

サッカーの自由視点映像提示における気の利いた視点選択手法

北原 格 橋本 浩一郎 亀田 能成 大田 友一

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

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: {kitahara | kameda | ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし “気の利いた”自由視点映像生成・提示システムの実現を目的として、観察者の好みに合わせて仮想視点の位置を自動的に決定する手法を提案する。サッカーゲーム中の数種類のイベントにおいて、多くの観察者が観察を希望する主要視点位置を獲得する。視点自動選択サービスを提供する場合には、まず、観察者にあらかじめ用意しておいたサンプルイベントをいくつか観察してもらい、その際の視点位置から、観察者の好みを判定する。それ以降のイベントに対しては、観察者の好みに最も近い主要視点位置を推定する。各イベントにおけるカメラ位置を補間することにより、イベントの間のカメラワークを算出し、自由視点映像の生成・提示を行う。生成映像を用いた主観評価実験を実施し、提案する自動視点提示手法の有効性を確認する。

キーワード 自由視点映像, 視点選択, 自動生成, クラスタリング, 主観評価実験

Automating Viewpoint Decision Method for Generating a 3D Soccer Video

Itaru KITAHARA Koichiro HASHIMOTO Yoshinari KAMEDA Yuichi OHTA

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

1-1-1 Tennoudai, Tsukuba Science City,

Ibaraki 305-8573, Japan

E-mail: {kitahara | kameda | ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

Abstract This paper proposes an automating method to determine a viewpoint for generating a 3D video of soccer games. Our proposed method aims to realize an empathic 3D video system that counts users' personal preference. Our system first classifies the soccer game into some soccer events by referring 3D position of soccer players and a ball. For each event in soccer games, typical viewpoints, which are preferred by many numbers of users, have been estimated by a clustering method with questionnaire survey. In a phase of presenting 3D Video, the user inputs his/her individual taste of viewpoint by trial-using 3D video system in a few soccer events. Our system estimates a viewpoint to generate the user's favorite 3D video by choosing a typical viewpoint which is the nearest from user's input. With interpolating the selected typical viewpoints in soccer events by B-spline curve, this system generates a sequence of 3D video. We confirm the effectiveness of our proposed method in subjective evaluation experiments.

Keyword Free Viewpoint Video, Viewpoint Decision, Automated Generation, Clustering, Subjective Evaluation

1. はじめに

ビデオ機器や計算機の性能向上を背景に、多数の視点から撮影した映像を計算機内部で融合することにより、自由な視点位置からの映像の生成・提示を行う研究が、国内外で盛んに行われている[1]-[6]。「好きな視点位置から観て楽しむ」という新しい鑑賞スタイルは、新たなデジタル映像サービスとして注目が集まっている。特に、オリンピックやワールドカップのように世界中が注目し、膨大な数の視聴者が存在し、様々な視聴希望が発生するスポーツイベントでは、自由視点映像技術が有効に機能するであろう。我々は、遠隔地

の観察者が、サッカーシーンのような大規模空間で行われるイベントの自由視点映像を生中継で楽しむことが可能な、自由視点映像配信システムの研究開発に取り組んでいる[7]。

我々の開発したシステムを含め、従来の自由視点映像提示システムでは、視点の位置を設定するインターフェイスとして、マウスを用いるのが一般的である。しかし、3次元空間中を位置・姿勢・画角を変えながら動きまわり、7自由度を持つカメラパラメータを、2次元インターフェイスのマウスで思い通りに操作することは、そう容易なことではなく、観察者に負担を強いることになりかねない。さらに、映像制作の知識に乏しい視聴者の操作によって生成された映像が、撮

影空間の状況を的確に表現するものであるかについては、疑問の余地がある。我々は、このような問題を解決するために、観察者の好みと撮影シーンの内容に応じて適切な視点位置を自動的に選択する“自動視点ナビゲーション”を提案する。

これまでも会議や講義を対象としたカメラ切り替え方式に関する研究[8][9]が行われているが、この場合、情報の送受信者に明確な目的が存在するため、撮影対象の状態遷移によりカメラ切り替えをほぼ一意に決定することが可能であり、視聴者毎のカメラ切り替えの好みの差異に関する検討は行われていない。一方で、我々が撮影対象とするスポーツシーンは、“筋書きのないドラマ”と言われるように、撮影対象の状態遷移の形式化は難しく、さらに、膨大な数の視聴者が情報の受信者となるため、その全てを満足させる単一のカメラ切り替えモデルが存在するという事は考えにくい。むしろこのような場合には、視聴者側にカメラ切り替えの権利を与え、個々の好みで切り替え操作を行ってもらう方が、高い満足度を与えられるであろう。大西らや熊野らは、スポーツシーンを広角で撮影した映像の一部をクリッピングすることにより、視聴者に視点選択の自由度を与え、個々のカメラ切り替えの好みを実現する方式を提案している[10][11]。この方式では、視聴者の好みをある程度反映できるものの、実写映像を再利用するため、視聴者の視点位置設定には物理的な制約が存在する。本論文では、自由視点映像技術を適用することにより、カメラ設置の物理的な制限を取り払い、あらゆる視聴者のカメラ切り替えの好みに対応した映像の生成・提示を行うシステムを実現する。自由視点映像生成処理は、従来の映像生成手法と異なり、カメラの設置位置に物理的な制限を受けないため、従来研究で提案されているカメラ切り替えモデルをそのまま適用するだけでは、視聴者を十分に満足させる映像が生成できないと考えられる。そこで本研究では、視聴者に好まれる自由視点（カメラ配置）の調査を行うことから、取り組みを開始する。

2. 自由視点映像配信システム

本研究では、図 1 に示すシステムを用いて、多視点映像の撮影から自由視点映像の提示までの処理を行う。このシステムは、“人物ビルボード”とよばれる手法を用いて、被写体の 3 次元モデルのデータ量を削減することにより、自由視点映像を実時間で遠隔地に配信・提示可能であるという特長を有する[7]。

シーン解析部では、多視点カメラにより獲得される映像を用いて、選手の 3 次元位置を実時間で推定し、多視点映像撮影部の PC へ転送する。多視点映像撮影部の PC は、選手の 3 次元位置に基づき、撮影された多視点映像から選手テクスチャを抽出し、サーバ部に転送する。遠隔地にいるユーザは、自身が望む仮想視点位置情報をサーバ部に送信し、サーバ部は要求された自由視点映像を生成するために必要最小限のデータをユーザに送信する。これらの処理を実時間で繰り返すことにより、自由視点映像中継を実現する。以降の節では、この自由視点映像配信システムに、適切な観察視点を自動的に設定する手法について述べる。



図 1: 自由視点映像配信システム

3. 自動視点ナビゲーション方式

提案方式は、図 2 に示すように“自由視点映像コンテンツ生成部”、“主要視点位置決定部”、“視点ナビゲーション部”によって構成される。自由視点映像コンテンツ生成部では、選手とボールの時系列 3 次元位置データと撮影空間の 3 次元情報を用いて、サッカーゲームをイベント単位に分類した自由視点映像コンテンツを生成する。主要視点位置決定部では、複数の観察者を対象としたアンケート調査に基づき、各サッカーイベントにおいて多くの観察者に好まれる主要視点位置を決定する。ここまでの前処理となる。視点ナビゲーション部では、映像の観察者に対し、少数のサンプルイベントを用いて視点位置の好みに関する調査を行い、その結果に応じて、映像生成用カメラの位置を設定する。イベントごとに設定された視点位置をスプライン補間することにより、サッカーゲーム全体のカメラワークを生成し、自由視点映像の生成・提示を行う。

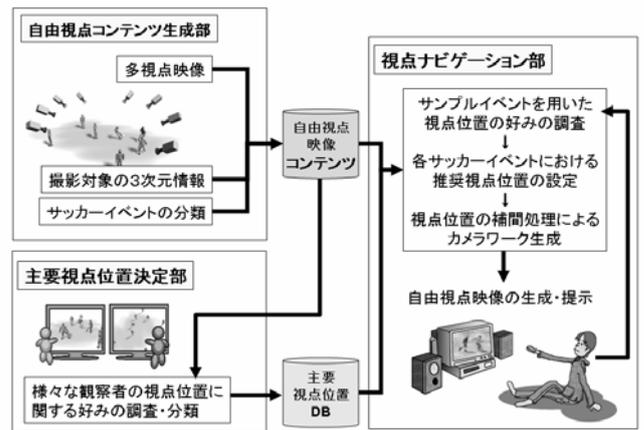


図 2: 自動視点ナビゲーション方式の構成

4. 自由視点映像コンテンツ生成部

観察者の希望する視点位置は、サッカーイベント毎に異なるため、まずは、サッカーゲームをイベントに分類する必要がある。サッカーの試合は、“いつ”、“どこで”、“だれが”、“なにを”の項目によって、統計的

に分析することにより、分類することが知られている [12]. 本研究では、“いつ”を撮影時刻情報，“どこで”をサッカースタジアム中の3次元位置，“だれが”を選手の識別情報によって与えることにより、サッカーゲームを数値化し、以下に示すように、ドリブル、パス、ゴールの3種類のイベントに自動的に分類する. このとき、選手とボールの3次元位置、および、サッカースタジアムの3次元情報は、あらかじめ獲得されているものとする.

- (1) ボールの半径3 m以内に選手が存在する状態が一定時間継続した場合、そのイベントはドリブルであると判定される. ただし、ドリブル終了時までには、ボールのベクトルと速度が大きく変わらない場合はドリブルとみなさない.
- (2) 味方同士のドリブルが連続して検出された場合、その間をパスイベントと判定する.
- (3) 相手チームのゴール付近にボールが移動し、その後ゴールの枠内にボールが移動した場合をゴールイベントと判定する.

このようにして判定した、イベント分類情報、選手とボールの3次元位置情報、サッカースタジアムの3次元情報を1フレーム単位で統合し、自由視点映像コンテンツを生成する.

5. 主要視点位置決定部

観察者の好む視点からの映像を生成するためには、その好みに関する情報を獲得する必要がある. 本研究では、実際に映像を観察している視点位置に手がかりが存在すると考え、仮想カメラの位置情報を解析することにより、好みの抽出を行う.

5.1 箱庭スタジアム

前述したように、マウス操作で観察者の希望通りの視点位置を獲得することは困難である. 観察者の好みをもっと正確に調べるためには、より直感的操作が可能である必要があると考え、図3に示す“箱庭スタジアム”を制作した. スタジアムに相当するボード上には、カメラの位置・姿勢検出用のマーカが貼られ、観察者はボード上空で小型カメラの位置・姿勢を自由にしながら自由視点映像の撮影を行うことができる. 写りこんだマーカ像から算出したカメラの位置・姿勢情報を用いて、実物体であるボード上に仮想物体であるサッカースタジアムを重畳した映像を生成し、観察者に提示することにより、あたかもサッカースタジアム上空を飛び回りながら、撮影を行っているような感覚を与えることができる. 実世界を目視しながらカメラを操作するため、被写体との相対的な位置感覚がつかみやすく、より直感的な視点位置の指定が可能である.

5.2 仮想カメラのパラメータ獲得

箱庭スタジアムでは、ARToolKit [13]によって与えられる、カメラと撮影空間の相対的位置関係から、仮想カメラの3次元位置を獲得する. 図4に示すように、

カメラ座標系におけるカメラの位置情報を P_c 、マーカ座標系 P_m 、ワールド座標系 P_w とする. マーカ座標系からカメラ座標系の変換行列を M_{mc} 、マーカ座標系からワールド座標系の変換行列を M_{mw} とすると、カメラ座標系からワールド座標系への変換は、式(1)によって与えられる.

$$P_w = M_{mw} M_{mc}^{-1} P_c \quad (1)$$

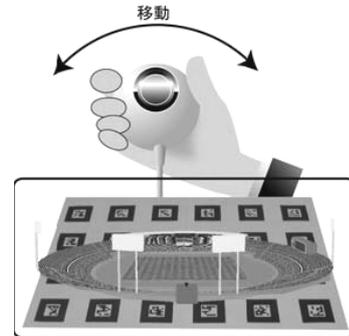


図3: 箱庭スタジアム

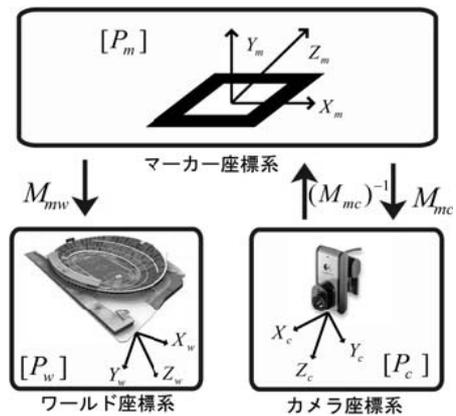


図4: 各座標系の関係

5.3 主要視点位置の決定

5.1 節で紹介した箱庭スタジアムを用いて、イベントの自由視点映像を閲覧してもらい、その時の視点位置を記録する作業を多数の観察者に対して実施し、対象イベントの観察視点位置データを獲得する. 獲得したデータに対し、クラスタリング手法を適用し、各クラスの重心を主要視点位置とする¹. 同様の処理を4節で分類したサッカーイベント各々に対して行うことにより、各イベントにおける主要視点位置を決定する.

6. 視点ナビゲーション部

6.1 観察者が好む視点位置の選択

前節で述べたとおり、主要視点位置はサッカーイベント毎に数箇所に分類される. 観察者に映像を提供する場合、まずその観察者がどの主要視点位置を好むか

¹ 本方式では、クラスタリング手法として k-means 法を用いる [14].

を調べる必要がある。本研究では、調査用サンプルとするサッカーイベントをあらかじめ用意しておき、箱庭スタジアムを利用して、サンプルイベントを自由に観察してもらい、その時に与えられる視点位置を、先述したクラスタリング空間に投影し、3次元空間中での距離が一番近い主要視点位置を判定する。同様の調査を全てのイベントに対して行うことにより、各サッカーイベントにおける好みの主要視点位置を推定する。

6.2 観察視点位置の補正処理

全てのイベントの全てのフレームにおける、選手・ボールの位置関係が、5節において主要視点位置を決定した状況と完全に一致するとは限らない。本節では、図5に示すように、ボールが飛んでいく方向を用いて、各フレームにおける注目物体の位置関係が主要視点位置決定時と等しくなるように補正する手法について述べる。

まず、推定された視点位置が、ボールを蹴る選手に近い場合について考える。主要視点位置を決定した状況において、ボールを蹴る選手Aの位置をPA、ボールを受ける選手Bの位置をPB、決定された視点位置をVとし、現在処理しているフレームでは、ボールを受ける選手B'は位置P'Bに移動しているとする。両状況においてボールが飛んでいく方向ベクトルがなす角 $\theta = \angle PB PA P'B$ から回転移動 $R\theta$ を獲得することができる。 $R\theta$ を用いて、ボールを蹴る選手を中心として主要視点位置Vを回転させることにより、現在のフレームの仮想視点位置V'と被写体(ボールを蹴る選手A)の位置関係を、主要視点位置決定時と同じ状況に補正することができる。なお、推定された視点位置が、ボールを受ける選手に近い場合には、ボールを蹴る選手Aと受ける選手Bを置き換えて同様の補正処理を行う。フィールドを俯瞰する視点位置のように、選手と視点位置が比較的遠い場合には、補正の影響が小さいと考えられるため、補正処理は行わない。

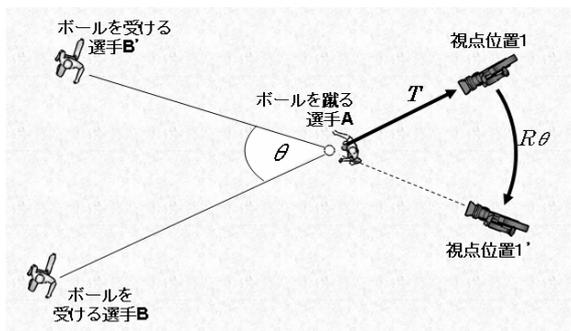


図5: 主要視点位置の相対移動

6.3 カメラワークの生成

自由視点映像を生成するためには、各イベントで設定された視点位置間の移動を表現するカメラワークが必要である。本システムでは、制御点が少なく設定が簡易であるB-スプライン曲線を用いて、前節で求めた視点位置を補間しカメラワークを生成する。B-スプライン曲線補間によって生成される軌跡Mは、始点Ms、

制御点Mc、終点Meとした場合、式(2)で表される。ただし、分割数をNとしたときの、 $t[0, \dots, 1]$ の増加量は $1/(N-1)$ である。

$$M = (1-t)^2 M_s + 2t(1-t)M_c + t^2 M_e \quad (2)$$

例えば、あるイベントE1では視点位置MAから自由視点映像を観察し、イベントE2では視点位置MBが選択された場合、始点MsにMAを、終点MeにMBを与え、その間をスプライン曲線により補間する。なお、本手法では、始点と終点を底辺とし地面に平行な垂直二等辺三角形の頂点を制御点Mcとして与えている。

7. 実験

7.1 自由視点映像撮影実験

国立霞ヶ丘競技場において開催された、全日本学生サッカー選手権決勝戦を被写体として、撮影実験を実施した。サッカーフィールドを取り囲むように配置したテクスチャ獲得用カメラ8台と、高所に設置したサッカー選手の位置検出用カメラ2台の多視点カメラを用いて、サッカーフィールドの半分程度の空間の撮影を行った。撮影に使用したカメラは、ソニー製プロダクトプレジデント3CCDカメラ(DXC9000)である。画像サイズ640x480画素の画像を毎秒30枚で撮影し、デジタル画像データとして計算機に記録する。全てのカメラについて、3次元測量器と移動式ランドマークを用いたキャリブレーション処理を行い、撮影空間と画像面間の射影関係を算出する[15]。

7.2 主要視点位置獲得実験

5節で述べた手法を、ゴールイベント、パスイベントの自由視点映像コンテンツに適用し、各イベントにおける主要視点位置の獲得実験を行った。このとき、ゴールイベントとして図6(左)に示すボールを蹴る方向が異なる3パターン、センタリングシーンとして図6(右)に示す5パターンを用意した。注目選手以外の領域(他の選手、サッカーゴール、観客席)が、視点位置決定に与える影響を除去するために、ゴールイベントではボールを蹴る選手とゴールキーパー、パスイベントでは、ボールを蹴る選手と受ける選手のみを表示している。

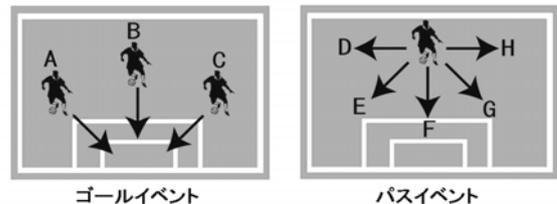


図6:(左)ゴールシーンイベント、(右)パスイベント

この実験は、“サッカー観戦をしない”、“よく観戦する”、“サッカー競技者”というサッカーに関する知識が異なる3タイプ毎15人の、計45人の被験者に対

して行った。なお、被験者の年齢は全て 20 代前半である。被験者には、図 6 に示す 3 パターンのゴールイベントと、5 パターンのパスイベントの自由視点映像を観察してもらい、イベント毎に観察を希望する視点位置を指定してもらった。

獲得した視点位置のデータに対して、クラス数を一つずつ増やしながら K-means 法を適用した場合の分離性能の調査を行い、十分な判別を実現する最小数 3 をクラス数に設定している²。この結果を実際のサッカーシーンに当てはめて考えると、観察者の視点位置は、“イベントの仕手となる選手の後方から観る位置”、“イベントの受け手の後方から観る位置”、“フィールド全体を俯瞰する位置”の 3 箇所にはほぼ集約できることがわかった。分類結果の一例を図 7 に示す。星印で表された主要視点位置を中心に、3 種類の希望観察視点位置が分布し、それらが正しく分類されていることがわかる。分類された各クラスに対し、視点位置のタイプに基づき表 1 に示すラベル α 、 β 、 γ を与える。

表 1: 視点位置クラスターのラベル付け

	ゴールイベント	パスイベント
α	シュートする選手の後方	パスする選手の後方
β	キーパーの後方	パスを受ける選手の後方
γ	フィールドを俯瞰する位置	フィールドを俯瞰する位置

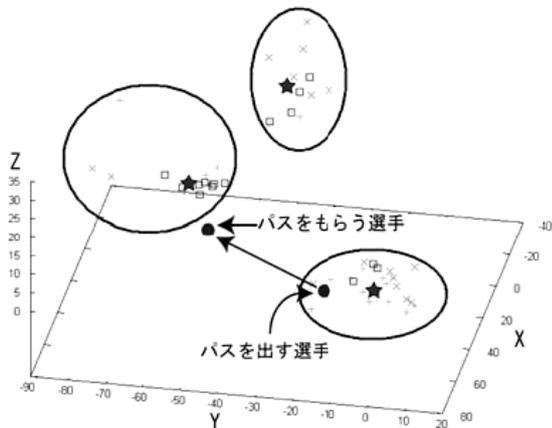


図 7: あるパスイベントにおいて獲得された視点位置データのクラスタリング結果

上述した主要視点位置獲得実験は、同じイベントでボールを蹴る方向が異なる数パターンに対して実施している。ここでは、実験で獲得された主要視点位置を用いて、その分類手法の妥当性を検証する。被験者には、同じイベントでボールを蹴る方向が異なる数パターンについて、好みの視点位置を指定してもらっている。それら複数の指定された視点位置が属するクラス（主要視点位置）が、ボールの蹴る方向には依存せずにイベント内で一定であれば、我々の主要視点位置の設定・分類法が妥当であるといえる。本実験では、クラスにつけたラベルの遷移率を用いて評価を行った。この遷移率とは、あるイベントにおいて、あるクラス

² 分離性能の評価にはクラス内分散とクラス間分散の比を用いた。

に属する被験者が、他のイベントにおいても同一のクラスに属する確率である。

表 2 に、図 6 (左) に示す 3 パターンのゴールイベント (A, B, C) におけるクラスラベルの遷移率を示す。ゴールイベント A で視点位置 α (シュートする選手の後方) に分類された全ての観察者が、ゴールイベント B においても視点位置 α からの観察を希望していることがわかる。それ以外の組み合わせについても、85%以上の高い遷移率が算出されたことから、主要視点位置の設定・分類法の妥当性が確認できる。

表 2: ゴールイベントにおけるラベル遷移率

	A \leftrightarrow B	A \leftrightarrow C	B \leftrightarrow C
α	100%	93%	93%
β	85%	88%	100%
γ	93%	92%	100%

7.3 生成した自由視点映像の評価実験

サッカーゲームの自由視点映像コンテンツに対して、提案手法を適用して自動視点ナビゲーションを行い、パスイベントからゴールイベントに至る 20 秒程度の自由視点映像を生成した。様々な状況における提案手法の有効性を検証するため、使用した映像中には、パスからシュート・ゴールに至る広い空間を利用した複数のサッカーイベントが含まれている。生成された自由視点映像の一例を図 8 に示す。

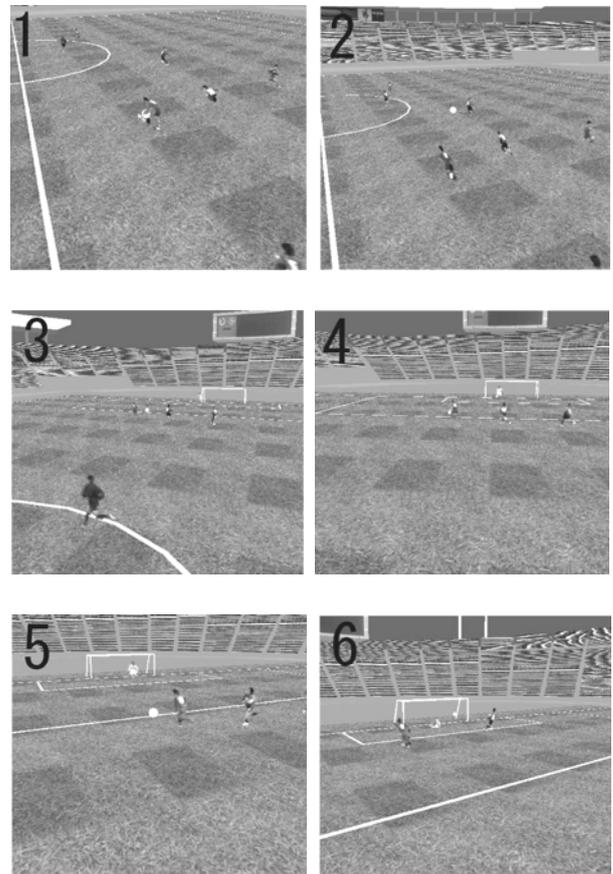


図 8: 生成された自由視点映像例

先述したサッカーに関する知識の異なる3タイプの被験者を新たに10人用意し、生成映像に関する主観評価実験を行った。パスイベントからゴールイベントに切り替わるシーケンスの場合、主要視点位置の組み合わせは、本方式により自動ナビゲーションされた視点の組み合わせを含め9通り存在する。被験者には、9種類の全ての組み合わせで生成した自由視点映像を観察してもらい、各映像の視点位置設定について、「満足できる」「やや満足できる」「どちらともいえない」「やや満足できない」「満足できない」の5段階評価を行ってもらった。

主観評価実験の結果を図9に示す。横軸は視点の組み合わせのパターンを、縦軸は各パターンの評価値と標準偏差を表す。各パターンにおいて左の棒グラフは全被験者による評価値の平均、右の棒グラフはこの組み合わせを嗜好した被験者のみの評価値の平均である。なお、パターン3, 6, 8については、嗜好する被験者が一名以下だったため、右側の棒グラフの値の算出・表示を行っていない。この図より、被験者は、提案方式によって生成・提示された自由視点映像に対して、その他の映像よりも高い満足度を示していることがわかる。自動ナビゲーションされた自由視点映像に対する全被験者の満足度の平均値は、平均値 4.56 (標準偏差値 0.69) であった。本システムで自動ナビゲーションされた視点位置において生成された自由視点映像が、観察者の希望を反映したものであることが確認できる。

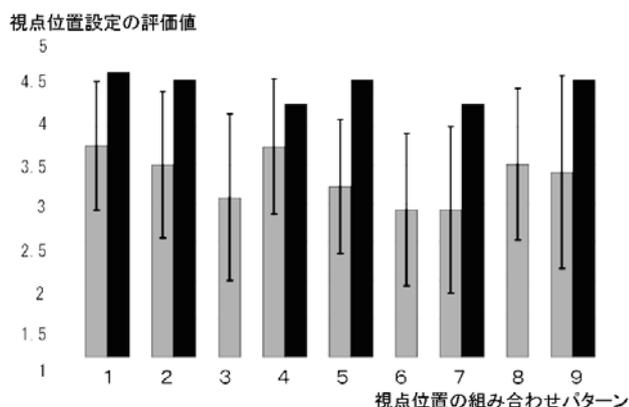


図9: 主観評価実験の結果

8. まとめ

“気の利いた”自由視点映像生成・提示システムの実現を目的として、観察者の好みに合わせて仮想視点の位置を自動的に選択する手法を提案した。サッカーゲームをイベント毎に分類し、各イベントにおいて、多くの観察者に好まれる主要視点位置を獲得する手法について述べた。視点自動提示サービスを提供する場合には、まず、イベント毎に、あらかじめ決められたサンプルイベントをいくつか鑑賞してもらい、選択されたカメラ位置に最も近い主要視点位置を観察者に提示する。各イベントにおけるカメラ位置をスプライン補間することにより、イベントの間のカメラワークを算出し、自由視点映像の生成・提示を行う。生成映像を用いた主観評価実験を実施し、提案する自動視

点提示手法の有効性を確認した。今後の課題としては、観察者の好みに基づいたカメラワークの生成や、クラスタリングを行った際の外れ値の考慮などが考えられる。

参考文献

- [1] T.kanade, P.Rander and P.J.Narayanan, “Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes”, IEEE MultiMedia, Vol4, No1, pp33-47, (1997)
- [2] W. Matusik, C. Buehler, R. Raskar, S.J. Gortler, and L. McMillan, “Image-based visual hulls”, ACM Siggraph 2000, pp. 369-374, (2000)
- [3] B.Goldlucke, M.Magnor, B.Wilburn, “Hardware-Accelerated Dynamic Light Field Rendering”, Vision, Modeling and Visualization (VMV) 2002, pp. 455-462, (2002)
- [4] H.Saito and T. Kanade “Shape Reconstruction in Projective Grid Space from Large Number of Images”, Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 1999, pp. 2049-2054, (1999)
- [5] I.Kitahara and Y.Ohta, “Scalable 3D Representation for 3D Video in a Large-Scale Space”, PRESENCE, The MIT Press, Vol.13, Issue 2, pp.164-177, (2004)
- [6] K.Tomiyama, M.Katayama, Y.Orihara and Y.Iwadata, “Arbitrary Viewpoint Images for Performances of Japanese Traditional Art”, The 2nd IEE European Conference on Visual Media Production (CVMP), pp.68-75, (2005)
- [7] T.Koyama, I.Kitahara, Y.Ohta, “Live Mixed-Reality 3D Video in Soccer Stadium”, Proc. of The 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2003), pp.178-187, (2003)
- [8] 井上智雄, 岡田謙一, 松下温, “テレビ番組のカメラワークの知識に基づいた TV 会議システム,” 情処学論, Vol.37, No.11, pp.2095-2104, (1996)
- [9] 先山卓朗, 大野直樹, 椋木雅之, 池田克夫, “遠隔講義における講義状況に応じた送信映像選択,” 信学論 (D-II), Vol.J84-D-II, No.2, pp.248-257, (2001)
- [10] 大西正輝, 泉正夫, 福永邦雄, “デジタルカメラワークを用いた自動映像生成”, 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU2000, pp.1-331-I-336, (2000)
- [11] 熊野雅仁, 有木康雄, 塚田清志, “ボールと選手に着目したデジタルカメラワークの実現法-デジタルシューティングによるサッカー解説映像生成システムに向けて-”, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, No.2, pp.271-278, (2005)
- [12] 掛水隆, 大橋二郎, 赤木真二, “サッカー面白科学”, 東京電機大学出版局, (1999)
- [13] 加藤博一, M. Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎, “マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol4, No4, pp.607-616, (1999)
- [14] 甘利俊一, 麻生英樹, 津田宏治, 村田昇, “パターン認識と学習の統計学—新しい概念と手法 統計科学のフロンティア 6”, 岩波書店, (2003)
- [15] R. Tsai, “A versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, (1987)