

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

A Trajectory Estimation Method for Badminton Shuttlecock Using Multiple Exposure Time Images

宍戸 英彦[†], 北原 格^{††}, 亀田 能成^{††}, 正会員 大田 友一^{††}
Hidehiko Shishido[†], Itaru Kitahara^{††}, Yoshinari Kameda^{††} and Yuichi Ohta^{††}

あらまし 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。本稿では、大規模な空間において非同期撮影された映像を用いて、高速かつ変則的に移動するバドミントンシャトルの3次元位置を推定する手法を提案する。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。

キーワード：非同期撮影映像、バドミントンシャトル、シャッタ速度、3次元軌跡、視体積交差法、モーションブラー

1. ま え が き

映像情報を用いた物体追跡処理は、コンピュータビジョンの重要な研究テーマの一つである。特に、戦術の理解や向上を目的としたスポーツ競技映像における物体追跡処理に注目が集まっている^{1)~9)}。スポーツ競技映像における物体追跡処理では、大規模空間で撮影した映像から、複数の選手やボールなどの高速で複雑な動きを伴う物体を同時に検出・追跡する必要がある、多くの課題が存在する。われわれは、それらのうち、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ことを目的とした研究に取り組んでいる。

本研究では、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。球技を対象とした従来研究で追跡対象となっているボールは、観測サイズが小さく高速に移動するが、運動が力学モデルで記述しやすいこと、見かけの形状が撮影方向に依存せず常に円形であることを利用して追跡処理が実現されている。一方で、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¹⁰⁾、球技の中では珍しく非球状の被写体であるため、図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、また、その観測形状が多様に変化する。一般的に、バドミントンゲームを撮影する場合、カメラからシャトルまでの距離は15 m程度となるため、図1右に示すよう



図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)

2014 年 12 月，冬季大会で発表

2015 年 3 月 1 日受付，2015 年 5 月 3 日再受付，2015 年 6 月 11 日採録

[†] 筑波大学 大学院システム情報工学研究科

(〒 305-8573 つくば市天王台 1-1-1, TEL 029-853-6556)

^{††} 筑波大学 システム情報系

(〒 305-8573 つくば市天王台 1-1-1, TEL 029-853-6556)

に、観測されるシャトルの解像度は低く、シャトル形状特徴を用いた追跡処理⁵⁾は現実的ではない。

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、例えば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¹¹⁾、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¹²⁾。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¹³⁾、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¹⁴⁾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左に示すように、モーションブレンダ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、逆にそのブレンダ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¹⁵⁾¹⁶⁾。われわれも、モーションブレンダ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¹⁷⁾¹⁸⁾。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、非同期撮影画像を用いた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)のモーションブレンダー領域を各画像から検出し、モーションブレンダ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¹⁹⁾²⁰⁾。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レンダ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²²⁾。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、短時間露光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。長時間露光撮影では、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。具体的には、図2に示すように、まず長時間露光撮影で、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、その上に短時間露光で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時間露光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ある。

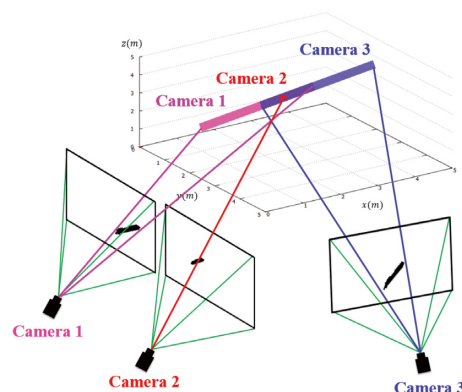


図2 異なるシャッタ速度の非同期撮影画像を用いた3次元位置推定

2. 異なるシャッタ速度で非同期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

以下では、図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。

2.1 Shape-From-Silhouetteを用いたバドミントンシャトルの軌跡推定法

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により3次元観測線を得る手法について述べる。図3 (a) 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、文献17) 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-Silhouette²¹⁾ を適用し、領域の3次元形状を推定する。Shape-From-Silhouette²¹⁾ 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3 (b) 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 (注目要素) 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3 (c) に示す。同様の処理を、Camera3 に対して行った結果を図3 (d) に示す。図3 (e) は、図3 (c)、図3 (d) 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3 (e) 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。

2.2 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

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4 に示すように、長露光時間画像の観測像から推定されたシャトルの3次元観測線が推定されている。図4 (c) に示すように、Camera2 で撮影した短露光時間画像から検出したシャトルの領域を検出する。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。

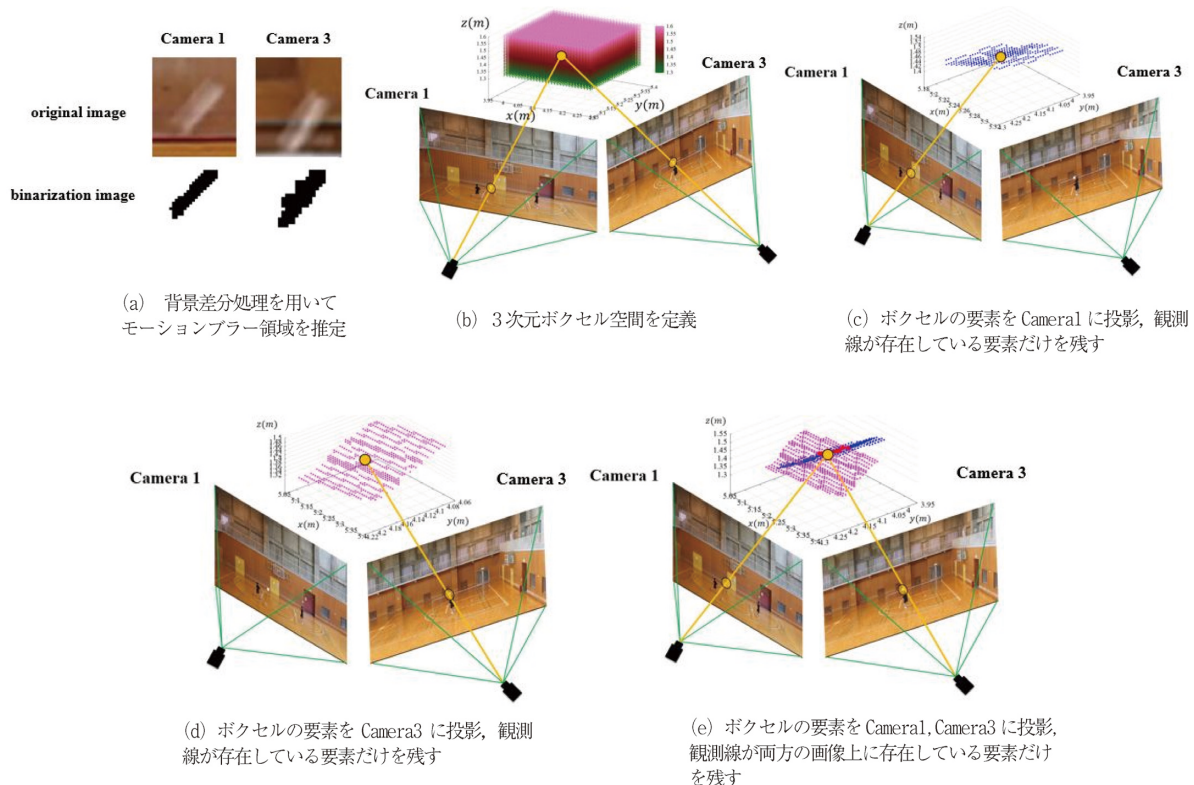


図3 SHAPE-FROM-SILHOUETTEを用いたバドミントンシャトルの軌跡推定法

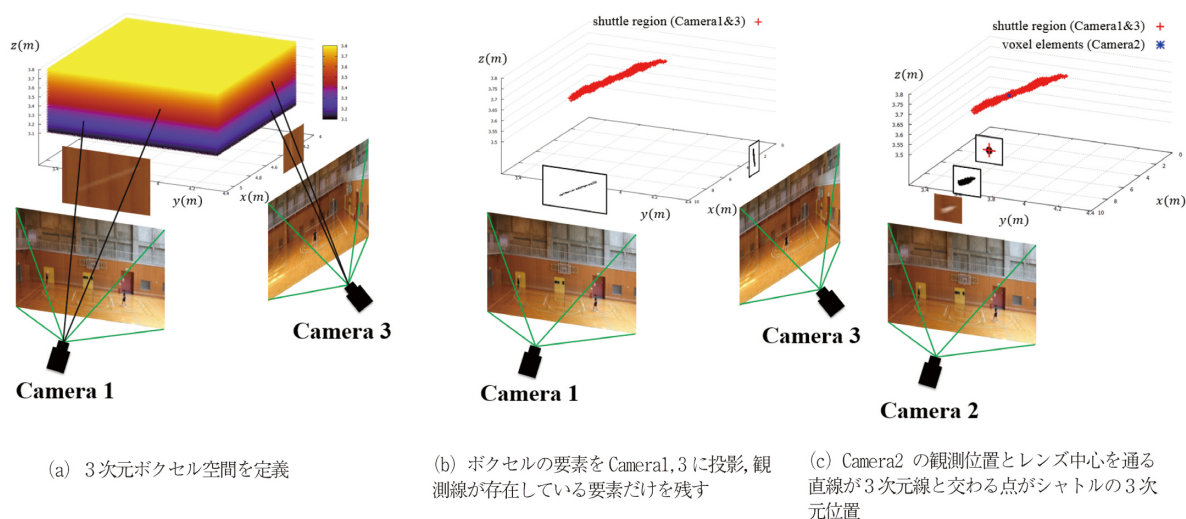


図4 異なるシャッタ速度で非同期撮影した映像を用いたバドミントンシャトルの3次元位置推定法

3. 提案手法の実証実験

3.1 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ャノン社 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3, 図4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 Camera1, 3)と1/200秒(図5 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、2章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。したがって、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、処理対処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に示すように、短露光時間で撮影された画像では、ブラー

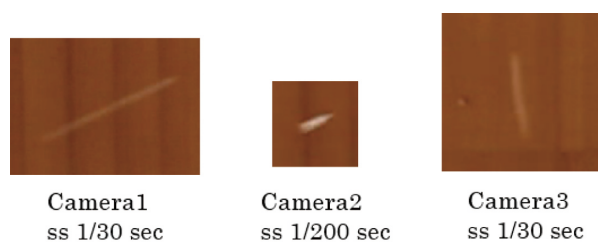


図5 各カメラのシャッタ速度設定値による撮影画像例

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¹⁷⁾。

図4(c)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4(c)※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。

3.2 CGシミュレーションを用いた提案手法の実証実験

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かったため、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6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

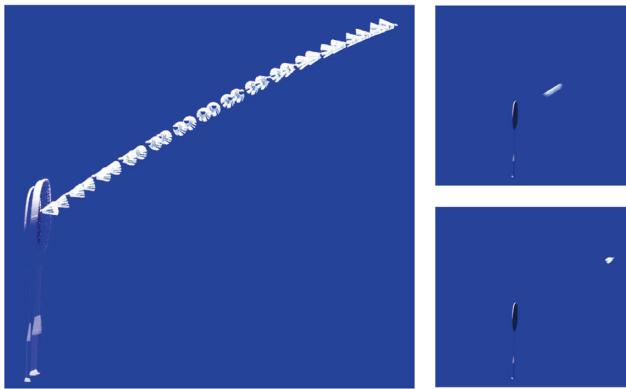


図6 左：シャトルの剛体シミュレーション（正解値），右上：露光時間を長く設定したCGモデル（シャトル）シミュレーション，右下：露光時間を短く設定したCGモデル（シャトル）シミュレーション

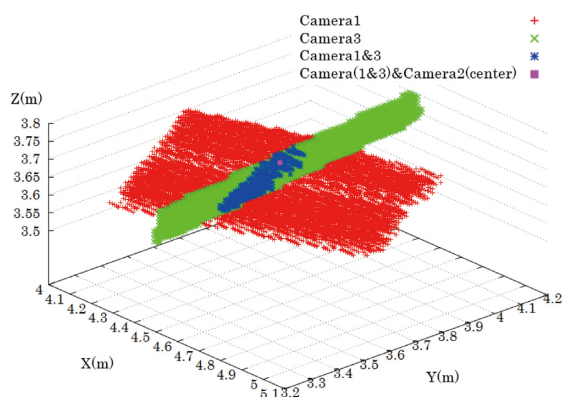


図7 CGモデルシミュレーション画像を用いた提案手法の実証実験結果

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、モーションブレンダ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6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6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7に示すように、モーションブレンダ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7青プロット)。さらに、モーションブレンダ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7桃色プロット)。

3.3 CGシミュレーションを用いた比較実験

3.2節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。モーションブレンダ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^{19) 20)}を従来手法とし、6フレームのシミュレーショ

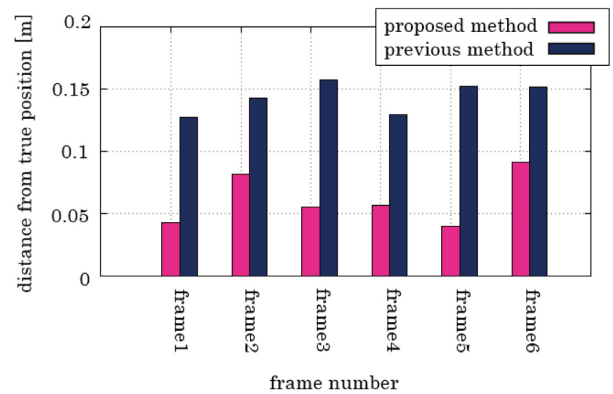


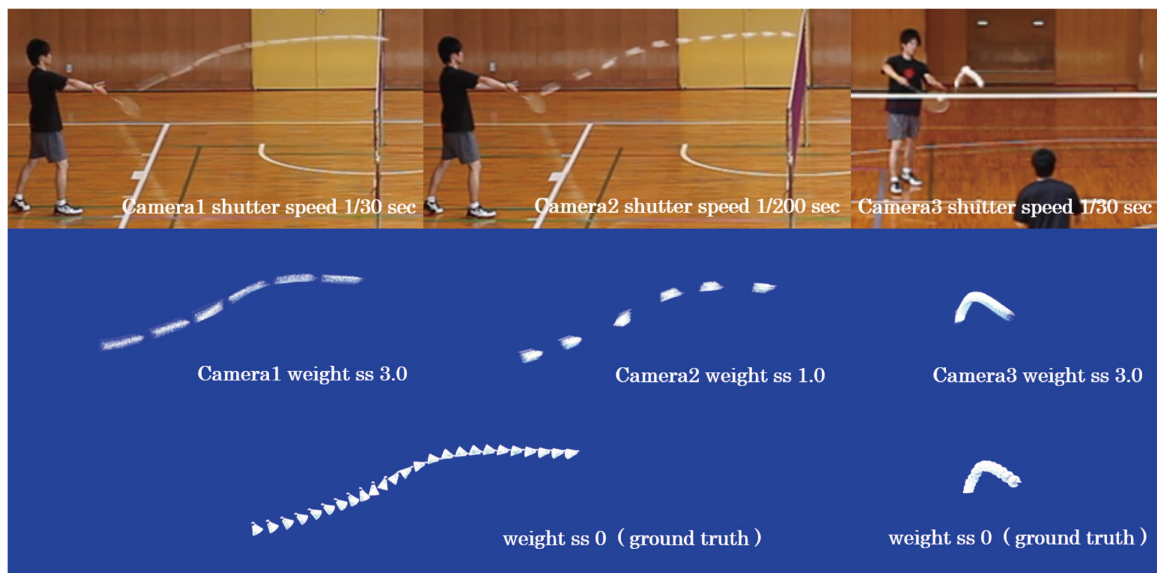
図8 提案手法と従来手法の推定誤差の比較実験結果

ン画像に対して、位置推定実験を実施した。図8に示すように、従来手法の推定誤差の平均は、約0.14 mであった。一方、提案手法の推定誤差の平均は、約0.06 m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0.06 m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。したがって、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。

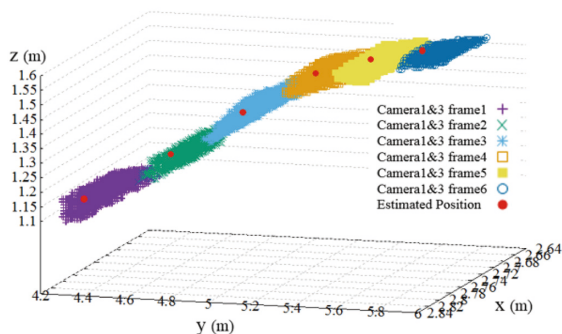
3.4 実環境の実証実験およびCGシミュレーションを用いた実証実験

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および、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。

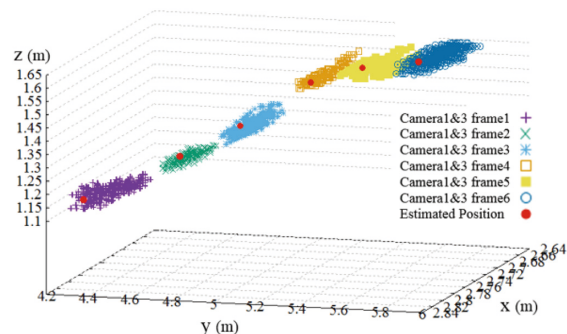
まず、3.1節で述べた撮影実験環境において撮影した変則的な移動を伴うシャトルのシーケンスに対して提案手法の実証実験を行った。図9(a)に示すように、シャトルは、打ち始めから移動方向が定まるまでの数フレームの間、変則的な動きを伴う。スマッシュ(高い位置から、相手コートに一直線に落下する打球)のような速い軌道は、約2フレームの間、変則的に移動し、その後移動方向が定まる。一方で、ヘアピン(ネット際に落ちてきたシャトルを逆にネット際に落とす打球)のようなゆっくりとした軌道は、約6フレームの間変則的に移動し、その後移動方向が定まる。本研究の処理対象とするフレームは、変則的な動きを伴う打ち始めから約6フレームの間とする。なお、6フレーム後の位置推定に関しては、これまでに取組んだ研究成果として報告している¹⁷⁾。図9(b)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



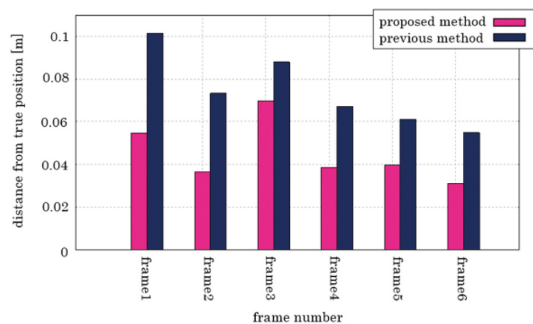
(a)



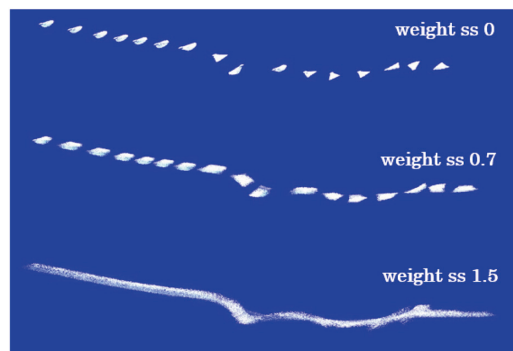
(b)



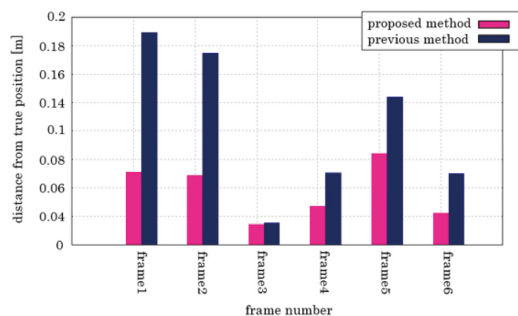
(c)



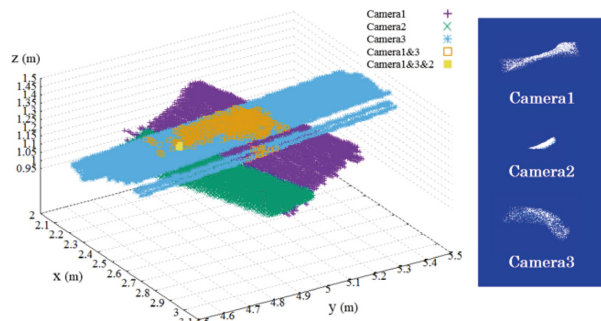
(d)



(e)



(f)



(g)

図9 実環境において変動的に移動するシャトルのシーケンスに対する実証実験およびCGシミュレーション実証実験

(a) 上段：実環境におけるシーケンスデータ，中段：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，下段：CGシミュレーションの真値の軌道，(b) 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，(c) 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，(d) (c) の実験結果より従来手法との比較，(e) 変動的なシャトルのCGシミュレーション，上段：真値，中段：短時間露光シミュレーション，下段：長時間露光シミュレーション，(f) (e) 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，(g) (e) 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

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、長時間露光撮影では、シャトルのモーションブラーの重みを3.0に設定し、短時間露光撮影では、重みを1.0に設定した。図9(a)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9(c)に示す。また図9(c)の実験結果の位置推定誤差を図9(d)に示す。3.3節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0.07 m、提案手法の推定誤差の平均は約0.04 m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9(e)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。モーションブラーの重みは、それぞれ長時間露光撮影では0.7、短時間露光撮影では1.5に設定した。3.3節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9(g)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0.09 m、提案手法の推定誤差の平均は約0.06 mであり、提案手法の有効性が確認された。図9(f)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。したがって提案手法は、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台の長時間露光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、露光時間を長くし過ぎると、撮影画像が白とびするなどの問題が発生する。

4. むすび

本研究では、大規模な空間において非同期撮影された映像を用いて、高速かつ変則的に移動するバドミントンシャトルの3次元位置を推定する手法を提案した。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、正確な3次元位置推定を実現した。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、提案手法の有効性を確認した。

〔文 献〕

- 1) H. Gandhi, M. Collins, M. Chuang and P. Narasimhan: "Real-Time Tracking of Game Assets in American Football for Automated Camera Selection and Motion Capture", *Procedia Engineering*, 2, 2, pp.2667-2673 (June 2010)
- 2) W.-L. Lu, K. Okuma and J.J. Little: "Tracking and recognizing actions of multiple hockey players using the boosted particle filter", *Image and Vision Computing*, 27, 1-2, pp.189-205 (Jan. 2009)
- 3) H.-T. Chen, M.-C. Tien, Y.-W. Chen, W.-J. Tsai and S.-Y. Lee: "Physics based ball tracking and 3D trajectory reconstruction with applications to shooting location estimation in basketball video", *J. Vis. Commun. Image R.*, 20, 3, pp.204-216 (Apr. 2009)
- 4) H.-T. Chen, H.-S. Chen, M.-H. Hsiao, Y.-W. Chen and S.-Y. Lee: "A Trajectory-Based Ball Tracking Framework with Enrichment for Broadcast Baseball Videos", *International Computer Symposium (ICS-2006)*, Taiwan, III, pp.1145-1150 (Dec. 2006)
- 5) 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*, 30, 10, pp.1814-1830 (Oct. 2008)
- 6) J. Ren, J. Orwell, G.A. Jones and M. Xu: "Tracking the soccer ball using multiple fixed cameras", *Computer Vision and Image Understanding*, 113, 5, pp.633-642 (May 2009)
- 7) H.-T. Chen, W.-J. Tsai, S.-Y. Lee and J.-Y. Yu: "Ball tracking and 3D trajectory approximation with applications to tactics analysis from single-camera volleyball sequences", *Multimedia Tools and Applications*, 60, 3, pp.641-667 (Oct. 2012)
- 8) M. Salzmann, R. Urtasun: "Physically-based Motion Models for 3D Tracking: A Convex Formulation", *International Conference on Computer Vision (ICCV2011)*, pp.2064-2071 (Nov. 2011)
- 9) J. Liu, P. Carr, R. Collins, Y. Liu: "Tracking Sports Players with Context-Conditioned Motion Models", *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2013)*, pp.1830-1837 (June 2013)
- 10) F. Alam, H. Chowdhury, C. Theppadungporn and A. Subic: "Measurements of Aerodynamic Properties of Badminton Shuttlecocks", *Procedia Engineering*, 2, 2, pp.2487-2492 (June 2010)
- 11) R. Chang, S.-H. Ieng, R. Benosman: "Using structures to synchronize cameras of robots swarms", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008*, pp.3266-3271 (Sep. 2008)
- 12) M. Noguchi, T. Kato: "Geometric and Timing Calibration for Unsynchronized Cameras Using Trajectories of a Moving Marker", *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'07)*, Page (s) : 20 (Feb. 2007)
- 13) N. Hasler, B. Rosenhahn, T. Thormahlen, M. Wand, J. Gall and H.-P. Seidel: "Markerless Motion Capture with unsynchronized moving cameras", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009*, pp.224-231 (June 2009)
- 14) S. Tamaki, H. Saito: "Reconstruction of 3D Trajectories for Performance Analysis in Table Tennis", *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp.1019-1026 (June 2013)
- 15) G. Boracchi, V. Caglioti, A. Giusti: "Estimation of 3D Instantaneous Motion of a Ball from a Single Motion-Blurred Image", *International Conference, VISIGRAPP 2008, Funchal-Madeira, Portugal, Jan. 22-25, Computer Vision and Computer Graphics. Theory and Applications Communications in Computer and Information Science* 24, pp.225-237 (2009)
- 16) V. Caglioti, A. Giusti: "Recovering Ball Motion from a Single Motion-Blurred Image", *Computer Vision and Image Understanding* 113, 5, pp.590-597 (May 2009)
- 17) H. Shishido, I. Kitahara, Y. Kameda, Y. Ohta: "A Trajectory Estimation Method for Badminton Shuttlecock Utilizing Motion Blur", *6th Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT2013)* (Oct. 2013) *PSIVT2013, LNCS 8333*, pp.325-336. Springer, Heidelberg (Jan. 2014)
- 18) H. Shishido, I. Kitahara, Y. Kameda, Y. Ohta: "Trajectory Estimation

- of a Fast and Anomalous Moving Badminton Shuttle", International Workshop on Advanced Image Technology (Jan. 2015)
- 19) K. Takanohashi, Y. Manabe, Y. Yasumuro, M. Imura, K. Chihara: "Measurement of Ball Trajectory using Motion Blur", International Workshop on Advanced Image Technology, P04-8 (2006)
- 20) X. Chen, R.J. Woodham and W. Heidrich: "Motion Streaks: High Speed Motion Capture with Consumer-Grade Cameras", the 2nd IEEE International Workshop on Computational Cameras and Displays (CCD 2013), held in conjunction with CVPR 2013 (June 2013)
- 21) L. Díaz-Más, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, R. Medina-Carnicer: "Shape from silhouette using Dempster-Shafer theory", Pattern Recognition, 43, 6, pp.2119-2131 (June 2010)
- 22) 清水彰一, 藤吉弘亘: "カメラ間のシャッタタイミングのずれを利用した高速3次元位置推定", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), 1, pp.428-433 (July 2004)



ししど ひでひこ
宍戸 英彦 2013年, 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博士前期課程修了。現在, 同大学院博士後期課程在籍, 英国サリー大学客員研究員。コンピュータビジョン, 多視点画像解析の研究に従事。



きたはら いたる
北原 格 1996年, 筑波大学大学院理工学研究科了。同年, シャープ(株)入社。2000年, 筑波大学先端学際領域研究センター助手。2003年, ATR研究員。2005年, 筑波大学大学院システム情報工学研究科講師。2008年, 同大学准教授。コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。博士(工学)。



かめだ よしなり
亀田 能成 1996年, 京都大学大学院博士後期課程認定退学。京都大学助手, 2001年~2002年, 米国MIT客員研究員(併任), 筑波大学講師を経て, 2004年, 同大学院システム情報工学研究科助教授となり, 現在, 同大学准教授。知的画像処理, マルチメディア処理, 複合現実感技術等の研究に従事。博士(工学)。



おhta ゆういち
大田 友一 1977年, 京都大学大学院博士課程修了。京都大学情報工学科助手, 筑波大学電子・情報工学系講師。カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員, 筑波大学電子・情報工学系助教授を経て, 1992年, 同大学教授。2004年, 同大学院システム情報工学研究科教授。コンピュータビジョン, 視覚情報メディア, 複合現実感の研究に従事。工学博士。正会員。