験結果

前節では、実写映像を用いて提案手法の有効性を確認したが、実写映像ではシャトルの厳密な正解値の獲得が難しいため、本節では、CGシミュレーション画像を用いて提案手法の実証実験を実施することで、正解位置と推定位置の比較を行い、推定誤差を求める。

本節では、CGシミュレーションを用いた提案手法の実証実験について述べる。まず、図5-13に示すように、バドミントンラケットとシャトルのCGモデルを作成する。作成には、blender2.73を使用し、blenderに搭載されている物理エンジンを用いて剛体シミュレーションを実施する。シャトルのCGモデルは、質量 (5g)、大きさ (7cm) を設定し、重力加速度、初速を与え、シャトルの1往復の軌道をシミュレーションする。ラケットは、一般的な質量 (90g) を設定し、シャトル (往路) と衝突させる。衝突後のシャトル (復路) のシミュレーション画像を実証実験で用いる。また、カメラは、実写時の環境と同様にカメラ配置し、解像度 (1920画素×1080画素)、フレームレート (30fps) を設定する。blenderでは、カメラのシャッタ速度の設定項目が存在しないため、モーションプレーを伴うシャトルを、過去4フレームを用いて生成する。この4フレームの設定値は、Camera1, 3 (図5-13右上：露光時間を長く設定した場合に相当) に与え、1.2フレームの設定値をCamera2 (図5-13右下：露光時間を短く設定した場合に相当) に与える。以上のように、シャトルのCGモデルシミュレーションを3台の仮想カメラを用いてレンダリングを行う。

CGシミュレーション画像を用いて提案手法の実証実験を実施した。図5-13に示すように、モーションプレーを伴うシャトルのシミュレーション画像を用いることで、実写時の実証実験結果と同様に、3次元観測線を推定できていることがわかる (図5-14青プロット)。さらに、モーションプレーが比較的少ないシミュレーション画像を用いることで、精度の高い3次元位置の推定が実現されていることが確認できる (図5-14桃色プロット)。

### 5.2.3 CG シミュレーションを用いた比較実験

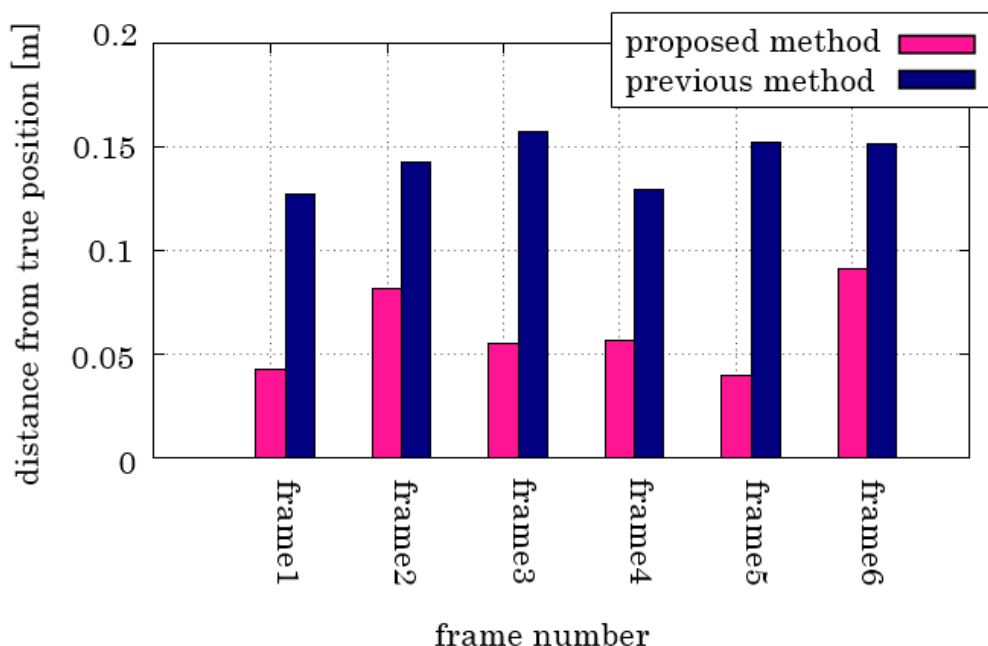


図 5-15 提案手法と従来手法の推定誤差の比較実験結果

5.2.2項で述べた実験環境中で提案手法と従来手法の推定誤差との比較実験を実施した。モーショングラフ画像を重ね合わせ、被写体の観測像の共通部分の中心を推定位置とした研究 [48, 49] を従来手法とし、6フレームのシミュレーション画像に対して、位置推定実験を実施した。図5-15に示すように、従来手法の推定誤差の平均は、約 0.14m であった。一方、提案手法の推定誤差の平均は、約 0.06m であった。提案手法は、従来手法と比較して、誤差低減率 57% であった。このような結果から、提案手法の有効性を確認できる。提案手法では、Camera2の速いシャッター速度で撮影した画像に対して、被写体の中心を推定位置と定義している。しかし、シャトルの正解値は、シャトルのコルク部分であり、提案手法においても、平均 0.06m の誤差が生じている。バドミントンシャトルは、物体の形状が複雑であり、シャトルの位置は、形状の重心ではなく、シャトルのコルク部分の重心をさす。従って、2次元画像上においてシャトルのコルク部分の検出が可能となれば、実証実験結果の推定誤差が軽減できると考えられる。

### 5.2.4 実環境の実証実験及びCG シミュレーションを用いた実証実験

本節では、実環境の実証実験、その実環境のシーケンスと類似したシャトルのCGシミュレーションを用いた実証実験及び、変則的なシャトルのCGシミュレーション画像を用いた実証実験に関して述べる。

まず、5.2.1項で述べた撮影実験環境において撮影した変則的な移動を伴うシャトルのシーケンスに対して提案手法の実証実験を行った。図5-16, 17, 18に示すように、シャトルは、打ち始めから移動方向が定まるまでの数フレームの間、変則的な動きを伴う。スマッシュ（高い位置から、相手コートに一直線に落下する打球）のような速い軌道は、約2フレームの間、変則



的に移動し、その後移動方向が定まる。一方で、ヘアピン（ネット際に落ちてきたシャトルを逆にネット際に落とす打球）のようなゆっくりとした軌道は、約6フレームの間変則的に移動し、その後移動方向が定まる。本研究の処理対象とするフレームは、変則的な動きを伴う打ち始めから約6フレームの間とする。なお、6フレーム後の位置推定に関しては、これまでに組み込んだ研究成果として報告している[46]。図5-20に実環境のシーケンスデータに対して提案手法を適用した結果を示す。このように打ち始めの変則的な移動を伴うシャトルに対して、3次元位置を推定可能としていることが確認できる。

次に、実環境のシーケンスデータに類似したCGシミュレーション実証実験を行った。実環境と同等のシャトルの観測像を生成するために、長露光時間撮影では、シャトルのモーショングラフの重みを3.0に設定し、短露光時間撮影では、重みを1.0に設定した。図5-16, 17, 18に示すように、シャトルのCGモデルを実環境と同様の軌道でシミュレーションできていることが確認できる。このように生成したCGシミュレーション画像を用いて、提案手法を適用した結果を図5-21に示す。また図5-21の実験結果の位置推定誤差を図5-22に示す。5.2.3項で述べた比較実験と同様に提案手法と従来手法の推定誤差との比較実験を実施した。従来手法の推定誤差の平均は約 0.07m、提案手法の推定誤差の平均は約 0.04m であり、提案手法の有効性を確認できた。

次に、変則的なシャトルのCGシミュレーション画像を用いた実証実験を行った。図5-23に示すように、シャトルのCGモデルは急激な回転を含んでいる。モーショングラフの重みは、それぞれ長露光時間撮影では0.7、短露光時間撮影では1.5に設定した。5.2.3項で述べた比較実験と同様に提案手法と従来手法の推定誤差との比較実験を実施した。図5-25から、急激な回転を含むシャトルのシーケンスに対して、シャトル領域が3次元復元され、その3次元位置が推定できていることが確認できる。従来手法の推定誤差の平均は約 0.09m、提案手法の推定誤差の平均は約 0.06m であり、提案手法の有効性が確認された。図5-24には提案手法と従来手法の位置推定誤差がほぼ同じシーケンスが存在する。これは、2台の撮影画像から復元できる3次元シャトル領域が小さく、推定3次元位置に差が生じにくかったためである。一方で、2台の撮影画像から復元する3次元シャトル領域が大きい場合、従来手法は、不確実性が多く含まれる領域の共通部分の中心を推定位置と定義することから推定3次元位置に大きな差が生じる。従って提案手法は、2台の撮影画像から復元される3次元シャトル領域が大きいほど、位置推定精度が向上することが考えられる。また、2台の長露光時間カメラの露光時間は、両方のカメラの露光中にシャトルが共通して撮像されるよりも長くする必要がある。しかし、露光時間を長くしすぎると、撮影画像が白とびするなどの問題が発生する。

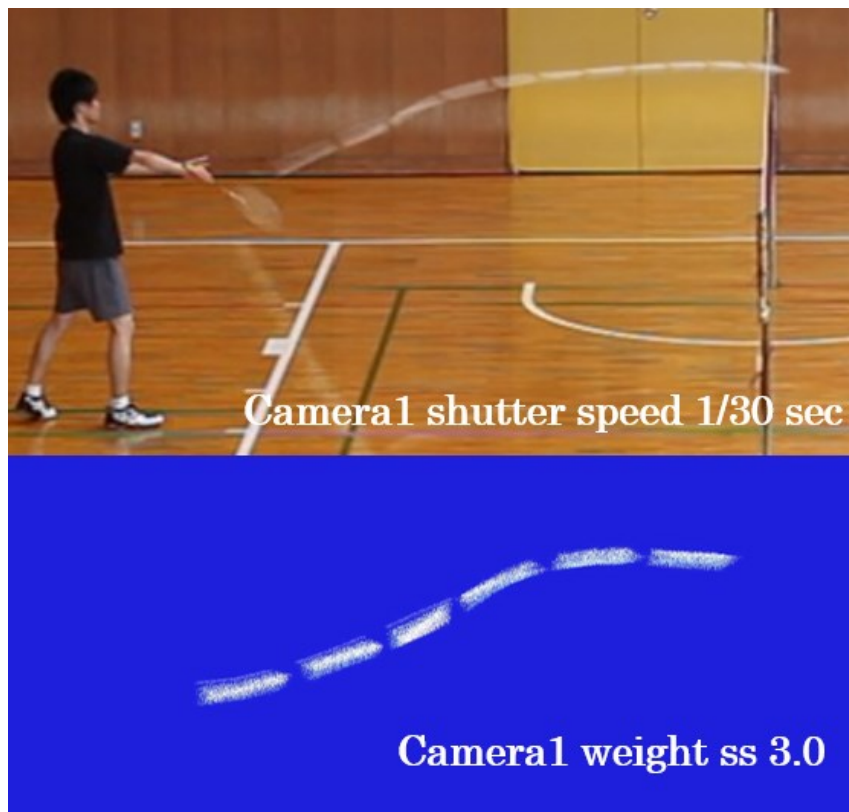


図 5-16 【Camera1】上：実環境におけるシーケンスデータ，  
下：実環境のシーケンスと同様の軌道のCGシミュレーション

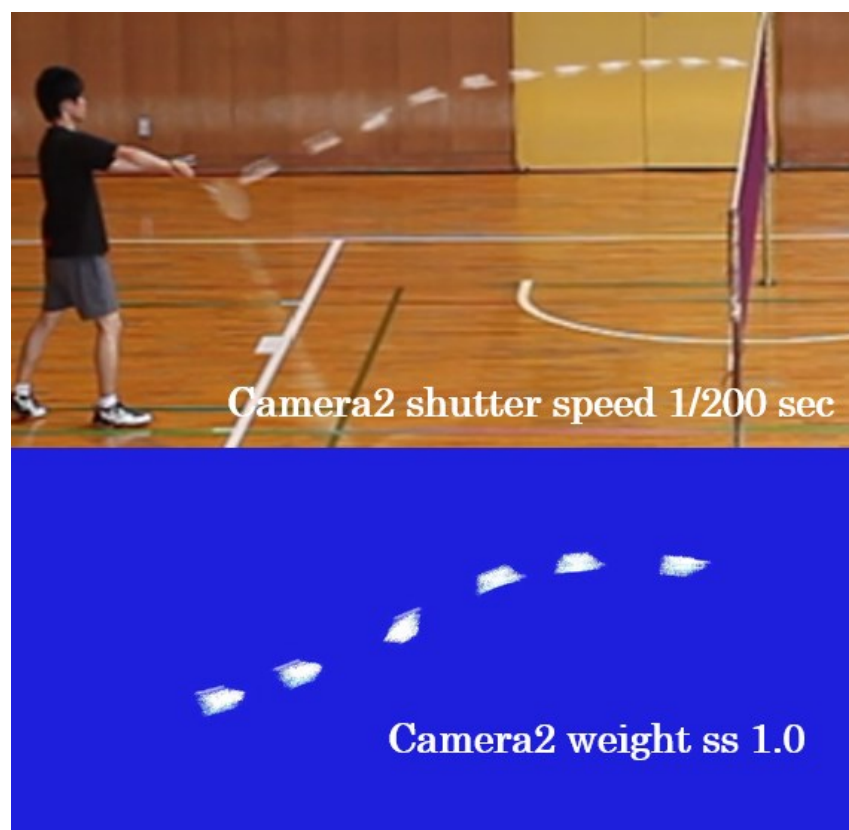


図 5-17 【Camera2】上：実環境におけるシーケンスデータ，  
下：実環境のシーケンスと同様の軌道のCGシミュレーション

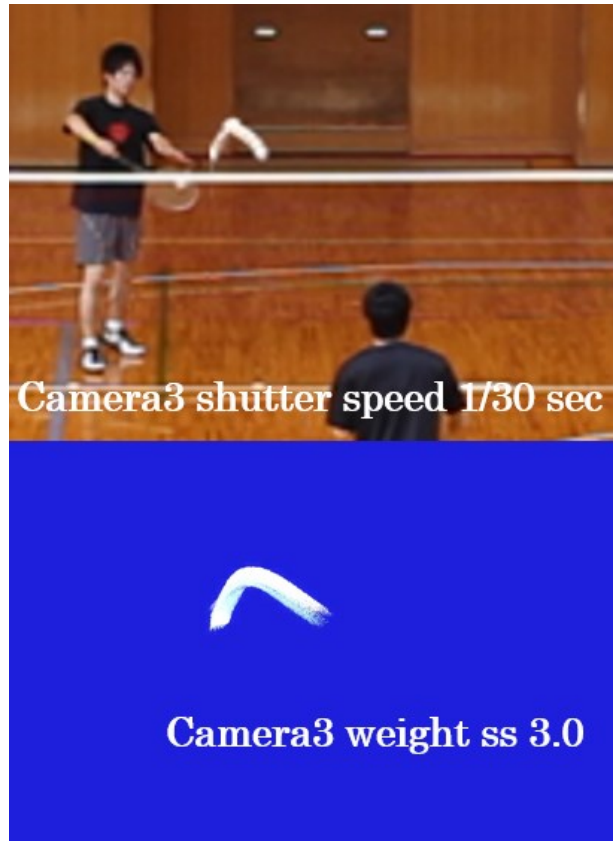


図 5-18 【Camera3】上：実環境におけるシーケンスデータ，  
下：実環境のシーケンスと同様の軌道のCGシミュレーション

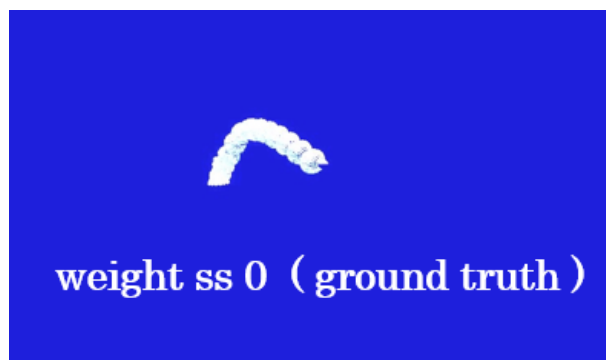
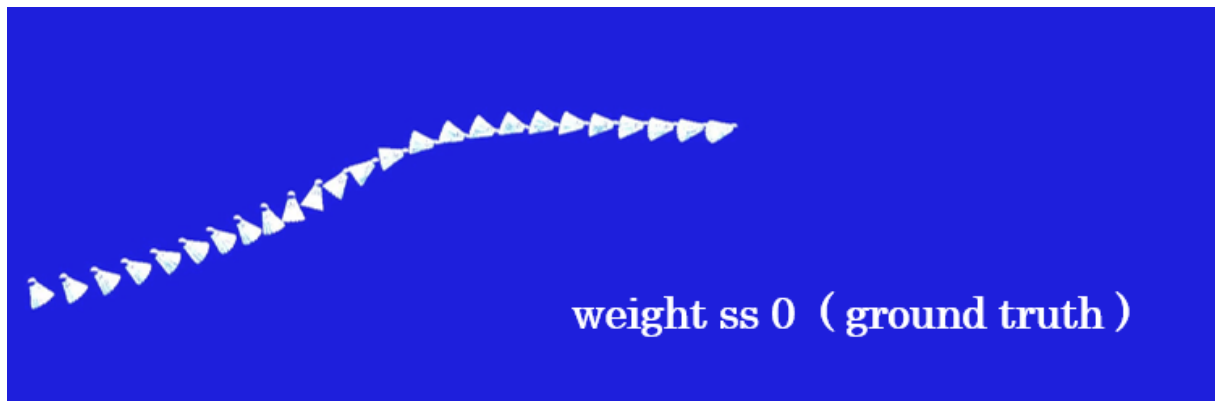


図 5-19 CGシミュレーションの真値の軌道

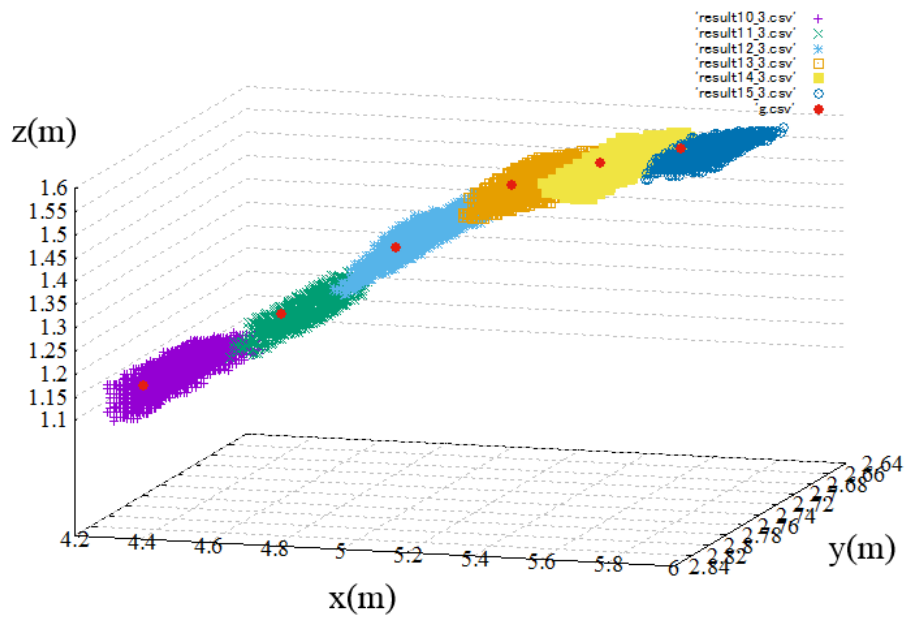


図 5-20 実環境のシーケンスデータに対して提案手法を適用した結果

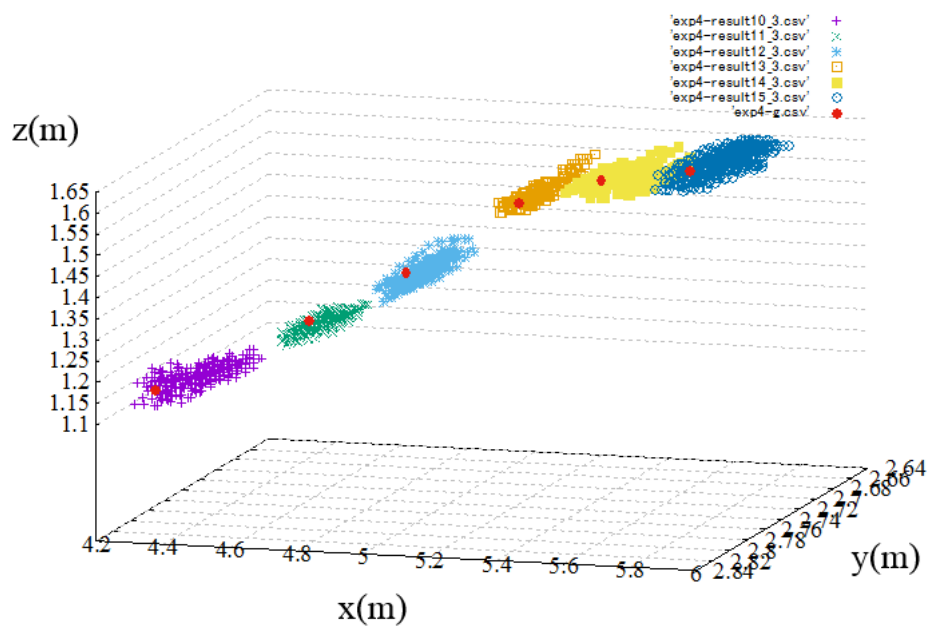


図 5-21 実環境のシーケンスと同様の軌道のCGシミュレーション画像に提案手法を適用した結果

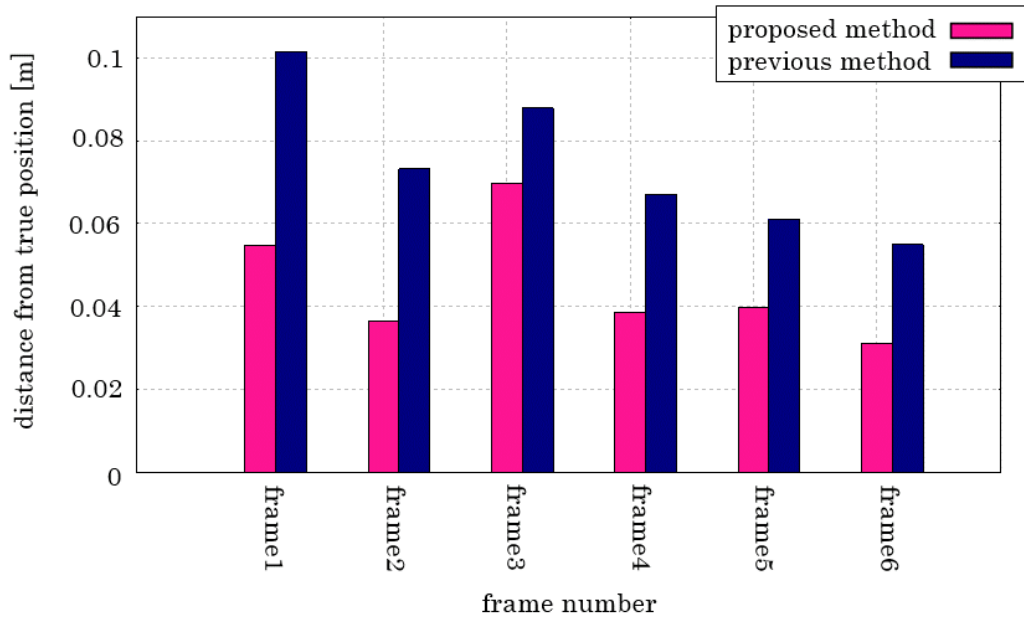


図 5-22 図 5-21 の実験結果より従来手法との比較

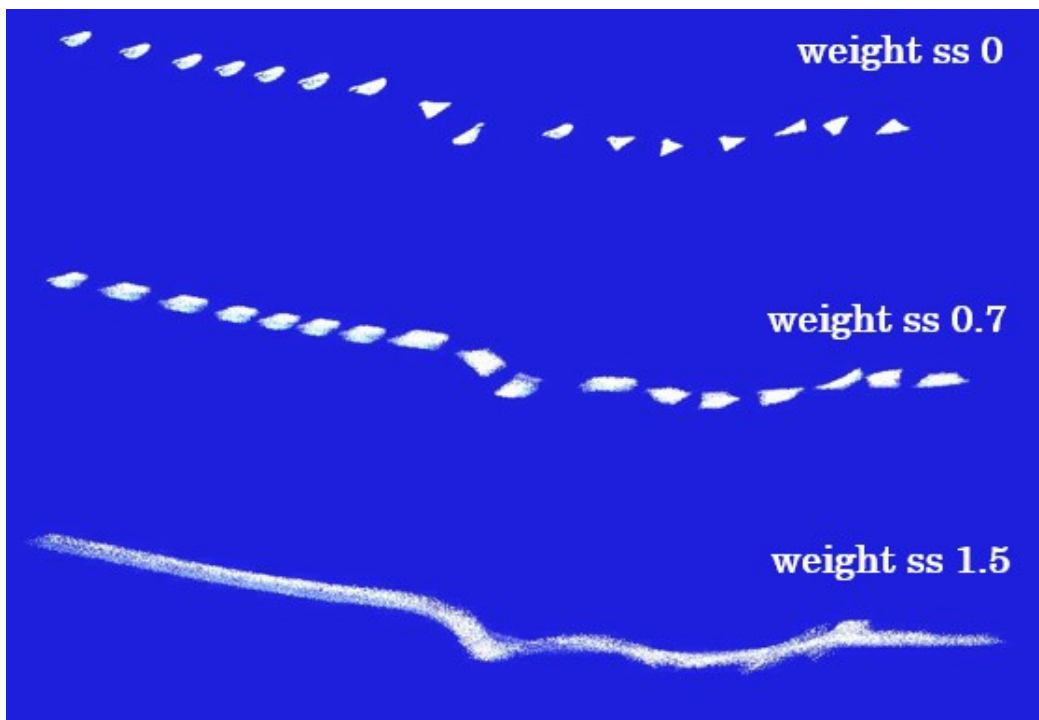


図 5-23 変則的なシャトルのCGシミュレーション，  
 上段：真値，中段：短露光時間シミュレーション，下段：長露光時間シミュレーション

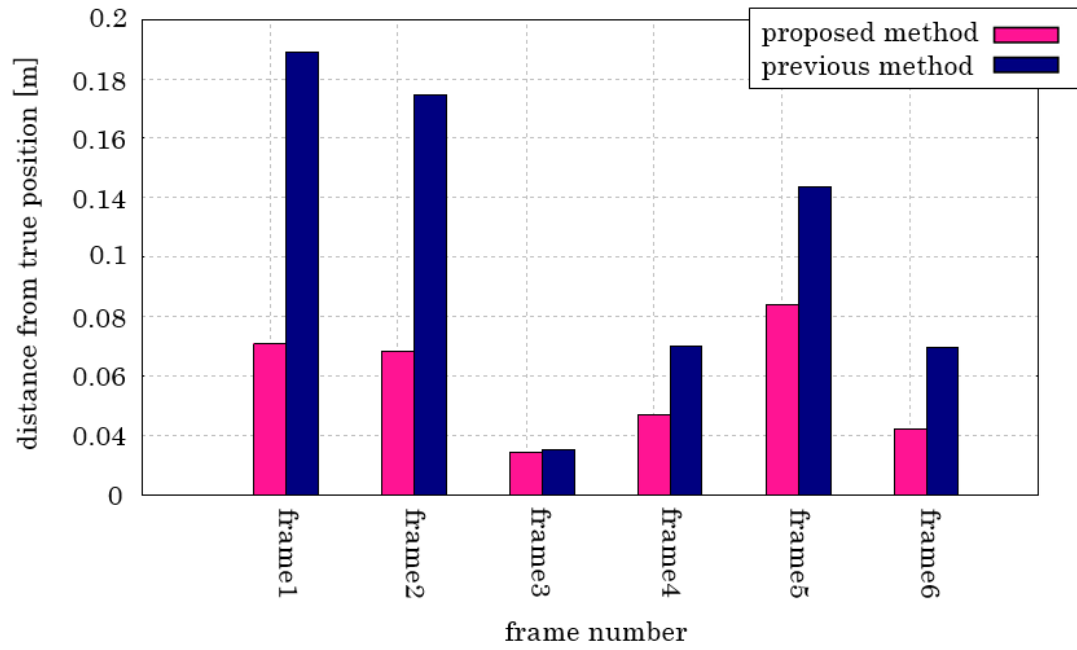


図 5-24 図 5-23 のシミュレーション画像に提案手法を適用した結果の位置推定誤差

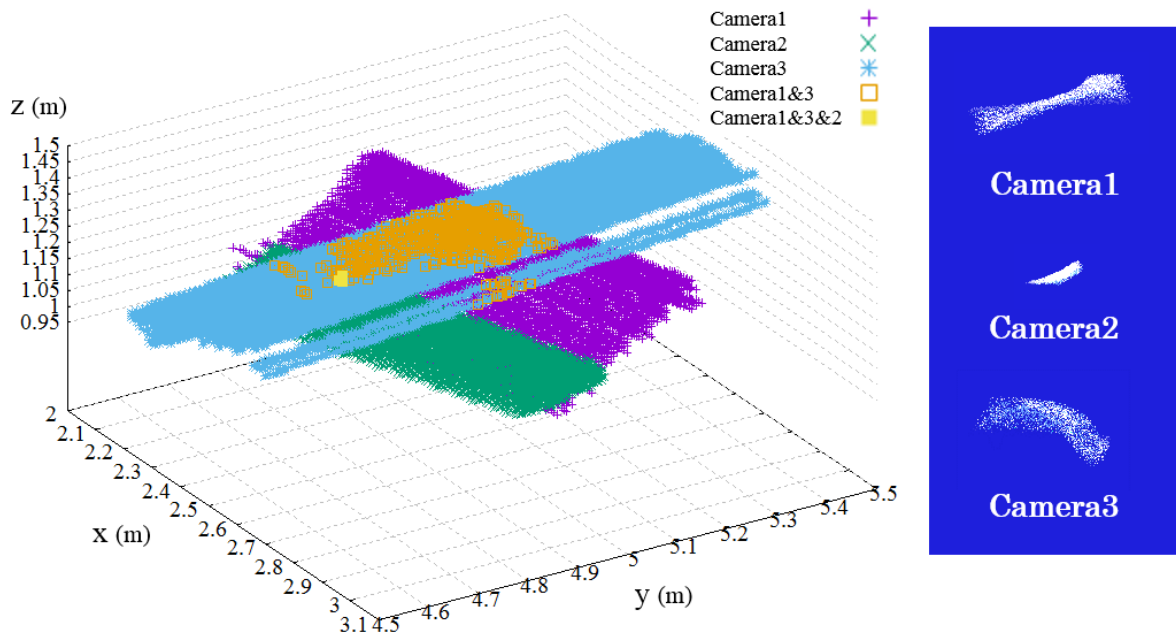


図 5-25 図 5-23 のシミュレーション画像に提案手法を適用した結果の例



## 5.2.5 野球を対象とした実環境の実証実験

本節では、高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定の応用事例として、野球のボールを対象に、提案手法を適用する。

東京大学本郷キャンパス野球場ブルペンにて、撮影実験を実施した。軌跡推定を対象とする領域は、ホームベース手前周辺、約 3 m とする。本研究では、多視点カメラとして SONY 社 FDR AX-1 を用いて、3840 画素×2160 画素の解像度の映像を撮影する。図 5-26 に示すように、長露光時間カメラを 2 台、短露光時間カメラを 1 台、投手がボールを投げる方向と平行に設置する。シャッタ速度(露光時間)とフレームレートは、各々 1/30 秒, 30fps (図 5-27, 29 Camera1, 3) と 1/2000 秒, 60fps (図 5-27, 29 Camera2) に設定する。各カメラは事前にキャリブレーションを行っている。本研究で実施した撮影場所は屋外であり、十分な光源環境を確保できることから、本研究で設定する短露光時間を 1/2000 秒と定義する。高速かつ変則的に移動するボールを対象シーケンスとするため、図 5-27, 29 に示すように、バウンドを含むボールの 2 本の軌道に対して提案手法を適用する。

図 5-28, 30 に野球のボールの軌道に提案手法を適用した結果を示す。2 本の軌道はそれぞれ 5 フレームから構成される。2 台の長露光時間撮影によってモーションブラーを含むボール領域が復元され、短露光時間撮影によるボールの位置が推定できていることがわかる。図 5-28, 30 の 3 フレーム目の長露光時間撮影によって復元された 3 次元観測線は、途切れていることが確認できる。これは、バッターボックスの白いラインとボールの軌道を描く色が類似しているため、前処理の背景差分処理により消滅してしまう。従って、3 次元位置精度を向上するためには、対象物体と同様の色の背景がないほど良い。

このように、バドミントン競技以外のスポーツにおいても提案手法は、有効に位置精度を推定できることが確認できる。また、ボールがバウンドするような、バドミントンシャトルの変則的な移動とは異なる変則的な移動をする物体においても良好な 3 次元位置推定を可能とした。

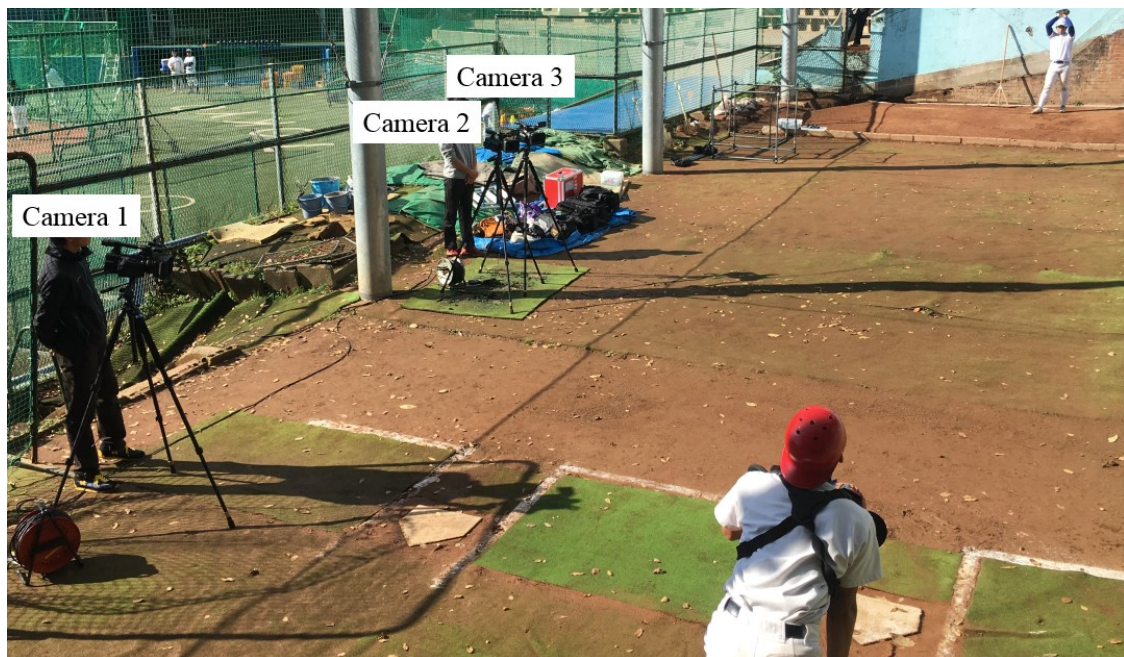


図 5-26 カメラ配置及び撮影風景 (東京大学本郷キャンパス)

Scene 1



Camera 1 ss 1/30 sec



Camera 2 ss 1/2000 sec



Camera 3 ss 1/30 sec

図 5-27 各カメラのボールの写り方 (Scenel : 5 フレーム)

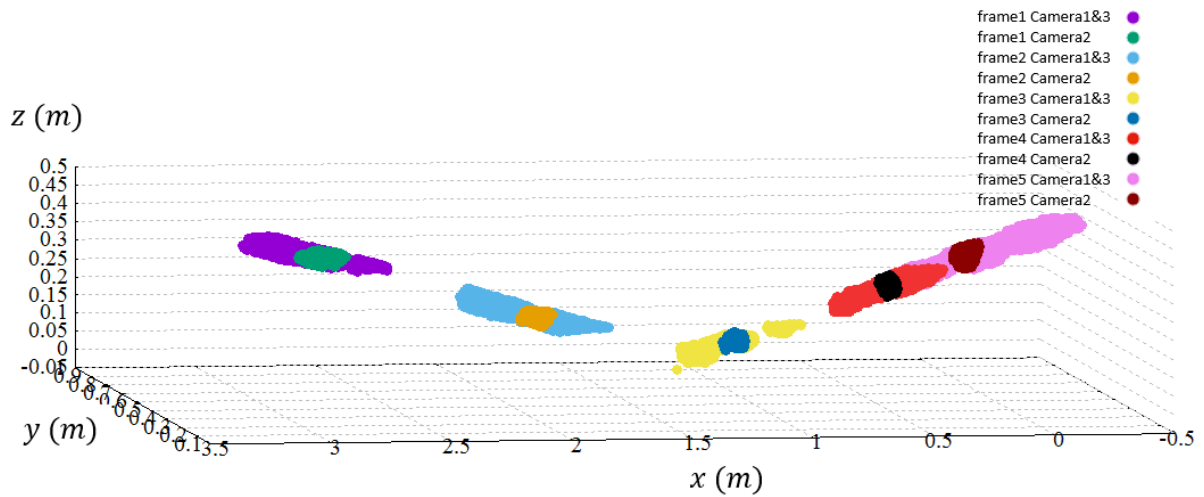


図 5-28 Scene 1 を提案手法に適用した推定結果



Scene 2



Camera 1 ss 1/30 sec



Camera 2 ss 1/2000 sec



Camera 3 ss 1/30 sec

図 5-29 各カメラのボールの写り方 (Scene2 : 5 フレーム)

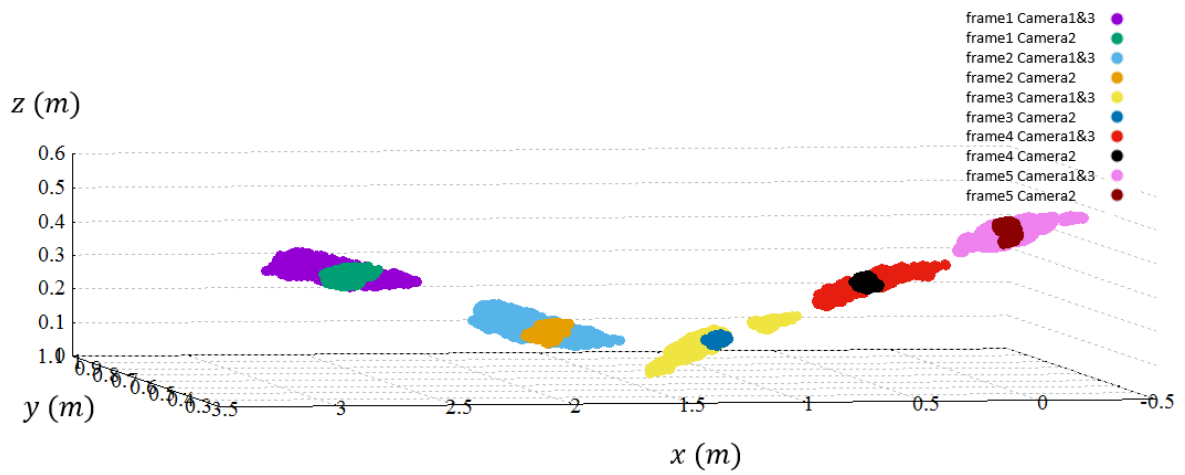


図 5-30 Scene 2 を提案手法に適用した推定結果

## 第6章 結論

本研究では、高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定法を提案した。本研究で対象としている高速に移動する物体は、撮影した画像にモーションブレンダーが観測される物体を高速に移動する物体と定義した。また、対象物体の外部から働く力によって急激な移動を伴う状態を変則的な移動と定義した。高速かつ変則的な移動を伴う物体の事例として、バドミントンシャトルを対象とし、提案した三つの軌跡推定手法の結果を以下にまとめる。

### 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跡推定法

観測解像度が低い問題を、2視点で撮影した画像に対して、シャトル以外の移動物体と輝度振幅が激しい領域をマスク処理する手法、運動モデルに基づくカルマンフィルタ及び、確率モデルに基づくパーティクルフィルタを適宜併用する手法を組み合わせることで解決を図った。色情報を用いた単純なパーティクルフィルタだけでは追跡が困難である問題を、バドミントンの競技特性を利用して解決した。具体的には、バドミントンの競技特性上、シャトルはネット周辺を必ず通過することを利用し、パーティクルフィルタの速度ベクトルをシャトルの移動状態に合わせて適用した。さらに、シャトルの移動特性とパーティクルフィルタの特性を利用し、シャトルを打ったタイミング検出に成功した。

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、提案手法の有効性を示した。

### モーションブレンダーを活用したバドミントンシャトル追跡手法

追跡を困難とさせている要因である、対象物体の移動速度がラリー中で低速から高速まで大きく変化する問題について取り組んだ。対象物体の移動速度が低速から高速まで大きく変化する問題は、モーションブレンダーを活用して物体の移動速度を観測することにより対応を試みた。具体的には、3次元空間中の粒子を用いて、粒子の形状をモーションブレンダーの3次元形状とさせることで、シャトルの位置と速度を獲得した。また、シャトルの速度に対し、適切な方法で観測したデータをカルマンフィルタに適用することにより、低速から高速まで大きく変化するシャトルの安定した追跡処理を実現した。さらに、算出した運動方程式より、時間を遡ることで、非常に高速に移動するシャトルの位置推定をも可能とした。

提案手法の実証実験を実施し、室内環境の背景色を考慮したシャトルの観測色情報を用いた尤度関数の妥当性を確認した。また、モーションブレンダーから得られる速度は、シャトルの速度が速い場合には、比較データと差異が認められず、シャトルの追跡処理に有効に機能することが確認された。シャトルの移動速度が低速な場合は、モーションブレンダーから得られる速度情報の信頼性は低く、フレーム間速度の信頼性が高くなることを確認した。

提案手法を実際のバドミントンのラリー映像に適用した結果、位置情報だけを観測データとしてカルマンフィルタに与えた場合よりも、約30%の誤差を低減できることを確認した。これらの実験結果から、モーションブレンダー情報を活用し、位置と速度情報を観測データとしてカルマンフィルタへ与える提案手法は、移動速度の大きな変化、速度差によって観測形状が変化することに対して有効であることを確認した。

### 異なるシャッター速度で撮影した映像を用いたバドミントンシャトル軌跡推定法

3次元位置推定を困難とさせている要因である、非同期撮影映像を用いた場合に、高速かつ変則的に移動する物体の観測形状が多様に変化する問題について取り組んだ。露光時間を長く設定したカメラで撮影した映像を用いてシャトルの3次元軌道を復元し、そこに短い露

光時間で撮影した画像で観測されたシャトル領域を投影することにより、正確な 3 次元位置推定を実現し、問題を解決した。さらに、本手法は、非同期撮影された短露光時間画像が追加されると、高精度で推定される 3 次元位置が増加するという特長も有する。

バドミントンシャトルは、高速かつ変則的に移動する区間が打ち始めの約 6 フレームであり、そのフレーム区間に焦点を当て提案手法の実証実験を実施し、提案手法の有効性を確認した。実写画像と CG シミュレーション画像を用いた実証実験により、従来手法と提案手法の比較実験を実施し、提案手法の有効性を確認した。提案手法と従来手法の位置推定誤差がほぼ同じシーケンスが存在したが、2 台の撮影画像から復元できる 3 次元シャトル領域が小さく、推定 3 次元位置に差が生じにくかったためであると考察した。一方で、2 台の撮影画像から復元する 3 次元シャトル領域が大きい場合、従来手法は、不確実性が多く含まれる領域の共通部分の中心を推定位置と定義することから推定 3 次元位置に大きな差が生じる。従って、提案手法は、2 台の撮影画像から復元される 3 次元シャトル領域が大きいほど、位置推定精度が向上することが考えられる。

さらに、高速かつ変則的な移動を伴う物体の応用事例として野球ボールを取り上げ、投手の投げるボールを対象に、提案手法を適用した。バドミントン競技以外のスポーツにおいても提案手法は、有効に 3 次元位置を推定できることを確認した。また、ボールがバウンドするような、バドミントンシャトルの変則的な移動とは異なる移動をする物体においても良好な 3 次元位置推定を可能とした。

このように、非同期撮影映像を用いた場合の高速かつ変則的に移動する物体の軌跡推定を実現し、提案手法の有効性を確認した。

## 謝辞

本博士論文の執筆及び研究にあたり、数々のご助言、ご指導を頂いた筑波大学システム情報系 北原 格 准教授に心から感謝いたします。研究とは何か、研究者とは何かを常に考えさせながら、研究計画、方針を明確に指示する北原先生の貴重なご指導がなくては、本論文の完成はありませんでした。今、こうして論文をまとめるにあたり、そして北原先生のご指導の下での博士前期、後期課程の研究生生活を終えるにあたり、心より感謝の意を表すとともに、これまでの貴重な経験を今後の研究生生活に生かしていきたいと考えています。

さらに、博士前期、後期課程の中でのゼミ、ミーティングを通して、懇切丁寧に指導して頂いた筑波大学 大田 友一 名誉教授、並びに本学システム情報系 亀田 能成 准教授に心から感謝いたします。

博士学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂いた本学システム情報系 福井 和広 教授、並びに日本体育大学 角田 貢 准教授に心から感謝いたします。

本研究において、数多くのご助言、ご指導を頂いた、本学画像情報研究室卒業生の糟谷 望 博士、佐藤 秀昭 博士、林 将之 博士、Dr. Polikovskiy Senya 並びに本学人間情報処理研究室卒業生の Dr. Maria Alejandra Quiros-Ramirez に心から感謝いたします。

本研究の撮影実験の実施にあたり、本学画像情報研究室卒業生の大川原 友樹君、河内 駿君、本学画像情報研究室の上山 嵩君、笹井 翔太君、山中 一希君、出川 諒君の熱心な協力を得たことを記すとともに心より感謝いたします。中でも上山 嵩君には、撮影映像シーケンスのモデルとして様々なバドミントンのショットを実演して頂いたことを記すとともに、心より感謝いたします。また、電子情報通信学会論文誌の執筆にあたり、数多くのご助言を頂いた本学画像情報研究室卒業生の明智 那央君に心より感謝いたします。また、日頃から活発な議論をして頂いた本学画像情報研究室の皆様にも心より感謝いたします。

本学システム情報系 鈴木 健嗣 准教授には、筆者を科学技術振興機構 (JST) CREST 研究の一員として頂き、研究成果の実用化に向けた数々のご助言、ご指導を頂いたことを記すとともに、心より感謝申し上げます。

東京大学大学院総合文化研究科 進矢 正宏 助教には、東京大学本郷キャンパスにて本研究の撮影実験の手配をして頂き、多大なるご協力を得たことを記すとともに心より感謝いたします。

英国サリー大学 Dr. Adrian Hilton (Head of the Centre for Vision, Speech and Signal Processing, Interim Head of Department and Professor of Computer Vision & Graphics), Dr. Jean-Yves Guillemaut (Lecturer in 3D Computer Vision) 並びに Dr. Hansung Kim (Research Fellow) には、英国にて本研究の応用事例を学ばせて頂き、数多くのご助言、ご指導を頂いたことを記すとともに、心より感謝いたします。中でも、Dr. Hansung Kim には、英国での研究生生活をサポートして頂き、公私共に研究者としての生き方を教えて頂いたことを記すとともに、心より感謝いたします。

最後に、中部大学大学院工学研究科情報工学専攻 藤吉 弘宣 教授には、本学に入学するきっかけを与えて頂き、パターン認識・メディア理解研究会や、画像の認識・理解シンポジウムにて、数多くのご助言、ご指導を頂いたことを記すとともに、心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Heer Gandhi, Michael Collins, Michael Chuang, Priya Narasimhan : “Real-Time Tracking of Game Assets in American Football for Automated Camera Selection and Motion Capture,” *Procedia Engineering*, vol.2, Issue 2, pp.2667-2673, 2010
- [2] Wei-Lwun Lu, Kenji Okuma, James J. Little : “Tracking and recognizing actions of multiple hockey players using the boosted particle filter,” *Image and Vision Computing*, vol. 27, Issues 1-2, pp.189-205, 2009
- [3] Hua-Tsung Chen, Ming-Chun Tien, Yi-Wen Chen, Wen-Jiin Tsai, Suh-Yin Lee : “Physics based ball tracking and 3D trajectory reconstruction with applications to shooting location estimation in basketball video,” *J. Vis. Commun. Image R*, vol.20, Issue 3, pp.204-216, 2009
- [4] Hua-Tsung Chen, Hsuan-Sheng Chen, Ming-Ho Hsiao, Yi-Wen Chen, Suh-Yin Lee : “A Trajectory-Based Ball Tracking Framework with Enrichment for Broadcast Baseball Videos,” *International Computer Symposium (ICS-2006)*, vol. III, pp. 1145-1150, 2006
- [5] Fei Yan, William Christmas, Josef 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, Issue.10, pp.1814-1830, 2008
- [6] Jinchang Ren, James Orwell, Graeme A. Jones, Ming Xu : “Tracking the soccer ball using multiple fixed cameras,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol.113, Issue 5, pp.633-642, 2009
- [7] Hua-Tsung Chen, Wen-Jiin Tsai, Suh-Yin Lee, Jen-Yu Yu : “Ball tracking and 3D trajectory approximation with applications to tactics analysis from single-camera volleyball sequences,” *Multimedia Tools and Applications*, vol.60, Issue 3, pp.641-667, 2012
- [8] Mathieu Salzmann, Raquel Urtasun : “Physically-based Motion Models for 3D Tracking: A Convex Formulation,” *International Conference on Computer Vision (ICCV’11)*, pp.2064-2071, 2011
- [9] Jingchen Liu, Peter Carr, Robert Collins, Yanxi Liu : “Tracking Sports Players with Context-Conditioned Motion Models,” *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’13)*, pp.1830-1837, 2013
- [10] Yuanyuan Ding, Scott McCloskey, Jingyi Yu : “Analysis of Motion Blur with a Flutter Shutter Camera for Non-linear Motion,” *11th European conference on Computer Vision (ECCV’10)*, pp.15-30, 2010
- [11] Firoz Alam, Harun Chowdhury, Chavaporn Theppadungporn, Aleksandar Subic : “Measurements of Aerodynamic Properties of Badminton Shuttlecocks,” *Procedia Engineering*, vol.2, Issue 2, pp.2487-2492, 2010
- [12] Hiromasa Oku, Naoko Ogawa, Kogiku Shiba, Manabu Yoshida, Masatoshi Ishikawa : “How to Track Spermatozoa using High-Speed Visual Feedback,” *30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS’08)*, pp.125-128, 2008
- [13] Kohei Okumura, Hiromasa Oku, Masatoshi Ishikawa : “High-Speed Gaze Controller for Millisecond-order Pan/tilt Camera,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’11)*, pp.6186-6191, 2011

- [14] Nan Jiang, Heng Su, Wenyu Liu, Ying Wu : “Tracking Low Resolution Objects by Metric Preservation,” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’ 11), pp.1329–1336, 2011
- [15] Ranga Narayanaswami, Anastasia Tyurina, David Diel, Raman K. Mehra, Janice M. Chinn : “Discrimination and tracking of dismounts using low-resolution aerial video sequences” , SPIE 8137 Signal and Data Processing of Small Targets 2011 81370H, 2011
- [16] Mayank Rana, Graham Taylor, Ian Spiro, Christoph Bregler : “3D Skeletal reconstruction from low-resolution multi-view images,” Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), pp.58–63, 2012
- [17] Jun Zheng, Geovany A. Ramirez, Olac Fuentes : “Face detection in low-resolution color images,” 7th international conference on Image Analysis and Recognition (ICIAR’ 10), Volume Part I pp.454–463, 2010
- [18] Tao Zhao Ram, Tao Zhao, Ram Nevatia : “Car Detection in Low Resolution Aerial Images,” Image and Vision Computing, Volume 21, Issue 8, 1, pp.693–703, 2003
- [19] Dapeng Chen, Zejian Yuan, Yang Wu, Geng Zhang, Nanning Zheng : “Constructing Adaptive Complex Cells for Robust Visual Tracking,” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’ 13), pp.1113–1120, 2013
- [20] Martin Godec, Peter M. Roth, Horst Bischof : “Hough-based tracking of non-rigid objects,” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’ 11), pp.81–88, 2011
- [21] Joao F. Henriques, Rui Caseiro, Pedro Martins, Jorge Batista : “Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels,” 12th European conference on Computer Vision (ECCV’ 12), pp.702–715, 2012
- [22] Haifeng Gong, Jack Sim, Maxim Likhachev, Jianbo Shi : “Multi-hypothesis motion planning for visual object tracking,” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’ 11), pp.619–626, 2011
- [23] Jianguo Zhang, Shaogang Gong : “People detection in low-resolution video with non-stationary background,” Image and Vision Computing, Volume 27, Issue 4, 3, pp.437–443, 2009
- [24] Changjiang Yang, Ramani Duraiswami, Larry Davis : “Fast Multiple Object Tracking via a Hierarchical Particle Filter,” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’ 05), vol.1, pp.212–219, 2005
- [25] Vasileios Karavasili, Christophoros Nikou, Aristidis Likas : “Visual Tracking by Adaptive Kalman Filtering and Mean Shift,” Artificial Intelligence: Theories, Models and Applications Lecture Notes in Computer Science, vol.6040, pp.153–162, 2010
- [26] Yuan Li, Haizhou Ai, Takayoshi Yamashita, Shihong Lao, Masato Kawade : “Tracking in Low Frame Rate Video: A Cascade Particle Filter with Discriminative Observers of Different Lifespans,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.30, Issue.10, pp.1728–1740, 2008
- [27] Chang Huang, Bo Wu, Ramakant Nevatia : “Robust Object Tracking by Hierarchical Association of Detection Responses,” 10th European Conference on Computer Vision (ECCV’ 08), pp.788–801, 2008



- [28] Fan Yang, Huchuan Lu, Yen-Wei Chen : “Human Tracking by Multiple Kernel Boosting with Locality Affinity Constraints,” 10th Asian Conference on Computer Vision (ACCV’10), Lecture Notes in Computer Science Volume 6495, pp. 39–50, 2010
- [29] Vasileios Belagiannis, Falk Schubert, Nassir Navab, Slobodan Ilic : “Segmentation Based Particle Filtering for Real-Time 2D Object Tracking,” 12th European conference on Computer Vision (ECCV’12), pp.842–855, 2012
- [30] Naiyan Wang, Jingdong Wang, Dit-Yan Yeung : “Online Robust Non-negative Dictionary Learning for Visual Tracking,” International Conference on Computer Vision (ICCV’13), pp.657–664, 2013
- [31] Yoshinori Satoh, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi : “A Color-based Tracking by Kalman Particle Filter,” International Conference on Pattern Recognition (ICPR’04), vol.3, pp.502–505, 2004
- [32] Xinyu Xu, Baoxin Li : “Adaptive Rao-Blackwellized Particle Filter and Its Evaluation for Tracking in Surveillance,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.16, Issue.3, pp.838–849, 2007
- [33] Lung-Ming Chen, Yi-Hsiang Pan, Yung-Jen Chen : “A study of shuttlecock’s trajectory in badminton,” Journal of Sports Science and Medicine (2009) 8, pp. 657–662, 2009
- [34] Zheng Wu, Nickolay I. Hristov, Tyson L. Hedrick, Thomas H. Kunz, and Margrit Betke : “Tracking a Large Number of Objects from Multiple Views,” IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV’09), pp.1546–1553, 2009
- [35] Vladimir Reilly, Haroon Idrees, Mubarak Shah : “Detection and Tracking of Large Number of Targets in Wide Area Surveillance,” 11th European conference on computer vision (ECCV’10), pp.186–199, 2010
- [36] Hailin Jin, Paolo Favaro, Roberto Cipolla : “Visual Tracking in the Presence of Motion Blur,” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05), vol.2, pp.18–25, 2005
- [37] Youngmin Park, Vincent Lepetit, Woontack Woo : “Handling Motion-Blur in 3D Tracking and Rendering for Augmented Reality,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), vol.18, Issue 9 , pp.1449–1459, 2012
- [38] Yi Wu, Haibin Ling, Jingyi Yu, Feng Li, Xue Mei, Erkang Cheng : “Blurred Target Tracking by Blur-driven Tracker,” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’11), pp.1100–1107, 2011
- [39] Shengyang Dai, Ming Yang, Ying Wu, Aggelos K. Katsaggelos : “Tracking Motion-Blurred Targets in Video,” IEEE International Conference on Image Processing (ICIP’06), pp.2389–2392, 2006
- [40] Chang. R, Sio-Hoi Ieng, Benosman. R : “Using structures to synchronize cameras of robots swarms,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008. pp.3266–3271, 2008
- [41] Noguchi.M, Kato.T : “Geometric and Timing Calibration for Unsynchronized Cameras Using Trajectories of a Moving Marker,” IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV’07), pp.20, 2007
- [42] Hasler.N, Rosenhahn.B, Thormahlen.T, Wand.M, Gall.J, Seidel.H.-P : “Markerless Motion Capture with unsynchronized moving cameras,” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’09), pp.224–231, 2009

- [43] Tamaki.S, Saito.H : “Reconstruction of 3D Trajectories for Performance Analysis in Table Tennis,” 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), pp.1019–1026, 2013
- [44] Giacomo Boracchi, Vincenzo Caglioti, Alessandro Giusti : “Estimation of 3D Instantaneous Motion of a Ball from a Single Motion-Blurred Image,” Computer Vision and Computer Graphics. Theory and Applications Communications in Computer and Information Science, vol.24, pp.225–237, 2009
- [45] Vincenzo Caglioti , Alessandro Giusti : “Recovering Ball Motion from a Single Motion-Blurred Image,” Computer Vision and Image Understanding, vol.113, Issue 5, pp.590–597, 2009
- [46] Hidehiko Shishido, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta : “A Trajectory Estimation Method for Badminton Shuttlecock Utilizing Motion Blur,” 6th Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT’13), LNCS 8333, pp.325–336, 2014
- [47] Hidehiko Shishido , Itaru Kitahara , Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta : “Trajectory Estimation of a Fast and Anomalously Moving Badminton Shuttle,” International Workshop on Advanced Image Technology, 2015
- [48] Kenta Takanohashi, Yoshitsugu Manabe, Yoshihiro Yasumuro, Masataka Imura, Kunihiro Chihara : “Measurement of Ball Trajectory using Motion Blur,” International Workshop on Advanced Image Technology, P04–8, 2006
- [49] Xing Chen, Robert J. Woodham, Wolfgang Heidrich : “Motion Streaks: High Speed Motion Capture with Consumer-Grade Cameras,” the 2nd IEEE International Workshop on Computational Cameras and Displays (CCD’13), held in conjunction with CVPR 2013, 2013
- [50] H. Fujiyoshi, S. Shimizu, Y. Nagasaka, T. Takahashi : “A Method of Pseudo Stereo Vision from Images of Cameras Shutter Timinig Adjusted,” ROBOCUP2004 SYMPOSIUM, 2004
- [51] Dr. R. Savarirajan, Arignar Anna Govt : “An Analysis of Playing Pattern of Tamilnadu State Junior Badminton Players,” International Journal of Health, Physical Education and Computer Science in Sports, Volume12, No.1, pp.24–27, 2013
- [52] L. Díaz-Más, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, R. Medina-Carnicer : “Shape from silhouette using Dempster-Shafer theory,” Pattern Recognition, vol.43, Issue 6, pp.2119–2131, 2010

# 研究業績

## 1. 査読付雑誌論文

1. 宍戸英彦, 北原 格, 亀田能成, 大田友一, “異なるシャッター速度で撮影した映像を用いたバドミントンシャトル軌跡推定法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 69, No. 8, pp. J237-J244, 2015
2. 宍戸英彦, 北原 格, 亀田能成, 大田友一, “モーションブラーを活用したバドミントンシャトル追跡手法”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J98-D, No. 7, pp. 1083-1097, 2015

## 2. 査読付国際会議論文

1. Hidehiko Shishido, Yoshinari Kameda, Itaru Kitahara, Yuichi Ohta, “3D Position Estimation of Badminton Shuttle Using Unsynchronized Multiple-View Videos,” Augmented Human International Conference, 2016
2. Hidehiko Shishido, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta, “Trajectory Estimation of a Fast and Anomalously Moving Badminton Shuttle,” International Workshop on Advanced Image Technology, 2015
3. Hidehiko Shishido, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta, “A Trajectory Estimation Method for Badminton Shuttlecock Utilizing Motion Blur,” 6th Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT' 13), LNCS 8333, pp. 325-336, 2014

## 3. その他の公表論文

1. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “映像情報を用いたバドミントンシャトル軌跡推定法”, SAT テクノロジーショーケース 2016, p-98, 2016
2. 宍戸英彦, 北原 格, 亀田能成, 大田友一, “異なるシャッター速度で撮影した映像を用いたバドミントンシャトルの 3 次元位置推定法”, 2014 年映像情報メディア学会冬季大会, 9-3, 2014
3. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “高速かつ変則的に移動するバドミントンシャトルの軌跡推定法”, 情報処理学会 第 13 回情報科学技術フォーラム (FIT2014), pp. 69-70, 2014
4. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “逆順時系列探索による高速に移動するバドミントンシャトルの追跡”, 電子情報通信学会 2014 年総合大会講演論文集 (情報・システム講演論文集 2), pp. 141, 2014
5. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “モーションブラーを活用したバドミントンのシャトル軌跡推定法”, SAT テクノロジーショーケース 2014, p-84, 2014
6. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “モーションブラーを活用したバドミントンシャトルの軌跡推定法”, 第 16 回 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2013), SS3-22, 2013
7. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “位置と速度の観測に基づく高速移動物体の追跡手法”, 電子情報通信学会 2013 年総合大会講演論文集 (情報・システム講演論文集 2), pp. 181, 2013
8. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “モーションブラーを活用したバドミントンシャトルの追跡手法”, 信学技報, vol. 112, no. 385, PRMU2012-95, pp. 139-144, 2013
9. 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “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”, 動的画像処理実用化ワークショップ講演論文集 (DIA2012), pp. 206-211, 2012

## 4. 受賞

1. 情報処理学会 第 13 回情報科学技術フォーラム (FIT2014) FIT 奨励賞 受賞