

## ランダムパターン背景を用いた視体積交差法のための シルエット欠損修復

豊浦 正広<sup>†</sup> 飯山 将晃<sup>††</sup> 角所 考<sup>††</sup> 美濃 導彦<sup>††</sup>

† 京都大学大学院情報学研究科 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

†† 京都大学学術情報メディアセンター 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: †toyo@mm.media.kyoto-u.ac.jp, ††{iiyama,kakusho,minoh}@media.kyoto-u.ac.jp

**あらまし** 視体積交差法は、複数のカメラで得られるシルエットから対象物体の形状を復元する手法である。視体積交差法では、シルエットの欠損が復元形状の欠損として蓄積するという問題点がある。そこで本研究では、ランダムパターン背景を用いることで未知の拡散反射色を持つ物体に対して、一定以上の割合の物体投影領域をシルエットとして抽出できるようにする手法を提案する。ランダムパターン背景を設定してもなお生じるシルエット欠損については、複数のカメラが同じ物体を観測していることを利用して、物体の拡散反射色を推定し、これと背景色を比較することで修復を行う。実験では、シルエットを手動で抽出した形状と提案手法により得られる形状との比較を行い、提案手法によりシルエット欠損が修復されることが確認できた。

**キーワード** 視体積交差法、シルエット欠損修復、拡散反射色推定、ランダムパターン背景、マルチカメラ画像。

## Silhouette Refinement for the Volume Intersection Method with Random Pattern Background

Masahiro TOYOURA<sup>†</sup>, Masaaki IIYAMA<sup>††</sup>, Koh KAKUSHO<sup>††</sup>, and Michihiko MINOH<sup>††</sup>

† Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

†† Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku,  
Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: †toyo@mm.media.kyoto-u.ac.jp, ††{iiyama,kakusho,minoh}@media.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** The volume intersection method reconstructs shapes of target objects from their silhouettes obtained by multiple cameras. There occurs a problem when some parts of the silhouettes are missing; some parts of reconstructed shapes are also missing. We propose a method for refining silhouettes to reconstruct more accurate shapes. Missing parts of silhouettes can be refined by using random pattern background when a target object has various colors. In addition, the comparison between the object's color and its corresponding background's color can also refine the silhouettes. In our experiment, proper silhouette refinement was confirmed by the comparison between the reconstructed shapes and the shapes from manually extracted silhouettes.

**Key words** Volume intersection method, silhouette refinement, estimation of diffuse reflection color, random pattern background, multi-camera images.

### 1. はじめに

視体積交差法[1]は、複数のカメラで形状復元の対象となる物体を観測して、画像上で物体の存在領域を表すシルエットから、物体の形状を復元する手法である。視体積交差法では、物体表面の色変化に乏しい物体やレーザを吸収する物体など、ステレオ視やレーザレンジファインダを用いた形状復元手法では復元が困難であるような物体に対しても、シルエットの抽出さ

え可能であれば形状復元が可能である。このため、様々な色の物体を対象とする場合の形状復元手法として大変優れている。その一方で、シルエット形状のみに基づいて形状復元を行うために、シルエット抽出の際に欠損が起こると、復元形状である視体積にも欠損が起ってしまう。

一般にシルエットは、物体を観測したときの画像と背景画像とを比較して、各画素ごとの差分を求め、この差分が大きな画素を要素を持つ領域を計算することによって求められる。この

とき、大きな欠損の多くは物体の拡散反射色が背景色と近いために起こるといえる。たとえば、ブルーバックを設定した環境では、青色を持つような物体のシルエットを抽出しようとしても、シルエットは欠損し、正しく抽出できない。その結果、視体積にも欠損が起り、物体形状の再現性は低くなる。

従来、シルエット抽出をより正しく行うことを目的として、赤外線を用いて物体領域を抽出する手法が提案されている[2]。この手法では、物体を避けて背景部分にのみ赤外線を当てた状態でカメラで物体を観測するときに、物体領域のみで赤外線が遮られ、反射される赤外線が観測されないことを利用する。このときに、赤外線が観測されない領域を物体領域とすることができます。しかしこの手法は、ごく少数台のカメラを用いて行うときのシルエット抽出においてのみ有効であり、全方位に多数のカメラが設置される環境においては適用できない。なぜなら、全方位に多数のカメラが設置される環境では、背景部分とカメラが設置される部分を分割することができず、赤外線を背景部分にのみ当てることができないため、カメラから赤外線が直接観測されることが起こるからである。視体積交差法では、全方位に多数のカメラを用いて行うことが一般的であるので、この手法は視体積交差法には適さないといえる。

シルエット欠損の問題を取り組む研究として、單一カメラで得られる画像からシルエットをロバストに抽出する研究もこれまでに行われてきた[3][4]。これらの研究では背景色と物体色が異なることを前提としており、この前提が成り立たない環境下でのシルエット抽出は考えていない。また、対象物体の形状についても連続であるという前提を置いているために、この前提が当てはまらない物体の形状復元を行う際には適切に動作しない。

また、シルエット自体を正しく抽出するのではなく、欠損を持つシルエットから視体積構築を行う際に、シルエット欠損を相互に補完して形状を復元する手法もいくつか提案されている。視体積の欠損を補完するスムージング処理をシルエットと照合しながら行う研究はこの一例である[5]。この研究では視体積構築の際に、視体積とシルエットとの整合性、および、視体積の領域の連続性についてのエネルギー関数を設定し、これを最小化するというアプローチをとる。この場合も、背景色と物体の観測色が同一である状況は想定されておらず、シルエットの欠損がほとんど起こらない場合のみに有効な手法となっている。

これらの手法では、背景色と物体の観測色が同一である状況が想定されていないが、物体色に汎用なシルエットの抽出を考えるとき、この状況が起こりうる。この状況を回避するために、従来では、物体色に合わせた背景色の変更が行われてきたが、背景色の変更はシステムの設計者にとって大きな負担となる。

また、 $n$ 台のカメラを用いる際に、通常の視体積交差法では $n$ 台のカメラのシルエット内部と判定されるボクセルを復元形状とみなすが、 $N_{allow}$ 台以内 ( $N_{allow} \geq 1$ ) のカメラにおいてのみシルエット外と判定されるボクセルについて、これらを復元形状に含めるという手法も、シルエット欠損を相互に補完して形状を復元する手法の例である[6]。この手法により得られる復元形状は欠損が修復されているが、その一方で、正しい視体

積には含まれない余分な領域も含んでしまう。この手法で得られる視体積の長所と短所については、2.3節で詳しく論じる。

本研究では、未知の色の物体に対してもある一定の割合以上の領域で正しくシルエット抽出を行うために、ランダムパターン背景の設定することを提案する。ランダムパターン背景を用いてもなお生じるシルエットが欠損については、複数のカメラが同じ対象物体を観測していることをを利用してこれを修復し、さらに欠損の少ないシルエットを得る手法についても提案する。

ランダムパターン背景とは、カメラが観測できる色の値の範囲内でランダムに選択される値を、小領域に区切られた各領域の色が持つ背景である。ランダムパターン背景を用いると、様々な拡散反射色の物体に対して、完全には正しくシルエットを抽出することはできないものの、ある一定の割合以上の領域で正しくシルエットを得ることが期待できる。

さらに、ランダムパターン背景を設定してもなお生じるシルエットが欠損について、複数のカメラの情報から得られる物体の拡散反射色を用いて、シルエット欠損が生じている画素を検出し、選択的に修復する。これにより、余分な領域をできるだけ増やさないようにすることができる。ランダムパターン背景とシルエット欠損修復手法とを合わせて用いることにより、未知の拡散反射色の物体に対しても欠損の少ない視体積を得ることができる。

以下、2節では視体積交差法の原理を説明する。また、 $N_{allow}$ を設定することによる視体積への影響についても論じる。3節ではランダムパターン背景の生成方法について説明する。4節ではランダムパターン背景を設定してもなお残るシルエット欠損に対し、複数のカメラの情報を統合してシルエット欠損修復を行い、視体積の欠損を軽減する手法を提案する。5節では実環境実験により提案手法の有効性を示し、6章で全体をまとめる。

## 2. 視体積交差法とシルエット欠損の影響

### 2.1 視体積交差法

視体積交差法では、複数台のカメラで対象となる物体を観測する。このとき、物体はすべてのカメラの観測範囲内に収まるものとする。以下ではカメラ $n$ 台の場合の視体積交差法の原理を説明する。

$m$ 番目のカメラ $C_m$  ( $m = 1, \dots, n$ ) の観測範囲に物体 $O$ が存在するとき、物体 $O$ は $C_m$ の画像上に投影され、その投影像は2次元画像上のシルエット $R_m$ として得られる。

のことから、逆にカメラ $C_m$ における物体 $O$ のシルエット $R_m$ が得られたとき、 $O$ は $C_m$ のレンズ中心を端点とし、 $R_m$ 上の任意の点を通る半直線の集合からなる錐体状の開空間に内接して存在することがわかる。この開空間をカメラ $C_m$ における“視錐体”と呼び、 $V_m$ で表す。これは $C_m$ の画像から得られる物体 $O$ の3次元形状に関する情報に相当する。このとき視錐体 $V_1, V_2, \dots, V_n$ について、式(1)のような積領域 $V$ を考え、“視体積”と呼ぶ(図1)。

$$V = \bigcap_{m=1}^n V_m \quad (1)$$

この  $V$  を求めることで各カメラから得られる物体  $O$  の 3 次元形状に関する情報を統合することができる。

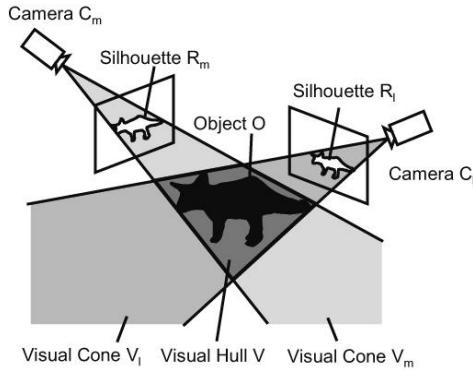


図 1 視体積交差法

本研究では、視体積  $V$  の表現にボクセルモデルを用いる。ボクセルモデルでは、3 次元空間をボクセルと呼ばれる微小領域で分割し、視体積  $V$  に含まれるボクセルの値を 1、そうでないものの値を 0 とする。

## 2.2 シルエット欠損の視体積への影響

視体積の持つ特徴として次の 2 つが挙げられる。

(1) 対象物体は視体積に常に内接する

(2) 視点が増加すればするほど視体積の体積は減少する

これらの特徴より、カメラ台数が多ければ多いほど視体積に含まれる物体領域以外の領域が減少し、視体積は物体形状に近づくといえる。つまり、復元形状の再現性の向上を図るためにカメラ台数を増やすべきである。

しかし、視体積交差法では、物体の拡散反射色が背景色と近いことなどによりシルエットに欠損が生じると、視錐体も欠損する。視体積はそれぞれのカメラで得られるシルエットから計算される視錐体の積領域として求められるために、1 台のカメラのシルエット欠損による影響は、視錐体の積領域である視体積にまで及び、各カメラで生じる欠損は視体積の欠損として蓄積することとなる。つまり視体積交差法では、カメラ台数を増やすべき増やすほど、原理的には真の物体領域以外の余分な領域が減少し、視体積の再現性は向上するが、反面、シルエット欠損が生じる領域が増えて視体積が欠損するために、復元形状の再現性はかえって悪くなることがある。

## 2.3 $N_{allow}$ を設定した視体積

たった 1 台のカメラのシルエット欠損が、視体積を欠損させることがあるという問題に対処するために、十数台程度の多数のカメラを使って視体積交差法を行う際には、 $n$  台すべての視錐体の積領域ではなく、 $(n - N_{allow})$  台以上のカメラの視錐体に含まれる領域を復元形状とする手法がよく用いられる [6]。

この手法では、 $N_{allow}$  を 0 以外に設定して得られる復元形状もシルエットから得られる復元形状となる。これも広義の視体積であるので、以降では単に視体積とよぶことにする。

19 台のカメラを用いて視体積交差法を行うときに、 $N_{allow}$  を 0, 1, 2 に設定した視体積をそれぞれ図 2(b), (c), (d) に示す。図 2(a) は対象物体の写真である。

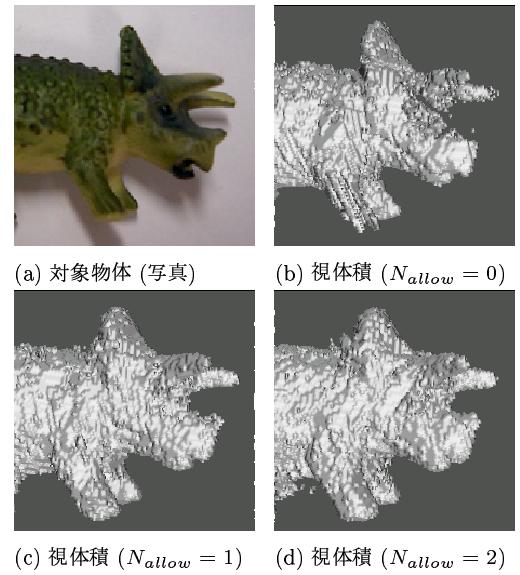


図 2 視体積要素の欠損

通常の視体積交差法で得られる視体積 ( $N_{allow} = 0$ ) では、シルエット欠損の影響を受けて視体積要素の欠損が見られる。恐竜の顔の部分で欠損が顕著に現れている。 $N_{allow} = 1$  として求めた視体積では欠損が改善されているが、恐竜の角やたてがみのうしろの部分などで、物体領域以外の余分な領域が増えていることが確認できる。 $N_{allow} = 2$  として求めた視体積では、全体的に余分な領域が増えてしまっている。以上より、 $N_{allow}$  を大きく設定した視体積では、物体領域以外の余分な領域が視体積に含まれることが確認できる。そこで本研究では、シルエットの欠損を抑えるとともに、 $N_{allow}$  を設定して求められる視体積を手がかりにして、欠損領域のみを修復する手法を提案する。

## 3. ランダムパターン背景

### 3.1 ランダムパターン背景の設置

本節では、物体の観測色と背景色が近いときにシルエット欠損が生じる問題に対して、ランダムパターン背景を設定することで、未知の拡散反射色を持つ物体に対しても、一定以上の割合のシルエットを抽出する手法を提案する。一定以上の割合のシルエットを抽出することができれば、4 節に述べるシルエット欠損修復手法と組み合わせることで、欠損の少ない視体積を得ることができるようになる。

未知の色を持つ物体に対して、できるだけ多くのカメラでシルエット欠損が起こらないようにするためには、物体の各部分が各カメラの画像上に投影されるときに、それに対して背景差分を取りための背景となる画素の色が、それぞれのカメラで違う色を持つようにすればよい。こうすれば、物体のその部分に対して、1 台のカメラではシルエット欠損が起こることがあるが、その他のカメラではシルエット欠損が起こらない。

このことを実現する一つの方法として、カメラごとに異なる単一色の背景を設定することが考えられる。各カメラごとに別の色の背景を設定すれば、シルエット欠損は高々1台のカメラでしか起こらない。しかし視体積交差法では、すべてのカメラに対してシルエットの内部に投影されるボクセルのみが視体積要素と判定されるために、1台のカメラのシルエットが大きく欠損する場合には、視体積は大きく欠損する。視体積が大きく欠損するときには、4節で述べるシルエット欠損修復に必要な、物体の拡散反射色の推定ができず、シルエット欠損修復を行うことができない。物体の拡散反射色の推定のためには、画像に投影されている色が、物体のどの部分の色であるのかを知る必要があり、ある程度正確な物体形状を持たない状態では、物体の拡散反射色の推定を行うことはできないからである。つまり、大きく復元形状が欠損する部分では、正しい推定色が得られにくい。

また、 $N_{allow}$  を1に設定すると、完全に単一色である物体に対しては欠損の少ない視体積が得られることが期待できるが、複数の拡散反射色を持つような一般的な物体では、やはりシルエット欠損が複数のカメラで起こり、シルエット欠損修復の必要が生じる。この場合には前述のようにシルエット欠損が小さいことが必要であるので、結果として、カメラごとに異なる単一色の背景を設定する方法では視体積に欠損が修復されないことになり、再現性が低下するといえる。

以上のことを踏まえて、区切られた各小領域が別々の色を持つような画像を用意し、図3のように背景部分にこれを設置することを提案する。このとき、パターン中の各領域の色はカメラが観測可能な色の中から選択する。本研究では、シルエット抽出にYUV表色系のUとVの値を用いるので、画像中の各領域の色がUV空間で一様に分布するようにランダムに選択する。このようなパターンを用いた背景をランダムパターン背景とよぶ。なお、本研究で提案する手法は表色系や差分抽出に用いる色の成分のとり方に依存せず、RGBやHSVなどの他の表色系にも適用可能である。

ランダムパターン背景を設定することにより、どのような拡散反射色を持つ物体に対しても、一定以上の割合の領域でシルエットが正しく抽出されるようになる。複数のカメラに物体のある部分が投影されたときに、各カメラでは取得画像に同じ拡散反射色を観測する。これと対応する背景画像中の領域を比較して、これらが近いときにシルエットは欠損する。ランダムパターン背景では、物体のある部分に対して各カメラで与えられる背景色が異なることが期待できるので、シルエット欠損が起こる確率は低くなる。

ランダムパターンを背景に設定した場合、物体のある部分が投影されるそれぞれのカメラでの画素は、すべてのカメラでシルエットに含まれるわけではないものの、従来の単一色の背景と比較して多くのカメラでシルエットに含まれるといえる。提案手法では、物体の各部分の拡散反射色を推定する必要があり、このためにある程度正確な物体形状の復元が求められるので、真の物体投影領域に含まれる画素ができるだけシルエットに含まれることが望まれる。ランダムパターン背景では真の物体投

影領域に含まれる画素を一定以上の割合でシルエットに含めることが期待できる。

### 3.2 ランダムパターン背景の設定

図3(a)および(c)は、ランダムパターン背景のもつYの値により、観測される背景色のUV空間での分布が偏った例である。図3(a)では、Yのもつ値が小さく背景色が暗すぎて、黒つぶれして観測される領域が出てきている。図3(c)では、Yのもつ値が大きく背景色が明るすぎて、白飛びして観測される領域が出てきてしまっている。Yが適切に設定されていない場合には、観測される色のUV空間での分布は偏りが生じ、1台のカメラでシルエット欠損が生じる確率が大きくなることがある。観測される背景色のUV空間での分布に偏りが起こらないように、Yの値を設定した背景が図3(b)である。図3(b)の画像は、Yの目標値を128に設定し、与えられたUVから決まるYのとりうる値の範囲内で、最も目標値である128に近くなるようなYの値を設定した背景である。図3(b)では、それぞれの領域で観測される色がUV空間でランダム性を保存することが期待できる。



(a) 暗すぎる背景 (b) 適切な明るさの背景 (c) 明るすぎる背景

図3 ランダムパターン背景の明るさ

また、焦点ぼけ[9][10]による問題も起きる。焦点ぼけでは、レンズから物体までの距離、レンズから背景までの距離、カメラの焦点距離と開口円半径により、そのぼけ半径が決まる。ぼけが起こる領域では、隣接する領域との間色がカメラで観測され、その結果、観測される背景色のUV空間での分布に偏りが起きる。ぼけを観測している背景を図4(a)に示す。逆に、背景に用いる画像の各領域の大きさをあまり大きくしすぎると、物体の背景部分に現れる観測される背景色に多様性が失われ、観測される背景色のUV空間でのランダム性が失われる。また、視体積に大きな欠損が生じ、4節で述べるシルエット欠損修復が行いにくくなる。各領域の大きさが小さすぎる背景を図4(c)に示す。観測される背景色のUV空間での分布の偏りが起こらないように、また、シルエット欠損があまり大きくなりすぎないように各領域の大きさを設定した背景が図4(b)である。



(a) 領域の大きさが 小さい背景 (b) 領域の大きさが 適切な背景 (c) 領域の大きさが 大きい背景

図4 ランダムパターン背景の領域の大きさ

Y の目標値および各領域の大きさについては、様々な値に設定したパターンを多数作成し、実際に背景として設定したときに最適と思われるパターンを選択した。

#### 4. マルチカメラ情報の統合によるシルエット欠損修復

##### 4.1 シルエット欠損修復手法の概要

物体の同一部分を複数のカメラで観測する場合、その部分の拡散反射色は各カメラで同じものが観測される。このことを利用して、複数のカメラの観測情報から物体の拡散反射色を知ることができ、さらに、背景色と拡散反射色との近さを見ることで、各カメラの各画素での欠損の起こりやすさを判断することができます。この結果、シルエット欠損が起こりやすいと判定された画素については、これをシルエットに加えることで、シルエットの欠損自体を修復し、さらに、このシルエットから欠損の少ない視体積が得られる。以上の考えに基づき、本研究では、マルチカメラで得られる観測情報から物体の拡散反射色を推定し、シルエット欠損を修復することを試みる。

まずははじめに、このシルエット欠損修復手法の概要について説明する。本手法は、通常の視体積交差法で初期の視体積を復元した後に、以下の 5 つの手順を踏むことで実現される。

1. 復帰判定領域の決定
2. visibility の計算
3. 復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定
4. シルエット欠損の検出と修復
5. 復帰視体積の再構築

手順 1. では、欠損している恐れのあるボクセルの集合を“復帰判定領域”とする。ここで、ボクセルが欠損したボクセルであるかどうかを判定することを“復帰判定”とよぶ。復帰判定領域の中からいくつかのボクセルが選択され、手順 2. に渡される。このとき選択される領域に含まれるボクセルを、復帰判定ボクセルとよぶ。手順 2. に渡される復帰判定ボクセルがなくなった時点で、シルエット欠損修復の処理は終了する。図 5 の濃く塗りつぶされたボクセルが復帰判定ボクセルの例である。このボクセルは右のカメラのシルエット外に投影されている。

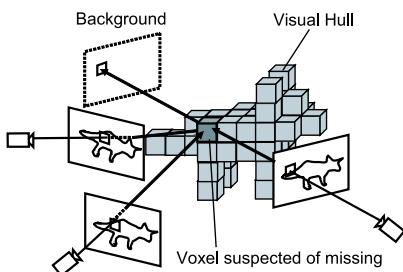


図 5 シルエット欠損修復手法概要

手順 2. では、あるカメラから復帰判定ボクセルが見えているかどうかを判定するために、そのカメラと復帰判定ボクセルの間に他の視体積要素であるボクセルがないかどうかを調べる。他のボクセルがないときには、そのカメラから判定対象とするボクセルが見えていると判定する。このとき、このカメラ

に対してボクセルは“visible である”といい、この判定のことを“visibility の判定”とよぶ。

visibility の判定ができると、手順 3. で復帰判定ボクセルの拡散反射色をマルチカメラの情報から推定できる。

手順 4. では、手順 3. で推定された復帰判定ボクセルの拡散反射色と各カメラで対応する背景画像の画素値を比較し、両者が近いときシルエット欠損が起こりやすいと判定することで、シルエット欠損が生じている可能性の高い画素を検出し、これをシルエットに含めることで欠損の少ないシルエットを得る。

手順 5. では、手順 4. で欠損が修復されたシルエットから、本手法で得られる復元形状である“復帰視体積”を構築する。その後、手順 2. に戻り、復帰判定領域に含まれるボクセルがなくなるまで処理を繰り返す。このとき、毎回のループで復帰視体積を再構築するのは、手順 2. の visibility の判定の精度を高めるためである。

##### 4.2 復帰判定領域の決定

初期の視体積に含まれないボクセルのうち、真の視体積から欠損したボクセルについてのみ復帰判定を行えば、誤ったボクセルを復帰させることなく、初期視体積の欠損を修復することができます。しかし、視体積を構築する時点において、真の視体積を求めるることはできないので、復帰判定領域として 2.3 節で述べた  $N_{allow} = N_{th}(N_{th} \geq 1)$  に設定した視体積と初期視体積の差分領域を選択する。 $N_{th}$  を適切に設定した視体積では、余分な領域は増加するものの欠損領域は少ないと期待できる。 $N_{th}$  を 1 つ選択するときに、どの程度の欠損領域と余分な領域を持つ復帰判定領域が与えられるかについては、5.1 節で予備実験を行い、この結果を基に議論する。

##### 4.3 visibility の計算

手順 2. によって求められる復帰判定領域に対し、これに含まれる復帰判定ボクセルのそれぞれに対して、復帰判定を行う。復帰判定ボクセルが視体積に含まれると仮定して、各カメラでの visibility を判定し  $a$  の拡散反射色を推定する。

ここで問題となるのは、通常、視体積に含まれるボクセルは数万個から数百万個となり、復帰判定ボクセルの 1 つ 1 つについて 3.1 節で示したループを繰り返すと膨大な時間がかかるということである。しかしながら、複数個の復帰判定ボクセルを同時に視体積に含まれると仮定して visibility を判定すると、それぞれ他のボクセルの影響を受けて visibility が誤って判定されることがある。よって、復帰判定ボクセルが相互に隠蔽することにより、カメラから visible でないと判定されることを回避する必要がある。

この問題を解決するために、visibility の判定を以下のように行う。カメラ  $C_m$  において、 $a$  が投影される画素の座標値を  $q_m(a)$  で表す。正の小さな値  $z_{th}$  を設定し、 $a$  がカメラ  $C_m$  から visible であるかどうかを、 $a$  が投影される画素  $I_m(x, y)$  に対応する Z バッファ [7] の値  $z_m(x, y)$  が  $z_m(q_m(a)) + z_{th}$  より小さいかどうかで判定する(図 6)。

$z_{th}$  を設定することにより、複数の復帰判定ボクセルを同時に視体積に含めて visibility を考えることができるようになる。さらに、同じ画素に投影される複数のボクセルに対して、カメ

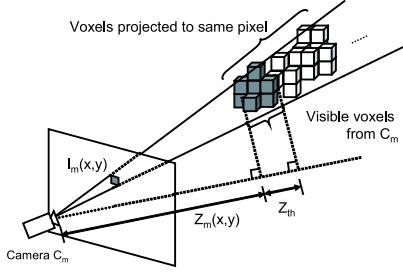


図 6 Z バッファ法による visibility の判定

ラから visible であると判定されるようになる。最も Z 値の小さいボクセルがあるためにカメラから見えないと判定されるボクセルは、最も Z 値の小さいボクセルから  $z_{th}$  の範囲内にあるものであれば、visible であると判定されることになる。

ただし、 $z_{th}$  に大きな値を設定すると、visible でない視体積の裏側のボクセルまで visible であると判定されることがあるので、物体の大きさや一度に与える復帰判定ボクセルの幅を考慮に入れて、できるだけ小さな  $z_{th}$  を設定する必要がある。我々は、それぞれの復帰判定ボクセルに対して、最も近い視体積表面ボクセルからの距離値を持たせ、これが小さいものから復帰判定ボクセルとして選択することとした。 $z_{th}$  はボクセル幅の  $\sqrt{3}$  倍程度とし、Z 値が最も小さいボクセルの 26 近傍のボクセルまでが visible であると判定されたようにした。

#### 4.4 復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定

$a$  を visible であると判定されたカメラ  $C_m$  の取得画像において、復帰判定ボクセル  $a$  が視体積に含まれるという仮定を置き、 $a$  の拡散反射色を推定する。シルエット抽出は YUV 表色系で行うものとし、復帰判定ボクセルである  $a$  が投影される画素の Y,U,V の値を  $f_{m,Y}(q_m(a))$ ,  $f_{m,U}(q_m(a))$ ,  $f_{m,V}(q_m(a))$  とする。また、 $C_m$  の背景画像において復帰判定ボクセルである  $a$  が投影される画素の Y,U,V の値を  $b_{m,Y}(q_m(a))$ ,  $b_{m,U}(q_m(a))$ ,  $b_{m,V}(q_m(a))$  とする。これらの画素値の関係を図 7 に示す。

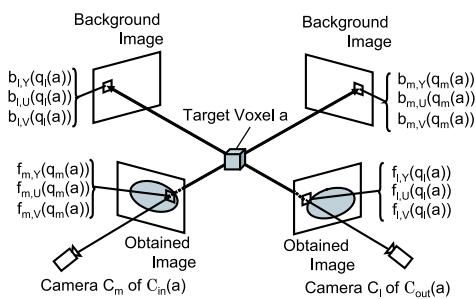


図 7 各画素値の関係

復帰判定ボクセル  $a$  の拡散反射色の推定には、 $a$  が見えているカメラの画像を用いる。このようなカメラの集合を  $C_{vis}(a)$  で表す。 $C_{vis}(a)$  のうち、復帰判定ボクセル  $a$  が投影される画素がシルエットに含まれるカメラの集合を  $C_{in}(a)$ 、含まれないカメラの集合を  $C_{out}(a)$  とし、 $N_{vis}(a)$  を  $a$  を visible であると判定するカメラ台数とする。 $C_{out}(a)$  に含まれるカメラでは背景を観測していることがあり、物体の拡散反射色を反映していないがあるので、 $C_{in}(a)$  に含まれるカメラの画素の値を用

いて、 $a$  の拡散反射色を推定する。マルチカメラでの観測情報から求められる復帰判定ボクセル  $a$  の拡散反射色の U と V の推定値  $Ave_U(a)$ ,  $Ave_V(a)$  は以下の式で求められる。

$$Ave_U(a) = \frac{\sum_{C_m \in C_{in}(a)} f_{m,U}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \quad (2)$$

$$Ave_V(a) = \frac{\sum_{C_m \in C_{in}(a)} f_{m,V}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \quad (3)$$

#### 4.5 シルエット欠損の検出と修復

手順 3. で求められる復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定値が、各カメラに投影されるときに対応する背景色と近い場合には、そのシルエット欠損が生じている画素ではシルエットが欠損しやすいと判定できる。シルエットが欠損しやすいと判定された画素を新たにシルエットに含めることで、拡散反射色と背景色の近さによるシルエット欠損を抑えることができる。

カメラ  $C_m \in C_{out}(a)$  において、 $Ave_Y(a)$ ,  $Ave_U(a)$ ,  $Ave_V(a)$  と  $a$  に対応する背景画像の画素の Y,U,V の値  $b_{m,Y}(q_m(a))$ ,  $b_{m,U}(q_m(a))$ ,  $b_{m,V}(q_m(a))$  とを比較して、シルエット欠損が生じているかを判定する。以下の条件を満たす画素  $q_m(a)$  では、シルエット欠損が起きていると判定し、 $q_m(a)$  をシルエットに含めることとする。 $U_{th}$ ,  $V_{th}$  はシルエット抽出に用いる閾値である。

$$| Ave_U(a) - b_{m,U}(q_m(a)) | < U_{th}$$

または

$$| Ave_V(a) - b_{m,V}(q_m(a)) | < V_{th} \quad (4)$$

## 5. 実験

実験では、物体を全方向から観測できるように配置された 19 台のカメラを用い、各カメラの背景部分にランダムパターンを設置して観測を行った。カメラは設置する前に、それぞれ単独でカラーキャリブレーションを行い、同じ色が各カメラで同じ色で写るように調整した。また、シルエット抽出に用いる閾値  $V_{th}$ ,  $U_{th}$  はいずれも 10 とした。

### 5.1 $N_{allow}$ を設定した視体積の再現性評価

対象物体に恐竜模型を用いて、いくつかの  $N_{allow}$  を設定した視体積を構築した。手動でシルエットを抽出した視体積を正解の形状として、それぞれ  $N_{allow}$  が設定された視体積に対して、正解との比較を行った。正解の視体積は 266702 ボクセルで表現された。 $N_{allow}$  を設定した視体積に含まれるボクセルのうち、正解の視体積には含まれないボクセル “stray voxels” とよぶ。逆に  $N_{allow}$  を設定した視体積に含まれないボクセルのうち、正解の視体積には含まれるボクセル “missing voxels” とよぶ。なお、この 2 種類のボクセルを合わせて “error voxels” とよぶ。それぞれのボクセル数とこれらの正解の視体積に対する割合を表 1 に示した。

表 1 から、stray voxels は  $N_{allow}$  が増えるに従って単調に増加し、missing voxels は単調に減少することがわかる。ランダムパターン背景を設置した環境下では、様々な拡散反射色を

表 1  $N_{allow}$  とボクセル数の推移

$N_{allow}$	Stray voxels	Missing voxels	Error voxels
0	8297 (3.1%)	153300 (57.5%)	161597 (60.6%)
1	12077 (4.5%)	115698 (43.4%)	127775 (47.9%)
2	30428 (11.4%)	57692 (21.6%)	88120 (33.0%)
3	35149 (13.2%)	54423 (20.4%)	89572 (33.6%)
4	52515 (19.7%)	41449 (15.5%)	93946 (35.2%)

持つ物体に対してほぼ同じ割合でシルエットが正しく得られることが期待できるので、error voxels の最も少なかった  $N_{allow}$  の値を用いて、 $N_{th}$  を 2 に設定してシルエット欠損修復手法を適用することとした。復帰判定領域として最適な領域を与える  $N_{th}$  の値は、実験に用いるカメラ台数に応じて設定する必要がある。

## 5.2 ランダムパターン背景環境下でのシルエット欠損修復

次に、5.1 節と同じ恐竜模型に対して提案したシルエット欠損修復手法を適用し、シルエットと復帰視体積の欠損が修復されているかを調べた。シルエット欠損修復を行った結果を図 8 に示す。

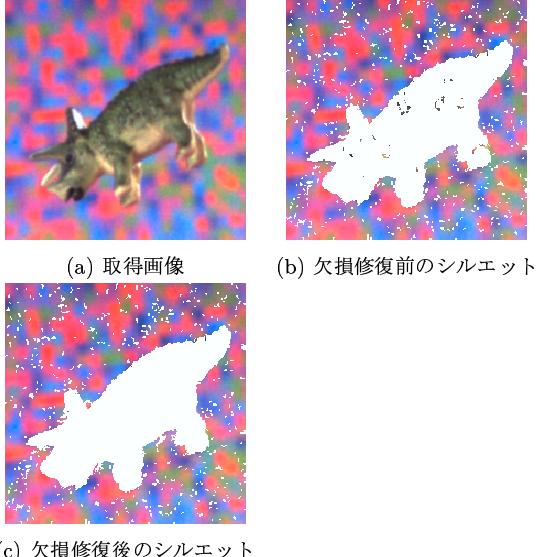


図 8 シルエット欠損修復

図 8(a) に示す取得画像に対して、YUV 表色系においてシルエット領域を求めるとき、図 8(b) の白色で示す領域が得られる。図 8(b) より、ランダムパターン背景を持つ環境下においては、物体がどのような色を持つような場合にもシルエット欠損が生じるが、一方で、一定以上の割合の領域で正しくシルエットが抽出され、大きな欠損は生じにくいといえる。また、こうして求められたシルエットに対して、4 節で述べたシルエット修復を行うと図 8(c) の白色で示す領域が得られ、物体の観測色と背景色の近さによる欠損が軽減されることが確認できた。

次に、修復されたシルエットを元に構築された視体積を図 9 に示す。図 9(a) は対象物体の写真であり、図 9(b) はすべてのカメラ画像について手動でシルエットを抽出したときに得られる正解の視体積である。図 9(c) は通常の視体積交差法で得られる視体積である。図 9(d) は  $N_{allow}$  を 2 に設定した視体積であ

り、図 9(e) は提案手法を適用して得られた視体積である。図 9 では、それぞれの視体積に対しマーチングキューブ法 [8] を適用し、表面のパッチを構成して表示している。表面の色は、得られた視体積において visibility を計算したときの visible なカメラから得られる平均色を与えている。

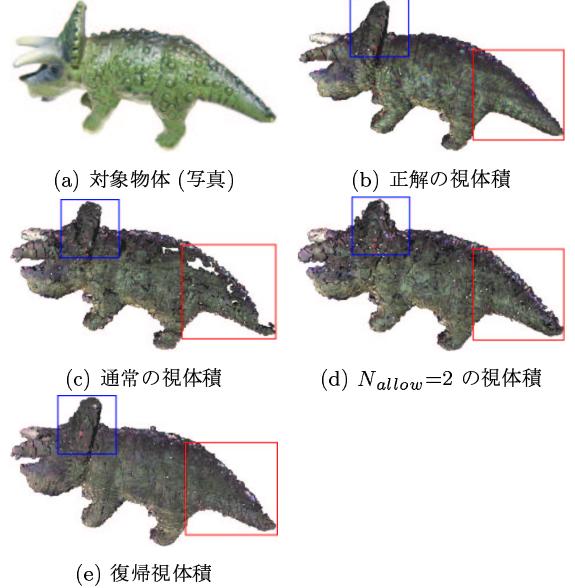


図 9 復帰視体積の構築

図 9(c) に示した通常の視体積では、赤い四角で囲んだ背中や尻尾の部分で大きな欠損を持つことがわかる。これに対し、図 9(d) の  $N_{allow}$  を 2 に設定した視体積や、図 9(e) の復帰視体積ではこの欠損が修復されている。また、復帰視体積では  $N_{allow}$  を 2 に設定した視体積と比べて、青い四角で囲んだたてがみの裏に確認される余分な領域が少ないことがわかる。

さらに、5.1 節と同様の数値評価を行った。結果を表 2 に示す。

表 2 誤差であるボクセル数の変化

	Stray voxels	Missing voxels	Error voxels
Normal VH	8297 (3.1%)	153300 (57.5%)	161597 (60.6%)
VH of $N_{allow} = 2$	30428 (11.4%)	57692 (21.6%)	88120 (33.0%)
Proposed VH	23273 (8.7%)	15766 (5.9%)	39039 (14.6%)

通常の視体積 (Normal VH) では、正解の視体積に対して 57.5% のボクセルが欠損した。 $N_{allow}$  を 2 に設定した視体積 (VH of  $N_{allow} = 2$ ) および復帰視体積 (Proposed VH) では、通常の視体積 (Normal VH) と比べて missing voxels が減少した。 $N_{allow}$  を 2 に設定した視体積では stray voxels が通常の視体積に比べ増加しているが、復帰視体積では  $N_{allow}$  を 2 に設定した視体積に比べるとあまり増加していない。error voxels についても、通常の視体積や  $N_{allow} = 2$  の視体積に比べて少なくなっている。

ここで、復帰視体積の missing voxels が  $N_{allow} = 2$  の視体積のそれよりは少なくなっていることに注目する。本研究で提

案したシルエット欠損提案手法では、 $N_{allow} = N_{th}$  に設定した視体積と通常の視体積の差分領域を復帰判定領域に選択し、ボクセルの復帰判定を行った。このときに、復帰すると決められた復帰判定ボクセルに対して、このボクセルを視体積に加えるのではなく、投影される画素をシルエットに含めるので、復帰判定領域外のボクセルが視体積に含まれることがある。よって、復帰視体積の missing voxels が  $N_{allow} = 2$  の視体積のそれよりは少なくなることがある。ただし一方で、同様の理由により stray voxels についても復帰判定領域外のボクセルが復帰されていることがあると考えられる。

### 5.3 多様な物体に対する手法の適用

未知の色を持つ物体を対象とする場合にも、提案手法が欠損の少ない復元形状を与えるかどうかを調べるために、さまざまな物体に対して手法の適用を行った。この結果を図 10 から図 13 までに示す。提案手法を適用することにより、いずれの物体に対しても通常の視体積に比べて欠損の少ない視体積が得られることが確かめられた。

## 6. まとめ

本研究では、視体積交差法を行う際に、シルエット欠損が復元形状である視体積を欠損させる問題を解決するために、まず、ランダムパターン背景を用い、様々な拡散反射色を持つ物体に対して、一定の割合以上の領域で正しくシルエットを得る手法を提案した。また、物体の同じ部分を複数のカメラが観測していることを利用して、ボクセルの拡散反射色を推定し、シルエット欠損修復を行う手法も提案した。具体的には、あるカメラでの背景色と、複数のカメラから得られるボクセルの拡散反射色の推定色とを比較し、これらが近いときには、その画素ではシルエット欠損が生じていると判定し、その画素をシルエットに含めた。

実験では、提案手法であるランダムパターン背景の設定とシルエット欠損修復の両方を行うことで、再現性の高い復元形状が得られることを確認した。さらに、様々な物体に対して提案手法を適用し、未知の色を持つ物体に対しても欠損の少ない視体積が得られることを示した。

今後の課題としては、推定される物体の拡散反射色を用いて動的に背景色を設定することを挙げる。背景領域に液晶ディスプレイを設置すれば、可変な背景を実現できる。背景領域には、物体の各領域に含まれないような色を設定することにより、シルエットの抽出精度がさらに向上することが期待できる。



(a) 対象物体 (写真) (b) 通常の視体積 (c) 復帰視体積

図 10 鹿



(a) 対象物体 (写真) (b) 通常の視体積 (c) 復帰視体積

図 11 象



(a) 対象物体 (写真) (b) 通常の視体積 (c) 復帰視体積

図 12 馬



(a) 対象物体 (写真) (b) 通常の視体積 (c) 復帰視体積

図 13 犬

## 文 献

- [1] W.N.Martin and J.K.Aggarwal, "Volumetric Description of Objects from Multiple Views," PAMI, Vol.5, No.2, pp.150-158, 1983.
- [2] Paul Debevec, Chris Tchou, Andreas Wenger, Andrew Gardener and Tim Hawkins, "A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing," Proc. SIGGRAPH2002, Vol.21, No.3, pp.547-556.
- [3] 松山 隆司, 和田 俊和, 波部 斎, 棚橋 和也, "照明変化に頑健な背景差分," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.10, pp.2201-2211, 2001.
- [4] Kentaro Toyama, John Krumm, Barry Brumitt and Brian Meyers, "Wallflower: Principles and Practice of Background Maintenance," Proc. ICCV, pp.255-261, 1999.
- [5] C. Hernández Esteban and F. Schmitt "Silhouette and Stereo Fusion for 3D Object Modeling," CVIU, Vol. 96, No. 3, pp. 367-392, 2004.
- [6] Dan Snow, Paul Viola and Ramin Zabih, "Exact Voxel Occupancy with Graph Cuts," Proc. CVPR, Vol.1, pp. 345-352, 2000.
- [7] 前川 佳徳, "コンピュータグラフィックス (新世代工学シリーズ)," オーム社.
- [8] William E. Lorensen and Harvey E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," Proc. SIGGRAPH '87, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
- [9] Jurriaan D. Mulder and Robert van Liere, "Fast Perception-Based Depth of Field Rendering," Proc. VRST2000, pp.129-133, 2000.
- [10] 久保田彰, 相澤清晴, "線形処理を用いた視差と焦点ぼけのレンダリングによる仮想カメラ画像の生成," MIRU2002, pp.II-31-36, 2002.