非同期カメラを用いたボールの3次元軌跡復元法 *

玉　城　　将**　斎　藤　英　雄***

A Method for Reconstructing 3D Trajectory of Ball with Unsynchronized Cameras

Sho TAMAKI and Hideo SAITO

Ball trajectory is an important performance indicator in ball game. However, Measuring 3D trajectories is often unusable because synchronized cameras and control points inside the playing field are generally required. A method that reconstructs 3D trajectory of ball with unsynchronized cameras is proposed in this paper. Proposed method consists of ball detection, camera calibration, and trajectory reconstruction. At first, ball candidates are detected based on the appearance. For the camera calibration, highly probable balls are extracted from the candidates based on the motion. Imaged ball trajectories are then reconstructed. Next, fundamental matrix is computed from the corresponding points, which are estimated with the ball trajectories, and roughly estimated temporal offset, which is estimated manually. The estimated fundamental matrix is assumed to be inaccurate due to the inaccuracy of the temporal offset. The key feature of this method is to accurately estimate temporal offset and fundamental matrix by optimizing them iteratively based on the error of fundamental matrix. After the calibration, balls are extracted robustly with geometrical and temporal relationship between cameras. A ball trajectory is finally reconstructed as connected trajectories which separated at collisions. It is experimentally demonstrated that the proposed method can calibrate cameras precisely and reconstruct accurate ball trajectories.

Key words: unsynchronized camera, calibration, trajectory, table tennis, ball

1. 序　　論

ボールの軌跡はボールスポーツにおける戦術および技術を理解するための重要な情報である．例えば野球における投球ではボールに多様な回転を加えることによって打者の軌道予測を難しくすることが頻繁に行われており，ボールの軌跡からはそのような戦術および技術を解析できる．テニスや卓球のようなボールスポーツでは，ボールの軌跡から抽出できる打球位置および打球コースも戦術を分析する上で重要な情報である．軌跡が時間関数として復元される場合には軌跡からボール速度を導くことが可能であり，打ち出したボールの速度に関する戦術あるいは技術を分析できる．例えば楠堀と吉田[1]は，卓球の国際大会において男子シングルス決勝の試合におけるボール軌跡を計測し，フォアハンドショットの最高速度が27.17 m/sであったこと，そしてこの速度のボールは人間の全身反応時間の限界値を下回る時間で卓球台を横切る可能性があることを指摘している．このようにボールの軌跡はスポーツのプレーを理解するための重要な情報であり，多くの試合におけるボール軌跡を計測することで，ボールスポーツに関する時空間的な理解が進むと考えられる．

しかし一方で，撮影環境やコストの制約上，ボール軌跡の計測はどのようなケースでも行えるものではない．ボールを対象とした3次元計測では，露光を同期させた複数のカメラを用いてボールを撮影し，三角測量によって撮影されたボールの3次元位置を復元し，最後に復元されたボール位置の軌跡を補間する方法が一般的である．しかし，この方法では外部同期に対応するカメラおよび同期信号発生器といった特殊な撮影機器が必要となり，さらにそれらをケーブル等で接続する必要がある．また，計測される3次元位置の精度を高めるためには対象物体が移動する領域に3次元位置が既知のマーカを置くなどして事前にカメラ間の幾何学的位置関係を算出すること（以下「幾何学的カメラ校正」という）が必要である．スポーツの競技会や練習場では，撮影環境やコストの制約上このような装置を用いることができない場面は多い．

安徳ら[2]は，カメラ1台のみを用いてテニスボールの画像上の軌跡と選手の画像上の位置を計測し，選手がフォアハンドで打球したか，バックハンドで打球したかを記録している．北原と内田[3]は露光を同期していない2台のカメラを用いてテニスボールのバウンド位置や選手の位置をコートの2次元座標で計測している．カメラは複数台用いているが，競技現場における利用の簡易さを考慮してカメラの露光は同期させていない．これらの研究では，システム利用の手間を少なくするために2次元情報のみを計測しており，ボールの3次元位置は計測していない．しかし，カメラの光軸がコート平面と平行に近くなるほど計測される位置の精度が低下する点は原理上避けられない．また，ボールに回転が加わることによる曲線的な軌道もスポーツにおいて戦術的あるいは技術的に重要な要素であるが，2次元の情報からは解析できない．プレー中の情報を記録する技術として3次元的な軌跡を計測できるものが求められる．

高野橋ら[4]は，カメラの露光時間を長くすることで得られるボールの残像，すなわち画像上の短いボール軌跡を3次元空間に逆投影し，それらの共通部分を3次元形状として復元している．カメラ間の露光が非同期の場合であっても，画像上の軌跡が得られれば3次元空間中の交線を求めることで3次元軌跡が得られることを示した．しかし，連続的な軌跡を復元することには成功しているが，薄く撮像されたボールの残像を頑健に検

* 原稿受付　平成26年5月12日
掲載決定　平成26年8月31日
** 学生会員　慶應義塾大学大学院（横浜市港北区日吉3-14-1）
*** 慶應義塾大学（横浜市港北区日吉3-14-1）

出することは非常に難しい問題であり，有効な方法は提案されていない．実際の試合映像を対象としてこの方法を用いることは難しい．

清水ら [5] は，エピポーラ線と画像上の軌跡の交点を求めることによってボールの 3 次元位置を計測している．非同期カメラ間の時刻ずれが未知の状態，さらにカメラがパン・チルトする場合であっても 3 次元軌跡を復元できることを示している．しかし，軌跡とエピポーラ線が平行に近くなる場合には計測精度が低下する問題がある．卓球やテニスのようなネット型スポーツを撮影する場合には，選手とボールとの重なりを少なくするためにカメラはコートのサイドライン側に水平に並べられることが多いと考えられるが，その場合にはボール軌跡とエピポーラ線は頻繁に平行になる．計測精度の観点からはエピポーラ線と軌跡の交点を用いる方法は適切ではないと考えられる．

Matsumoto et al. [6] は，複数の非同期アフィンカメラによって撮影された移動体の軌跡が周波数領域においては対応関係を保持する点に着目し，周波数領域において 3 次元軌跡を復元することで，非同期カメラから移動体の 3 次元軌跡を復元している．しかし，対象物とカメラの距離が短く，アフィンカメラで近似することが適切ではない場面は多い．各務ら [7] は非同期射影カメラであっても光軸を平行にしたステレオカメラであればアフィンカメラと同様の理論を適用できること，さらには同期カメラと比較して高密度な 3 次元形状を復元できることを示している．しかし，2 台のカメラを用いて移動体の 3 次元位置を計測する場合にはカメラの光軸を直角に配置した時に最も精度が高くなるため，光軸を平行に複数のカメラを配置するという制約は計測精度の観点からは望ましくない．

Zhou and Tao [8] は，各カメラの外部パラメータが既知の状態で移動体を撮影し，各視点で撮影された移動体の移動距離の比率から時刻ずれを推定し，推定された時刻ずれおよびオプティカルフローを用いて実際には撮影されていない時刻の画像を生成している．ボールを検出することができれば，この方法を用いてカメラ間の時刻ずれを推定すること（以下「時間的カメラ校正」という）ができる可能性がある．しかし，ボールスポーツを対象とする場合，フレーム間の移動体の動きを等速直線運動に近似することは，実際の移動体の動きとは異なる可能性がある．また，この方法で扱うのは時間的カメラ校正のみであり，幾何学的なカメラ校正は別の方法で実施する必要がある．

野口と加藤 [9] は，2 台の非同期カメラで撮影したマーカの軌跡を線形に復元し，カメラ間の時刻ずれの初期値からカメラ間の対応点を大まかに推定し，推定された対応点によって計算された基礎行列の誤差に基づき時刻ずれを最適化することで時間的カメラ校正と幾何学的カメラ校正を同時に行う方法を提案している．また，Ying and Sato [10] は，野口と加藤の方法が異なるフレームレートのカメラを組み合わせる場合にも適用可能であることを示している．この方法では，時間的カメラ校正と幾何学的カメラ校正を同時に扱う行うため，マーカをボールに置き換えることでボールの 3 次元計測に応用できる可能性がある．ただし，フレーム間の移動体の動きを線形近似していることから，フレームレートに対して移動体の動きが十分に遅くなければならないという制約がある．この近似はスポーツプレー中のボールのように高速で曲線的に移動する物体を扱う場合には妥当ではないと考えられる．また，マーカを用いていることから，ボールを対象とした場合に生じる誤検出等の問題には対応していない．ボールを対象とした場合，これらの点が問題になる可能性がある．

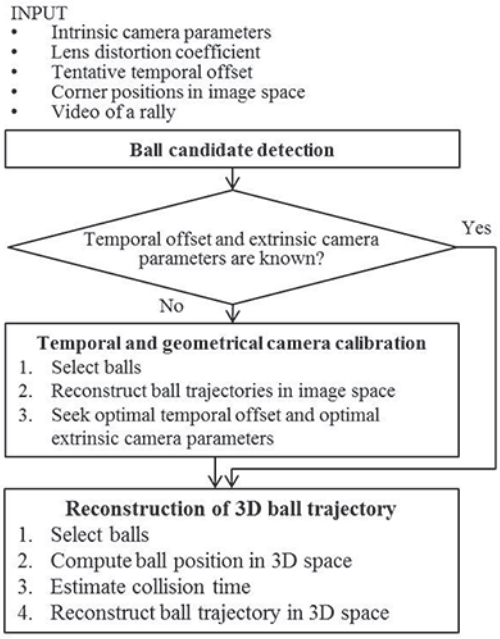


Fig.1 Flowchart of the proposing method

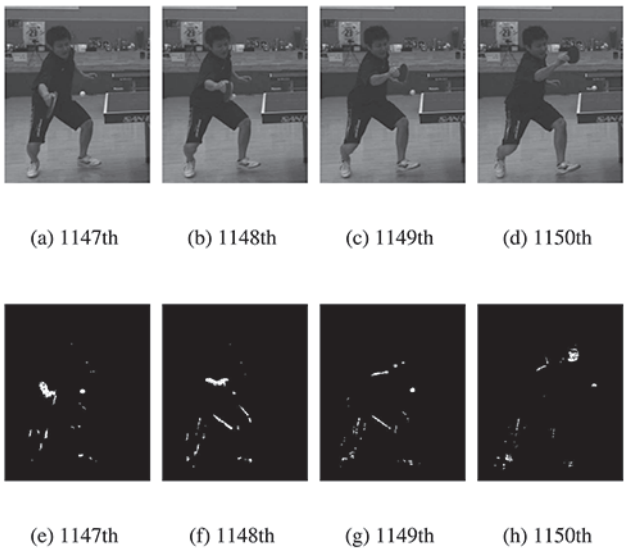
本論文では，非同期カメラを用いたボールの 3 次元計測法を提案する．まず，野口と加藤の提案する非同期カメラの時間的および幾何学的カメラ校正法に修正を加えることで，ボールを用いた高精度な時間的および幾何学的カメラ校正が可能であることを示す．次に，非同期カメラを用いた場合，ボールの検出は各カメラで独立して行われることが多いが，提案手法ではカメラ間の時刻ずれおよび位置関係を高い精度で求められるため，この結果を用いることで頑健にボールを検出する方法を示す．以上のように，本論文における提案手法は，非同期カメラを用いた場合のボール軌跡の復元に必要な全ての工程を含む包括的な枠組みである．提案手法によって時間同期されたカメラが不要になり，且つ計測対象のボールを用いたカメラ校正が可能となることでボールスポーツにおける 3 次元計測が簡易化されることが期待できる．本論文では特に卓球での計測に焦点を当てているが，テニスやバレーボール等，プレー中の多くの時間でボールが空中を移動しているスポーツであれば提案手法は適用可能である．

本論文の構成は以下の通りである．第 2 章では提案手法について説明する．第 3 章では実験結果を示し，最後に第 4 章で本論文をまとめる．

2. 提 案 手 法

2.1 概　　要

提案手法のフローを**図 1** に示した．本手法によって復元される軌跡は 1 ラリーのものであり，ラリーの開始および終了時刻が既知であることを前提とする．まず，映像からボールを検出する．もし時間的および幾何学的にカメラが未校正である場合，検出された画像上のボール位置を用いたカメラ校正を行う．カメラ校正後，検出された画像上のボール位置からボールの 3 次元軌跡を復元する．カメラ内部パラメータ，レンズ歪み係数は OpenCV ライブラリや Matlab に実装されている Zhang の方法 [11] を用いる等によって簡易に推定できるため，本手法ではこれらは入力値として扱う．また，時刻ずれの初期値も入



(a) 1147th (b) 1148th (c) 1149th (d) 1150th

(e) 1147th (f) 1148th (g) 1149th (h) 1150th

Fig.2 (a)-(d) are input images captured in 60 fps. (e)-(h) are results of frame differentiation with 3 frames interval

力値となっているが，これは撮影された映像をコマ送りするなどして推定できる数フレームの誤差を含む時刻ずれである．コート四隅の画像上の座標は手動で記録することとし，鉛直方向の算出，画素と実長の比率の算出，バウンド検出，および打球コースの記録に用いる．以降，各処理の詳細を説明する．

2.2 ボール検出

本手法では空中を移動するボールを検出対象とするため，まずはフレーム間差分によって移動体を検出する．フレーム間差分とは，時刻 t における画像と時刻 $t-s$，$t+s$ の画像との差分を求め，その論理積をとることで時刻 t における移動体を検出する方法である．**図 2** に 60 fps で撮影された卓球の打球シーンを差分間隔 3 でフレーム間差分した場合に検出される移動体の例を示した．多くの場合，ボールは他の物体と比較して速く移動しているため，差分間隔を短く設定することで，検出される他の移動体を少なくできる．

次に，検出された移動体から色，円形度および面積がボールと類似している領域を抽出する．この処理で必要となる閾値は以下の 3 つである．

- 輝度の下限 [0-1.0]: L_I
- 円形度の下限 [0-1.0]: L_C
- 面積の下限 pixel^2: L_A
- 面積の上限 pixel^2: U_A

なお，領域の周囲長が l，面積が S である領域の円形度 C は以下の式で定義される．

$$C = 4\pi S/l^2. \tag{1}$$

ここまでの方法によって検出される物体がボール候補である．1 フレームの画像のみからボールを検出するため，ボールだけを正確に検出することは非常に難しく，多くの誤検出が含まれることが想定される．そのため，次にボール候補から正しいボールを抽出する必要があるが，時間的および幾何学的カメラ校正の前後で異なる方法を用いるため，次節以降で詳しく説明する．

2.3 時間的および幾何学的カメラ校正

2.3.1 ボールの抽出

ボール候補から，複数フレームに渡って空中を移動するボールと類似した動きをするものを検出する．ボールの動きに関する条件は，移動速度，隣合う移動速度の差，そして隣り合う移動方向間の角度によって定める．すなわち，この処理で必要となる閾値は以下の 4 つである．

- 移動速度の上限 m/s: U_V
- 移動速度の下限 m/s: L_V
- 連続した移動距離の変化率の上限 %: U_D
- 連続した 2 つの移動ベクトル間角度の上限 rad: U_R

ただし，U_V と L_V は卓球台のコーナーら求められた画素と実長の比率を用いて，それぞれ画像上の速度 U_v と L_v に変換して用いる．ここで，i 番目のフレームにおけるボール候補の位置を $\boldsymbol{p_i}$ と表記し，$\boldsymbol{p_i}$ から $\boldsymbol{p_{i+1}}$ まで線形に移動したと仮定した場合の速度ベクトルを $\boldsymbol{v_{i,i+1}}$ と表記する．$\boldsymbol{v_{i,i+1}}$ が U_v 以下且つ L_v 以上である場合，$\boldsymbol{p_i}$ と $\boldsymbol{p_{i+1}}$ は異なるフレームにおける同じボールである可能性があると考える．続いて $\boldsymbol{p_{i+2}}$ は，$\boldsymbol{v_{i+1,i+2}}$ が U_v 以下且つ L_v 以上であることに加え，$\boldsymbol{v_{i,i+1}}$ に対する $\boldsymbol{v_{i+1,i+2}}$ の変化率が U_D 以下，且つ成す角が U_R 以下であるという条件も併せて満たした場合，$\boldsymbol{p_i}$，$\boldsymbol{p_{i+1}}$ と同じボールである可能性があると考える．以降，$\boldsymbol{p_{i+4}}$ まで連続して 5 フレーム前述の条件を満たすボール候補を最終的に正しいボールであると判断する．

このようにボール候補に対して強い制約を課したとしても，ボールに類似した領域がボールらしい動きをした場合には誤検出が生じる．このような誤検出の混入は本手法におけるボール抽出の限界であると同時に，ボールの検出を行う他の多くの方法に当てはまる限界でもある [14–17]．現状では画像から正しいボールだけを検出することは困難であり，以降の処理では少数の誤検出が含まれることを仮定する．

2.3.2 ボールの 2 次元軌跡の復元

ここまでに得られたボール位置から，ボールの画像上の軌跡を復元する．精度が低下することを避けるため，ボール位置を連続して記録できた区間のみ軌跡を推定する．軌跡の復元は，3 次スプライン補間を用いる．スプライン補間では，ボールバウンドのような急激な運動の変化を含む軌跡は正確に復元できない．しかし，以降の処理では誤検出への対応を行うため，バウンド前後の軌跡が正しく復元されない場合でもカメラ校正の結果にほとんど影響は与えない．

2.3.3 時刻ずれおよびカメラ外部パラメータの推定

2.1 で述べたように，時刻ずれの初期値 τ_0 は既に得られている．ここで，カメラ i における j 番目のフレームの時刻を t_j^i と表記する．τ_0 が正しい場合にはカメラ 1 における時刻 t_j^1 と，カメラ 2 における時刻 $t_j^2 - \tau_0$ は同じ時刻となる．そして，カメラ 2 において画像上のボール軌跡が得られている期間であれば，τ_0 に基づき，カメラ 1 で検出されたボールがカメラ 2 のどこに撮像されるかを推定できる．同様に，カメラ 1 において画像上のボール軌跡が得られている期間であれば，カメラ 2 で検出されたボールがカメラ 1 のどこに撮像されるかを推定できる．このように画像上のボール軌跡と時刻ずれによって，画像間に多数の対応点が得られるため，基礎行列 $\boldsymbol{F_0}$ が計算できる [18]．基礎行列はカメラ間の位置関係とそれぞれのカメラ内部パラメータで定まる 3 × 3 の行列であり，カメラ内部パラ

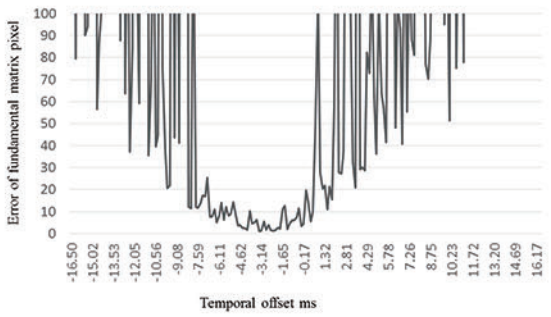


Fig.3 Error of fundamental matrix. The ground truth is -3.0 ms

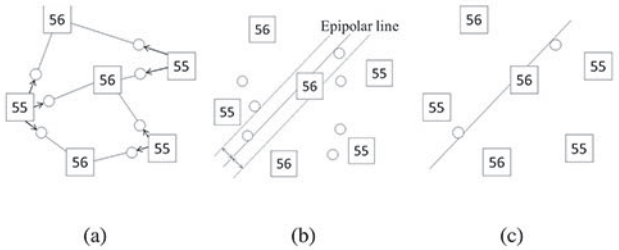


Fig.4 Ball extraction from ball candidates with epipolar line. Rectangles denote ball candidates. The number of each candidate is the frame number at which the candidate was detected. Circles detenos estimated ball candidates. (a) Connect two candidates whose distance is less than threshold and estimate ball position at $t+\tau$ linearly. (b) Obtain epipolar line from the ball imaged in the other camera and detect candidates which are close to the epipolar line, (c) and detected candidates are extracted

メータが既知である場合には基礎行列から一方のカメラに対するもう一方のカメラの位置姿勢が求められる．ただし，τ_0 が数フレームの誤差を含むものであるため，$\boldsymbol{F_0}$ は正確ではない．ここで，時刻ずれと画像上の軌跡によって算出した $\boldsymbol{p_i^1}$ のカメラ 2 における対応点を $\boldsymbol{p_i^{2'}}$，$\boldsymbol{p}$ の斉次座標を $\tilde{\boldsymbol{p}}$，点と直線の距離を算出する関数を d，N 個の数列の中央値を算出する関数を Med_i^N と表記すると，基礎行列 $\boldsymbol{F}$ の誤差関数 E は次式のように定義できる．

$$\mathrm{E}(\boldsymbol{F}) = \mathrm{Med}_i^N \mathrm{d}(\boldsymbol{p}_i^1, \boldsymbol{F}\boldsymbol{p}_i^{2'}) + \mathrm{d}(\boldsymbol{p}_i^{2'}, \boldsymbol{F}^T\boldsymbol{p}_i^1). \qquad (2)$$

$\boldsymbol{F}\boldsymbol{p}_i^{2'}$ は $\boldsymbol{p}_i^{2'}$ と対応するカメラ 1 におけるエピポーラ線，$\boldsymbol{F}^T\boldsymbol{p}_i^1$ は $\boldsymbol{p}_i^1$ と対応するカメラ 2 におけるエピポーラ線である．数式 2 はエピポーラ線と対応する点との距離の中央値であり，基礎行列が正しい値に近づくほど小さくなる．本手法では，時刻ずれに含まれると想定される誤差の範囲内に渡って固定ステップで基礎行列の誤差を求め，最小の値を返した時刻ずれを最適な時刻ずれとする．カメラの時刻ずれの値の変化によって基礎行列の誤差がどのように推移するかを**図 3** に示した．カメラに設定した時刻ずれは-3.0 ms であり，この値に近づくにつれて基礎行列の誤差が小さくなることが分かる．しかし，基礎行列算出の際の不安定さから基礎行列の誤差は激しく値が上下している．本手法では局所解に陥ることを避けるため，設定した時間幅の中で必要な精度で時刻ずれを推定できる方法として固定ステップで最小値を探索することとした．

最後に，推定された最適な時刻ずれによって推定される対応点から基礎行列を求める．基礎行列は RANSAC によって外れ値を除外した全ての対応点からランダムに 8 点を選択して算出する．ただし，プレー中のボールを用いる場合には対応点が一様に分布しないため，抽出される 8 点の組み合わせによっては正しく基礎行列が算出されない場合がある．この不安定さに対応するため，対応点の抽出と基礎行列の算出を N_i 回繰り返す．算出された全ての基礎行列からカメラ外部パラメータおよび再投影誤差を求め，再投影誤差が最小のものを選択する．

提案手法における本節で説明した部分は野口と加藤 [9] の方法に基づいているが，卓球ボールを対象とできるよう修正したため，幾つかの相違点がある．まず，画像上の軌跡を復元する方法が異なる．野口と加藤はフレームレートに対してゆっくり動かすマーカーを対象としているため，画像上の軌跡は線形補間を用いているが，本手法で対象とする卓球ボールは高速且つ曲線的に移動するため，スプライン補間を用いている．また，基礎行列の誤差の評価方法も異なる．野口と加藤は検出が容易なマーカーを対象としているため，基礎行列の誤差はエピポーラ線と対応点の距離の平均値を用いている．しかし，本手法で対象とする卓球ボールは，様々な理由により誤検出が含まれる可能性があり，また，バウンドを含む区間の軌跡が正確に復元できないため，平均では外れ値の影響を大きく請けすぎる可能性がある．そのため，本手法では外れ値が含まれていたとしても誤差分布の代表値を正確に反映できる中央値を用いており，数式 2 は誤検出の有無に関わらず正しい基礎行列を与えた際に最小値を返すことが期待できる．

2.4 ボールの 3 次元軌跡復元

2.4.1 ボールの抽出

基礎行列 $\boldsymbol{F}$ を用いて計算できるエピポーラ線を用いてもう一方の画像におけるボール候補から正しいボールを抽出する（**図 4**）．必要となる閾値は，以下の 2 つである．

- エピポーラ線とボールとの距離の上限 m: U_E
- 軌跡を支持すると考えるボール候補の距離の上限 m: U_S

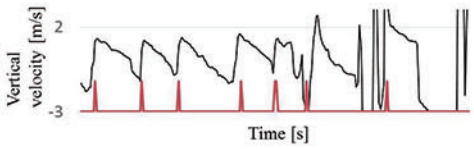
ただし，U_E は画像上の距離 U_e に変換して用いることとする．まず，時刻 $t_j^1+\tau$ の直前および直後にカメラ 1 において検出されたボール候補を対象とし，2 点間の距離がボールがフレーム間で移動する距離の最大値，すなわち U_v とフレーム間時刻との積を下回る組み合わせを抽出する（図 **4**(a)）．抽出された組み合わせの間を等速で線形に移動していると近似することで $\boldsymbol{p}^1_{t_j^1+\tau}$ の候補を推定する（図 **4**(a) の円）．次に，カメラ 2 の時刻 t_j^2 におけるボール候補位置 $\boldsymbol{p}^2_{t_j^2}$ に対応するエピポーラ線 $\boldsymbol{F}\tilde{\boldsymbol{p}}^2_{t_j^2}$ を求める．エピポーラ線との距離が U_e 以内の点を探索し（図 **4**(b)），探索されたボール候補，ボール候補を推定する際に用いられた隣合う 2 点，エピポーラ線と対応するもう一方の画像上のボール候補を対応付けて抽出する．これによって，多くの誤検出が候補から除外される（図 **4**(c)）．なお，後述するように，ここで線形近似によって推定されたボール位置は正しいボールを抽出する目的のみに用いられるものであり，最終的なボールの測定精度には影響を与えない．

次に，エピポーラ線によるボール抽出によって得られた全ての対応点から，3 次元位置を計算する．誤った組み合わせが存在する場合，3 次元空間であれば正しいボール位置から大きく離れると考えられる．そこで，Yan の方法 [19] を 3 次元に拡張した方法を用いて 3 次元空間中のボール候補に対して軌跡モデルをフィッティングし，正しいボールを抽出する．まずボールの運動を等加速度運動モデルに近似し，ボール候補に対してモデルをフィッティングする．この近似は短時間のみ成り立つ

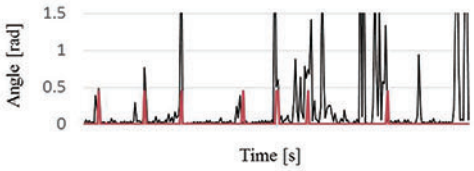


(a) (b)

Fig.5 Trajectory model estimation by iterative optimization. (a) is the model before optimization and (b) is the model after 3 times optimization. Black circles are detected ball candidates. Red circles are estimates given by a trajectory model



(a) Vertical velocity and collisions



(b) Angle of two adjacent velocity and collisions

Fig.6 Change of ball motion when it collided to other objects. The pulses of red line denote collisions

ものであるため，時間領域における幅 h_w の走査窓を用いることで，フィッティングを h_w フレーム毎に行う．h_w はボールの運動を等加速度運動に近似できる程度の期間であり，3 以上の整数とする．ステップ幅は $h_w/3$ とし，フレームの 2/3 は前後の走査窓との重複させる．まず，3 つの連続したフレームにおいて，ボール間の距離がボールがフレーム間で移動する距離の最大値を越えないボール候補 $\boldsymbol{p_1}$，$\boldsymbol{p_2}$，$\boldsymbol{p_3}$ を選択する．各フレーム時刻を t_1，t_2，t_3，t_1 と t_2 および t_2 と t_3 の差分をそれぞれ Δt_{21}，Δt_{32}，加速度を a，t_1 におけるボール速度を v_1 とすると，等加速度運動モデルは以下の数式によって求められる．

$$\boldsymbol{v}_1 = \frac{\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1}{\Delta t_{21}} - \frac{\Delta t_{21}\boldsymbol{a}}{2} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{a} = 2\frac{\Delta t_{21}(\boldsymbol{p}_3 - \boldsymbol{p}_2) - \Delta t_{32}(\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1)}{\Delta t_{21}\Delta t_{32}(\Delta t_{21} + \Delta t_{32})} \tag{4}$$

ただし，隣り合ったフレームのみから求められたモデルは不正確であることが多い．そのため，求めたモデルから h_w フレームの期間の軌跡を復元し，その軌跡との距離が U_S 以内のボール候補の中から，時刻が最小，最大，中央の 3 つの候補を選択して再度モデルを求める．この軌跡の最適化処理を，選択される 3 点が変化しなくなるまで，または，復元された軌跡と各ボール候補との誤差の総和が増加し始めるまで反復する．**図 5** に，最適化処理を 3 回繰り返した例を示した．時間的に近い 3 点によって推定されたモデル（図 **5**(a)）と比較して，最適化処理を繰り返すことで時間が離れた 3 点によって推定されたモデル（図 **5**(b)）は検出されたボール位置（図中の黒丸）との距離が近い．このように，最適化処理を繰り返すことでより確からしいモデルが求められる．以上の処理を，h_w 間の全ての候補を対象として行い，誤差が最小となる軌跡モデルを選択する．このようにして復元された軌跡との距離が U_S 以内のボール候補と対応する画像上のボール位置を正しいボールとして抽出する．抽出されたボール位置からは，スプライン補間によって各画像上のボール軌跡を復元する．最後に，カメラ間の時刻ずれと軌跡によって各ボールの対応点を推定し，三角測量によってボールの 3 次元位置を算出する．

2.4.2 衝突時刻の推定

数式 3 を用いることで，前節で求められた各ボール位置における速度を算出する．このボール速度より，ボールと他の物体との衝突が生じた時刻を推定する．本手法ではボールの軌跡を多項式で近似するが，その場合，衝突のような急激な運動状態の変化を含む軌跡は正確に復元できない．そのため，ここで推定された衝突で区切ってボール軌跡を復元することで復元される軌跡の精度を高めることとする．

ボール速度の鉛直成分，および隣合うボール速度ベクトル間の角度の変位と手動で記録した衝突を**図 6** に示した．ボールの衝突時には，ボール速度の鉛直成分の符号が負から正に変化する，あるいは隣り合う速度ベクトル間の角度が大きくなる．そこで，以下の閾値を用いることで衝突を検出する．

- 隣り合う速度ベクトル間の角度の上限 rad: U_P

計測されたボール速度は計測誤差が含まれるボール位置から求めたものであるため，衝突が発生していない場合にも衝突が発生している場合と類似した変化を示す場合がある．その場合には実際には衝突が起こっていない時刻で軌跡が分割されるが，以降の処理で軌跡同士の融合を行うため最終的に得られる軌跡には影響を与えない．

2.4.3 軌跡の復元

最後にボールの軌跡を復元する．前節で推定された衝突時刻によって軌跡を区切って復元し，それらを接続することで 1 つの軌跡を復元する．

まず，衝突間の軌跡を復元する．隣り合う 2 つの衝突間のボール位置から 3 次スプライン補間によって軌跡を復元し，サンプリング間隔が等しくなるようリサンプリングする．リサンプリングされたボール位置を Savitzky-Gollay フィルタ [21] によって平滑化し，再度，3 次スプラインを用いて軌跡を復元する．非同期カメラによって計測されたボール位置の時間間隔は均一ではないが，これによって一般的な平滑化手法を適用し，計測ノイズを除去できる．

次に，複数の軌跡を接続する．ここでの軌跡の接続とは，ラリーの開始時刻から終了時刻まで必ず 1 つの軌跡からボール位置が推定されるように，各軌跡に対応する期間 $[t_s, t_e)$ を与えることである．ここで，時系列的に前の軌跡を T，後の軌跡を T'，T の開始および終了時刻をそれぞれ t_s，t_e，T' の開始および終了時刻をそれぞれ t'_s，t'_e と表記する．時系列的に最も前の軌跡の開始時刻はラリー開始時刻，後の軌跡の終了時刻はラリー終了時刻が与えられるため，ここでは t_e と t'_s を求める方法を考える．隣り合う 2 つの軌跡は前節で推定された衝突で区切られており，基本的には**図 7**(a) のような関係にあると考えら

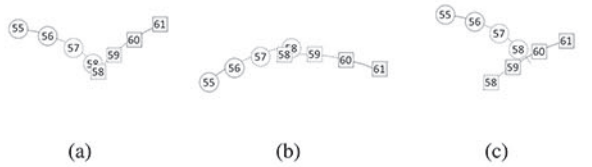


Fig.7 Connect two trajectories. The number denotes the time when the ball was detected. The distance between two trajectories becomes the shortest at the time 58. (a) denotes "connectable". (b) denotes "mergeable". (c) denotes "unconnectable"

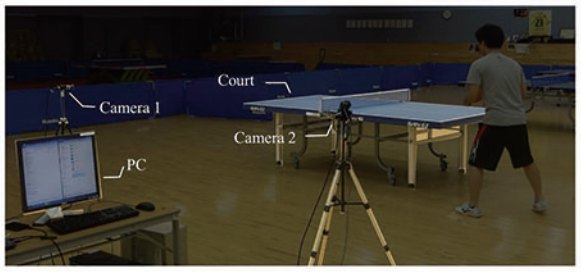
れる．しかし，計測された軌跡の中には，誤って検出された衝突によって複数の軌跡に分割されている場合が考えられる．例えば図 **7**(b) の 2 つの軌跡は，衝突時刻におけるボール位置は近いが，衝突時点におけるボールの進行方向がほとんど同じである．このような軌跡は，1 つの軌跡として再度軌跡モデルを計算すべきである．また，ボールではない物体の軌跡が混入している場合には図 **7**(c) のように，衝突時刻におけるボールの距離が離れている．このように 2 つの軌跡の間には，接続可能，接続可能且つ融合可能，接続不可の 3 つの関係があり，このいずれかを判定する必要がある．そこで，以下の閾値を用いて，軌跡間の関係を定義する．

- 衝突時刻におけるボール位置の間の距離の上限 m: U_I
- 衝突時刻におけるボール速度間の角度の上限 rad: U_M
- 軌跡間の時間の上限 s: U_T

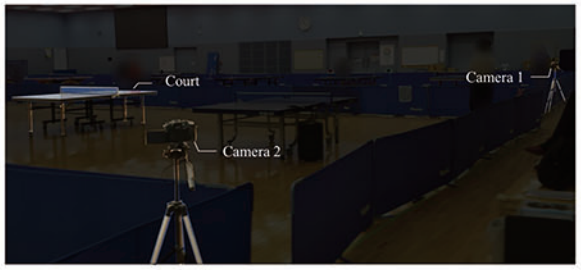
ここで，T と T' を時系列的に互いに近づく方向に延長し，2 つの軌跡モデルから推定されるボール位置が最も近づく時刻 t_i と表記する．T の復元時に用いられたボール位置の時刻のうち最も新しい時刻と T' の復元時に用いられたボール位置の時刻のうち最も古い時刻の差が U_T 以上，または，T と T' の t_i における距離が U_I よりも大きい値の場合には接続不可であると判定する．U_I 以下の場合，次に 2 つの軌跡モデルを用いて t_i 前後におけるボール速度ベクトルを求め，その角度が U_M より大きい値の場合には接続可能，U_M 以下の場合には融合可能と判定する．接続可能な場合，t_e，t'_s には t_i が設定される．融合可能な場合，T と T' を復元する際に用いられたボール位置から再度軌跡モデルを計算し，新たに計算された軌跡の開始時刻は t_s，終了時刻は次の軌跡と接続時に求められる．接続不可の場合，t_e および t'_s には T の復元時に用いられたボール位置の時刻のうち最も新しい時刻と T' の復元時に用いられたボール位置の時刻のうち最も古い時刻の平均値を与えることとする．軌跡の接続の流れは以下の通りである．

Step 1 全軌跡間で接続可能な組み合わせを探索する．
Step 2 接続可能な組み合わせの中で最も期間が長くなる組み合わせを抽出する．
Step 3 既に抽出された軌跡との間に時系列的な矛盾が生じる軌跡を除外する．
Step 4 抽出されていない接続可能な軌跡の組み合わせの中で期間が最も長くなる組み合わせを抽出する．
Step 5 Step3-4 を抽出される軌跡が無くなるまで繰り返す．
Step 6 融合可能な組み合わせを融合する．

以上の結果得られる軌跡の組み合わせが，本手法の出力として得られる 1 ラリーの軌跡である．



(a) Match1



(b) Match2

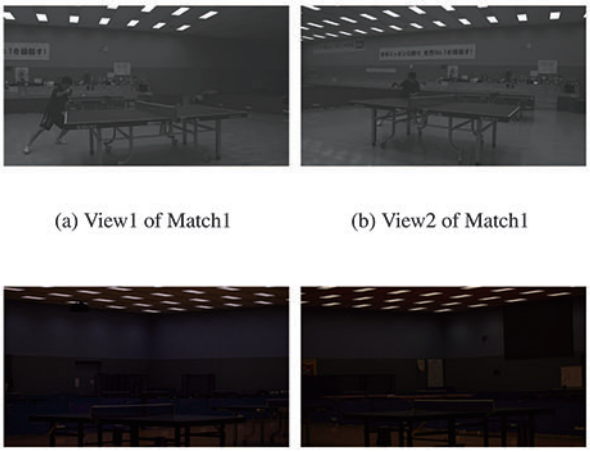
Fig.8 Experimental environment

3. 実　　験

提案手法によって精度よく時間的および幾何学的カメラ校正ができること，そしてボールの 3 次元軌跡が復元できることを検証するために実験を行った．

3.1 実験条件

図 8 に実験環境を示した．卓球経験者による 2 試合を対象とし，それぞれ撮影するカメラ，カメラと卓球台の距離，選手を変更した．以降，対象とした 2 試合をそれぞれ試合 1，試合 2 と呼ぶ．試合 1 は Grasshopper3（Point Grey 社）を 2 台用いて撮影した．カメラ間には 3 ms の時刻ずれを設定し，解像度は 1920 × 1080 とした．カメラは図 **8**(a) に示したように設置し，図 **9**(a)，図 **9**(b) に示したような画像が得られた．試合 2 は Lumix GH3（Panasonic 社）を 2 台用いて撮影した．カメラ間の時刻ずれはカメラの仕様上調整できず，解像度は 1920 × 1080 とした．カメラは図 **8**(b) に示したように設置し，図 **9**(c)，図 **9**(d) に示したような画像が得られた．両試合とも，ボールの検出はダウンサンプリングした 960 × 540 の画像から行い，検出後の座標値をダウンサンプリング前の座標値に変換した．ボールの検出率を評価するため，試合 1 からは 35 ラリー，試合 2 からは 10 ラリーをランダムに抽出し，ボール位置を手動で記録した．画像上のボール半径は最大で 15 pixel 程度であったため，手動で記録した位置から 15 pixel よりも離れた位置で検出されたボール候補を誤検出と判定した．時間的および幾何学的カメラ校正は始めの 10 ラリーの検出結果を用いて行う．時刻ずれ探索時のステップは 0.0165 ms とした．時間的および幾何学的カメラ校正の精度は，試合 1 の結果より評価した．幾何学的カメラ校正の精度を評価するため，校正点計 18 点を用いた方法で外部パラメータを求め，最後にバンドル調整によって最適化した．バンドル調整には Lourakis and Argyros [22] の公



(a) View1 of Match1　(b) View2 of Match1

(c) View1 of Match2　(d) View2 of Match2

Fig.9 A sample of input images in Match1 and Match2

開するライブラリ SBA を利用した．バンドル調整後の再投影誤差は 0.21 であった．時間的および幾何学的カメラ校正の結果については，野口と加藤[9]の方法と提案手法との間で比較することとする．なお，試合 2 の撮影ではカメラ間の時刻ずれが未知であり，さらに従来手法によるカメラ外部パラメータの計測はされなかった．そのため，試合 2 の実験結果はボールの検出率を評価する目的のみで用いることとした．

提案手法における各閾値は複数の値を入力し，最も良い結果が得られる値を選択した．試合 1 を対象とした場合の閾値はそれぞれ L_I：0.24，L_C：0.3，L_A：13，U_A：531，U_V：25，L_V：1，U_D：0.3，U_R：0.524，U_E：0.025，U_S：0.15，U_P：0.209，U_I：0.015，U_M：0.785，U_T：1，であり，試合 2 を対象とした場合の閾値のうち試合 1 の場合と異なるものは L_I：0.12 のみであった．本実験では試合 1 の画像の方が試合 2 の画像よりも輝度が高かったため，L_I は試合 1 よりも小さい値となった．L_C，L_A，U_A は解像度によって最適な値が変わるが，本実験では 2 試合とも同じ解像度で撮影したため同じ値であった．U_D は画角によって最適な値が変わるが，図 **9** に示したように全ての画角で類似した画角であったため，同じ値であった．なお，2 視点撮影において卓球ボールと選手の重なりを少なくし，且つ光軸が垂直に近くなることを考慮した場合には図 **8** に示したカメラ配置が最適であり，本実験ではこれ以外の条件については検討しなかった．U_E，U_S，は測定精度によって最適な値が若干変わるが，解像度が同じであれば同程度の精度で測定できるため本実験では同じ値であった．U_V，L_V，U_R，U_P，U_I，U_M，U_T は卓球を対象とする限り同じ値を設定できるパラメータである．これら 7 つの閾値については，今後，多くの試合を対象としてボール軌跡を復元し，最適な値を定めることができれば定数として扱うことができると考えられる．

3.2　実験結果

3.2.1　カメラ校正前のボール検出

対象とした全ラリーを合計したフレーム数，ボールの存在するフレーム数を表 **1** に示した．ボール検出の結果を表 **2** に示した．表 **2** の数値はボールが存在するフレーム数に占める，各検出結果であったフレーム数の割合である．最大で 10% 程度のボールが未検出となった原因は，選手との重なりが

Table1 The number of frames. #frame stands for total number of frames. #ball-frame stands for the number of frames where a ball exists

	Match1		Match2	
	View1	View2	View1	View2
#frame	3422	3379	1412	1397
#ball-frame	3312	3239	1199	1251

Table2 Results of the appearance based ball detection. TP stands for true positive, FP stands for false positive. Detection rate means the ratio of the frames where true positive was detected

	Match1		Match2	
Indicator	View1	View2	View1	View2
TP %	19.7	21.6	30.0	9.1
TP and FP %	76.3	70.6	62.4	82.2
Detection rate %	96.0	92.2	92.4	91.3

Table3 Results of motion based ball extraction in image space. TP stands for true positive, FP stands for false positive, and FN stands for false negative

	Match1		Match2	
Indicator	View1	View2	View1	View2
TP %	82.7	70.7	62.2	64.9
FP %	0.3	0.1	0.1	1.6
FN %	13.8	25.1	22.6	23.1
Detection rate %	85.5	73.8	73.2	72.4
Precision %	99.7	99.9	99.8	97.6

Table4 The detection rate of the motion based extraction after selecting the balls whose corresponding points can be estimated

	Match1		Match2	
Indicator	View1	View2	View1	View2
Detection rate %	61.6	66.4	48.7	46.1

66.2%（398/601），ネットとの重なりが 19.8%（119/601），背景にボールと類似色があったためが 11.3%（68/601），画像上のボールが静止したためが 2.7%（16/601）であった．画像上のボールが静止する現象はボールがカメラ光軸方向に移動した際，あるいはゆっくりと鉛直方向に移動するボールが頂点に差し掛かる際に発生し，この時，フレーム間差分によってボールは背景と判定されるために未検出となる．未検出となる最も大きい要因は選手やネットといったプレー領域内の他の物体との重なりによるものであった．また，多くのフレームでは正しいボールに加えて誤検出が含まれていた．誤検出の多くは選手の移動領域であった．その中から 5 フレーム連続してボールらしい動きをするものを抽出した場合の検出結果を表 **3** に示した．抽出されたボールの 97% 以上は正しいボールであった．このことから，画像上のボールの動きに基づいた抽出法は，ボールを用いたカメラ校正を目的とした場合には有効と言える．この抽出法がボール軌跡の復元を目的とした場合にも有効かを検討するため，もう一方の視点おける対応点が推定できるもの，すなわち 3 次元位置を計算できるものだけを抽出した結果を表 **4** に示した．この結果は，ボール軌跡を復元するためのボール抽出法としては検出率の低さが問題になる可能性を示している．提案手法では，この問題に対応するために，時間的および幾何学的カメラ校正の後に再度ボール抽出法を行う．その結果につ

Table5 Results of temporal camera calibration

Indicator	Reference [9]	Proposing
Error of temporal offset ms	1.95	0.04

Table6 Results of geometrical camera calibration

Indicator	Reference [9]	Proposing
Error of optical axis degree	3.26	1.07
Error of camera center m	0.27	0.03
Reprojection error pixel	2.71	1.31

Table7 Results of ball extraction using temporal offset and fundamental matrix. TP stands for true positive, FP stands for false positive, and FN stands for false negative

	Match1		Match2	
Indicator	View1	View2	View1	View2
TP %	85.4	85.0	66.7	69.8
FP %	0.8	1.9	3.9	2.1
FN %	10.6	9.0	14.3	17.6
Detection rate%	88.2	88.6	78.6	77.9
Precision %	99.1	97.8	94.5	97.0

Table8 The detection rate of the ball extraction using temporal offset and fundamental matrix after selecting the balls whose corresponding points can be estimated

	Match1		Match2	
Indicator	View1	View2	View1	View2
Detection rate %	79.9	85.2	72.4	73.9

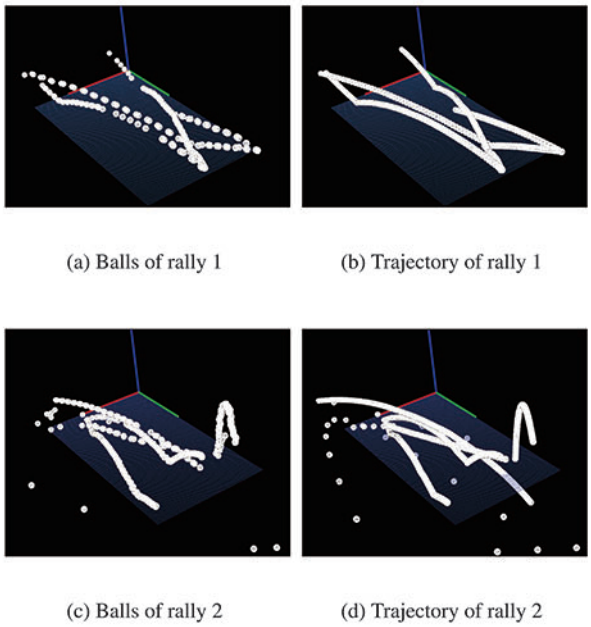
いては　3.2.3 で述べる．

3.2.2　時間的および幾何学的カメラ校正

時間的カメラ校正の結果を**表 5** に示した．野口と加藤の提案する方法 [9] をそのまま用いた場合には真値とは 1.95 ms 異なる時刻ずれが推定されたが，提案手法における修正を加えることで，ほぼ真値と同じ時刻ずれを推定できている．提案手法における基礎行列の誤差評価が正確であり，そのため大域的な正しい時刻ずれを探索できたと考えられる．幾何学カメラ校正の結果を**表 6** に示した．再投影誤差は，試合撮影前にチェッカーボードを 14 の異なる位置および姿勢で撮影した．提案手法ではカメラの光軸と位置が正確に推定できており，そのことから再投影誤差も小さい値であった．この再投影誤差は実長だと約 3.2mm であり，高い精度でカメラ校正ができていることが分かる．以上の結果より，スポーツプレー中のボールを用いて時間的および幾何学的カメラ校正を行う場合，提案手法が有効であると考えられる．

3.2.3　カメラ校正後のボール検出

時間的および幾何学的カメラ校正によって得られたカメラ間の時刻ずれ，およびカメラ外部パラメータを用いたボール検出の結果を**表 7** に示した．検出されるボールの割合は試合 1 では約 88%，試合 2 では約 78% であった．このうち，もう一方の視点おける対応点が推定できるもの，すなわち 3 次元位置を計算できるものだけを抽出した結果を，**表 8** に示した．表 **4** と比較して 18-27% 多くのボールを抽出できている．このように，本手法によって時刻ずれやカメラ外部パラメータが既知とできることにより，1 視点におけるボールの動きだけを利用する場合と比較して頑健性を高められることが示された．



(a) Balls of rally 1　(b) Trajectory of rally 1

(c) Balls of rally 2　(d) Trajectory of rally 2

Fig.10 Reconstruction of trajectories from ball positions. (a) was used for reconstructing (b). (c) was used for reconstructing (d)

ここで，試合 1 では約 20%，試合 2 では約 27% のボールが抽出されなかった要因を検討する．まず，10% 前後のボールは未検出であったことが挙げられる．その理由については　3.2.1 で述べたように，選手，ネットおよび類似した背景色との重なりであった．次に，一方のカメラには映っていない，あるいは両方のカメラにおける隣り合うフレームに映っていないボールが多かったことが挙げられる．手動で記録したボール，すなわち映像に映る全てのボールを対象として，時刻ずれおよびエピポーラ線を用いたボール抽出を行った結果，試合 1 のカメラ 1 では 7.9%，カメラ 2 では 6.7%，試合 2 のカメラ 1 では 9.3%，カメラ 2 では 12.5% のボールが抽出できなかった．これらのことが，抽出されないボールがあった要因と考えられる．カメラの台数が 2 台だと，どのようにカメラを配置しても選手やネットとボールの重なりを防ぐことを防ぐのは困難であり，一般的な競技場面では背景に類似した色が映り込むことを完全に防ぐことはできない．また，計測精度を考慮すると 2 台のカメラ光軸は垂直に近く配置することになるため，そうすると 2 視点間の視差は大きくなり，選手とのオクルージョン等によってボールが一方のカメラには映らない，あるいは両方のカメラにおける隣り合うフレームに映らないことがある程度のフレーム数生じることは避けられない．本論文では 2 台のカメラを用いた場合のカメラ校正法について述べたが，1 つのカメラと各カメラの間のカメラ校正として実施することで，3 台以上のカメラを用いる場合でも提案手法を適用できる．今後，計算できる 3 次元位置の割合を高めるためには，撮影する視点を増やし，少なくとも 2 視点にボールが映るようにする必要がある．

3.2.4　3 次元軌跡の復元

復元された軌跡の例を**図 10** に示した．図 **10**(b) は軌跡の復元が成功したラリーの一例である．復元に用いたボール位置（図 **10**(a)）では図中右上のボールバウンド前後でボール位置を計算できていないが，前後の軌跡から綺麗に補間されている．

復元された軌跡が検出されたボールの何割を包含できていたかを推定した．軌跡から求められたボール位置をカメラ 1 とカメラ 2 に再投影した結果，検出されたボール位置から 15 pixel 以内であった割合は試合 1 ではそれぞれ 98.3%，98.6%，試合 2 ではそれぞれ 93.5%，93.8% であった．このことから，撮影視点を増やし，検出できるボールの割合を高めることで，ラリー全体のボール軌跡は問題なく復元されると考えられる．次に，復元された軌跡がラリー全体の軌跡の何割を復元できていたかを推定した．軌跡から求められたボール位置をカメラ 1 とカメラ 2 に再投影した結果，手動で記録したボール位置から 15 pixel 以内であった割合は試合 1 ではそれぞれ 93.9%，95.6%，試合 2 ではそれぞれ 80.6%，81.8% であった．表 **8** のボール抽出率と比較して高い割合のボール位置を復元できている．これは，図 **10**(a) に見られたように軌跡の接続が精度良く行われることで，未検出期間が補間されたためである．前述した通り，様々な理由によってボールが未検出になることはある．本手法は，未検出の前後の軌跡が復元できている場合，この問題に対応できるものであると考えられる．ただし，全てのラリーにおいて問題なく軌跡が復元できたわけではない．図 **10**(d) は復元後の軌跡に誤りがみられたラリーの一例である．図中右下のバウンド直後のボールが検出できなかったため，卓球台を貫通する軌跡が推定されている．また，復元に用いたボール（図 **10**(c)）に誤検出が含まれていたため，誤検出を含む期間において実際とは大きく異なる軌跡が復元されている．提案手法における 3 次元空間でのボール抽出は，時間領域に走査窓を設定し，各走査窓の中で最も長くボールに類似した動きをした物体を正しいボールと考えるものである．この方法では，ボールが未検出になる期間がある場合，選手の足などの他の物体がボールと判断される．表 **7** に示したように本実験では最終的に残ったボールに 1-4% の誤検出が含まれていた．正しい軌跡を復元するためにも，撮影視点を増やすなどによってボールの未検出を減らす必要がある．

4. 結　　論

本論文では，露光が同期されていないカメラを用いたボールの 3 次元計測法を提案した．まず，画像から円形度，面積，輝度および動きがボールと類似する領域を探索することで，正確にボールのみ検出することを可能とした．次にボールの画像上の軌跡をスプライン曲線によって復元し，基礎行列の誤差の中央値を最小化する時刻ずれを推定することで，ボール位置に誤検出が含まれる場合であってもカメラ間の時刻ずれおよびカメラ外部パラメータを推定可能とした．また，非同期カメラを用いた場合，ボールの検出は各カメラで独立して行われることが多いが，提案手法ではカメラ間の時刻ずれおよび位置関係を高い精度で求められるため，この結果を用いることで頑健なボール検出を可能とした．実画像を用いた実験から，提案手法によって高い精度でカメラ校正を行うことが可能であり，ボールが検出できている期間であれば頑健に軌跡が復元できることが示された．今後は，提案手法に基づいた実用システムを構築することが課題である．実用化に向けた技術的な課題は，3 台以上のカメラによる撮影に対応したシステム構築，および復元される軌跡からスポーツプレー中の情報を抽出する方法の検討である．提案手法の実用化によって試合場面における 3 次元計測の簡易化が実現することで，ボールスポーツの時空間的な理解が進められることが期待される．

謝　　辞

本研究の一部は一般財団法人上月財団の助成を受けて行われたものであり，一部は（独）情報通信研究機構の委託研究「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術の研究開発」の補助により行われたものである．また，本研究の実験に協力していただいた日本スポーツ振興センターの池袋晴彦氏に対し，ここに謝意を表する．

参 考 文 献

1) 楠堀誠司, 吉田和人: 卓球ゲームにおける打法や状況毎の打球速度, 日本体育学会大会予稿集, **62**, (2011) 239.
2) 安徳知博, 鹿嶋雅之, 佐藤公則, 渡邊睦: 動画像処理によるテニスプレー自動認識・記録に関する研究, 情報処理学会研究報告.CVIM, **2013**, 14, (2013) 1.
3) 北原駿, 内田理: テニス競技映像からのプレー自動分析手法の提案, 映像情報メディア学会技術報告, **37**, 35, (2013) 51.
4) 高野橋健太, 眞鍋佳嗣, 安室喜弘, 千原國宏: 残像を利用したボールの 3 次元軌跡の計測, 情報処理学会研究報告.CVIM, **2005**, 112, (2005) 139.
5) 清水彰一, 藤吉弘亘, 長坂保典, 高橋友一, 岩堀祐之: 複数の非同期パン・チルトカメラを用いた 3 次元位置推定法, 精密工学会誌, **75**, 2, (2009) 284.
6) H. Matsumoto, J. Sato, F. Sakaue: Multiview constraints in frequency space and camera calibration from unsynchronized images, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, (2010) 1601.
7) 各務友美, 坂上文彦, 佐藤淳, 石丸和寿, 今西勝之: 非同期マルチカメラによる高密度 3 次元復元, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2012), (2012).
8) C. Zhou, H. Tao: Dynamic depth recovery from unsynchronized video streams, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, **2**, (2003) II-351 .
9) 野口真身, 加藤丈和: マーカの軌跡を用いた非同期カメラの幾何学的・時間的キャリブレーション, 情報処理学会論文誌.CVIM, **47**, 5, (2006) 59.
10) P. Ying, J. Sato: Computing Epipolar Geometry from Unsynchronized Cameras, Proc. Image Analysis and Processing, (2007) 475.
11) Z. Zhang: A flexible new technique for camera calibration, Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 11 (2000) 1330.
12) S. Brutzer, B. Hoferlin, and G. Heidemann: Evaluation of Background Subtraction Techniques for Video Surveillance, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, (2011) 1937.
13) G. Jing-Ming, H. Chih-Hsien, L. Yun-Fu, S. Min-Hsiung, C. Cheng-Hsin, and W. Jing-Yu: Fast Background Subtraction Based on a Multilayer Codebook Model for Moving Object Detection, Circuits and Systems for Video Technology, **23**, 10 (2013) 1809.
14) Y. Huang, J. Llach, and C. Zhang: A Method of Small Object Detection and Tracking Based on Particle Filters, Proc. 19th International Conference on Pattern Recognition, (2008) 1.
15) 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ボール追跡手法, 画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2007）, (2007).
16) X. Yu, C. H. Sim, J. R. Wang, and L. F. Cheong: A Trajectory-Based Ball Detection and Tracking Algorithm in Broadcast Tennis Video, Proc. International Conference on Image Processing, (2004) 1049.
17) C. Wei, and Z. Yu-Jin: Tracking Ball and Players with Applications to Highlight Ranking of Broadcasting Table Tennis Video, Proc. Computational Engineering in Systems Applications, (2006) 1896.
18) R. Hartley and A. Zisserman: Multiple view geometry in computer vision, Cambridge Univ Press, (2003) 279.
19) F. Yan, A. Kostin, W. Christmas, and J. Kittler: A Novel Data Association Algorithm for Object Tracking in Clutter with Application to Tennis Video Analysis, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, (2006) 634.
20) S. Hu, F. Zaojun, X. De, and T. Min: Trajectory Prediction of Spinning Ball Based on Fuzzy Filtering and Local Modeling for Robotic Ping-Pong Player, Instrumentation and Measurement, **62**, 11, (2013) 2890.
21) A. Savitzky and M. J. E. Golay: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, Analytical Chemistry, **36**, 8, (1964) 1627.
22) M. I. A. Lourakis, A. A. Argyros: SBA: A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment, ACM Trans. Math. Software, **36** 1 (2009) 1.