

広域競技空間に適用可能な高精度リアルタイム 自由視点生成手法に関する検討

渡邊 良亮^{1,a)} 野中 敬介¹ 今野 智明¹ 菅野 勝¹

概要: 近年、スポーツ観戦の新たな楽しみ方の一つとして、視聴者が見たいアングルからの映像視聴を可能とする自由視点映像が注目を集めており、手法やハードウェアの発展から、リアルタイム処理が可能な手法が登場してきている。一方、リアルタイム自由視点では計算時間を大きく要する複雑な処理を行うことは難しく、品質面には課題がある。特に、サッカーのコート等の広域な競技空間に対して品質を保ちながら、リアルタイムに自由視点を生成することは困難である。そこで本研究では、視体積交差法を用いた3Dモデルの生成において、欠損の少ない粗い3Dモデルを生成し、ユーザが視点位置を選択した後のレンダリング過程において、モデル輪郭を洗練する手法を提案した。実験ではサッカーのハーフコート全面を対象に、20台のFull HDのカメラから、リアルタイムに自由視点が生成できることと、生成品質が従来のリアルタイム自由視点手法を上回ることを確認した。

Study on Accurate Real-time Free Viewpoint Generation in Large Sports Field

1. はじめに

近年、視聴者が見たいアングルからの映像視聴を可能とする自由視点映像が、新たなスポーツ観戦体験を実現するアプリケーションの一つとして注目を集めている。自由視点映像技術は、特定のシーンを複数のカメラで撮影し、それらの情報を基に実カメラがない視点を含む任意の視点からの映像鑑賞を実現する技術である。特に、複数台の実カメラの映像から被写体のモデル形状をボリュームデータとして復元する自由視点方式をフルモデル自由視点 [1], [2], [3] と呼ぶ。従来、フルモデル自由視点の計算には膨大な処理時間を要していたが、近年ではリアルタイムで生成が可能な手法 [1], [2] が提案されてきており、スポーツの試合をリアルタイムで任意のアングルから視聴するなどの用途への期待が高まっている [4]。

リアルタイム自由視点制作手法 [1], [2] は、いずれも図 1a に示されるような視体積交差法 [5] に基づいて被写体の3Dモデルの再構成を行う。この視体積交差法ベースの手法の品質は、視体積交差法の処理に使われる被写体シルエット画像の抽出精度や、カメラパラメータの誤差に大き

く影響を受ける。しかしながら、リアルタイム性を志向する場合、多数のカメラ映像に対してリアルタイム処理と高精度抽出を両立させることが難しく、リアルタイム性を追求した場合にカメラのデジタルノイズやフィールドに落ちる影を被写体として誤抽出してしまうことがあった。またカメラキャリブレーションの誤差を完全に抑制することも既存の技術 [6], [7] では困難であった。さらに、自由視点の制作範囲を広域空間に拡張する場合には、サイズに比例して計算時間が大きくなるという問題も存在していた。

そこで本研究では、視体積交差法を用いた3Dモデルの生成において、欠損の少ない粗い3Dモデルを生成し、ユーザが視点位置を選択した後のレンダリング過程において、モデル輪郭を洗練する手法を提案した。実験では68m×53m×5mから成るサッカーのハーフコートを対象に、20台のFull HDのカメラから、リアルタイムに自由視点が生成できることと、生成品質が従来のリアルタイム自由視点手法を上回ることを検証した。

2. 関連研究

フルモデル自由視点の実現方法として、多くの手法が視体積交差法 [5] に基づく3Dモデルの生成を行っている。視

¹ KDDI 総合研究所 (KDDI Research, Inc.)

^{a)} ru-watanabe@kddi-research.jp

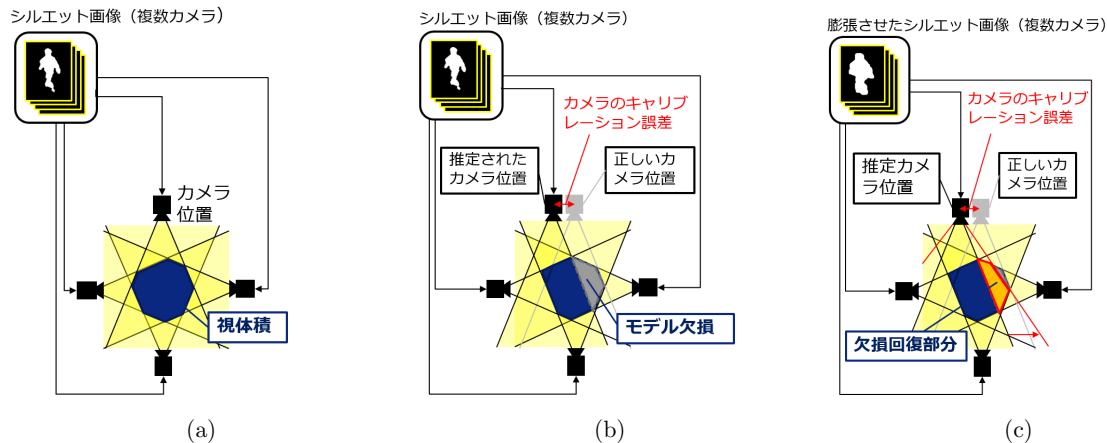


図 1: 視体積交差法による 3D モデル生成: (a) カメラ位置の誤差を含まない場合 (b) カメラ位置の誤差を含む場合 (c) カメラ位置の誤差を含む条件で膨張させたシルエットを入力する場合

体積交差法は、図 1a のように各カメラの画像から被写体のシルエット画像を抽出した後に、被写体シルエットを 3 次元空間に投影し、その錐体の積集合を取ることで被写体の形状を得る手法である。このとき、物体を構成する最小単位はボクセルと呼ばれる立方体であり、このボクセルの集合体としてモデルが表現される。

文献 [1] では、視体積交差法によるボクセル生成過程を 2 段階に分け、最初に粗いボクセルグリッドに対して視体積交差法を適用して 3D モデルを生成し、次に粗いボクセルモデルが生成された位置に対してのみ再び細かいボクセルグリッドで視体積交差法の計算を行う Coarse-to-Fine のアプローチが提案されている。一方、本文の対象は 3D モデル生成部分のリアルタイム化のみであり、その前段のシルエット抽出部分に関しては深層学習ベースのシルエット抽出法 [8] を用いており、この部分のリアルタイム化は対象としていない。また、文献 [2] では、モデルを多数の平面の集合で表現することでモデル生成を高速化する手法が提案されている。この手法では、ある特定の仮想視点をユーザが決定した後、その視線方向に正対するように多数の面（投影面）を立て、その各面を従来の視体積交差法と同様に、シルエット画像からの投影で削り出すことで、投影面の集合として 3D モデルを表現する。

これらの視体積交差法ベースの自由視点の高速生成手法において、自由視点品質を低下させる要因が三点ある。一つ目は、視体積交差法に用いる被写体シルエットの品質である。リアルタイム性を志向する場合、多数のカメラ映像に対して高速にシルエット抽出を行う必要があるが、リアルタイム処理と高精度の抽出を両立することは困難であった。精度面に優れるシルエット抽出手法は複数提案されているが [8], [9], Full HD クラスの高解像度画像に対してはリアルタイムで処理が行えないことが報告されている。二つ目はカメラパラメータの推定精度の問題である。既存のカメラキャリブレーション技術ではカメラの位置や向きを

完璧に推定することが困難である [6], [7]。そのため、図 1b のようにカメラパラメータ推定の誤差に基づいて、視体積交差法の実施時に被写体の 3D モデルの形状に一部欠損が生じる懸念や、逆に被写体ではない領域がモデル化される懸念があった。最後に、広域空間に適用することを考えた場合に、リアルタイム計算を実現するためには文献 [1] ではボクセルのサイズ、文献 [2] では投影面の間隔を粗くせざるを得ず、特にスタジアム全体などの広域空間への適用を考える場合、品質劣化の懸念がある。この観点から、文献 [1] ではバレーや柔道、文献 [2] では野球のバッターボックス付近のみを自由視点化しており、広域空間に適用が可能かどうかや、その際の品質に関しては未検証であった。

3. 提案手法

本研究では広域競技空間に対応可能で、かつ従来手法 [1] より高品質なリアルタイム自由視点の制作方法を提案する。自由視点映像制作システムの処理フローを図 2 に示す。処理は以下の 3 工程に大別される。

- (1) シルエット抽出処理
- (2) 3D モデル生成処理
- (3) レンダリング処理

これらは (1) → (2) → (3) の順にシーケンシャルに処理が成される。よって基本的には (1)~(3) の各処理に 1 台ずつ別の計算機を割り当てるシステムを想定しており、各処理でリアルタイムが担保できれば、システム全体としてリアルタイム制作を実現することができる。本研究では従来手法 [1] をベースに改善を行うことで、広域空間でも高品質に自由視点生成が可能な手法を提案した。大部分の提案は (3) のレンダリング部に関するものであるが、以下では従来手法と異なる部分に関してフォーカスして、(1) から (3) の処理を説明する。

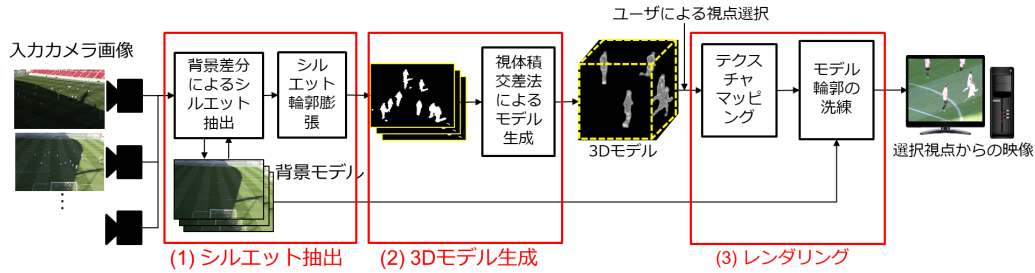


図 2: 自由視点映像の制作フロー

3.1 シルエット抽出処理

第 2 章にて記述の通り，従来のリアルタイム自由視点制作手法 [1] は，3D モデルの生成をリアルタイム処理することを対象としており，シルエット抽出部のリアルタイム化は達成できていない．一方，実際に自由視点映像をリアルタイムで視聴することを考えれば，シルエット抽出部からレンダリング部までの End-End でのリアルタイム化が必須である．そこで本研究ではシルエット抽出に，高速動作可能な単一ガウス分布ベースの手法 [10] を用いた．

単純ガウス分布による背景差分法は以下の式で表される．

$$M_{c,t,x,y} = \begin{cases} 0 & (|I_{c,t,x,y} - \mu_{c,t,x,y}| \leq \sigma_{c,t,x,y} + T) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (1)$$

ここで $M_{c,t,x,y}$ は背景差分後のシルエットの状態を表しており，1 が前景，0 が背景を示す．また， c はカメラのインデックス， t はフレーム番号で， x, y は画素位置を表す．また， $I_{c,t,x,y}$ は画像の輝度値を， $\mu_{c,t,x,y}$ と $\sigma_{c,t,x,y}$ はそれぞれ背景モデルを構成するガウス分布の平均と標準偏差を表し， T はユーザの手で設定される閾値で定数値を取る．加えて，背景モデルの更新は以下の式にて計算される．

$$\mu_{c,t,x,y} = (1 - U)\mu_{c,t-1,x,y} + UI_{c,t,x,y}, \quad (2)$$

$$\sigma_{c,t,x,y} = (1 - U)\sigma_{c,t-1,x,y} + U|I_{c,t,x,y} - \mu_{c,t,x,y}|, \quad (3)$$

ここで U は背景モデルの更新率を表し，ユーザの手で決定される定数である．

また，提案手法におけるシルエット抽出部の特徴的な点として，出力シルエット画像に対しシルエットの被写体抽出領域の膨張 (Dilation) 処理を複数回実施した．具体的には，シルエット上で前景と判定された画素を，周囲 $(2d+1) \times (2d+1)$ 画素に拡張することで行われる．ここで d はユーザの手で決定されるパラメータで，定数値を取る．

3.2 3D モデル生成処理

3D モデル生成処理は文献 [1] に基づき Coarse-to-fine のボクセル生成手法を用いた．ボクセルモデルが生成された後は，マーチングキューブ法を用いて被写体ボクセルモデルをポリゴンモデルに変換する．このとき，同時にポリゴ

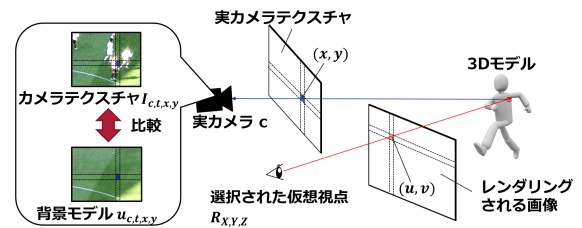


図 3: レンダリング時のテクスチャと背景モデルの比較

ンを構成する各頂点の遮蔽情報 $O_{i,c}$ が計算される． $O_{i,c}$ はインデックス i の頂点がカメラ c から見て遮蔽されるか否かを表す 2 値の情報である．この遮蔽情報がレンダリング部でのテクスチャマッピング時に使用される．

提案手法の特徴的な部分として，提案手法では広域競技空間でのリアルタイム性を担保するために，細かいボクセルモデルを 4cm などの通常より粗いサイズで生成した．例えば文献 [1] ではボクセルサイズは 2cm に設定されており，文献 [3] では 1.25cm に設定されている．一般に，ボクセルを粗くすることは品質の劣化に繋がるが，提案手法では後述のレンダリング部で，レンダリング画像の画素単位でモデルを洗練化する処理が導入されていることから，例えばボクセルを粗くしたとしても，その影響を最小限に抑えながら 3D モデルの生成が可能となる．

3.3 レンダリング処理

3D モデル生成処理にて被写体 3D ポリゴンモデルを得た後に，仮想視点 $R_{X,Y,Z}$ から見た 2D 画像を得るのがレンダリング処理である．ここで (X, Y, Z) は自由視点制作を行う 3D 空間のワールド座標系の座標位置である．以下に，提案手法のレンダリング手順通りに各項にてレンダリングの処理の詳細を述べる．説明においては 3D ポリゴンモデルを構成する各頂点のインデックスを i ，ポリゴンのインデックスを n とする．ポリゴンは，どの頂点を結び合わせて構成されるかというポリゴン構成情報を持つ．

3.3.1 レンダリング画像へのポリゴン描画

レンダリングにおいては，まずユーザの操作に基づき，レンダリング画像 (u, v) を生成する仮想視点位置 $R_{X,Y,Z}$ が決定される．その後，ポリゴン P_n を構成する頂点 V_i の 3D ワールド座標位置 (X_i, Y_i, Z_i) に対応する仮想視点位置

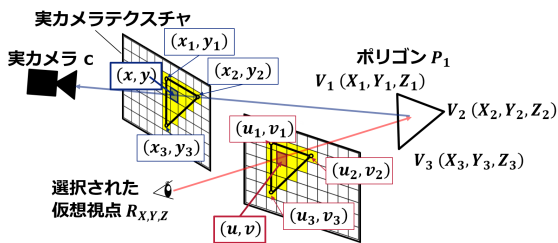


図 4: ポリゴンの透過判定方法

$R_{X,Y,Z}$ から見たレンダリング画像上の画素位置 (u_i, v_i) を計算し、当該位置に各ポリゴン P_n の描画を行う。

3.3.2 テクスチャマッピング

各ポリゴン P_n が画素 (u, v) 上に描画されるとき、各画素にテクスチャマッピングが施される。提案手法では従来手法 [1] と同様に、仮想視点位置 $R_{X,Y,Z}$ と、実カメラの向き (角度) の差を基に、基本的には最も近いカメラからマッピングが成される。ただし、各ポリゴン P_n を構成するいずれかの頂点が遮蔽されている場合、全ての頂点が遮蔽されていない最近傍カメラからテクスチャマッピングを施す。遮蔽情報は 3.2 節で述べた遮蔽情報 $O_{i,c}$ が利用される。加えて、提案手法ではこの各ポリゴン P_n を画素 (u, v) 上に描画する際に透過判定を行い、透過判定された画素では透過率を 100% としてポリゴンの描画を行う。

ここで画素 (u, v) にポリゴン P_n を書き込む際の透過判定の方法について述べる。まず、図 4 のように判定するレンダリング画像上の画素 (u, v) と、描画したい三角形ポリゴン P_1 が存在するとき、 P_1 を構成する頂点を V_1, V_2, V_3 とする。この V_1, V_2, V_3 それぞれの 3D ワールド座標位置を $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3)$ としたとき、それぞれをテクスチャマッピングに使用する実カメラ上に投影した際の画素位置 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ を計算する。その後、判定する画素 (u, v) と頂点 V_1, V_2, V_3 の位置関係に基づき、線形補間により実カメラ上の画素位置 (x, y) を得る。その後、以下の判定式を計算する。

$$|I_{c,t,x,y} - \mu_{c,t,x,y}| < T_R. \quad (4)$$

式 (4) が真となるとき、三角形ポリゴン P_n が画素 (u, v) に描画される際に、透過率 100% で描画が成される。ここで $I_{c,t,x,y}$ はマッピングに使う実カメラの画素値であり、 T_R は判定のための閾値であり定数値を取る。なお、実験では式 (4) の判定を HSV 色空間で行った。そのため、式 (1) で用いた $I_{c,t,x,y}$ と $\mu_{c,t,x,y}$ に関し、式 (4) のために HSV 色空間へ変換する処理を行った。

式 (4) において、一般に被写体が存在する場合には比較される画素値に差が生じる。一方、フィールド上の芝生等が、3D モデル形状の不正確さ故に選手モデルにマッピングされてしまう場合、実カメラテクスチャと背景モデルはいずれも芝生が写り込むため画素値の差は小さくなる。そこでテクスチャと背景モデルの差が小さいケースではモデ

表 1: 使用した計算機の性能

OS	Windows10 Prof 64 ビット
CPU	Ryzen ThreadRipper 2970WX
GPU	NVIDIA RTX 2080Ti(2 枚_SLI 接続)

ルを透過表示することで、輪郭形状を洗練する。このように 3.1 節のシルエット抽出だけでなく、レンダリング過程においてもテクスチャと背景モデル画像を比較し、モデル形状を洗練するのが提案手法の特徴である。

3.3.3 視点位置に応じた透過幅の決定

レンダリング画像 (u, v) から見て被写体が存在する画素を前景と見なすとき、この前景の縁から遠い位置にある画素は透過率を 0% に修正する。これは、式 (4) において $I(x, y)$ と $\mu_{c,t,x,y}$ の類似性が高い場合に、本来透過されるべきではない領域が透過されることを防止するため、透過領域を被写体の縁付近のみに限定するために行われる。具体的には、ある画素 (u, v) を中心とした $(2L+1) \times (2L+1)$ 画素の矩形領域を考え、矩形領域内の全ての画素にポリゴンが書き込まれている場合には、縁に遠い画素であると見なしして透過率を 0% に戻すことで実施される。

また、提案手法ではレンダリング画像の画素単位で透過処理が行われる関係から、被写体までの距離が近い場合は L を大きくすることが望ましい。そこで、提案手法では視点の位置に応じて透過幅を動的に変更する。本研究で用いたレンダリング画像を表示するビューアでは、ユーザが視点の回転中心を設定し、斜め下を見下ろすようにしながら、視点を回転させることができる。この回転中心 $S_{X,Y,Z}$ は、地面 $Y = 0$ 上のみ設定できる。このとき、透過幅 L は以下の式で計算される。

$$L = L_r(\text{Dist}(C_{X,Y,Z}, S_{X,Y,Z}) / \text{Dist}(R_{X,Y,Z}, S_{X,Y,Z})), \quad (5)$$

$C_{X,Y,Z}$ はある実カメラの 3 次元座標位置であり、実験では 20 台のカメラのうち最もフィールドまで遠いカメラの座標が利用された。また、 $\text{Dist}()$ はユークリッド距離を計算する関数で、 L_r は基準となる透過幅でユーザの手により決定される。式 (5) によると、仮想視点位置が回転中心に近いほど広い幅に対してポリゴンモデルの透過処理が実行されることになることから、被写体に近づいた場合に透過幅 L を動的に大きくすることが可能となる。

4. 実験

4.1 実験条件

提案手法の有効性の確認のため、サッカーの多視点映像の公開データセット [11], [12] を用いて実験を行った。当該データセットで提供されている 20 台のカメラ映像 (解像度: 1920 × 1080, 30fps, 10 秒) から自由視点制作を行う。自由視点の制作範囲はサッカーのハーフコート

表 2: 計算時間の測定結果

手法	シルエット 抽出 [ms]	3D モデル 生成 [ms]	レンダリング [ms]
従来 [1]	26468.2	52.6	18.3
提案	30.7	31.7	18.6

(68m×53m×5m)とした。なお公開データセットで提供されるカメラパラメータの誤差が大きかったことから、これを軽減するために実験ではコート上の白線の交点位置を画像上で手動で選択し、事前にサッカーコートの規格から明らかとされる既知の交点の3D位置との対応を基にカメラキャリブレーションを実施した[13]。また、実験に用いたPCのスペックを表1に示した。提案手法ではシルエット抽出処理において、式(1)から式(3)の計算や、前景領域の膨張処理に関しCUDAを用いてGPUベースで実装した。また、3Dモデル生成処理に関しても、視体積交差法やマーチングキューブ等の並列化可能な処理はCUDAベースで実装を行い、レンダリングにはOpenGLを利用した。

4.2 実験 1:計算処理時間の確認

まず、実験1として従来手法[1]と提案手法の処理時間の測定を行い、リアルタイム性の検証を行った。提案手法ではシルエット抽出、3Dモデル生成、レンダリングに1台ずつPCを割り当てることを想定しているが、今回は簡単のため表1のPCでそれぞれの処理の1フレーム平均の計算時間を測定した。その結果を表2に示した。

シルエット抽出に関しては文献[1]ではリアルタイム化の対象外であり、深層学習(Mask R-CNN[8])の処理に大きく時間を要した。次に3Dモデル生成に関しては、従来手法では文献[1]内に記載の通り粗いボクセルを5cm、細かいボクセルを2cmで生成を行った。一方、提案手法では粗いボクセルを10cm、細かいボクセルを4cmとすることでリアルタイムを実現した。最後にレンダリング処理に関しては、従来手法と比較しわずかに処理の増加が見られたものの、高速に処理ができていくことがわかる。これは提案の透過処理が式(4)や式(5)等のシンプルな計算処理で構成されており、画素ごとの並列計算が可能のためであると考えられる。提案手法ではシルエット抽出、3Dモデル生成、レンダリングの各処理を30fps(33.3ms以下)で実施できており、リアルタイム性を検証することができた。

4.3 実験 2:従来手法との品質比較

次に従来手法との品質比較を行った。表3に示される5つの条件の比較を行った。条件Aは従来手法[1]を採用した。条件Bはリアルタイム性を保つために、3.1節で紹介した方法でシルエット抽出処理を実施したが、シルエットの輪郭膨張は行わなかった($d=0$)。条件C~Eにおいては提案手法の機能を徐々に追加し、効果の検証を行った。また、ボク

セルサイズは条件Aでは粗いボクセルを5cm、細かいボクセルを2cmとし、条件B~Eは粗いボクセルを10cm、細かいボクセルを4cmとすることでリアルタイムを実現した。なおパラメータは今回の実験では $T(y, u, v) = (20, 2, 2)$ 、 $U = 0.01$ 、 $T_R(H, S, V) = (36, 20, 20)$ とした。また、条件Dではポリゴンの透過処理を固定幅($L=5$)にて実施し、条件Eでは動的幅($L_r=5$)とした。

3Dモデル形状の正確性の客観評価のために、人間の手で作成した各カメラの正解シルエット画像と、生成された3Dモデルをカメラ平面に投影することで得られるシェイプマスクのF値を算出した。また、透過幅の動的変更機能の効果検証のために、引き画角と寄り画角の2パターンでF値の計算を行った。引きカメラは実カメラ位置でF値の算出を行ったもので、寄りカメラは引きカメラの映像を縦横2倍拡大した位置の画角に対し、F値を算出した。

表3によると、提案手法(条件E)が従来手法(条件A)より優れた品質を実現できることがわかる。また、条件Bや条件Cの精度は条件Aを下回っているが、これはシルエット抽出の処理が変更されたことと、ボクセルサイズが粗く設定されたことが悪影響を及ぼしていると考えられる。また、条件Cによるとシルエット膨張処理単体ではほぼ品質改善には繋がらないが、条件Dにてポリゴンモデルの透過処理を組み合わせることで、大きく精度向上を実現できることがわかる。これは視体積交差法の段階では欠損少なくモデルを生成し、レンダリング過程で洗練するアプローチが有効に働いているためであると考えられる。また、条件Dと条件Eの比較から、寄り画角の際に透過幅を動的に計算した方がF値が良好となることがわかった。また、図5に各条件のレンダリング画像の例を示した。これによると、従来手法(条件A)と比較すると、条件Dや条件Eの提案手法の方が欠損が少なく選手を表示できている。

5. まとめ

本研究では、3Dモデルの生成において欠損の少ない粗い3Dモデルを生成し、ユーザが視点位置を選択した後のレンダリング過程において、モデル輪郭を洗練する手法を提案した。結果、20台のFull HDのカメラからサッカーのハーフコートを対象にリアルタイムに自由視点が生成できることと、生成品質が従来のリアルタイム自由視点手法を上回ることを確認した。今後としては、サッカー以外のスポーツシーンへの効果検証を行うことに加え、レンダリングにおけるポリゴン透過判定の高度化や、各被写体までの距離に応じて透過幅を決定するなどの処理の洗練化を行い、更なる高精度な自由視点映像の生成の実現を目指す。

参考文献

[1] J. Chen, et al, "Fast Free-viewpoint Video Synthesis Algorithm for Sports Scenes", IROS 2019, 3209-3215, 2019.

表 3: 品質客観評価結果

条件	シルエット輪郭膨張	ポリゴンモデル透過処理	透過幅の動的変更	引き画角 F 値	寄り画角 F 値	平均 F 値
条件 A	従来手法 [1]			0.606	0.680	0.643
条件 B				0.577	0.645	0.611
条件 C	○ ($d = 3$)			0.579	0.665	0.622
条件 D	○ ($d = 3$)	○		0.667	0.711	0.689
条件 E	○ ($d = 3$)	○	○	0.672	0.736	0.704

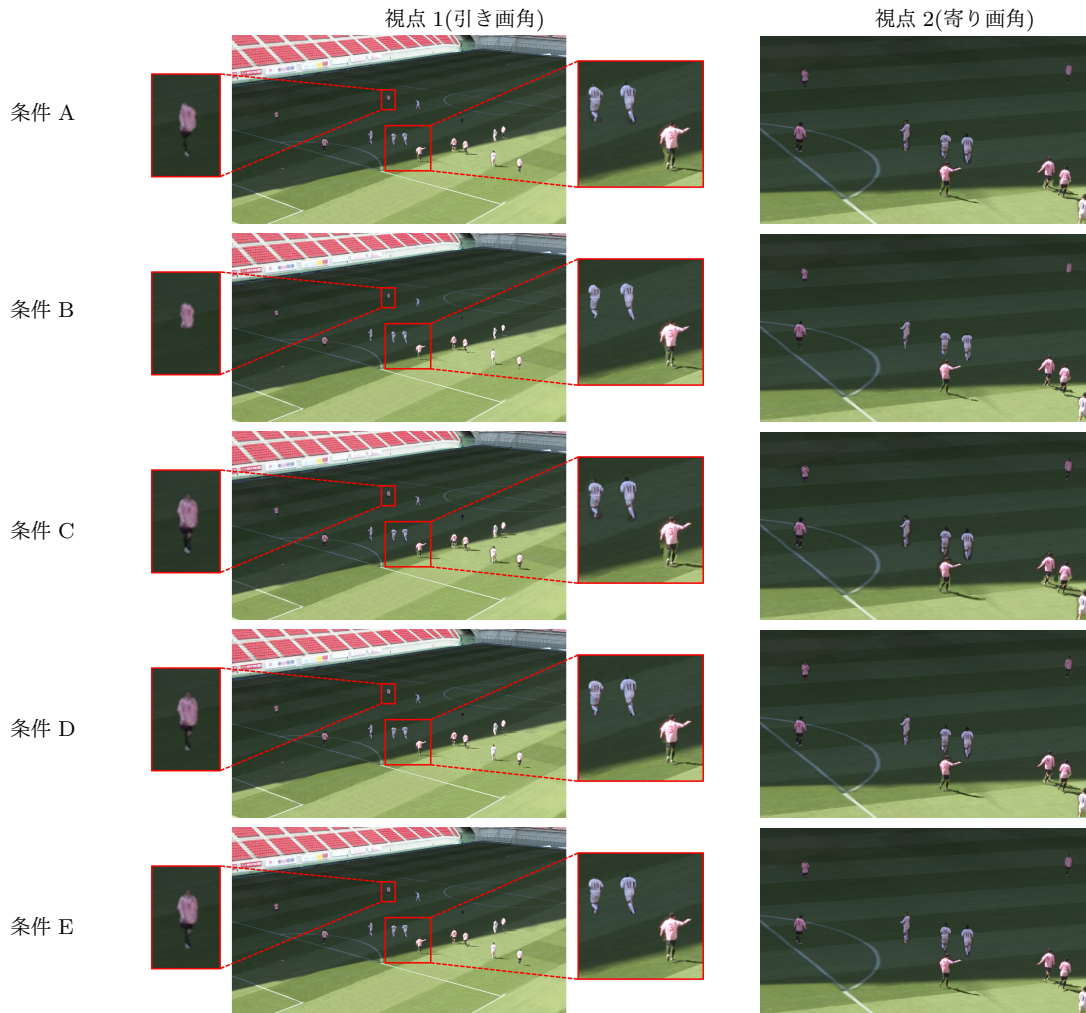


図 5: 各条件のレンダリング結果

- [2] K. Nonaka, et al, "Fast Plane-Based Free-viewpoint Synthesis for Real-time Live Streaming," VCIP 2018, pp. 1-4, 2018.
- [3] 前田哲汰, 他, "Visual Hull を用いた高効率な高品質自由視点スポーツ映像生成", 情報処理学会研究報告, 2017-AVM-96, 3, 2017.
- [4] 野中 敬介, 他 "5G 網を利用した自由視点映像リアルタイム配信技術," 映像情報メディア学会誌, 74 巻, 1 号, p. 180-186, 2020.
- [5] A. Laurentini, "The visual hull concept for silhouette-based image understanding," IEEE Trans. PAMI, 16, 2, pp. 150-162, 1994.
- [6] J. Chen, et al, "Sports Camera Calibration via Synthetic Data," CVPR Workshop, 2019.
- [7] L. Wang, et al. "Multi-Camera Calibration with One-Dimensional Object under General Motions," ICCV 2007, pp. 1-7, 2007.
- [8] K. He, et al, "Mask R-CNN," ICCV 2017, pp. 2980-2988, 2017.
- [9] P. St-Charles, et al. "SuBSENSE: A Universal Change Detection Method With Local Adaptive Sensitivity," IEEE Trans. Image Process., 24, 1, pp. 359-373, 2015.
- [10] Q. Yao, et al, "Accurate Silhouette Extraction of Multiple Moving Objects for Free Viewpoint Sports Video Synthesis," MMSP 2015, pp. 1-6.
- [11] M. Tanimoto, et al, "Free-viewpoint tv," IEEE Signal Processing Magazine, 28, 1, pp. 6776, 2011.
- [12] R. Suenaga, et al, "A practical implementation of free viewpoint video system for soccer games," SPIE Electronic Imaging 9393-15, 2015.
- [13] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. PAMI, 22, 11, pp. 1330-1334, 2000.