

残像を利用したボールの3次元軌跡の計測

高野橋 健太[†] 眞 鍋 佳 嗣[†] 安 室 喜 弘[†]
井 村 誠 孝[†] 千 原 國 宏[†]

本論文では、非同期のビデオカメラを複数台利用し、ボールの3次元軌跡を計測する手法を提案する。一般にボールの3次元位置計測はステレオ法が用いられるが、ボールは高速移動するため、ブレのない(シャッタースピードが速い)同期のとれた高速度撮影の多視点映像が必要である。本提案手法は、逆にシャッタースピードを遅くして映像にボールの軌跡を故意に残し、多視点から撮影された軌跡を空間に投影して共通部分を計算することで3次元軌跡を求める。本手法によりカメラ間の同期をとらなくてもボールの3次元位置が計測可能となるだけでなく、フレーム間のボールの3次元軌跡も決定可能になる。つまりステレオ法では時間的に離散な3次元位置しか計測できないが、本手法では連続な3次元軌跡が計測可能である。また、このようにして求めたボールの3次元軌跡に時間情報を付加するために、映像のフレームが切り替わる瞬間のボールの位置をもとに時間情報を求める。本論文では、提案手法の詳細を説明した後、実際に卓球およびサッカーの環境で実験を行い提案手法の有効性を確認した。

Measurement of 3D Ball Trajectory Using Motion Blur

KENTA TAKANOHASHI,[†] YOSHITSUGU MANABE,[†]
YOSHIHIRO YASUMURO,[†] MASATAKA IMURA[†]
and KUNIHIRO CHIHARA[†]

This paper proposes a new method of measuring a 3D trajectory of ball. Our proposed method does not need high-speed video cameras and synchronized video cameras to measure the 3D ball trajectory, and it enables to measure a continuous trajectory between shutter timings. Our approach is that a 2D ball trajectory appears on each image by slowing down shutter speed of camera, and the 3D ball trajectory can be computed using shape of silhouette method from intersection of inversion projected the images. The estimated 3D trajectory does not have time information. The time information is given according to a correspondence between 3D trajectory and the position of ball in images when video frames are switched. This paper describes details of our method and experimental results applied our method to table tennis and football.

1. はじめに

スポーツの世界にコンピュータビジョン技術が導入され、スポーツはより魅力的なものになった。一例をあげると、金出らが開発した自由視点生成システム EYEVISION¹⁾ は、テレビ中継時に任意の視点で試合のリプレイを放送することを可能にした。この映像表現は単に視聴者を惹きつけるだけでなく、スポーツを分かりやすく伝えられるという実用性も兼ね備え

ている。このような新たな映像関連技術の開発は、スポーツの発展に欠かせないものとなっている。

ボールスポーツにおいてボールの行方に注目することは至極当然である。本論文では、ボールスポーツに対してコンピュータの映像技術を適用し、ボールの3次元位置を計測することを考える。

ボールの3次元位置の計測が最も効果を発揮すると考えられる応用分野として、スポーツの判定支援がある。近年、ボールスポーツの判定、特にボールのバウンド地点がラインを越えたか否かの判定に科学的アプローチを用いる試みがされている。しかし、ボールの3次元位置計測にステレオ法を用いている限り、ボールのバウンド地点を正確に決定することは難しく、正確な判定は困難である。これは、ステレオ法では映像のシャッタタイミング間にどのようにボールが移動し

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
Department of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology
現在、株式会社日立製作所ユビキタスプラットフォーム開発研
究所
Presently with Ubiquitous Platform Systems R&D Lab-
oratory, Hitachi, Ltd.

たかを計測することが難しく、何らかの補間を行って軌跡と見なすことが一般的であり、補間した軌跡と真の軌跡が一致しないためである。ボールスポーツの判定には、補間に頼らず、連続した3次元軌跡を計測する方法が求められる。

さらに、競技者にとってもボールの軌跡データを求めることは有意義である。たとえば、ボールの3次元軌跡を求めることは、スコアブックを付けることに直結し、簡単に客観的な軌跡データを算出できれば強力に競技者をサポートできる。また、ボールの3次元軌跡を可視化し自由視点から観察可能にすれば、テレビ観戦者に対して多大なインパクトを与えられる。たとえば、サッカーのフリーキックやテニスのサービスなどをゴールキーパやレシーバの視点で見ることが可能になる。また、卓球などボールが高速に移動するスポーツを分かりやすく放映するために、ボール軌跡を計測し可視化することは有効だと思われる。これらは、ステレオ法によるボール計測でも実現可能ではあるが、ステレオ法では同期のとれた特殊なビデオカメラが必須であるという問題がある。一般的に利用されている安価なビデオカメラ数台でボールの3次元計測ができれば、アマチュアレベルの競技者支援にも応用が可能になり、テレビ向けコンテンツ応用への利用もよりいっそう進むと考えられる。

2. 関連研究

ボールの3次元軌跡の計測は、同期カメラ群を利用した計測、非同期カメラ群を利用した計測、単眼カメラを利用した計測、の3種類に分類できる。

どの計測手法でも、基本的に内部パラメータや外部パラメータを求めるキャリブレーションは必要であり、コストはビデオカメラの台数と同期の有無に依存する。

同期カメラ群を利用した計測は、従来より多方面で研究が進められており、頑健な計測が行える場合も多い。同期カメラ群を利用した研究をもとに、実用化されたスポーツシーンでの3次元軌跡計測システムも存在する^{2)~5)}。しかし、ステレオ法を用いた場合、1章で述べたように、連続した軌跡は求められないという問題がある。

非同期カメラ群を利用した計測は、特殊なカメラが必要な同期カメラ群を利用した場合に比べて、ビデオカメラの同期に関するコスト面で有利である。清水らは、ボールの進行方向を補間することにより、ステレオ法による3次元計測を実現した⁶⁾。しかし、補間による計測精度の悪化は否めない。

単眼カメラを利用した計測は、計測機器のコスト面

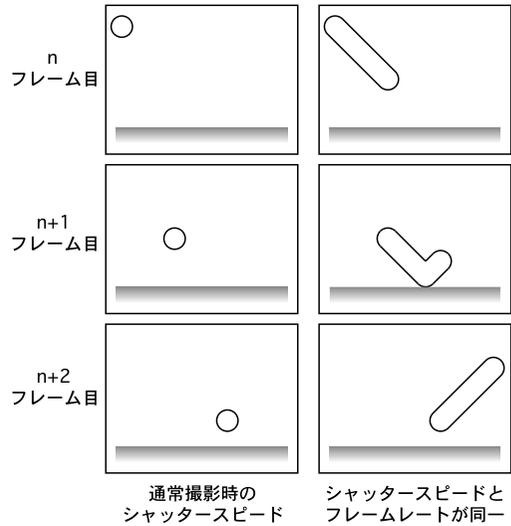


図1 シャッタースピードと撮影画像の関係

Fig. 1 Relationship between the shutter speed and captured images.

で圧倒的に有利である。Cagliotiらは、ボール残像の幅の情報を利用して、3次元軌跡を復元した。しかし、光学条件によってはボールの軌跡の幅を信用することはできず、計測精度には疑問が残る⁷⁾。

本提案手法は、上記分類によれば、コスト面で有利な非同期カメラ群を利用した計測であるが、補間を行わずに計測ができる。さらに、計測結果は連続した軌跡が得られるという特徴がある。

3. 提案手法

本提案手法は、ボールの3次元軌跡の形状計測と、ボールがいつどこに存在していたかを示す時刻情報の付加の2つのステップからなる。

3.1 3次元軌跡の計測

まず、シャッタースピードの設定が可能な複数台のビデオカメラを、ボールが移動する範囲を取り囲むように設置し、内部パラメータおよび外部パラメータを算出しておく。ビデオカメラのシャッタースピードはフレームレートと同一に設定する。つまり、シャッタをつねに開いた状態とする。たとえば、フレームレートが30 fps ならばシャッタースピードは1/30 sec に設定する。この設定により、図1のように、映像中にボールの残像が撮影される。ボールの残像は、前後フレームで空間的に連続する。一般的な撮影では、移動物体がブレないようにフレームレートよりシャッタースピードを速く設定するが、そのような設定では残像が前後フレームで連続しない。

次に、撮影された残像を、次の手順により処理し

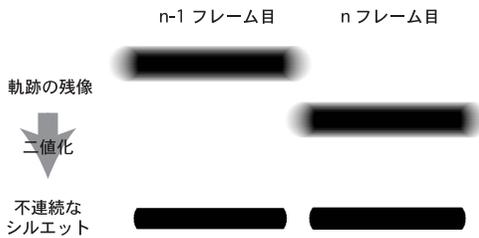


図 2 不連続なボール残像のシルエット
Fig.2 Noncontiguous silhouette of ball.

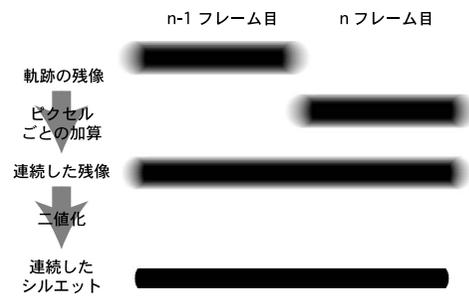


図 3 連続したボール残像のシルエット
Fig.3 Contiguous silhouette of ball.

ボール軌跡を計測する．

- (1) 撮影されたすべてのフレームで背景差分を行い、残像を抽出した差分画像を求める．
- (2) カメラごとに、得られた差分画像を加算する．
- (3) 加算した差分画像を 2 値化し、軌跡をシルエット化する．
- (4) シルエットに視体積交差法を適用する．

上記手順の理由を、残像の特徴から説明する．図 2 上のようにボール軌跡の残像は中心部分に比べて周辺部分が薄いという特徴がある．これは、ボールの中心が通過した撮像素子が、周辺部分が通過した素子に比べてボールが露光した時間が長いためである．そのため、二値化処理で軌跡を抽出すると、本来の軌跡より一回り小さいシルエットとなる．このことから、前後フレームで軌跡が重ならず、図 2 下のように、不連続なシルエットとなる可能性がある．この現象は、ボールが高速に移動し、かつボールが比較的小さく撮影されているときに顕著に現れる．不連続なシルエットを利用すると、視体積交差法で軌跡を 3 次元復元したときに、軌跡が寸断されてしまう．この問題は、図 3 のように、軌跡の残像に対して背景差分を行った後、ピクセルごとに加算し連続した残像としてから二値化することで解決できる．本手法ではシャッタースピードとフレームレートを同一に設定するため、ボールは前後フレームの時間内で撮像素子に常時露光していたことになる．よって、背景差分を行ったすべてのフレームの差分画像をピクセルごとに加算すれば、その時間内の軌跡が完全に連続して現れる．

次にボールの残像をシルエット化し視体積交差法で 3 次元復元する．視体積交差法とは、多視点から撮影された対象物体のシルエットを 3 次元空間中に投影し、それらの共通部分を求めることで物体の 3 次元形状を復元する手法である⁸⁾．軌跡をシルエット化し視体積交差法を適用すると、軌跡の形状が 3 次元復元される．

本提案手法では、背景差分を用いて軌跡の抽出を行っているため、ボール以外の移動物体も軌跡として

抽出してしまい、計測結果にもボール以外の物体が 3 次元再構成されて現れる可能性がある．この現象については、5.3.1 項で実験を行い考察する．

3.2 時刻情報の付加

3.1 節で求めたボールの 3 次元軌跡には、ボールがいつどこに存在していたかを示す時刻情報が付加されていない．理論的には、各フレームのボール軌跡の残像の端が正確に求められれば、ボール軌跡と時刻の関係は決定できる．ボール残像の端は、フレームが切り替わる瞬間にボールが存在していた位置であり、このときの時刻はビデオカメラのフレームレートから自明だからである．

そこで、フレームが切り替わる瞬間にボールが存在していた位置を直接求めることで 3 次元軌跡に時刻情報を付加する方法を提案する．

時刻情報の付加は以下の手順で行う．

- (1) カメラごとにすべてのフレームで、撮影された映像の背景差分を行う．
- (2) すべての差分画像に対して、次のフレームの差分画像とピクセルごとに積をとる．
- (3) 積をとった画像を二値化し重心を計算する．
- (4) 重心を 3 次元空間中に投影する．

撮影された残像を背景差分を行った後のピクセルごとの積をとることで、フレーム間で軌跡が重なる領域を抽出する．ピクセルごとの積は、軌跡の共通部分をとることと同義である．ただし、残像として撮影された軌跡は薄いため、積をとり軌跡が重なる部分を強調することで二値化しやすくする．

軌跡が重なる領域を抽出する場合、軌跡を二値化した後に前後フレームの共通部分をとるのが自然である．しかし、3.1 節で説明したように、軌跡の残像を二値化すると不連続なシルエットとなり、共通部分が存在しなくなる可能性がある．二値化する前にピクセルごとの積をとることで、軌跡の端部が重なる領域を安定して抽出することができる

4. 実 装

3章で述べた3次元軌跡の計測原理および時刻情報の付加手法に基づき、実装を行った。

4.1 ノイズ処理

3章で述べたように、撮影されたボール軌跡は薄いため、ノイズに影響されることなくボール軌跡のみをシルエット化することは難しい。

もちろん、本提案手法では最終的に視体積交差法で軌跡の3次元形状を求めているため、抽出した軌跡画像に多少のノイズが載っていても、そのノイズは視体積交差の共通部分とはならないことが多いため消えてしまう。そのため、ボール軌跡を抽出しシルエット化する際には、それほど厳しい閾値設定をする必要はない。

ただし、面積が想定されるボールの大きさより明らかに小さく、ノイズと見なせる連結領域は、ラベリングによるノイズ処理で除去する。

4.2 視体積交差法

視体積交差法とは、多視点映像から3次元形状を復元する手法の1つであり、多視点で撮影された物体のシルエットを復元の対象となる3次元空間に逆投影し、それらの共通部分を復元された3次元形状と見なすものである。

視体積交差法による3次元形状の復元に関する実装は、平面間透視投影に基づく高速化⁸⁾や、ボクセルデータを求めるのではなく観察視点に応じた映像を計算することで、映像の画質改善およびレンダリングの高速化を図った手法⁹⁾など用途に応じたさまざまな手法が提案されている。

本実装では最も一般的な実装方法を選択した。復元対象の3次元空間を任意の大きさのボクセルで区切り、それぞれのボクセルの中心座標をカメラの射影行列によって撮像面に投影し、シルエットの内外を判定する。すべてのカメラでシルエット内と判定されれば、そのボクセルを残す。この処理をすべてのボクセルに対して実行することで、3次元形状がボクセルデータとして復元される。

4.3 ビデオカメラの設置

本提案手法は、原理的には直交する3台のビデオカメラがあれば、3次元軌跡を求めることができる。ただし、ボールが直線状に動くなど、ごく単純な軌跡形状でない限り、3台のビデオカメラではボクセルの削り残しが多発する。

また、ボール軌跡がある程度の太さで撮影されていなければ、提案手法を適用することは困難である。そ

のため、極端に広い範囲を1台のビデオカメラで撮影することは避ける。

以上をもとに、次のようなビデオカメラ設置の指針を示す。

- (1) ボール軌跡の太さを10ピクセル程度確保することを条件に、1台のカメラが撮影可能な範囲を考える。
- (2) ボールの移動範囲全域をカバーできるようなカメラ台数を考える。このとき、計測対象範囲全域が、数台のカメラでとらえられている必要がある。
- (3) カメラは計測範囲を取り囲むように設置する(一般的に困難であるが、天井から撮影することも検討する)。
- (4) ボールが主に移動する方向があれば、移動向きに直交するような向きにカメラが設置できれば、なお良い(ただし、天井など設置が困難な場所になることが多い)。

5.2 および5.3節で後述する卓球やサッカーのペナルティキックのシーンでの実験では、7台のカメラを用い、計測範囲の周囲(天井を含む)に配置することで、良好な計測結果を得ている。

5. 実 験

本章では、提案手法の計測精度および、実際のスポーツの環境での有効性を検証する。スポーツの環境での検証には卓球とサッカーのシーンを用いた。

5.1 計測精度

本提案手法によるボールの計測精度の検証を行う。実験は、直径6cmの硬質なボール(グラウンドゴルフ用)が1度バウンドする様子を4台のビデオカメラを用いて計測した。ビデオカメラは、地面から高さ約50cmに2台、地面から約100cmに1台、互いに直交するように配置し、さらに、地面とほぼ同じ高さにバウンドを真横からV字状にとらえるように1台配置した。すべてのビデオカメラは、バウンド地点からの距離は約100cmであり、バウンド地点に光軸を向けた。このとき、ボールをカーボン紙上でバウンドさせることにより、バウンド地点を実測した。

図4に示すようにバウンドの瞬間の映像はボールの下部が影となってしまう、背景差分および二値化による軌跡の抽出が困難なため、ボールが地面に接している瞬間の計測はできなかった。しかし、計測結果の軌跡を、地面から上方1cmで床に平行に切断すると、図5のような出力が得られた。ボールの直径が6cmあるため、地面から1cmならば、バウンドの瞬間と

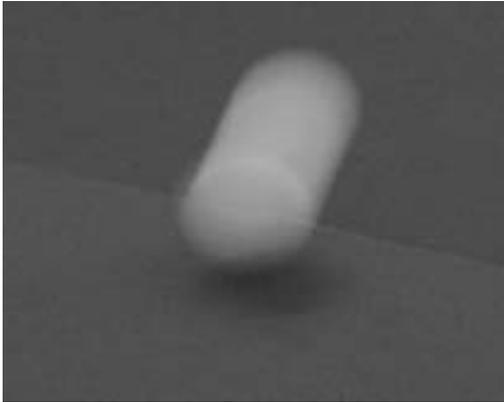


図 4 バウンドボールの瞬間
Fig. 4 Bounding ball.

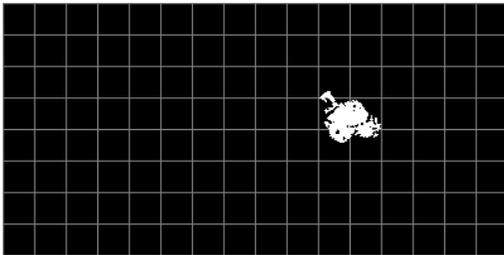


図 5 バウンド地点の計測結果 (床から 1 cm, グリッドは 5 cm 間隔)
Fig. 5 Measurement result of bound point (height from floor: 1 cm, grid interval: 5 cm).

ほぼ同座標を示していると考えられる。このシルエットの重心をバウンド地点の計測結果と見なす。

なお、視体積交差法を適用時には、ボクセルの大きさを 1 辺 2 mm の立方体に設定した。

実測結果と計測結果には、7.22 mm の差違が確認された。

5.1.1 考察

まず、本提案手法には推定や補間といったプロセスが存在しない。よって、軌跡の 3 次元形状に影響する可能性がある事項は、ビデオカメラの台数は十分か、シルエットは正確なボール軌跡を表現しているか、およびカメラキャリブレーションは正確かの 3 点である。カメラキャリブレーションが正確に行えていると仮定すれば、3 次元形状に影響を及ぼすのはビデオカメラの台数とシルエットである。

ここで、視体積交差法の計測結果は、ビデオカメラの台数に関係なくつねに真の物体形状を含んでいる。よって、真の 2 次元軌跡を完全に含むようなシルエットを作ることができれば、本提案手法は、真のボール軌跡を必ず含むような軌跡の 3 次元形状を計測可能で

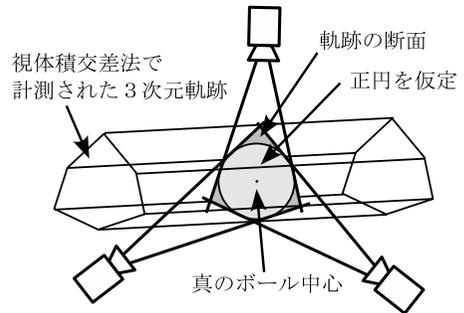


図 6 軌跡の断面と視体積交差法
Fig. 6 Cross section of trajectory and shape of silhouette.

あるといえる。

本実験では、ボール中心を完全に含んだ軌跡を撮影できたため、計測されたボール軌跡も真のボール中心を含んでいると考えられる。

図 6 に示すように、軌跡の断面は多角形をしており、軌跡の断面に内接する円を求めればボールの中心を求めることができる。そのためには鮮明なシルエット(軌跡の断面)が必要だが、薄いボールの残像から軌跡を背景差分、二値化により抽出しているため、抽出されている軌跡は実際のボールの大きさよりも小さく、またノイズの影響のために内接円を求めても内接円の中心がボールの中心になっているとは限らない。そこで本実験では、軌跡の断面に対して重心を求めボールの中心と見なした。このため本来のボールの中心と差違が発生したと考えられる。

5.2 卓球による実験

実際の卓球の環境で提案手法の有効性を調べた。

卓球の場合、卓球台の上に限定すれば、ボール以外の移動物体が映り込むことが比較的少ないため、背景差分によるボールの抽出が行いやすいと考えられる。

5.2.1 実験環境

公式規格の卓球台および卓球ボールを使用した。ボールは 40 mm オレンジボールである。実験環境を図 7 に示す。ビデオカメラは Sony Handycam シリーズを 7 台利用し、卓球台の周囲を取り囲むように配置した。映像は、すべて DV 形式 (720 × 480 ピクセル) でコンピュータに取り込んだ。すべてのビデオカメラのフレームレートは 30 fps、シャッタースピードは 1/30 sec に設定した。カメラパラメータのキャリブレーションは DLT 法¹⁰⁾を用い、既知の 3 次元座標は、卓球台の中央に 10 cm 平方の格子模様を貼り付けた箱 (70 cm(W) × 60 cm(H) × 40 cm(D)) を置くことで決定した。

5.2.2 実験結果

撮影された画像を図 8 に示す。ボールは 1 度バウ

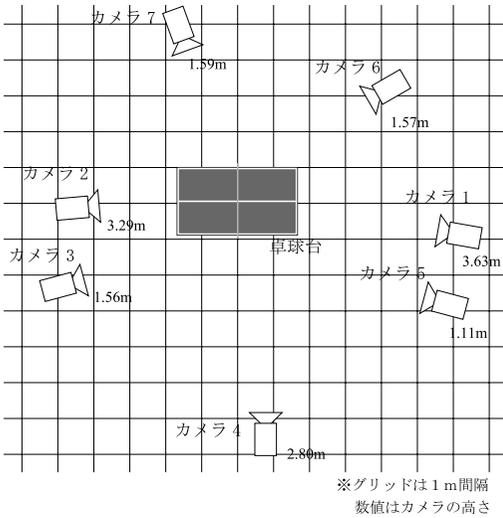


図 7 実験環境とカメラの設置位置
Fig. 7 Experimental setup.

ンドして卓球台を縦断した．これらの画像は，ちょうどバウンドの瞬間をとらえたものである．

次に，図 8 に対応するシルエットを図 9 に示す．これは，図 8 に示したフレームとその 1 つ前のフレームとを合成し，背景差分を行った画像である．

すべてのフレームを合成したシルエットを，図 10 に示す．

すべての視点のシルエットに対して視体積交差法適用し，ボールの軌跡を再構成した結果を図 11 に示す．視体積交差法の適用範囲は 400 cm × 152.5 cm × 60 cm であり，卓球台の上面 (274 cm × 152.5 cm) より若干大きい範囲，およびその上方 60 cm の範囲に相当する．また，ボクセルは 1 辺が 1 cm の立方体である．

次に求めた時刻情報を図 12 に示す．時刻情報は，ボール軌跡に対してなるべく直交するようなビデオカメラであるカメラ 4 を選択して求めた．図 12 は，求めた時刻情報をシルエットに重ねたものである．図 13 に求めた時刻情報を計測された 3 次元軌跡に対して投影し，軌跡と時刻の対応をとった様子を示す．

5.2.3 考 察

図 8 では，カメラ 1 およびカメラ 5 でプレーヤが映ってはいるが，卓球台から離れた位置にいるため他のカメラには映っていない．

図 9 を見ると，背景差分を用いてシルエット化しているにもかかわらず軌跡以外のノイズが随所に見られる．ノイズは卓球台の表面のサイドラインおよびエンドライン付近によく現れており，背景撮影時と比べて，ボール撮影時には卓球台が若干動いていた可能性があ



図 8 各カメラで撮影された映像
Fig. 8 Captured images.

る．また，三脚や卓球台の脚など，光沢のある物体もシルエット化されている．これは，光源状況の微妙な変化にともなうものであると予想される．また，カメラ 1 およびカメラ 5 ではプレーヤもシルエット化してしまっている．図 8 と図 9 を比較すると，ボール軌跡自体のシルエット化は良好に行われていることが分かる．

次に図 10 では，すべてのフレームが合成されているため，図 9 に比べてノイズが増加しているが，ボールの軌跡は 1 本につながった状態で確認できる．ただし，カメラ 5 ではプレーヤとボールの軌跡が重なった状態でシルエット化されてしまっている．

図 11 の再構成結果では，ボールの 3 次元軌跡がボクセルの集合として再構成されていることが確認できる．シルエットでは散見されたノイズも再構成結果では確認されない．これは，位置的にランダムに発生するノイズは視体積交差法における共通部分になる可能性が低いからである．また，卓球台から離れたプレーヤも再構成結果には現れていない．図 10 でボール軌跡とプレーヤが重なった状態でシルエット化されていたが，これも再構成結果に影響は見られなかった．他の視点のシルエットがこの部分のボクセルを削ったた

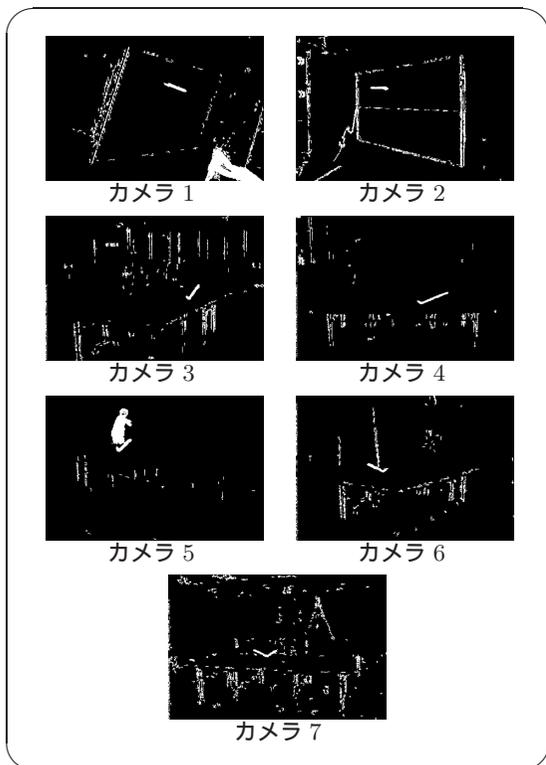


図 9 図 8 に対応するシルエット
Fig.9 Silhouettes.

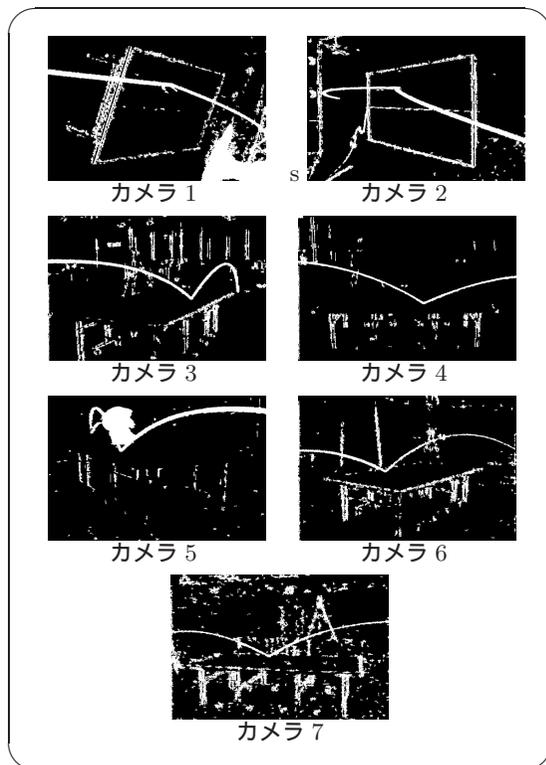


図 10 すべてのフレームを合成したシルエット
Fig.10 Composite silhouettes of all frames.

めであると考えられる。

図 12 を見ると、時刻情報はほぼ等間隔で並んでおりボールはほぼ等速で飛行していたことになる。この時刻情報は、撮影残像と目視で比べて見る限り、正確にフレームが切り替わる瞬間のボール位置を示していることが確認できた。図 13 のように、求めた時刻情報を 3 次元空間に投影することで、3 次元軌跡と時刻との対応関係が把握できる。

5.3 サッカーのペナルティキック

サッカーのペナルティキック時のボールの軌跡を計測した。ペナルティキックの場合、キックは必ず撮影画像内に写り込む。そのため、ボール以外の移動物体が映像中に映っていた場合、本提案手法および実装法ではどのような再構成結果が得られるのか確認ができる。

5.3.1 実験環境

実験は、実際のサッカーの公式規格の約 1/2 スケールでペナルティエリアの一部を再現して行った。実験環境を図 14 に示す。ゴールマウスは横 3m 高さ 2m である。なお、実験を室内で行った都合上、ボールはサッカーボールではなくソフトバレーボールのボール（ピンク色、直径約 25 cm）を利用した。ビデオカメ

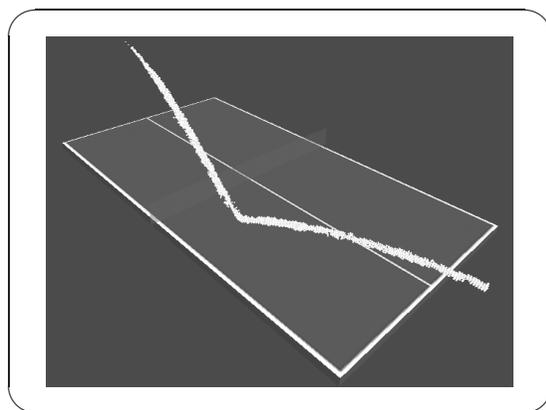


図 11 卓球のボール軌跡の再構成結果
Fig.11 Reconstruction of 3D ball trajectory.

ラは Sony Handycam シリーズを 7 台利用し、ボールが飛ぶ範囲を取り囲むように配置した。カメラ配置が異なる以外は、使用したビデオカメラおよびそのセッティングは 5.2.1 項と同様である。すべてのビデオカメラのフレームレートは 30 fps、シャッタースピードは 1/30 sec に設定した。キャプチャ形式はすべて DV 形式である。また、ビデオカメラの内部および外部パラ

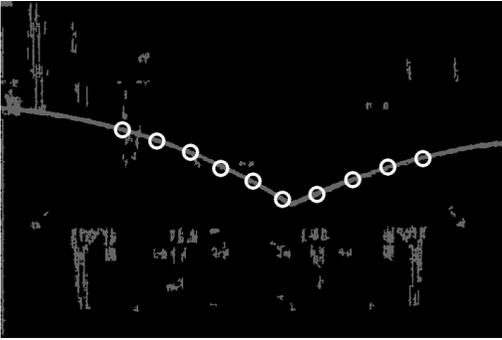


図 12 求めた時刻情報とシルエット
Fig. 12 Time information.

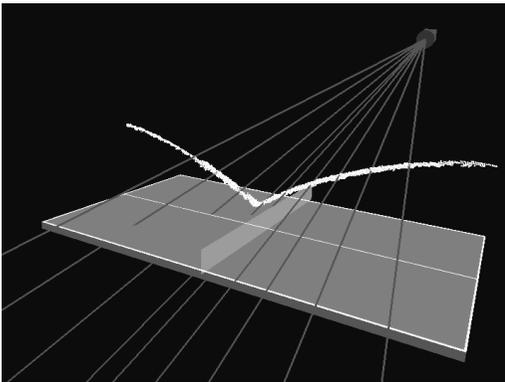


図 13 軌跡と時刻情報の対応関係
Fig. 13 Time information and reconstructed result.

メータは、図 14 のキャリブレーション地点に、50 cm 間隔に印をつけた長さ 2.5 m のポールを垂直に配置することで既知の空間座標を決定し、5.2.1 項と同様 DLT 法を用いてを求めた。

本実験では、キックがペナルティマークに置かれたボールをゴールに向かって蹴る様子を撮影した。

5.3.2 実験結果

ボールは蹴られた後、ゴールのクロスバーに当たった。その間、約 12 フレーム (0.4 秒) であった。ボールはクロスバーに当たった後、約 9 フレーム (0.3 秒) かけてゴールライン付近に落ちた。なお、ビデオカメラが非同期的なためこれらのフレーム数は撮影したカメラにより若干異なる。

撮影された画像を図 15 に示す。この画像は、ボールが蹴られてから約 0.2 秒後の様子である。

撮影画像から背景差分によってボールをシルエット化した画像を図 16 に示す。これは、図 15 に示したフレームとその 1 つ前フレームとを合成し、背景差分を行った画像である。

すべてのフレームを合成した画像を図 17 に示す。

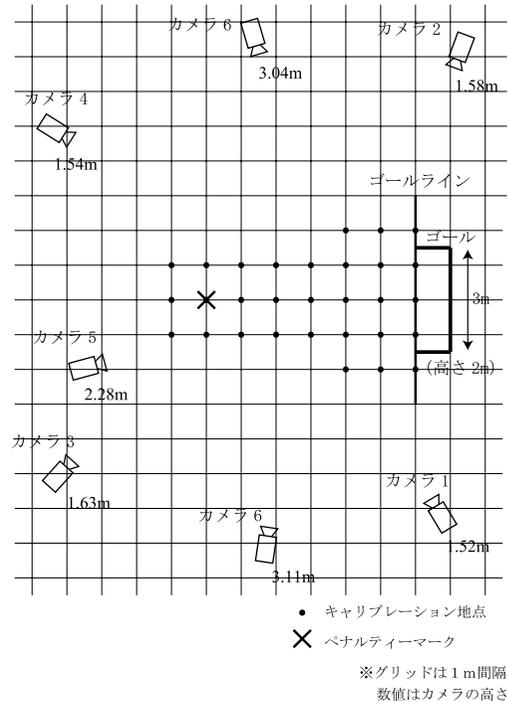


図 14 実験環境とキャリブレーション地点
Fig. 14 Experimental setup.

これは、ボールが蹴られてからクロスバーに当たり地面に落ちるまでの、すべてのフレームのシルエットを合成した画像である。なお、カメラ 1 とカメラ 2 に関してはゴール付近をとらえていないため、ボールが蹴られてから映像外に飛び出すまでの全フレームを合成した。

図 18 は再構成されたサッカーボールの軌跡である。また、上方から見た軌跡を図 19 に示す。なお、視体積交差法は、ペナルティマークからゴールラインまでの 6 m を長辺、ゴール両端より 50 cm ずつ大きな 4 m を短辺、クロスバーより 50 cm 高い 2.5 m を高さとした直方体の範囲に適用した。このため、ゴールラインを越えゴール内に入ったボールは再構成結果には現れない。また、ボクセルは 1 辺が 5 cm の立方体である。

次に求めた時刻情報を図 20 に示す。時刻情報は、ボール軌跡に対してなるべく直交するようなビデオカメラであるカメラ 6 を選択して求めた。図 20 は、求めた時刻情報をシルエットに重ねたものである。

5.3.3 考察

本実験は、5.2 節で行った卓球の実験と違い、プレーヤがより映像に映り込みさらにボールと重なる状況を想定している。図 15 を見ると、すべてのビデオカメラの映像にプレーヤが映り込んでいるのが分かる。図 16

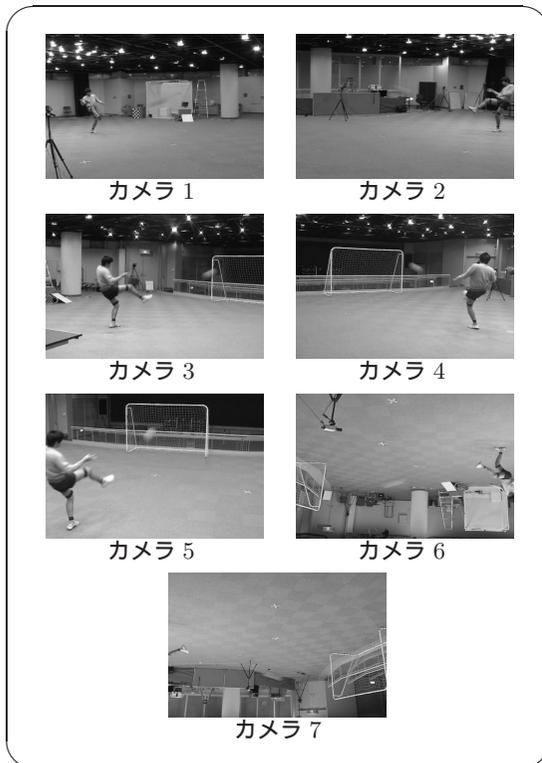


図 15 各カメラから撮影された映像

Fig. 15 Captured images.

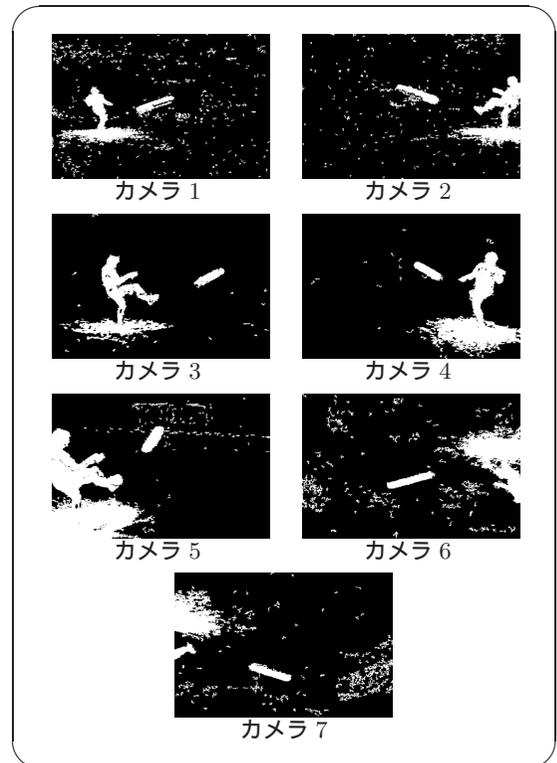


図 16 図 15 に対応するシルエット

Fig. 16 Silhouettes.

のシルエット画像では、プレーヤおよびその影が大きくシルエット化されてしまったことが分かる。また、小さなノイズが散見される。しかし、ボールの軌跡に注目すると、ボールははっきりとしたシルエットとして抽出できていることが分かる。

図 17 を見ると、プレーヤの一連のキック動作、およびその影がすべてシルエット化され、ボール以外に非常に大きなシルエットができてしまっている。また、ボールがクロスバーに当たりゴールが若干動いたため、ゴール全体もシルエット化されてしまった。

この結果は、18 のボール軌跡の再構成結果にも大きく影響を及ぼしている。まず、プレーヤの残像が大きく再構成されてしまっている。その結果、蹴られてからしばらくの間のボールの軌跡は、プレーヤに埋まってしまい判別できない。また、ボールがクロスバーに当たる少し前から、ボールの軌跡がだんだんと扇状に太くなっていることが確認できる。これは、図のカメラ 5 において、ボールのシルエットが、ゴールのシルエットに重なってしまっているためである。その結果、カメラ 5 の視点からボクセルを削ることができなかったと考えられる。

本実装では、背景差分でボール軌跡を抽出している

ため、当然ながら背景が変化するとボール軌跡の抽出が困難になる。本実験の場合、プレーヤとゴールという大きな背景変化がボールの 3 次元軌跡の再構成結果に大きな影響を及ぼしている。

そこで、ボールがクロスバーに当たる直前までのフレーム、つまりゴールが動いていない間のフレームを利用して、同様にボール軌跡を再構成した。

図 22 に、ボールがクロスバーに当たる直前までのフレームからなるシルエットを示す。図と比較するとゴールの影響が非常に少なくなっていることが分かる。特にカメラ 5 では、ゴールと重なって判別できなかったボールの軌跡がはっきりと認識できるようになった。

このシルエットを利用して再構成を行った結果を図 23 に示す。扇型に広がっていたボール軌跡の太さが改善されたことが分かる。

また、図 20 のように、タイムスタンプを求めることは完全に失敗した。しかし、図 24 に示す重心を求めるために利用した画像を見ると、ボールは確実に抽出できていることが分かる。よって、失敗の原因は、ボールよりプレーヤのシルエットが大きかったためプレーヤをボールと判断して重心を求めたためと推測できる。プレーヤとボールを判別できれば、この問題は解決可

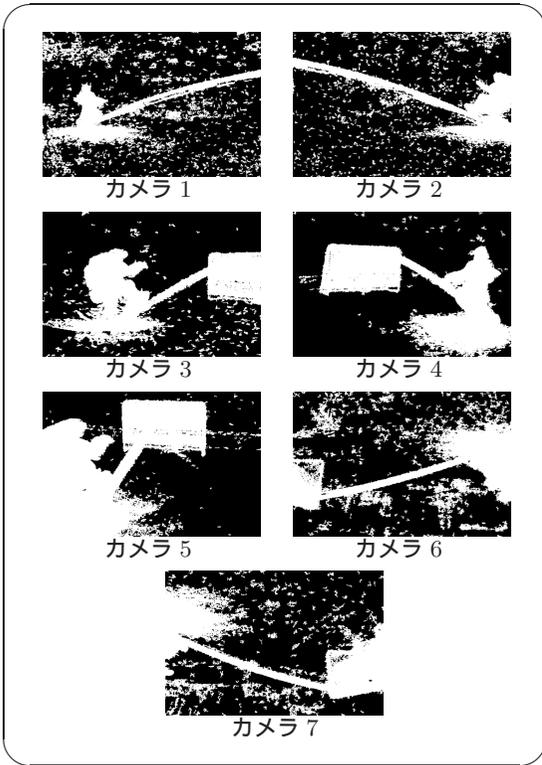


図 17 合成したシルエット
Fig. 17 Composite silhouettes of all frames.

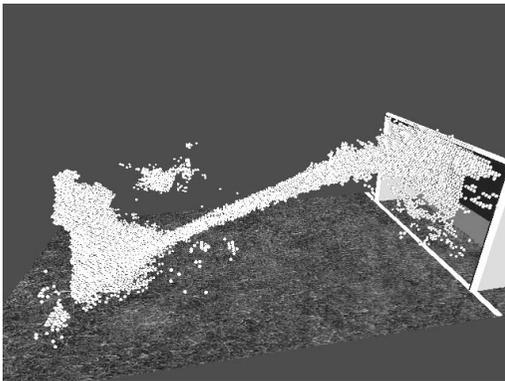


図 18 ボール軌跡の再構成結果
Fig. 18 Reconstruction of 3D ball trajectory.

能である。

6. 考 察

6.1 スポーツへの応用

ここでは、計測結果である軌跡の3次元形状から、実際にスポーツの判定などへ応用する際の問題点について考察する。

まず、5.1.1項で考察したように、真の2次元軌跡

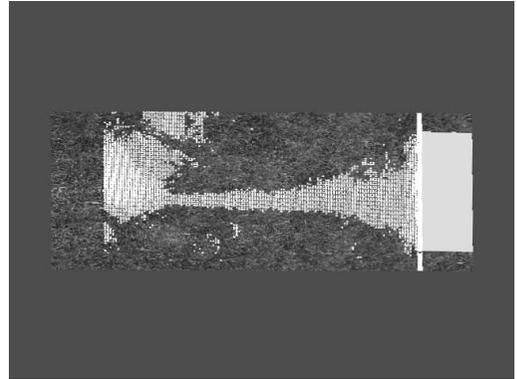


図 19 上方より見たボール軌跡の再構成結果
Fig. 19 Reconstruction of 3D ball trajectory (overhead view).

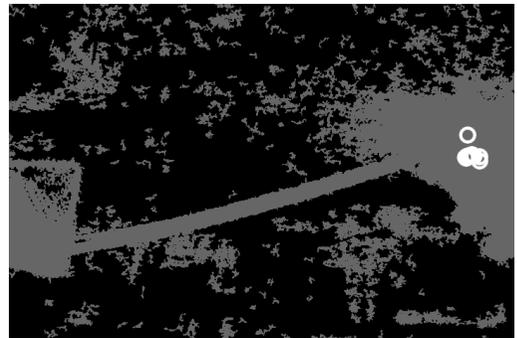


図 20 求めた時刻情報とシルエット
Fig. 20 Time information.

を完全に含むようなシルエットを作ることができれば、本提案手法は、真のボール軌跡を必ず含むような軌跡の3次元形状を計測可能であるといえる。

しかしながら、本提案手法を実際にスポーツの判定などに用いるには、計測結果から実際に真のボール軌跡を求めるステップが必須となる。たとえば、計測された軌跡の3次元の細線化によって、真のボール軌跡を推測する手法が考えられる。真のボール軌跡が求められれば、ボールの輪郭位置が決定でき、サッカーのライン判定などへ応用することができる。この本提案手法で求められたボール軌跡から真のボールの軌跡を推定する手法の検討は今後の課題である。

6.2 複雑な移動軌跡への対応

5章で実験した軌跡は、すべてビデオカメラを横切るだけの比較的単純な動きをするものばかりである。しかし、実際のスポーツシーンでは、ボールが打ち返されたり、何度もバウンドをしたりと複雑な動きをすることもある。

すべてのフレームの軌跡を合成してから視体積交差

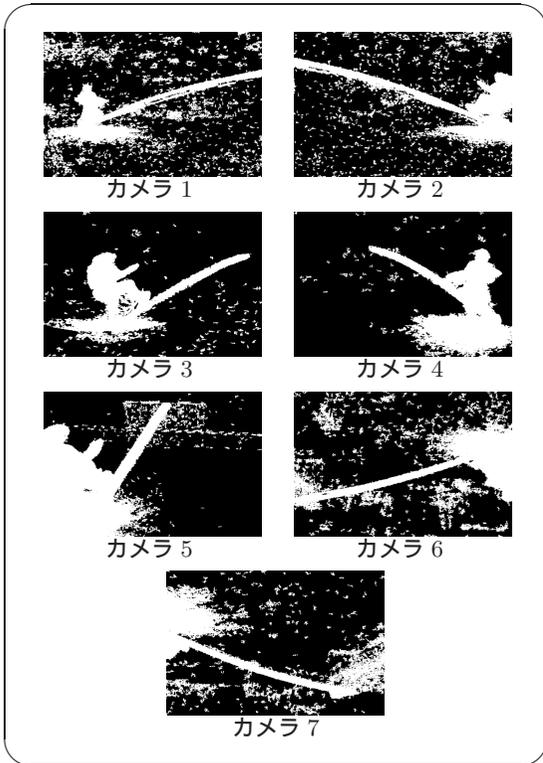


図 21 合成したシルエット
Fig. 21 Composite silhouettes.

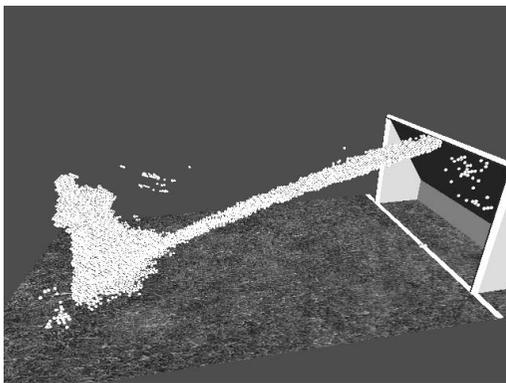


図 22 ゴールポストに当たる直前までのボール軌跡の再構成結果
Fig. 22 Reconstruction of 3D ball trajectory until the ball bounced back.

法にける本実装方法は、ボールが複雑な動きをすると、再構成された軌跡にボクセルの削り残しが頻発することになる(ただしこの場合も 5.1.1 項で述べたように、真のボール軌跡は再構成結果のどこかには必ず含まれている)。

この問題は、すべてのフレームを合成したシルエットを利用するのではなく、1 フレームごとに視体積交差法にかければ、ほぼ解決することができる。

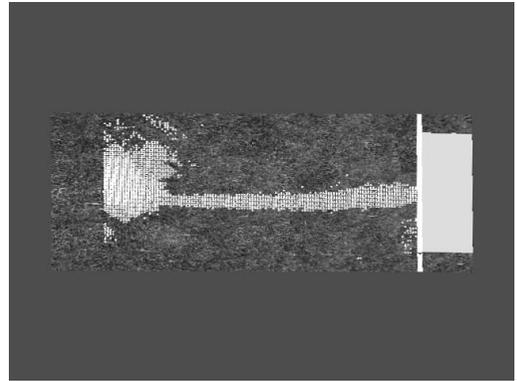


図 23 上方から見たゴールポストに当たる直前までのボール軌跡の再構成結果
Fig. 23 Reconstruction of 3D ball trajectory until the ball bounced back (overhead view).

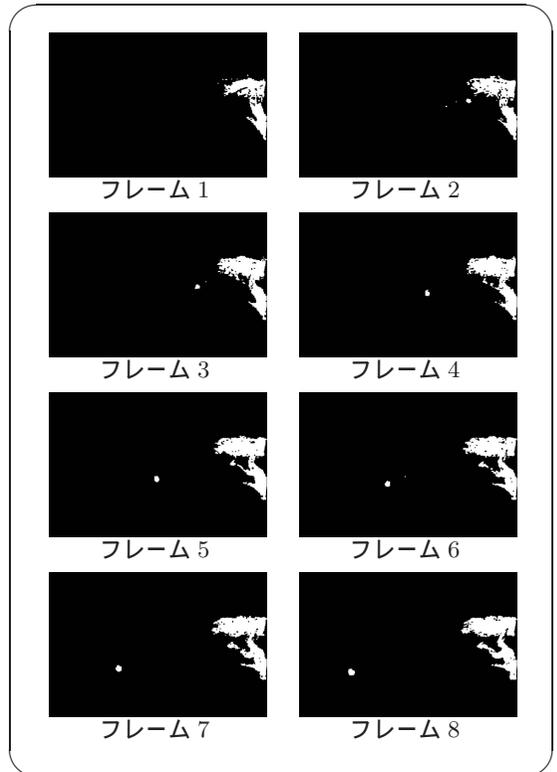


図 24 重心を求めるために利用したシルエット
Fig. 24 Silhouette for measuring the gravity point of ball.

つまり、図 25 に示すように、左から右へ移動するボールを同期がとれていないカメラ A とカメラ B で撮影したとする。同期がとれていないため、ボールは異なるタイミングで撮影される。図 25 では、カメラ B はカメラ A より撮影タイミングが遅くなっている。しかし、タイミングは異なっても同期のずれが 1 フ

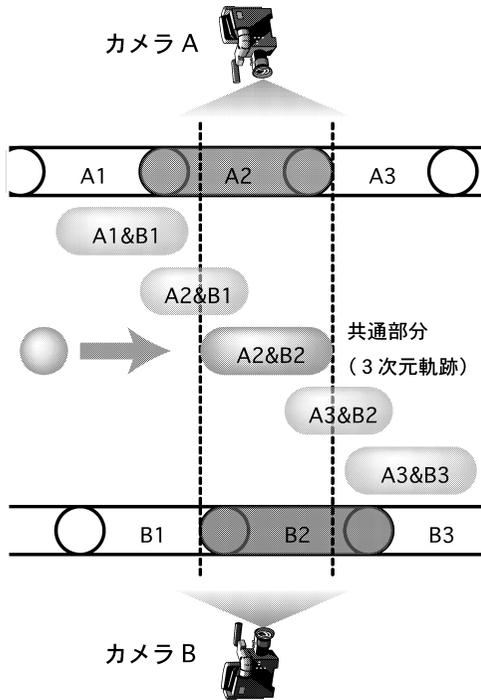


図 25 同期が必要ない理由

Fig. 25 Principle of asynchronous measurement.

レーム以内の画像どうしであれば、シルエットの共通部分は存在する。たとえば、残像 A2 と残像 B2 に対して視体積交差法を適用すると、3 次元軌跡 A2&B2 が共通部分として現れる。この 3 次元軌跡の続きの部分、つまり 3 次元軌跡 A3&B2 は、カメラ B はそのまま残像 B2 を用い、タイミングが早いカメラ A のフレームは 1 フレーム進め残像 A3 を用いて、視体積交差法を適用することで求められる。

上記手法は、1 度に視体積交差法を適用する軌跡は 2 フレーム分と短くなるため、複雑な軌跡が比較的簡単な形状に分割され、ボクセルの削り残しも少なくなり、ボールの往復運動にも対応できると考えられる。

6.3 ボール軌跡の残像とシルエット化

5.3 節で見られたように、本実装で用いた背景差分による軌跡の抽出は、計測結果に大きな影響を及ぼすことがある。たとえば、プレーヤもシルエット化してしまう現象は、実際にスポーツシーンで応用する際の障害になる。

この問題の解決法としては、ボール軌跡の色認識がある。一般にボールスポーツでは、ボールは他の用具や施設の色、さらにはプレーヤのユニフォームとは異なる色であることが多く、ボールと他の物体とを区別することも可能であろう。実際、文献 2) ではボールの黄色を認識することでテニスボールの計測を行って

いる。

ただし、本提案手法で撮影された軌跡は、残像としてとらえられているため非常に薄い。これは、静止物体はずっと同じ受光素子にとらえられ続けるが、移動物体は時間とともに異なる受光素子にとらえられてしまうからである。ボールの色認識を行う場合、薄い軌跡への対応が必要である。

7. 結 論

本論文では、カメラの同期を必要としない連続した軌跡が計測可能なボールの 3 次元軌跡の計測法を提案した。本提案手法は、ビデオカメラのシャッタースピードを調整して得られるボール軌跡の映像に対して、視体積交差法を用いてボールの 3 次元軌跡を再構成するものである。

ボールスポーツでは、テレビ向けのコンテンツの作成や、正確なプレイの判定、訓練支援システムなどにボールの 3 次元軌跡を計測することが求められている。本提案手法は、一般的な非同期のビデオカメラにより、正確かつ連続したボールの 3 次元軌跡が計測可能であり、その応用範囲は広い。

実験では、本提案手法が視体積交差法を用いて計測を行っているため、シルエットのノイズにロバストであることが確認できた。ただし、シルエット化の実装に単純な背景差分を用いているため、プレーヤなどボール以外の移動物体もシルエット化され、それらが計測結果に影響することもある。今後、ボール軌跡を色で抽出するなど、ボール軌跡と他の移動物体を見分ける手法の確立が必要である。

参 考 文 献

- 1) Carnegie Mellon Goes to the Super Bowl. <http://www.ri.cmu.edu/events/sb35/tksuperbowl.html>
- 2) Pingali, S.G., Jean, Y. and Carlbom, I.: Real Time Tracking for Enhanced Tennis Broadcasts, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.260-265 (1998).
- 3) QuesTec, Inc.: PitchTrax. http://www.questec.com/q2001/prod_pt.htm
- 4) International Tennis Federation: ITF Tennis — Technical-Line-calling systems. <http://www.itftennis.com/technical/research/linecalling/>
- 5) Hawkeye Innovations Ltd.: HAWK-EYE. <http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/>
- 6) 清水彰一, 藤吉弘巨: カメラ間のシャッター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), Vol.1, pp.428-433 (2004).

- 7) Caglioti, V. and Giusti, A.: Ball Trajectory Reconstruction from a Single Long-exposure Image, *Proc. CVBASE'06 — Workshop on Computer Vision Based Analysis in Sport Environments* (2006).
- 8) 松山隆司, 高井勇志, ウ 小軍, 延原章平: 3次元ビデオの撮影・編集・表示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.521-532 (2002).
- 9) Matusik, W., Buehler, C., Raskar, R., Gortler J.S. and McMillan, L.: Image-Based Visual Hulls, *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp.369-374 (2000).
- 10) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).

(平成 18 年 5 月 9 日受付)

(平成 18 年 11 月 10 日採録)

(担当編集委員 岡谷 貴之)



高野橋健太 (正会員)

2006 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在, 株式会社日立製作所ユビキタスプラットフォーム開発研究所勤務。修士 (工学)。



眞鍋 佳嗣 (正会員)

1995 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学基礎工学部助手。1999 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授, 現在に至る。2001 年ヨエンスー大学客員研究員。質感計測・表現の研究に従事。博士 (工学)。



安室 喜弘 (正会員)

2000 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年大阪大学大学院リサーチアソシエイト。2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手, 現在に至る。コンピュータグラフィックス, 人工現実感に関する研究に従事。博士 (工学)。



井村 誠孝

2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同研究科助手, 現在に至る。可視化および人工現実感に関する研究に従事。博士 (工学)



千原 國宏

1973 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年大阪大学基礎工学部助手。1983 年同助教授。1992 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授, 現在に至る。バーチャルリアリティの応用研究に従事。工学博士。