多視点テニス画像からのプレーヤ視点画像の生成

Video Synthesis of a Tennis Player's Viewpoint from Multiple View Videos

木村 健二[†], 正会員 斎藤 英雄[†]

Kenji Kimura[†] and Hideo Saito[†]

Abstract We propose a new method for synthesizing player viewpoint images from multiple view tennis videos. Our method uses two key techniques: virtual-view synthesis and player's viewpoint estimation. In the former, we divide the object tennis scene into sub-regions, which are the background, tennis court ground, players, and ball. For each sub-region, a virtual viewpoint image is synthesized by considering the geometrical conditions of each region. Then the virtual viewpoint images of the sub-regions are merged into a virtual viewpoint image of the whole scene. In virtual viewpoint image generation, view interpolation, which is a way of synthesizing images at an intermediate viewpoint to two views of the real object, restricts the viewpoint to a position between the two views. To avoid this restriction, we propose our first key technique, whereby we are able to flexibly position the viewpoint. In our second technique, the viewpoint is computed using epipolar geometry from the center of gravity of a player. By applying the computed player's viewpoint to the former technique, we can synthesize player viewpoint images. Experimental results demonstrate that the proposed method can successfully provide a video of the tennis player's viewpoint from multiple-view video images.

キーワード: プレーヤ視点, 自由視点映像, 射影幾何, トラッキング, 多視点映像

1. ま え が き

近年, スポーツ等の放送映像に対して, 特殊な映像効果を付与する試みが盛んになっている. 例えば, テニスにおけるボールの追跡を行い, CG に重畳表示して自由な視点で見ることが可能なシステム¹⁾や, アメリカンフットボールのスーパーボウル中継において, 同一シーンを 30 台以上のカメラで撮影し, それらを連続的に切り替えて提示する映像効果を持つ EyeVision システムなどが挙げられる. 一方, Computer Vision の分野では, 多数のカメラにより撮影したスポーツ映像から, 自由に指定された仮想視点における映像を生成することを目的とした研究が行われている²⁾.

複数のカメラ画像から仮想視点画像を生成する手法は, Image Based Rendering (IBR) と呼ばれる. IBR は, Model Based 手法と Transfer Based 手法に分けられる. Model Based 手法は, 3 次元モデルを復元して, テクスチャを貼り付けて仮想視点画像を生成する手法²⁾³⁾である.

一方, Transfer Based 手法は入力画像間の対応点を仮

想視点に移動して, 仮想視点画像を生成する手法であり, View Interpolation⁶⁾, View Morphing⁷⁾ 等が代表的な手法として知られている. これらの手法では, 入力画像間で画素の対応関係が必要である. この対応関係を多視点画像から自動的に求めるために対象の 3 次元モデルを復元し, Transfer Based 手法により仮想視点画像を生成する手法⁵⁾が提案されている. また, 多視点画像から 3 次元モデルを復元するためには, シーンの 3 次元座標系とカメラ座標系の射影関係を推定する強校正を行う必要があるが, その空間が大きくなるほど, その作業は困難となる. そこで, これを軽減するために, カメラ間の射影幾何関係のみを推定する弱校正を行うだけで 3 次元モデルを推定し, 仮想視点画像を推定する手法⁴⁾も提案されている.

この Transfer Based 手法に基づいた IBR を, サッカーシーンを全体に対して適用し, 仮想視点画像を生成する手法が稲本ら⁸⁾によって提案されている. この手法では, サッカーシーンをグラウンド面と背景シーンの静止領域, そして, 選手とボールの動領域に分け, 入力画像の各領域毎の特徴に応じて, カメラ間の射影幾何関係を利用し, 仮想視点画像を生成する. この手法では, カメラ間の射影幾何関係を求める弱校正を行うだけで良いので, サッカーのような大規模空間におけるスポーツシーンに対しても, 容易に適用可能である. また, シーンをその幾何学的性質に応じて分割し, 各領域毎に仮想視点画像を生成して, それらを

2003 年 12 月 18 日, 電子情報通信学会 PRMU 研究会で発表

2004 年 3 月 1 日受付, 2004 年 5 月 25 日再受付, 2004 年 7 月 9 日採録

[†]慶応義塾大学 情報工学科

(〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, TEL +81-45-566-1747)

[†]Department of Information and Computer Science, Keio Univ.

(3-14-1, Hiyoshi Kouhoku-ku Yokohama 223-8522, Japan)

合成するという方法であるため、サッカーシーン全体について仮想視点画像を生成することに成功している。

本論文では、この稲本らの手法⁸⁾をテニスに拡張して利用することにより、テニスのプレーヤ視点における仮想視点画像を生成する手法を提案する。本手法では、テニスのプレーヤ位置を複数のカメラで追跡し、このプレーヤ位置における仮想視点画像を生成する。そして、本手法をテニスの多視点画像に適用することにより、本手法の有効性を示す。

稲本らの手法⁸⁾では、Transfer Based 手法の一つである、View Interpolation⁶⁾に基づいて仮想視点画像を生成している。この手法は、二つの入力視点画像に対する内挿比によって仮想視点を指定するため、仮想視点の移動が入力視点間に制限されるという問題があり、そのままテニスに適用しただけでは、追跡したプレーヤ位置における仮想視点画像を合成することができない。そこで、提案手法では、内挿比を使わずに、自由に視点位置を設定でき、そして視点の位置を直接指定できる新しい手法を用いる。具体的には、指定された仮想視点と入力視点画像の F 行列を用いて仮想視点画像を合成する。これにより、仮想視点の自由度が制限されず、追跡したテニスプレーヤ位置における仮想視点画像を自由に生成できる。なお本手法では、この仮想視点と入力視点の F 行列算出のために、テニスコート形状の規格を利用する。

多視点画像からの仮想視点画像生成法をスポーツ画像に利用して得られる効果の一つとして、競技中のプレーヤの視点における画像提示が考えられる。しかし、従来研究では、実際にプレーヤ視点画像を生成するにまでは至っていない。本研究では、このプレーヤ視点における画像生成を実画像から行っているという点も特徴の一つになっている。

2. 射影幾何

2.1 射影行列

図1に示すようなカメラモデルにおいて、3次元空間での座標 X とその画像上に投影された座標 m との関係は、射影行列 P によって記述される。

$$\tilde{m} = P\tilde{X}_w \quad (1)$$

$$P = \begin{pmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} [R|T] \quad (2)$$

ただし、 f は焦点距離、 (u_0, v_0) は画像中心、 R は回転行列、 T は並進行列である。

2.2 F 行列

複数の視点における相対的なカメラの位置や姿勢の情報はエピポーラ幾何によって記述できる。図2に示すように、空間上の点 X と m を結ぶ線を視点2に投影した線上に、視点1の点 m の対応点が存在することになる。この投影

図1 カメラモデル
Camera model.

図2 エピポーラ幾何
Epipolar geometry.

図3 ホモグラフィ
Homography.

された線のことをエピポーラ線と呼び、対応点の探索領域を制限することができる。そして、エピポーラ線 l' は次のようにして求めることができる。

$$l' = F\tilde{m} \quad (3)$$

ここで F は Fundamental Matrix(F 行列) と呼ばれ、既知な対応関係から算出することができる。

2.3 H 行列

空間中である平面上の点は、その平面において一意に決まる行列 H によって、画像間の1対1の対応関係を得ることができる(図3)。

$$\tilde{m}' = H\tilde{m} \quad (4)$$

ここで m, m' は2視点で対応する点同士である。また H は Homography(H 行列) と呼ばれ、この平面上の点における既知な対応関係から算出することができる。

3. 提案手法

図4に本手法の流れを示す。本手法では、対象テニスシーンをグラウンド面と背景シーンの静止領域、そして、選手とボールの動領域に分け、領域毎に仮想視点画像を生成し、最後にすべての領域を合成することにより、シーン全体の

図 4 本手法の流れ
Flowchart of proposed method.

図 5 View Interpolation における対応点の移動
Transfer of corresponding points in View Interpolation.

仮想視点画像が生成される。一方、別途設置されたカメラにより追跡したプレーヤ視点によって仮想視点位置を指定することによって、プレーヤ視点画像を生成する。

3.1 動領域に対する仮想視点画像生成

動領域に対しては、Transfer Based 手法を用いて画像を合成することで仮想視点画像を生成する。この Transfer Based 手法には、異なる 2 視点での画像からそれらの中間位置での画像を合成できる手法である View Interpolation⁶⁾がある。この View Interpolation では、2 つの入力画像の内挿比を指定し、2 つの入力画像間の対応点の移動量を内挿することにより、仮想視点画像上での対応点の位置を決定する。そして、この位置に入力画像の画素値を与えることを、入力画像間のすべての対応画素について行うことによって、仮想視点画像が生成される。

このとき、View Interpolation では、図 5 に示すように 2 つの入力画像の内挿比により、仮想視点位置を決定するため、仮想視点位置の設定範囲が 2 つの入力画像の視点を結んだ直線の間に制限される。これに対して、本手法では、2 つの入力画像の内挿比ではなく、推定されたプレーヤ位置に応じて、仮想視点の位置や姿勢を指定できなくてはならない。そこで本手法では、指定された仮想視点から算出される、仮想視点と入力画像間の $\mathbf{F}$ 行列によって仮想視点画像を合成する。

図 6 のように、任意に指定された仮想視点に対して、2 つの入力画像に対する 2 つの $\mathbf{F}$ 行列を与えたとき、2 つの入力画像間の対応点が、仮想視点上ではエピポーラ線の交点に対応することになる。そこで、2 つの入力画像間のすべての対応点の画素値を、仮想視点上でエピポーラ線の交

図 6 本手法の対応点の移動
Transfer of corresponding points in the proposed method.

図 7 規格部位の仮想視点での位置算出
Estimation of the position in the virtual view image of standard parts.

図 8 テニスコートの規格部位
Standard parts on tennis court.

点に与えることによって、仮想視点画像が生成できる。

このように、動領域に対する仮想視点画像生成のためには、仮想視点と入力画像間の $\mathbf{F}$ 行列、そして、入力画像間の画素毎の対応関係が必要である。仮想視点と入力画像間の $\mathbf{F}$ 行列は、テニスコートの規格を利用して推定する。また、入力画像間の画素毎の対応関係については、選手とボールに分け、領域毎に推定する。以下に、これらの推定方法の詳細について述べる。

(1) 仮想視点と入力画像の $\mathbf{F}$ 行列の推定

仮想視点の位置と姿勢が与えられると、(2) 式の $\mathbf{R}$ と $\mathbf{T}$ が決定される。仮想カメラの焦点距離 f は任意に与える。すると、仮想カメラの射影行列を算出できる。そして、この仮想カメラの射影行列から、図 7 に示すようにして、テニスコート特有の規格により、3 次元位置が既知な点 (図 8) が、仮想カメラ上に投影される位置を算出することができる。一方、これらの規格部位が入力画像に撮影されている点を、事前に手動により指定しておけば、規格部位に関する、仮想カメラと入力画像の対応関係が得られる。この対応関係により、入力視点と仮想視点との間の $\mathbf{F}$ 行列を算出することができる。つまり本手法では、このように仮想視点の位置、姿勢を直接指定することにより、前後/左右/上下、パン/チルト/ローと自由に視点を変化させることができる。

図 9 選手領域の対応づけ
Matching player domain.

図 10 ボール領域の抽出
Extraction of ball region.

(2) 動領域における画素毎の対応関係の推定

テニスシーンの動領域は、選手領域とボール領域である。これらの領域に対しては、各フレームについて画素毎の対応関係を求め、フレーム毎に仮想視点画像を合成する。

[選手領域の対応関係]

選手領域を抽出するため、背景差分を行って選手のシルエット画像を得る。次にそれらのシルエット画像間でエッジホーラ線の平行化を行い、対応点と同じスキャンライン上に存在するようにする。そして、同じスキャンライン上でエッジ同士の対応付け⁹⁾を行い、シルエット内部に関しては図 9 に示すようにして、エッジ間の対応関係の線形補間によって、画素毎の対応付けを行う。

[ボール領域の対応関係]

ボール領域を抽出するため、前フレームと現フレーム間、現フレームと次フレーム間でフレーム間差分を行う。それぞれで得られたシルエット間で AND 処理を施すことによって、背景除去画像を生成する¹⁰⁾。しかし、これだけではボール以外の領域もまだ残っている状況なので、そのシルエット内の入力画像の色情報を用いて、最も黄色らしいラベルをボール領域として抽出する。次にボール領域の重心を求め、それらを画像間で対応づけを行う (図 10)。

3.2 静止領域での処理

静止領域 (図 11) では、テニスコートの規格部位を利用して、仮想視点画像を生成する。

まず、コート・ネットは、これらの頂点の 3 次元位置がテニスコートの規格により既知なので、この頂点位置が仮想視点画像に投影される位置は、3.1(1)と同様の方法により決定可能である。一方、同じ点の入力画像上の点は、あらかじめ手動で抽出しておくことにより決定できる。コート

図 11 分割された静止領域
Divided static regions.

図 12 静止領域の処理の流れ
Flow of processing for static domain

・ネットは、ともに平面であるため、仮想視点と入力画像間の対応点から推定可能なホモグラフィを用いて、仮想視点に対応点を移動すれば、仮想視点画像を生成することができる (図 12)。

一方、背景は一つの平面と見なすことができるほど遠方に存在するものと見なし、同様にホモグラフィを推定し、これを利用して背景の仮想視点画像を生成できることになる。

3.3 プレーヤ視点推定

プレーヤ視点位置は、2台のプレーヤ視点推定用カメラにより撮影される画像により推定する。本研究では、すべてのカメラの強校正は行わないものとする。これは、テニスコートのような大規模な空間でカメラの強校正を行うことは非常に面倒であり、労力を要するものだからである。そこで、提案手法では、撮影された画像だけから得られる射影幾何情報のみを用いてプレーヤ視点を推定する。また、選手が実際に見ている本当の視線方向や、選手の眼の厳密な3次元的位置をプレーヤ視点推定用カメラにより追跡するのは困難である。そこで、選手の視点の高さがテニスコート面から一定の高さにあり、常に対戦相手の方向に視線を向けているという仮定のもとで、プレーヤ視点推定用カメラの画像からプレーヤ視点を決定するものとする。

具体的な処理法は、まず、プレーヤを背景差分によって抽出した後、画像上でのプレーヤ足元座標を算出する。そして、グラウンド面におけるテニスコートの頂点座標と、それらのプレーヤ追跡用カメラ上での座標の対応関係から推定されるプレーヤ追跡用カメラとグラウンド面のホモグラフィを用いて、グラウンド面におけるプレーヤ足元座標を算出できる。この足元座標の3次元位置に定数で与えた高さ成分を付加したものをプレーヤの視点位置とする。

このとき、単純に背景差分して抽出された領域の最下点を足元座標としてしまうと、①背景差分によって足の部分が切れてしまったとき、②プレーヤがジャンプしているときに、大きな誤差が生じてしまう。また画像フレームによって異なる足を検出してしまうことにより、実際のプレーヤの進行方向とは逆方向に動いたように推定されてしまうこともある。一方、両足を検出してその平均を足元座標としても、ラケットのような部分を足と誤認識してしまうこともある。そこで本手法では、プレーヤ領域に関して最も安定して求められる要素と考えられる重心を、2台のプレーヤ視点推定用カメラにより検出し、この重心から足元座標を次のようにして求める。

まず、図13に示すように、“プレーヤ視点推定用カメラに撮影されたプレーヤの軸は、おおよそ画像の垂直軸に平行であるように撮影されている”という仮定をする。これは、プレーヤがグラウンド面に対して垂直に立っており、プレーヤ追跡用カメラの水平軸がグラウンド面に平行であることに相当し、実際の撮影画像において十分に現実的な仮定と言える。この仮定によって、プレーヤの重心から垂直方向に下ろした線上に足元座標があると見なせ、かつこれらの足元座標は、2視点のプレーヤ視点推定用カメラ画像間で対応していると考えられることができる。そこで、図14に示すように、画像上で重心を通る垂直な直線を引き、これを、プレーヤ視点推定用カメラとグラウンド面のホモグラフィを用いてグラウンド面上に投影する。この直線を二つのプレーヤ視点推定用カメラについて求め、これらの交点

図 13 仮定を満たすような入力画像例
An input image which fills assumption.

図 14 重心から下ろした垂線
Vertical line from the center of gravity.

図 15 グラウンド面上に投影された線の交点
Intersection of the line projected on ground plane.

を取ると、図15のようにプレーヤの足元座標を得ることができる。

このような手法を用いると、上記の①のような症例が起きたとしても、重心は全体でその誤差を分散するのでその影響は小さい。また、②のような場合も重心から地面に接している部分を直接求めることができるので、問題は生じない。

上記のように、本手法では、高さ成分に関しては一定と見なしているため、厳密なプレーヤの視点は求めていない。しかし、プレーヤの視点を直接求めるより、足元座標から求めた方がフレーム間でのプレーヤの相対的な運動を安定して再現することができ、プレーヤ視点の画像においてなめらかな変化を実現できる。

4. 実験

テニスを多視点から撮影し、プレーヤ視点画像を生成することを試みた。図16に示すように、仮想視点画像生成

図 16 カメラ配置
Locations of cameras.

用カメラ 3 台とプレーヤ視点推定用カメラ 2 台を設置し、さらにコート・背景などを撮影している 1 枚の静止画像も使用した。入力画像は、720 × 480 画素、RGB24bit のカラー画像であり、図 17 にその一例を示す。

まず、プレーヤの視点算出結果を検証する(図 18)。シルエットの最下点を足元座標としたときの結果を見ると、プレーヤは右斜め前(プレーヤ自身から見て)に移動しているにもかかわらず、逆方向に動いたような結果が出ている部分があり、また追跡されたプレーヤ軌跡がランダムに動いて推定されている。これは異なるフレームで左右異なった足を検出してしまふことが原因と考えられる。一方、本手法では、検出したプレーヤ領域の重心を用いてプレーヤ位置を算出することによって、プレーヤの動きに応じた軌跡が推定できていることがわかる。

次に本手法により生成した仮想視点画像の結果を検証する。図 19 に、比較のために、View Interpolation を拡張した手法である View Morphing⁸⁾ を用いて生成した仮想視点画像を示す。ここで View Morphing とは、View Interpolation が持つ幾何学的な歪みの発生という欠陥を回避するするために、前処理として入力画像面の平行化を行った上で画像を合成する手法である。しかし、View Morphing は、本質的には View Interpolation と同等で、入力視点間の内挿比で仮想視点は指定される。図 19 を見ると、View Morphing では、仮想視点は入力視点位置を結んだ直線上にしか設定できないため、プレーヤ視点の画像を生成するまでには至らないことが確認できる。一方、本手法を用いて実際にプレーヤ視点の画像を生成した結果(図 20)を見ると、コート上に存在するプレーヤの視点における画像を生成できていることがわかる。また、図 21 には、コート上の色々な場所を指定して本手法により生成した仮想視点画像を示す。このように、本手法ではコート上の自由な位置における仮想視点画像を生成できていることが確認できる。

図 17 入力画像
Input images.

5. む す び

テニスの多視点画像からプレーヤ視点画像を生成した。このとき、視点の移動が入力視点間に限定されていた View Interpolation に対し、本論文では仮想視点位置を自由に設定可能な新しい手法を提案した。一方で、射影幾何を用いた効率的かつロバストなプレーヤ視点の算出法も同時に提案した。プレーヤにおける安定した要素である重心を介して求めることで、安定した算出結果を得ることを可能にした。

今回の実験は、本手法が適用可能な必要最低限のカメラ台数で行ったものである。そのため、カメラ設置台数の追加とそれに伴う画像の高精度化についての検討が今後の課題である。

(a) プレーヤの動きを示す実画像

(b) 最下点を足元座標としたときの追跡結果 (白:過去の軌跡, 黒:現在)

(c) 本手法の重心を利用した追跡結果 (白:過去の軌跡, 黒:現在)

図 18 プレーヤ視点算出結果

Results of player-viewpoint estimation.

(a) 1:9

(b) 4:6

(c) 6:4

(d) 9:1

図 19 view morphing による仮想視点画像

Virtual viewpoint images using View Morphing.

(a) 実際に生成されたプレーヤ視点画像

(b) プレーヤ付近を拡大した画像

図 20 本手法によるプレーヤ視点画像

Player-viewpoint images using our technique.

図 21 本手法による仮想視点画像
Virtual viewpoint images using our technique.

【文 献】

- 1) Gopal Pingali, Agata Opalach, Yves Jean, "Ball Tracking and Virtual Replays for Innovative Tennis Broadcasts", ICPR'00, Volume 4 (2000)
- 2) 北原格, 大田友一, "多視点映像の融合によるスポーツシーンの自由視点映像生成", 信学技法, PRMU2000 - 189, pp23-30 (2000)
- 3) T.Kanade, P.J.Narayanan, P.W.Rander, "Virtualised Reality: Concepts and Early Results", IEEE Workshop on Representation of Visual Scenes, pp69-76 (1995)
- 4) 矢口悟志, 木村誠, 斎藤英雄, 金出武雄, "未校正多視点カメラシステムを用いた任意視点画像生成", 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌, Vol.42, No.SIG06-003, pp.9-21 (2001)
- 5) H.Saito, S.Baba, T.Kanade, "Appearance-Based Virtual View Generation From Multicamera Videos Captured in the 3-D Room," IEEE Trans. on Multimedia, vol.5, no.3, pp.303-316 (2003)
- 6) S.E.Chen, L.Williams, "View interpolation for image synthesis", Proceedings of SIGGRAPH '93, pp279-288 (1993)
- 7) Seitz, S.M. and Dyer, C.R., "View morphing", Proceedings of SIGGRAPH '96, pp.21-30 (1996)
- 8) 稲本奈穂, 斎藤英雄, "視点位置の内挿に基づく3次元サッカー画像の自由視点鑑賞システム", 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.4 (2004)
- 9) S.Pollard, M.Pilu, S.Hayes, A.Lorusso, "View Synthesis by trinocular edge matching and transfer", Image and Vision Computing 18, pp749-757 (2000)
- 10) 渡部周平, 斎藤英雄, "テニスにおける複数のカメラを用いたボールの追跡", 電子情報通信学会2003総大会, D-12-114 (Mar. 2003)

きむら けんじ
木村 健二 2004年 慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科修士課程開放環境科学専攻に在学中。コンピュータビジョンに関する研究に従事。

さいとう ひでお
斎藤 英雄 1987年 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1992年 同大学大学院博士課程修了卒業。同年同大学助手、専任講師を経て2001年 助教授。コンピュータビジョン、画像処理等に関する研究に従事。1997年から1999年まで、日本学術振興会海外特別研究員として米国カーネギーメロン大学に留学。2000年より、科学技術振興事業団さきがけ21(「情報と知」領域)研究員兼任。工学博士。正会員。