

修士論文

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修復手法

指導教員 美濃 導彦 教授

京都大学大学院情報学研究科
修士課程知能情報学専攻

豊浦 正広

平成17年2月10日

ランダムパターン背景を用いた視体積交差法のための シルエット修復手法

豊浦 正広

内容梗概

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。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の適用が困難な物体に対してもシルエットさえ得られれば形状復元が可能であり、対象に汎用な形状復元手法であるといえる。しかし、シルエット抽出を行う際に欠損が生じると、復元形状にも欠落が生じる問題がある。

シルエット欠損の主な原因は物体の観測色と背景色の近さによるものである。本研究では、物体の観測色と背景色の近さが原因で起こるシルエット欠損を修復する手法を提案する。

真のシルエットに含まれる画素ができるだけ多くシルエットに含まれ、かつ、復元形状に大きな欠損を生じないようにするために、ランダムパターン背景を用いる。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、様々な拡散反射色を持つ物体に対して、すべての領域で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。

ランダムパターン背景を用いても発生するシルエット欠損を、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修復する。シルエット欠損が生じていないカメラ画像より、視体積が欠損した領域の拡散反射色を推定する。推定される拡散反射色と背景色とを比較し、これらが近いときには、シルエット欠損が生じていると判定し、その領域が投影される画素をシルエットに含める。

ランダムパターン背景とシルエット修復手法とを合わせて用いることにより、様々な色を持つ物体に対して欠損の少ない視体積を得ることができる。

実験により、シルエットを手動で抽出した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された。また、多様な色を持つ物体に対して観測を行い、それぞれの物体に対して欠損の少ない復元形状が得られた。

Silhouette Refinement for the Volume Intersection Method with Random Pattern Background

Masahiro TOYOURA

Abstract

The volume intersection method reconstructs shapes of target objects from silhouettes with multiple cameras. With stereo vision, textureless objects are different to be handled. In case of laser range finders, laser absorbing materials can not be handled either. Compared with these two methods, the volume intersection method can reconstruct the shapes of objects as long as their silhouettes are extracted. It means that the method copes with more kinds of objects than the other methods do. But there occurs a problem when missing parts of silhouettes, some parts of shapes are missing.

The missing parts of silhouettes occur mainly when objects' color and background's color are similar. We propose a method for silhouette refinement to reconstruct more accurate shapes.

Missing parts of silhouettes should be limited enough to refine them properly. Random pattern background, which has small regions filled with random colors, can help with it.

Missing parts of silhouettes which are limited can be refined by using multiple cameras around a target object. In certain voxels of interest in the 3D object, corresponding pixels are in silhouettes for some cameras, while they are out of silhouettes for the other cameras. Diffuse reflection colors of the voxels are estimated from the cameras that have corresponding pixels in silhouettes. When this color and background's color for the voxels are similar, the cameras tend to miss the corresponding parts of silhouettes. In this case, the corresponding pixels should be included in the silhouettes for those cameras.

Using the random pattern background and the silhouette refinement together, accurate shapes of objects with various colors are obtained.

In our experiment, proper silhouette refinement was confirmed by comparison between a reconstructed shape and a shape from manually extracted silhouettes. The experimental results show the method is capable of refinement silhouette for objects with various colors.

ランダムパターン背景を用いた視体積交差法のための シルエット修復手法

目次

第 1 章 はじめに	1
第 2 章 視体積交差法におけるシルエット欠損	3
2.1 視体積交差法	3
2.2 シルエット抽出	3
2.3 シルエット欠損の原因	7
2.4 シルエット欠損の視体積への影響	8
2.5 視体積交差法におけるシルエット欠損の修復	10
第 3 章 ランダムパターン背景	14
3.1 ランダムパターン背景の利用	14
3.2 シルエット欠損の割合	16
3.3 ランダムパターン背景の設置	19
第 4 章 拡散反射色推定によるシルエット修復	22
4.1 シルエット修復手法の概要	22
4.2 復帰判定領域の決定	24
4.3 シルエット欠損の検出と修復	27
4.4 復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定	28
4.4.1 visibility の計算	28
4.4.2 拡散反射色の推定	30
4.4.3 拡散反射色推定が正しく推定できない場合	31
4.5 シルエット欠損修復手法のまとめ	35
4.6 単一色背景を持つ環境下での適用可能性	36
第 5 章 実験	38
5.1 実験環境	38
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	38
5.3 単一色背景環境下でのシルエット修復	41
5.4 多様な物体に対する手法の適用	44

第6章　まとめ	52
謝辞	54
参考文献	55

第1章 はじめに

視体積交差法は、複数のカメラで形状復元の対象となる物体を観測して、得られるシルエットから物体の形状を復元する手法である。視体積交差法で得られる復元形状は視体積とよばれ、本研究では、微小領域での物体の存在を表すボクセルの集合を用いてこれを表現する。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、博物学のように多様な色の物体を対象とする場合に用いる形状復元手法として大変優れている。

しかし、視体積交差法ではシルエット抽出を行う際にシルエットに欠損が生じると、視体積にも欠損が生じるという問題がある。シルエットとは画像上の物体の存在領域を表す領域のことであり、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で求められる。シルエット欠損は、物体表面での鏡面反射やカメラノイズが観測するために起こることもあるが、鏡面反射やカメラノイズによるシルエット欠損は大きな領域を持つことは少なく、多くの場合には物体の拡散反射色が背景色と近いために起こる。視体積に欠損が生じると、物体形状の復元精度を損ねることになる。特に博物学的価値のある物体を対象とするときには、美観の保存や形状の解析を行うために高精度な復元形状が求められるため、この復元精度の低下は大きな問題となる。

従来、画像のみを用いてシルエット抽出を行うよりもロバストな抽出を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も行われている。しかしこの手法では、画像のみを用いてシルエット抽出を行うよりも、装置が大きくなりやすくなる。特に、多くの台数のカメラを用いて行うときには実現が困難であり、本研究で扱う視体積交差法を基にした形状復元手法を用いることは難しい。

また、形状復元の対象となる物体に仮定を置いてシルエット欠損を抑える手法も提案されている。このときの仮定には、物体の形状的連続性や大きな色変化をしないなどということが用いられる。しかし、多様な形状や色の物体を対象とする場合にはこれらの仮定は成り立たないことがあり、この場合には誤ったシルエットが抽出されることがある。

そこで本研究では、視体積交差法を用いた形状復元を行う際にシルエット欠損を修復し、欠損の少ない視体積を得ることを目指す。これにより、高精度な復元形状の手法を提案する。

シルエット欠損を軽減するために、ランダムパターン背景を用いる。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。従来手法では、物体色に前提を置いてシルエット抽出を正確に行うことが多かった。この手法では、物体色は青や緑の拡散反射色を持たないとして、青や緑の単一色背景を用いる。しかし、多様な色を持つ物体の形状を復元することを考えると、青や緑の拡散反射色を形状復元の対象となる物体が持たないことを想定することはできず、正しい視体積を得ることができない場合が存在する。これに対して、本研究で提案するランダムパターン背景を用いると、様々な拡散反射色を持つ物体に対して、すべての領域で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。

ランダムパターン背景を用いても残るシルエット欠損を、複数のカメラが同じ対象物体を観測していることを利用して修復する。シルエット欠損が生じていないカメラ画像より、視体積外部の各ボクセルの拡散反射色を推定する。あるカメラでの背景色に対し、別のカメラから得られるボクセルの拡散反射色とを比較し、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る。これにより、拡散反射色と背景色の近さによるシルエット欠損を修復する。シルエット欠損の修復が行われると、シルエットを基に復元される視体積も修復される。ランダムパターン背景とシルエット修復手法とを合わせて用いることにより、あらゆる色を持つ物体に対して欠損の少ない視体積を得ることができる。

2章では視体積交差法の原理を説明し、予備実験によりシルエット欠損の原因とそれが視体積に与える影響を明らかにする。3章ではランダムパターン背景の生成方法について説明し、ランダムパターン背景を設定するときのシルエット欠損の割合について論じる。4章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章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。

第2章 視体積交差法におけるシルエット欠損

本節では視体積交差法の原理の説明と、シルエット欠損による復元形状への影響についての考察を述べる。

2.1 視体積交差法

視体積交差法では、複数台のカメラで形状復元対象となる物体を観測して、得られた画像から、物体形状を視体積として復元する。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。

視体積交差法を行う様子を図1に示す。 n 台のカメラの中の*i*番目のカメラ C_i ($i = 1, \dots, n$)の観測範囲に物体 O が存在するとき、物体 O は C_i の取得画像上に投影され、その投影像は C_i の画像上のシルエット R_i として得られる。

このことから、シルエット R_i が得られたとき、 O は C_i のレンズ中心を端点とし、 R_i 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_i における“視錐体”と呼び、 V_i で表す。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、これを“視体積”と呼ぶ。

$$V = \bigcap_{i=1}^n V_i \quad (1)$$

2.2 シルエット抽出

カメラノイズの生起や、物体色と背景色が近いことなどにより、シルエットは欠損することがある。シルエット欠損について議論するために、本節では、シルエットの抽出過程について説明する。

シルエット抽出では、取得画像と背景画像を一度YUV表色系やHSV表色系に変換した上で、それらの差分を計算し差分値の大きな領域をシルエットとする処理を行う。RGB表色系で計算される差分画像よりも、YUV表色系やHSV表色系に変換して差分画像を求めるほうが精度よくシルエットを抽出できるといわれている[1]。本研究では、YUV表色系でのシルエット抽出を採用する。Y,U,Vはそれぞれ輝度、輝度信号と赤色成分の差、輝度信号と青色成分の差を表す。

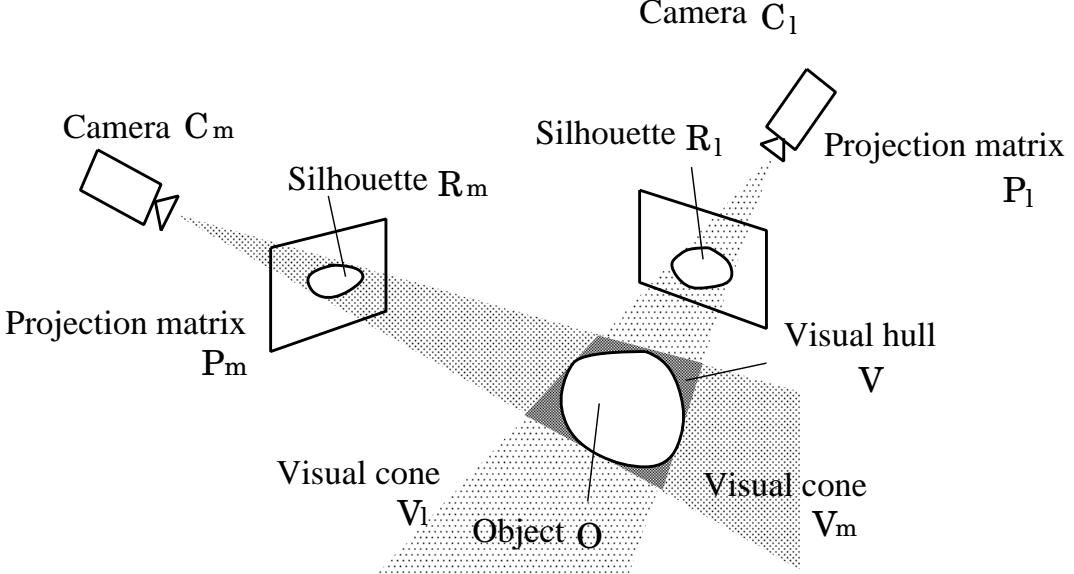


図 1: 視体積交差法

物体の形状や色の復元を行うために、照明環境が調整された環境では、物体の観測色と背景の観測色の輝度値の差分は大きくならない。これは、観測環境の内部全体に対して照明ができるだけ均一にあたるように設計されているためである。よって、本研究では Y の差分値をシルエット抽出のために用いず、 U と V の差分値が大きい領域をシルエットとして求める。

カメラからの信号が RGB 表色系で得られている場合を考える。RGB 表色系から YUV 表色系への変換式は多く存在するが、本研究ではそのうちの 1 つの変換式を用いて Y,U,V の値を求める。R,G,B がそれぞれ [0, 255] の範囲の値を持つときに、 Y,U,V の値はそれぞれ以下の式で求められる。また、このときの Y,U,V のとりうる値の範囲を図 2 に示す。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$U = -0.169R - 0.331G + 0.500B$$

$$V = 0.500R - 0.419G - 0.081B$$

Y,U,V のとりうる値の範囲は、図 2 に示すとおり、六面体の内部の領域となり、 Y,U,V はそれぞれ [0, 255] の範囲の値をとるようになる。以降、取得画像は

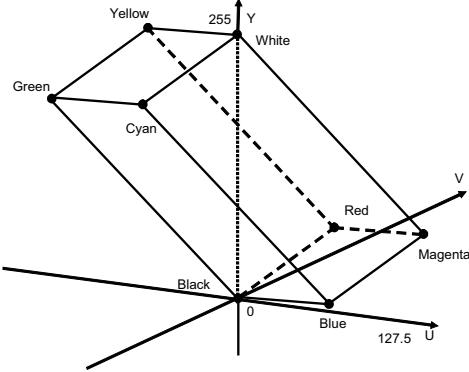


図 2: Y,U,V のと取りうる値の範囲

YUV 表色系に変換されているものとして議論を進める.

シルエット R_m は、カメラ C_m で得られる取得画像 I_m の画素 (x, y) での画素値 $f_{m,Y}(x, y)$, $f_{m,U}(x, y)$, $f_{m,V}(x, y)$ と背景画像の画素値 $b_{m,Y}(x, y)$, $b_{m,U}(x, y)$, $b_{m,V}(x, y)$ により、以下の式で与えられる.

$$R_m = \{(x, y) \mid |f_{m,U}(x, y) - b_{m,U}(x, y)| > U_{th} \text{ または } |f_{m,V}(x, y) - b_{m,V}(x, y)| > V_{th}\} \quad (2)$$

ただし、 U_{th} , V_{th} は手動で設定する背景差分の閾値である.

ここで、シルエット抽出のときに得られる各領域に定義を与える。図 3 に示すようにシルエット抽出を考えるとき、実環境下で得られるシルエットのほかに、理想環境下で得られるシルエットを考えることができる。理想環境下で得られるシルエットは、物体が投影される領域と完全に一致する領域を与える(図 3(a))。このときの得られるシルエットを“真のシルエット”とよび、“真のシルエット”の補集合となる領域を“真の非シルエット”とよぶことにする。また、実環境下で得られるシルエットに対して、この補集合を与える領域を“非シルエット”とよぶ((図 3(b)))。

シルエット抽出の後処理として、面積の小さなシルエット領域を除去することが行われることが多い。これは、カメラノイズにより誤抽出されるシルエットが、面積の小さな孤立点となりやすいことを利用した処理である。この処理により真のシルエット以外の領域の一部はシルエットとして抽出されなくなるので、処理後のシルエットからは余分な領域の少ない視体積を得ることができ

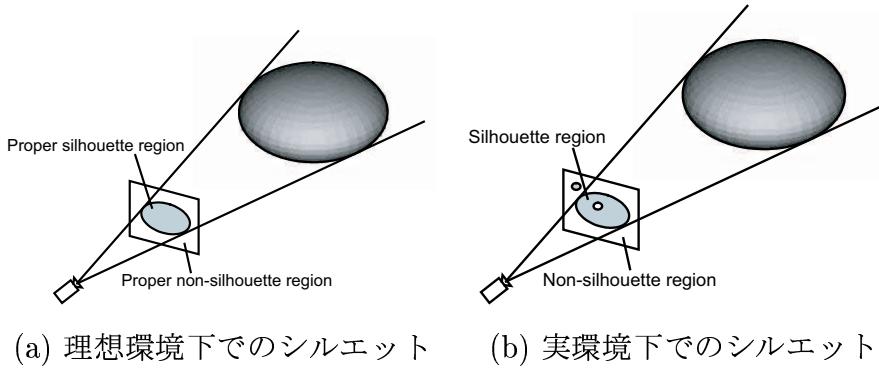


図 3: 領域の名称

る。この処理のためには、形状復元の対象としている物体が、すべてのカメラで、ある面積以下の小さな孤立点としては投影されないことが前提となる。本研究で扱う物体では、細長い物体を観測する画像のうち、物体の先端にあたる領域で小さな孤立点として真のシルエットの要素が得られることがある。よって本研究では、シルエット抽出後の処理として、面積の小さなシルエット領域を除去しない。

また、カメラノイズによってシルエット欠損が生じる場合があるが、その面積が小さいからといって、その非シルエット領域をシルエットに含めることは正しくない。面積の小さな非シルエット領域については、真のシルエットが得られるときにもこれが生じる可能性がある。図 4 に示すシルエットがこの例である。

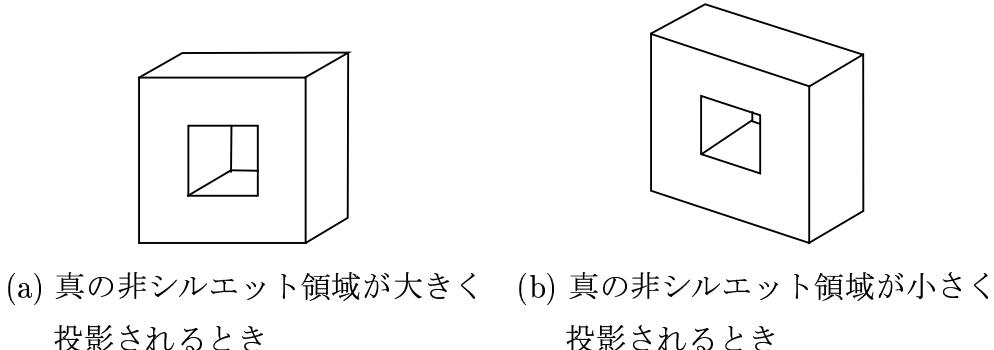


図 4: 面積の小さい真の非シルエット領域

図 4(a) では、シルエットの内側に大きな面積を持つ非シルエット領域が観測

されるが、物体の観測方向を変えた図4(b)では、小さな面積しか持たない非シルエット領域が観測される。このことから、面積の小さな非シルエット領域は、ノイズによる欠損であるとは断定できず、シルエットに含めることはできない。よって本研究では、面積の小さな非シルエット領域をシルエットに含める処理も行わない。

2.3 シルエット欠損の原因

本節では、物体の観測色がどのようにして生じるかを述べ、シルエット欠損の原因について説明する。

はじめに、拡散反射と鏡面反射について説明する。光を物体表面に照射したときの拡散反射は、その物体表面を観測できる全方向に一様な大きさで反射する。このときの反射光を拡散反射光とよぶ。

一方、鏡や磨かれた金属の表面などで起こる決まった方向への反射が鏡面反射である。面の法線ベクトルに対する光の入射方向と反射方向が等しくなるような全反射方向に対して強い反射が生じる。このときの反射光を鏡面反射光とよぶ。

拡散反射と鏡面反射を図5(a), (b)にそれぞれ示す。物体の観測色は、拡散反射光および鏡面反射光の色である。

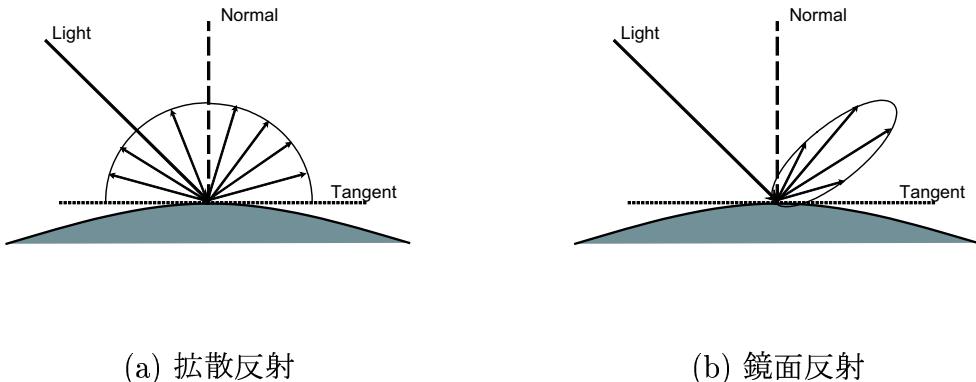


図5: 拡散反射と鏡面反射

次に、物体の観測色と背景色の近さによってシルエット欠損が生じることを

説明する。物体の観測色と背景色が同じ色を近いときには、取得画像と背景画像の画素値の差分は小さくなり、真のシルエットがシルエットとして抽出されない。たとえば、青色の背景を用いてシルエット抽出を行うときに、青色の拡散反射色を持つ部分が物体に含まれていると、取得画像と背景画像の差分値は小さくなり、シルエットは欠損する。よって、青色の背景を用いてシルエット抽出を行うときには、対象物体が青色を含まないことが前提となる。

博物学のように多様な色の物体を対象とする場合を考えると、対象物体の色を想定しておくことは適切ではなく、様々な色を持つ物体の形状を復元しようとすると、正しい復元形状が得られないことが起こる。また、たとえ物体に青色の拡散反射色を持つ部分が含まれていなくとも、背景に現れる陰影領域と物体上に現れる陰影領域がちょうど重なる場合には、シルエットは欠損する。従来から行われている陰影に対する対応としては、背景画像の中に陰影が映りこまないようにすることが、視点方向が限られているバーチャルスタジオなどで行われている。しかし、形状復元を目的として、マルチカメラを用いて対象物体を全方向から観測するような場合には、従来から行われているような対応は行いにくい。特に、再現性の高い視体積を得るために、多くの台数のカメラを用いて視体積交差法を行う際には、このような対応を行うことは不可能である。

物体の観測色と背景色の近さが原因で、シルエット欠損が生じている例を図6に示す。図6(a), (b)にそれぞれ示す背景画像と取得画像から、差分画像を求める。図6(c)は、取得画像の上にシルエットと判定された領域を重ねて表示した。図6に示すように、対象物体に用いた恐竜模型の顔の部分の色が背景色と近い値として投影されたために正しくシルエットとして判定されなかった。また、背景の青色の布で反射したものと見られる間接光の鏡面反射によって発生する青色のハイライトが背の部分で観測され、物体の観測色が背景色と近くなりシルエットの欠損が生じた。

2.4 シルエット欠損の視体積への影響

視体積交差法では、カメラノイズの生起や、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で表現するために、1台のカメラのシルエット欠損による影響は、視錐体を統合したものである視体積に及び、視体積が欠損する。また、一度欠損してしまった



(a) 背景画像

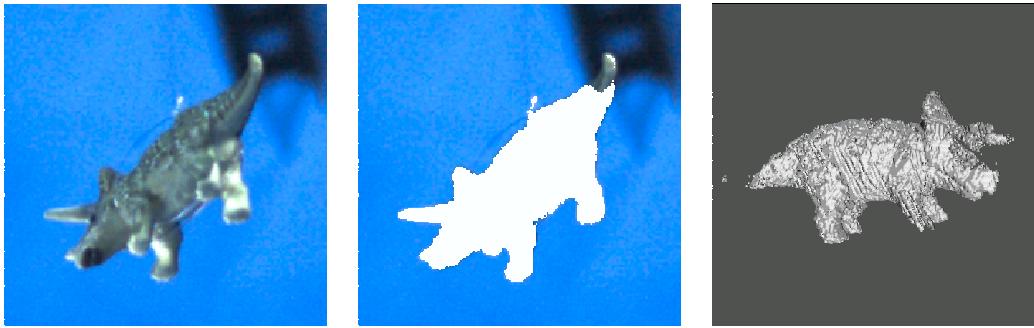
(b) 取得画像

(c) シルエット領域

図 6: 物体の観測色と背景色が近いときのシルエット欠損

領域はカメラ台数をいくら増やしても再び視体積に含まれることはない。

図 7 にシルエット欠損による視体積の欠損の例を示す。



(a) 取得画像

(b) シルエット

(c) 視体積

図 7: シルエット欠損による視体積の欠損

図 7(a) の取得画像に対して、背景画像との差分を取ることで図 7(b) の白色で示すようなシルエットが抽出されている。このときに、恐竜模型の尻尾の部分の画素は、背景画像の画素と似た値を持っているために、差分が検出されずにシルエットに含まれていない。この結果、復元された視体積も尻尾の部分が欠損している。

図 7 のように 1 台のカメラのシルエット欠損が視体積に影響を与えることがあるために、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 [4]。

以降、 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

る復元形状であるので、広義の視体積であるとみなして、単に視体積とよぶことにする。

N_{allow} を 0,1,2 に設定した視体積をそれぞれ図 8(a), (b), (c) に示す。図 8(a) は通常の視体積交差法で得られる視体積である。図 8(d), (e), (f) は、図 8(a), (b), (c) の一部を拡大したものである。

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。恐竜の尻尾では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 1 以上に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。このことから、 N_{allow} を設定する手法以外にシルエットの欠損自体を修正する手法が望まれる。

視体積交差法では、カメラ台数を増やせば増やすほど、原理的には真の物体領域以外の余分な領域が減少し、視体積の精度は向上する。しかし、カメラ台数を増やせば増やすほど、シルエット欠損が生じる領域は増え、視体積が欠損するために、復元形状の精度はかえって悪くなることが起こりうる。

2.5 視体積交差法におけるシルエット欠損の修復

前節で、シルエット欠損が視体積の欠損を生じさせることを説明した。視体積交差法において、欠損のない視体積を得るためにシルエット欠損を修復することが必要になる。

シルエット欠損の問題に取り組む研究として、单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 [5] [6] がこれまでに行われてきた。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、また、形状が連続であると仮定することでロバストにシルエットを抽出するものであり、これらの仮定が当てはまらない物体の形状復元を行う必要がある際には適切に動作しない。

また、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 [4] [7] もなされている。これらの研究では、視体積構築の際にシルエットとの整合性と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。これらの研究でも、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

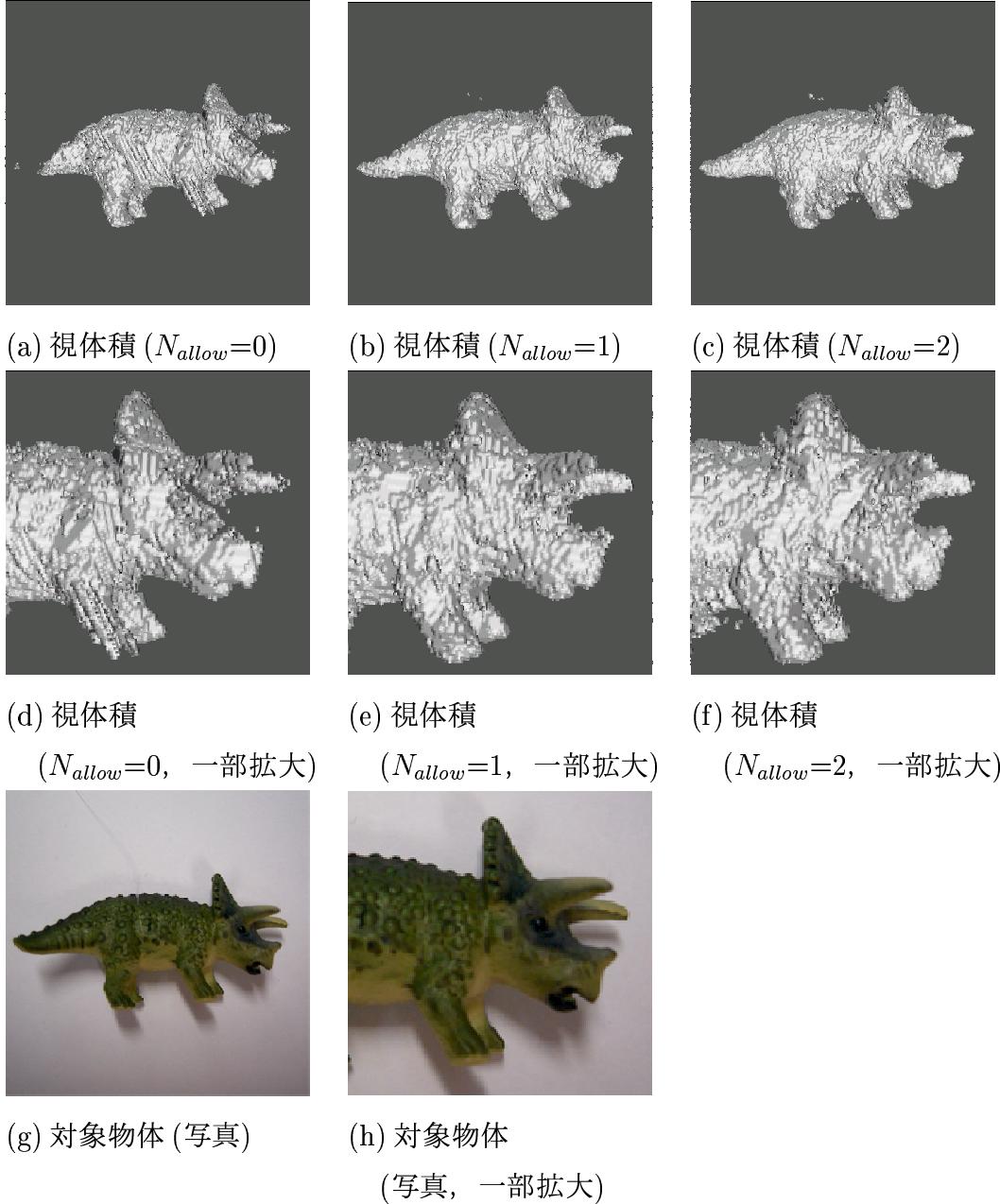


図 8: 視体積要素の欠損

起こらない場合のみに有効な手法となっている。

2.4 節で紹介した N_{allow} を設定して視体積を求める手法も、シルエット欠損による視体積の欠損を軽減する手法であるといえる。しかし、 N_{allow} を設定して視体積を求める手法は、余分な領域が視体積に含まれるといふ欠点があること

は確認した.

これらの研究に対し本研究では、シルエット修復のために、一定台数以上のカメラを用いて視体積交差法を行うときには、複数のカメラが物体の同じ部分を観測していることを利用する。カメラ台数が多くなるほど、シルエット欠損による視体積欠損が生じる可能性は大きくなる。しかし、その一方で、カメラ台数が多くなるほど複数のカメラが物体の同じ部分を観測している状況は起こりやすくなり、シルエット欠損を修復できる可能性も増える。

物体の同じ部分を複数のカメラが観測する場合に、その部分の拡散反射色が各カメラで同じ色として観測される。あるカメラでのシルエット欠損は、他のカメラで物体を観測している情報から修復が行える。シルエットが欠損する物体のある部分に対して、他のカメラで同じ部分が観測されている画素での拡散反射色を知ることができれば、注目している部分の拡散反射色を推定できる。このときさらに、シルエット欠損が生じているカメラにおける背景色と拡散反射色とを比較することで、欠損の起こりやすさを知ることができる。よって、シルエット欠損が起こりやすいと判定された画像上の領域をシルエットに加えることで、シルエット欠損の影響を少なくすることができます。

ただし、鏡面反射色については、見る方向により強度が変わるので、マルチカメラの情報からこの色を推定することはできない。よって本研究では、拡散反射光のみを考え、シルエット欠損を修復する。詳細については、4章で説明する。

ここで問題となるのが、あるカメラでシルエットの欠損が起こっている物体上のある部分に対して、他のカメラでシルエットが正しく得られるかということである。他のカメラでシルエットが正しく得られる場合には、注目している部分の拡散反射色が正しく推定できる。単一色背景を用いた環境下で得られた2.3節図6のシルエットについて考えると、シルエット欠損のうち、対象物体上で青く観測される部分についてはマルチカメラの情報を用いるシルエット修復が行いにくい。なぜなら、拡散反射はどの方向から見ても同じ色に観測される反射であるために、あるカメラでの拡散反射色が背景色と近いときには、他の多くカメラでも拡散反射色が背景色と近く、その部分が投影される領域がシルエットにも含まれないことが考えられるためである。このときには、マルチカメラの情報を用いたとしても、欠損したシルエット領域と真の非シルエット領域との区別がつきにくい。マルチカメラの情報を用いてシルエット修復をすること

を考えると、ある部分がそれぞれのカメラに投影される領域が、できるだけ多くのカメラでシルエットとして抽出されていることが望まれる。このためには、ある部分が投影される画像上の領域に対して、それぞれのカメラで異なる背景色を設定することができればよい。

また、物体領域に対する欠損部分について、その領域は本来物体領域であるはずの領域と仮定して、拡散反射色を推定してシルエットの修復を行う。このときに、欠損修復の対象となる視体積がある程度正しい形状を復元しておらず、視体積に大きな欠損が生じる場合には、拡散反射色の推定が誤ることが考えられる。この拡散反射色を基に修復されるシルエットも、やはり誤って修復されることが起こる。よって、正しいシルエット修復のためには、視体積の各領域である程度の正しい形状が復元されていることが必要であり、大きく欠損した領域が生じることは望ましくない。3章ではこれを実現するためのランダムパターン背景の設定を提案する。

第3章 ランダムパターン背景

本章では、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、真のシルエット領域に含まれる画素ができるだけ多くシルエットに含まれ、かつ、視体積に大きな欠損を生じないようにする手法を提案する。

3.1 ランダムパターン背景の利用

2.5節で单一色背景を用いる観測において、観測される物体の拡散反射色が背景色と近く、シルエット欠損が生じるカメラがあると、他のカメラでもシルエット欠損が起こることを述べた。できるだけ多くのカメラでシルエット欠損が生じないようにするためにには、物体の各部分に対して、カメラごとに違う背景色を持てばよい。

ステレオ視などを用いて物体形状を復元する場合には、背景で対応点が得られないようにするために、背景の各領域で観測される色が異なるように設定されることが行われる。この手法は、シルエット抽出のための手法ではなく、扱っている問題が異なるといえる。

従来の单一色背景を用いるシルエット抽出では、物体は背景以外の色しか持たないことを仮定している。たとえば、バーチャルスタジオでは、人の領域抽出を行うために、肌色の補色にあたる青色を背景に設定することで、人の領域については背景差分値が大きくなり、シルエット抽出が行いやすいようになっている。

しかし、博物学のように多様な色の物体を対象とする場合を考えたときに、物体の拡散反射色を想定しておくことはできず、单一色背景を用いると、物体の拡散反射色が背景色に近くなるときには全くシルエットを得られない。青色以外の物体のシルエットを抽出できるように、青色とは別の緑色の单一色背景の環境を、青色背景の環境とは別に作れば、青色物体のシルエット抽出は可能になる。しかし、青色と緑色が同時に含まれるような物体に対しては、どちらの環境を使ってもシルエットを抽出することができず、形状復元は行えない。物体の色に合わせて、いくつもの背景色の環境を設定しても、この問題は解決されない。いくつもの色を合わせ持つような物体が存在するためである。

また、物体の各部分に対して、カメラごとに違う背景色を設定する方法とし

て、カメラごとに異なる単一色の背景を設定する方法が考えられる。しかしこのときには、拡散反射色の推定ができず、シルエット欠損の修復を行うことができない問題が起こる。なぜなら、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。特に、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。視体積交差法では、すべてのカメラに対し、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。よって、単一色しか持たない物体に対して、各カメラごとに単一色の背景を設定した環境でシルエット抽出すると、物体の拡散反射色と背景色が近くなるカメラでは全くシルエットが得られず、視体積として何も得られないことがある。そのため、物体の各部分の拡散反射色を推定することができず、シルエット欠損の修復は不可能となる。

以上のことを見て、各領域が別々の色を持つようなパターンを用意し、図9のように各カメラの背景として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。2.2節で説明したように、シルエット抽出にYUV表色系のUとVの値を用いることから、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。UとVの値によっては、図2に示したようにYのとりうる値の範囲に制限がある。Yの値はシルエット抽出に用いない。Yは照明環境に応じて、カメラで観測しうる値の範囲内で適当な値をとればよい。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、真のシルエットの一定割合以上の領域がシルエットとして判定されるようになる。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

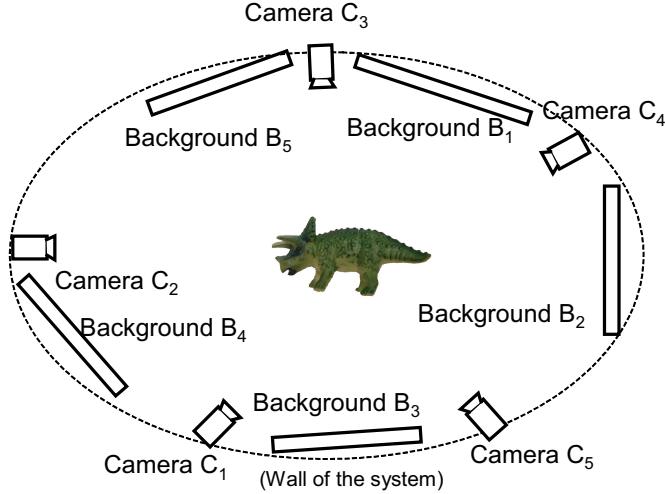


図 9: ランダムパターン背景の設定

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、従来の单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、真のシルエット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シルエット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できると期待できる。

ただし、従来の視体積交差法でランダムパターン背景を用いる場合には、視体積の欠損がかえって大きくなることも起こりうる。従来の視体積交差法では、真のシルエットに含まれるすべての画素が、シルエットに含まれなければならぬからである。よって、復元形状の欠損を抑える目的でランダムパターン背景を設置する際には、マルチカメラの情報を用いてのシルエット欠損の修復も行うことが不可欠である。

3.2 シルエット欠損の割合

ランダムパターンの背景を設定することで問題となるのは、あるボクセルが投影されるすべての取得画像で、観測される拡散反射色と対応する背景色が近くになり、そのボクセルが投影される画素が、すべてのカメラでシルエットに含

まれないことが起こることである。このときには、ボクセルの拡散反射色を与えるカメラがないことになり、マルチカメラの情報から拡散反射色が推定できない。よって、マルチカメラの情報によるシルエット欠損の修正を行うこともできない。

ボクセル a の拡散反射色が、すべての取得画像で対応する背景色と近いためにシルエットとして判定されない状況を図 10 に示す。図 10 では、 a を観測するカメラが 3 台である状況を考えている。

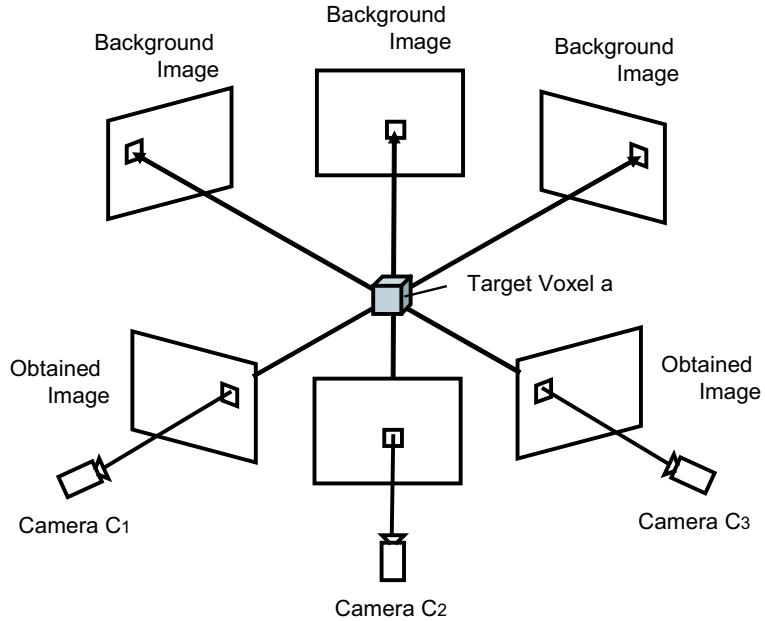


図 10: 背景色とシルエット領域

a の拡散反射色と対応する背景色とが近ければ、 a が投影される画素はシルエットと判定されない。 a が投影される画素の色が図 11 の \times 印で与えられるときに、UV 空間上でこの画素の色と同一であるとみなされる色の値の範囲は図 11 の四角形で示した範囲の内部である。六角形で示される範囲は、カメラから得られる画像信号が R,G,B であり、それぞれ $[0, 255]$ の範囲で得られるときの、U,V のとりうる値の範囲である。背景色に設定するランダムパターンの各領域が持つ色は、UV 空間で取りうる値の範囲に等確率に存在する。 a の背景色として、四角で示した範囲内の色が設定されているときには、 a が投影される画素はシルエットに含まれない。

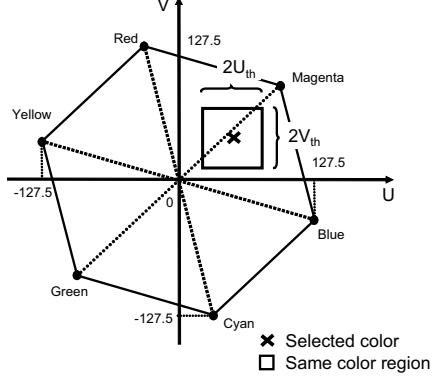


図 11: 同一色の値の範囲

すべてのカメラで, a が投影される画素が, 対応する背景色と同一と判定され, シルエット要素に含まれないと判断される確率を考える. このときに a の拡散反射色を観測するカメラがないことになり, a の拡散反射色の推定はできず, マルチカメラの情報を用いることによるシルエット欠損の修復もやはり不可能である. 同一であるとみなされる色の値の範囲は最大で $2U_{th} \times 2V_{th}$ の範囲となる. a が投影される画素が UV の取りうる値の範囲の境界近くにある場合には, 同一であるとみなされる色の値の範囲はこれより狭くなる. つまり, a が投影される画素が背景色と同一色である確率 p は, U,V の取りうる値の範囲を示す六角形の面積を S とすると,

$$p = \frac{4U_{th}V_{th}}{S} \quad (3)$$

以下となる. 図 11 に示すように, a を観測するカメラが 3 台であるときに, 3 台のすべてのカメラの画像でシルエットに含まれないと判断されないと判断される確率は p^3 以下である. つまり, a を観測することのできるカメラの台数を $N_{vis}(a)$ と表すと, この確率は $p^{N_{vis}(a)}$ 以下であるといえる. このときには, マルチカメラを用いたいかなる方法を用いても, a の拡散反射色を求めるることは不可能であり, a が投影される画素をシルエットに含めることも不可能である.

ここで, U,V の取りうる値の範囲を示す六角形の面積 S は 7673.3 であるので, たとえば, $N_{vis}(a) = 1, U_{th} = 10, V_{th} = 10$ のときには $p^{N_{vis}(a)} = 5.21\%$, $N_{vis}(a) = 3, U_{th} = 20, V_{th} = 20$ のときには $p^{N'_{vis}(a)} = 0.907\%$ となる. この値は U_{th} と V_{th} を変えることで調整することができる. U_{th} と V_{th} と大きく設定する

と、カメラノイズが生じたり鏡面反射が起こったりする場合にもシルエット抽出を正しく行うことができるが $p^{N_{vis}(a)}$ の値も大きくなる。逆に U_{th} と V_{th} と小さく設定すると、シルエット抽出がカメラノイズの影響を受けやすくなり、厳格なノイズ除去の設定が必要となるが、 $p^{N_{vis}(a)}$ の値は小さくなる。また、カメラ台数が $N_{vis}(a)$ が大きいと仮定できる場合には $p^{N_{vis}(a)}$ の値は小さくなる。

ここで、2.4節の図8で示した通常の視体積交差法において、得られる視体積に含まれるボクセルは265472ボクセルであった。これに対して、 $N_{allow} = 1$ として計算した視体積に含まれるボクセルは309424ボクセル(16.6%増加)、 $N_{allow} = 2$ として計算した視体積に含まれるボクセルは343754ボクセル(29.5%増加)であった。このことから、 $N_{vis}(a)$ 台のすべてのカメラで a が投影される画素がシルエットに含まれず、 a が視体積要素と判定されないようなボクセル a は、 $N_{allow} \neq 0$ の視体積と比較すると、ボクセル数という観点でほとんど無視できると考えられる。よって、ランダムパターン背景はシルエット修復を行わない場合でも、それほど大きな欠損を持たない視体積を与えるといえる。また、シルエットは一定以上の割合で正しく得られることから、シルエット修復を行うときに必要となる拡散反射色を推定するに足りうるだけの大きな欠損のない視体積が得られることが期待できる。

3.3 ランダムパターン背景の設置

理論的には前節に示したとおり、シルエット欠損の修復が行えない確率は、 $p^{N_{vis}(a)}$ となる。しかし、UとVのとりうる値の範囲は、カメラの観測色や背景パターンを生成するプリンタなど表現色の限界により、理論上よりも狭い範囲内でしか背景色を選択できないことがある。この結果、 $p^{N_{vis}(a)}$ は理論値よりも大きくなり、シルエット欠損の修復が行えない確率は大きくなることがある。

図12(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12(a)では、Yのもつ値が小さく背景色が暗すぎて、黒く観測される領域が出てきている。図12(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。本研究で用いる実験環境の照明は、対象物体に適度な強度でむらなくあたるように設定されている。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 p は理論値よりも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 12(b) である。図 12(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 12(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。

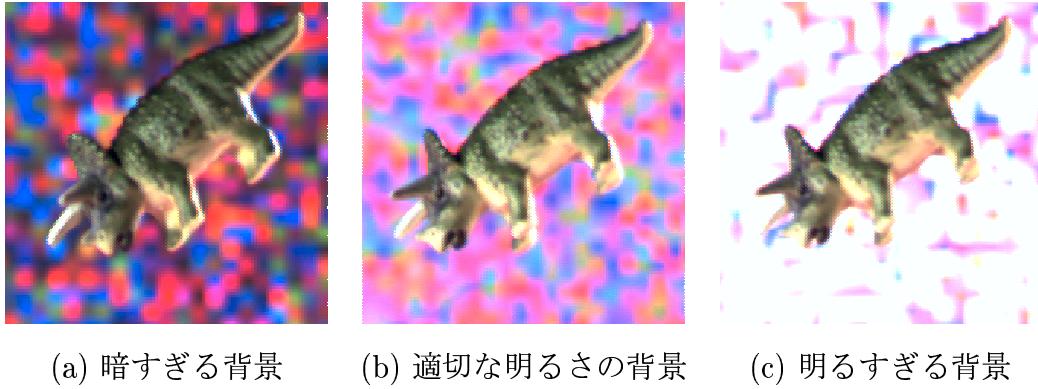


図 12: ランダムパターン背景の明るさ

また、焦点ぼけ [8] [9] 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。ぼけが起る領域では、隣接する領域との中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 13(a) に示す。一方、背景に用いる画像の各領域の大きさをあまり大きくしそぎると、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、マルチカメラの情報による拡散反射色の推定が行いにくくなる。各領域の大きさが小さすぎる背景を図 13(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 13(b) である。

実際にどの程度のシルエット欠損が確認され、復元形状にどの程度の影響を与えるかについては 5.2 節で検証する。

物体の観測色に影響を与える反射光のうち、鏡面反射光に対してはマルチカメラによる色の推定が行えず、観測される物体色と背景色との近さによるシル



(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 13: ランダムパターン背景の領域の大きさ

エット修正ができないことを先に述べた。しかし、どのような色を持つ光の鏡面反射に対しても、鏡面反射が観測される画素は $1 - p^{N_{vis}(a)}$ の確率でシルエットに含まれることがいえる。周囲を青色の壁で覆い、背景色も青色であるような環境では間接光の鏡面反射光も青色に観測されることが多く、その結果、シルエット欠損が起こることがあった。これに対し、ランダムパターンを背景に設定するときには、鏡面反射が観測される画素は $1 - p^{N_{vis}(a)}$ の確率でシルエット含められる。つまり、ランダムパターンを背景に設定することにより鏡面反射光によるシルエット欠損も抑えられるといえる。

また、青色の壁に覆われた空間の中で物体を観測すると、間接光として光源色に青い色が重畳された光が生じ、物体表面でこの間接光が観測されることがある。これに対しランダムパターン背景では、周囲の壁の色を单一色で覆わないので、任意の光源環境下での物体の色を観測することができる。

第4章 拡散反射色推定によるシルエット修復

本章では、マルチカメラで得られた画像からボクセルの拡散反射色を推定し、得られた拡散反射色とそれに対応する背景色との比較からシルエット欠損の起こっている画素を検出し、シルエットを修復する手法について説明する。

4.1 シルエット修復手法の概要

物体の同じ部分を複数のカメラが観測する場合に、その部分の拡散反射色が各カメラで同じ色として観測される。あるカメラでのシルエット欠損は、他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れば、背景色と拡散反射色とを比較することで、欠損の起こりやすさを知ることができるため、欠損を検出することが可能である。シルエット欠損が起こりやすいと判定された画像上の領域をシルエットに加えることで、シルエット欠損の影響を少なくすることができる。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。

まずははじめに、シルエット欠損修復手法の概要について説明する。シルエット修復手法は図14に示すように、大きく4つの段階に分かれる。

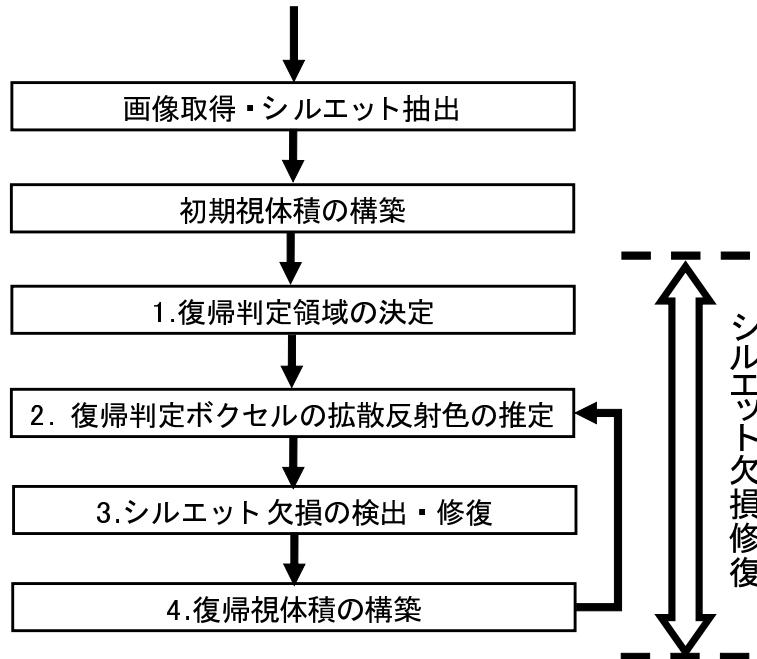


図14: シルエット修復の4つの段階

“画像取得・シルエット抽出”および“初期視体積の構築”は2章で説明した通常の視体積交差法の手順である。提案手法によって欠損が徐々に修復される視体積を復帰視体積と定義し、最初の復帰視体積を初期視体積とする。

“1. 復帰判定領域の決定”では、欠損の生じている恐れのあるボクセルが含まれる領域を復帰判定領域に決定する。ここで、ボクセルが欠損領域に含まれるボクセルであるかどうかを判定することを“復帰”判定とよび、復帰判定を行うボクセルを復帰判定ボクセルとよぶ。復帰判定ボクセルは復帰判定領域の要素である。

手順2. に渡される復帰判定ボクセルの集合は、復帰判定領域の中から順に選択される。復帰判定ボクセルとして観測領域に含まれるすべてのボクセルとすることもできるが、できるだけ欠損の生じている恐れのある領域に含まれるボクセルのみを判定することが望ましい。復帰判定領域の決定と、手順2. に渡される復帰判定ボクセルの集合の選択を4.2節で説明する。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。

“2. 復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定”では、復帰判定ボクセルを観測しているカメラを用いて、復帰判定ボクセルの拡散反射色を推定する。

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ときには、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、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、このカメラからボクセルはvisibleであるといい、この判定のことをvisibilityの判定とよぶ。

本来、真の視体積に含まれないボクセルを視体積に含まれるとして拡散反射色を推定するときには、誤ったシルエット欠損修復が行われることがある。4.4節でボクセルの拡散反射色の推定方法について説明し、誤ったシルエット欠損が起こっていることを検出する手法についても提案する。

“3. シルエット欠損の検出と修復”では、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との比較をすることで、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。推定されたボクセルの拡散反射色に対して、近い色の背景色を持つカメラではシルエット欠損が起りやすいと判定する。4.3節でこの手法を説明する。

“4. 復帰視体積の再構築”では、欠損が修復されたシルエットから、本手法に

おける復元形状である復帰視体積を構築する。新しい復帰視体積を構築した上で手順 2. に戻り、新しい復帰判定ボクセルの集合が与えられる。これを繰り返すことで、復帰判定領域に含まれるボクセルが順に復帰判定されていく。毎回のループで復帰視体積を再構築するのは、拡散反射色が正しく求められるようするためである。できるだけ完全な視体積を構築することは、拡散反射色を推定する上で必要となる visibility の判定の精度を高めることになる。

4.2 復帰判定領域の決定

初期視体積に含ま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る。ただし、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、真の視体積を包含して、かつ、できるだけ余分な領域を含まないような領域を求めて、これと初期視体積の差分領域を復帰判定領域とすることが本節での目標である。

この目標に対し本研究では、復帰判定領域として $N_{allow} = N_{th}$ ($N_{th} \geq 1$) に設定した視体積と初期視体積の差分領域を選ぶことで対処する。 $N_{allow} = N_{th}$ ($N_{th} \geq 1$) に設定した視体積は、2.4 節で説明したとおり、視体積の欠損をある程度修復した視体積を得ることができる。ただし、真の視体積に含まれない余分な領域を含んでいることがある。この領域は、真の視体積を包含してできるだけ余分な領域を含まないような領域に近いといえる。

N_{th} を大きくするとき、 $N_{allow} = N_{th}$ に設定した視体積は、真の視体積からの欠損領域が小さくなるが、余分な領域も増える。逆に N_{th} を小さくすると、真の視体積からの欠損領域は増えるものの、余分な領域はあまり増えない。 N_{th} は物体を観測するカメラ台数や発生するカメラノイズを考慮に入れ、手動で設定する。本研究では、 $N_{allow} = N_{th}$ に設定した視体積と初期視体積の差分領域に含まれるボクセルのうち、ボクセルの拡散反射色と、そのボクセルが投影される画素での背景色が近いようなものを検出し、復帰視体積に加える。余分な領域については、この過程で復帰されない可能性が残るが、 $N_{allow} = N_{th}$ に設定した視体積にも含まれない欠損領域については、本手法では復帰されることはない。よって、多少余分な領域が含まれていても、欠損ができるだけ少ないような N_{th} を選ぶ必要がある。

$N_{allow} = N_{th}$ としたときに、復帰判定領域に含まれず欠損が修復されないボ

クセルの生起確率を考える。真の視体積に含まれるボクセル e が、シルエット欠損により $N_{allow} = N_{th}$ に設定した視体積に含まれない確率 p' は、 e が投影される画素に対応する背景画像の画素値が、 e の拡散反射色と近くなる場合を考へることで求められる。 e の拡散反射色の U と V の値が決まると、式(4)により背景色がこの色に近くなる確率が求められる。これに対し、 e を真に visible であるカメラ台数を $N'_{vis}(e)$ とするとき、 p' は以下の式で表される。

$$p' = 1 - \sum_{k=0}^{N_{th}} {}_{N'_{vis}(e)} C_k p^k (1-p)^{N'_{vis}(e)-k} \quad (4)$$

p' は $N'_{vis}(e) = 5, U_{th} = 10, V_{th} = 10, N_{th} = 1$ のとき 2.45%， $N'_{vis}(e) = 7, U_{th} = 15, V_{th} = 15, N_{th} = 2$ のとき 3.92% になる。真の視体積に対して p' の体積を占める領域については、本章で提案したシルエット欠損修復を行っても視体積の欠損は復帰しない。視体積を構築する際には理論的に数%の標本化誤差が生じることがわかっており [10]、上に示した程度の欠損は、標本化誤差の範囲に吸収されるものと考えられる。なお、この領域を減らすためには、カメラノイズをできるだけ抑えた撮影を目指して、 U_{th} および V_{th} の値を小さく設定することが有効である。たとえば、 $N'_{vis}(e) = 5, U_{th} = 5, V_{th} = 5, N_{th} = 1$ のときには p' を 0.166% に抑えることができる。

一方、 $N_{allow} = N_{th}$ としたときに、復帰判定領域に含まれる余分なボクセルの生起確率を計算することは、生起確率がカメラ位置や物体形状の複雑さに依存するために困難である。ただし、一般的には N_{th} が大きくなるにつれ余分なボクセルの数は増加する。例として、2.4節の図8に示した N_{allow} を設定した視体積に対して、余分なボクセル数を計算した結果を表1に示す。

表1では、 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数 (additional voxels) と、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数 (missing voxels) を示した。なお、正解の視体積には手動でシルエットを抽出して作成した視体積を正解の視体積として用いた。

表1から、 $N_{allow} = 1$ であっても余分な領域は、正解の視体積の 10% 以上の体積を占めることがわかる。このことから、19台程度のカメラ台数を用いた視体積交差法では、1台のカメラから多くの情報を得て、再現性を向上していることがわかる。つまり、 N_{allow} を 1 に設定した視体積では、欠損は少ないが、余分

表 1: N_{allow} とボクセル数の推移

N_{allow}	Visual hull	Additional Voxels	Missing Voxels
(正解の視体積)	277496	0	0
0	265472	10502(3.78%)	22526(8.12%)
1	309424	34652(12.49%)	2724(0.98%)
2	343754	66789(24.07%)	531(0.19%)

な領域が多い視体積が得られているといえる。逆に、 N_{allow} を 2 以上に設定した視体積では、欠損領域はあまり減少しない割に、余分な領域が多くなる。復帰判定領域として最適な領域を与える N_{th} の値は、復元対象となる形状の複雑さと実験に用いるカメラ台数、カメラノイズや鏡面反射の観測のされやすさによる。

また、次の手順に渡す復帰判定ボクセルの集合について説明する。

拡散反射色の推定に必要となる visibility の判定のためには視体積が確定していることが必要であるので、復帰判定ボクセル a は視体積に含まれていると仮定して visibility を判定する。このときに、視体積に 1 つの復帰判定ボクセルを加えて visibility の判定を行い、4.1 節で説明したシルエット欠損修復のループを繰り返すことは現実的ではない。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、膨大な時間がかかることになるからである。よって、複数個のボクセルを同時に復帰判定する。このときに、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。

シルエット欠損修復の毎回のループで処理される復帰判定ボクセルの集合を適切に設定することで、visibility が誤って判定される問題を解決する。各ループで処理される復帰判定ボクセルの集合に、相互に visibility を誤らせるようなボクセルが含まれなければよい。

これを実現するために、最初のループが始まる前の段階で、復帰判定領域に含まれるボクセルのそれぞれに、視体積表面からのマンハッタン距離を値として持たせる。この上で、この値が小さいものを順に復帰判定ボクセルの集合として与える。これにより、各ループで処理される復帰判定ボクセルの集合に、相互に visibility を誤らせるようなボクセルが含まれにくくい。

4.3 シルエット欠損の検出と修復

まず、復帰判定ボクセルの拡散反射色が求まったときのシルエット欠損の検出と修復の手法について説明する。復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定については、4.4節で説明する。

シルエット欠損が生じている画素に投影されるボクセルの拡散反射光の色が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。

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 $\mathcal{C}_{vis}(a)$ で表す。 $\mathcal{C}_{vis}(a)$ 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 $\mathcal{C}_{in}(a)$ 、含まれないカメラの集合を $\mathcal{C}_{out}(a)$ とする。 a は視体積外のボクセルであるので、少なくとも 1 台のカメラで、 a が投影される画素がシルエット外と判定される。

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いて、 a の拡散反射色を推定する。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。また、復帰判定ボクセルである a が投影される画素の値を $f_{m,Y}(q_m(a))$, $f_{m,U}(q_m(a))$, $f_{m,V}(q_m(a))$ とし、 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。これらの画素値の獲得のようすを図 15 に示す。

マルチカメラでの観測情報から求められる a の拡散反射色の Y, U, V の値がそれぞれ $Ave_Y(a)$, $Ave_U(a)$, $Ave_V(a)$ であるとする。 $Ave_Y(a)$, $Ave_U(a)$, $Ave_V(a)$ の値はそれぞれのカメラでの $f_{m,Y}(q_m(a))$, $f_{m,U}(q_m(a))$, $f_{m,V}(q_m(a))$ の値から求められるが、詳細な求め方については、4.4節で説明する。カメラ $C_m \in \mathcal{C}_{out}(a)$ 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。以下の平均条件を満たす画素 $q_m(a)$ 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。

平均条件

$$| Ave_U(a) - b_{m,U}(q_m(a)) | < U_{th} \text{ または } | Ave_V(a) - b_{m,V}(q_m(a)) | < V_{th}$$

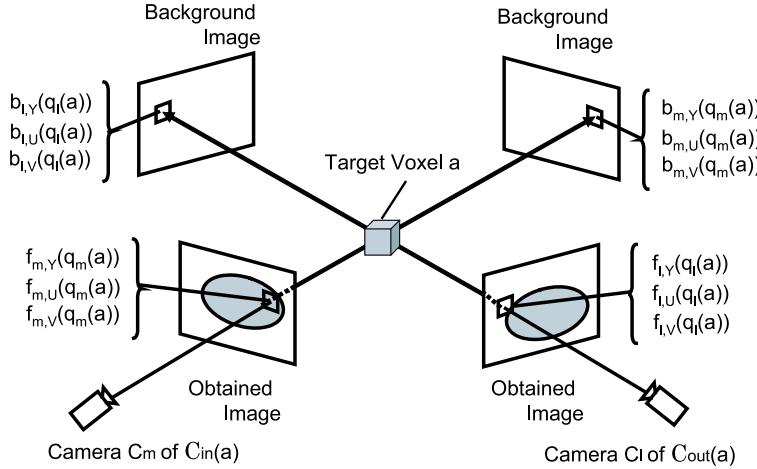


図 15: 記号の定義

4.4 復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定

4.4.1 visibility の計算

4.2 節に説明した方針によって与えられる復帰判定ボクセルの集合に対して、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。

ただし、鏡面反射色については、見る方向により強度が変わるので、マルチカメラの情報からこの色を推定することはできない。しかし、鏡面反射を観測できる方向は限られているので、カメラノイズが生じたときに観測される色と同様、外れ値を与える色として扱うことができる。

ある復帰判定ボクセル a について visibility を判定するとき、カメラと a の間に、視体積に含まれる他のボクセルがないかを調べ、これがないときに a はカメラから visible であると判定する。カメラ C_m が v に対して visible であるかどうかは Z バッファ法 [1] を利用して判定する(図 16)。Z バッファ法はコンピュータグラフィックスの分野で、画像の各画素の値に複数個ある物体のどの物体の色が反映されるかを決定し、物体の投影像を生成するために用いられる手法である。

visibility の判定は復帰判定ボクセルを含めた視体積に含まれるすべてのボクセルを対象として行う。visibility を判定するすべてのボクセルをカメラ C_m の画像に投影する。このときのレンズ中心からボクセルまでのベクトルを考え、このベクトルのカメラの光軸方向を Z 軸とし、光軸方向成分の大きさを $z_m(q_m(a))$

とする。カメラ C_m の各画素 $I_m(x, y)$ に対応する Z バッファ $z_m(x, y)$ に Z 値として格納する。従来の Z バッファ法では、 a がカメラ C_m から visible であるかどうかは、 a が投影される画素 $I_m(x, y)$ に対応する Z バッファの値 $z_m(x, y)$ が $z_m(q_m(a))$ より小さいかどうかで判定する。

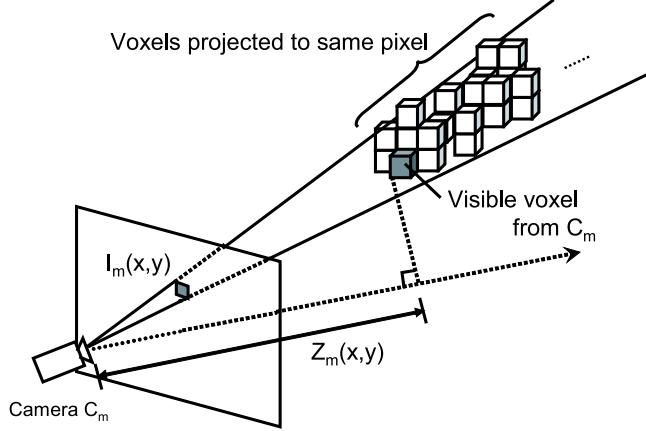


図 16: Z バッファ法による各画素値の決定

従来の Z バッファでは、最も手前に見えているボクセル a のみを visible であると判定し、同じ画素に投影されている a の近傍のボクセルは visible であると判定されない。このときには、 a の近傍のボクセルでは、そのカメラでの観測色を使って拡散反射色が推定されない。このようなことがないように、複数の visible なボクセルが同じ画素に投影されていることを想定した Z バッファの利用を考える。

この問題を解決するため、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 17)。これにより、同じ画素に投影される複数のボクセルに対して、カメラから visible であると判定されるようになる。

また、 z_{th} を設定することにより、4.2 節で述べた、複数の復帰判定ボクセルを同時に視体積に含めて visibility を考えることの問題も解決する。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。カメラと復帰前の視体積の間に厚みの薄い復帰判定

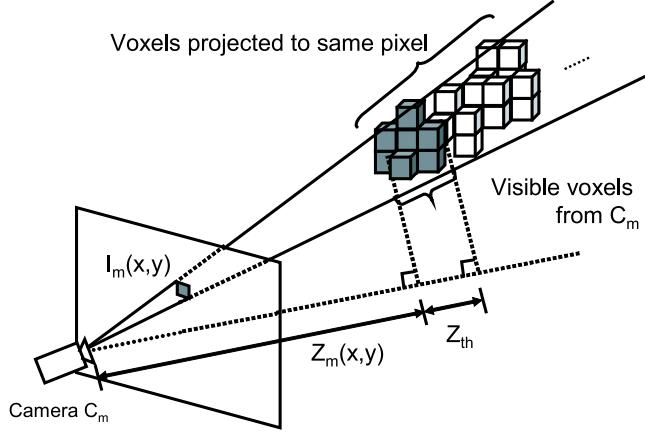


図 17: Z バッファ法による visibility の判定

ボクセルの集合を与えることで、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が回避される。

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、物体の大きさや復帰判定ボクセルの集合がなす復帰視体積表面上の層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。

4.4.2 拡散反射色の推定

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。

$$Ave_U(a) = \frac{\sum_{C_m \in \mathcal{C}_{in}(a)} f_{m,U}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \quad (5)$$

$$Ave_V(a) = \frac{\sum_{C_m \in \mathcal{C}_{in}(a)} f_{m,V}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \quad (6)$$

ただし $N_{vis}(a)$ は、 a を visible であると判定するカメラ台数であり、 $\mathcal{C}_{in}(a)$ の要素数である。このとき、 $\mathcal{C}_{out}(a)$ に含まれるカメラの取得画像の情報を用いないのは、 $\mathcal{C}_{out}(a)$ に含まれるカメラでは背景を観測していることがある、物体の拡散反射色を反映していないことがあるためである。

視体積外のボクセルを復帰判定ボクセル a に選択し、これが視体積に含まれていると仮定して拡散反射色を推定した場合には、誤った拡散反射色が得られ、この結果として誤ったシルエット欠損修復が行われることがある。誤ったシルエット欠損修復が行われると、余分な領域を持つ視体積が得られることになる。

a に対する観測色の分散および $N_{vis}(a)$ の値により、 a が存在するかどうかを調べることができことがある。これにより、誤ったシルエット欠損修復が行われることを抑える。

まず、 a の拡散反射色の推定に用いた各カメラの観測色のUとVの分散 $Var_U(a)$ 、 $Var_V(a)$ および標準偏差 $Sig_U(a)$ 、 $Sig_V(a)$ は以下の式で求められる。

$$Var_U(a) = \frac{\sum_{C_m \in C_{in}} (f_{m,U}(q_m(a)) - Ave_U(a))^2}{N_{vis}(a)}, Sig_U(a) = (Var_U(a))^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$Var_V(a) = \frac{\sum_{C_m \in C_{in}} (f_{m,V}(q_m(a)) - Ave_V(a))^2}{N_{vis}(a)}, Sig_V(a) = (Var_V(a))^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

観測色の分散が大きいときには、それぞれのカメラで得られている観測色が同一のボクセルを観測したものであるとは考えにくい。なぜならば、拡散反射色はどの方向から観測するときにも同じ色として観測されるはずであるからである。つまり、観測色の分散 $Var_U(a)$ 、 $Var_V(a)$ が大きくなるときには、 a は視体積に含まれないことが考えられる。よって、観測色の分散 $Var_U(a)$ 、 $Var_V(a)$ から a が視体積に含まれないことを検出し、シルエット欠損修復を行わないようとする。ただし、観測色の分散が大きくても視体積に含まれる要素があることがあり、観測色の分散だけで a が視体積に含まれるかどうかを判断することは適切ではない。これについては4.4.3節で説明する。

4.4.3 拡散反射色推定が正しく推定できない場合

正しく拡散反射色が推定できないのは、凹面領域や視体積が大きく欠落している部分、鏡面反射が起こっている部分、さらにvisibleなカメラ台数が少ないボクセルである。それぞれに対して、誤ったシルエット欠損修復が起こる状況とその解決法について説明する。それぞれの状況が起きていることを、観測色の分散 $Var_U(a)$ 、 $Var_V(a)$ と a をvisibleであると判定するカメラ台数 $N_{vis}(a)$ を用いて検出する。

凹面領域に隣接するボクセルの拡散反射色推定

視体積交差法では原理的に凹面部分を復元できない。よって、凹面部分を埋めるような余分な領域が視体積に含まれてしまう。このことは視体積交差法自体の問題であり、これを取り扱う研究がいくつかなされているが完全に凹面を復元できるわけではない[11][12][13]。本研究では凹面を扱わず、凹面部分で拡散反射色が正しく得られない問題のみを取り扱う。

凹面領域に隣接するボクセルの拡散反射色推定する場合には、凹面上の物体表面の色が画像に投影されるため、推定される色が正しくない(図18)。

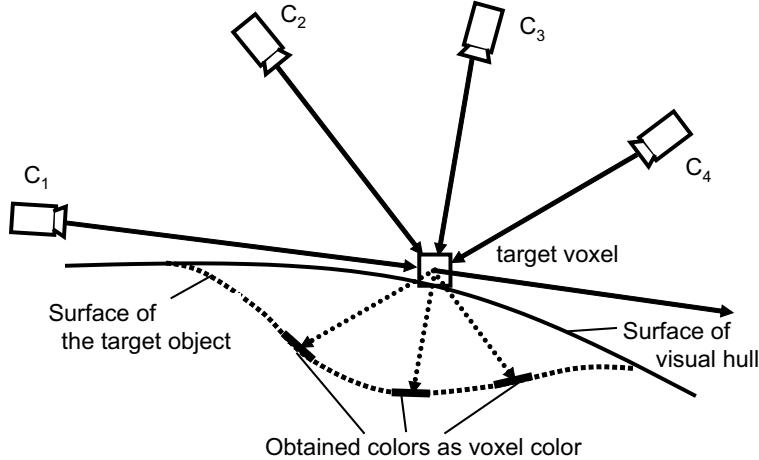


図18: 凹面部分で推定色間の分散が大きくなる場合

この場合、凹面部分の各箇所で観測される物体色が異なる物体であれば、 $Var_U(a)$, $Var_V(a)$ は大きくなる。これにより、 a が凹面部分を埋める余分な領域に隣接するボクセルである可能性があると判定できる。この判定が行われた場合には、 a が投影されるシルエットの修復を行わないことし、シルエットが誤って修復されないようにする。

しかし、凹面部分の各箇所で観測される物体色が異なるような物体でなければ、 a の色の推定に用いた色の分散のUとVの値 $Var_U(a)$, $Var_V(a)$ は大きくならない。このときには、 a が凹面部分を埋める余分な領域に隣接するボクセルであることは判定できず、誤って推定された a の色を用いてシルエット修正が行われる。この結果、 a は視体積要素であると誤って判定され、推定される a の拡散反射色からシルエット欠損を修復し、余分なボクセルを持つ視体積が得られることがある。このときには、 $Var_U(a)$, $Var_V(a)$ および $N_{vis}(a)$ の値を用いても問題は解決されない。これは本手法の問題点である。

ただし、このような場合には、余分な領域が復帰視体積に含まれてしまうものの、凹面部分の表面の各箇所で観測される色があまり変化しないので、視体積表面のボクセルに色を与えることで見た目は悪くなりにくいといえる。

視体積が大きく欠損した部分に含まれるボクセルの拡散反射色推定

視体積が大きく欠落している部分に存在する復帰判定ボクセル a の色を推定する場合には、欠落してしまった視体積の表面部分の色が画像に投影されるため、正しい色の推定が行われない(図 19).

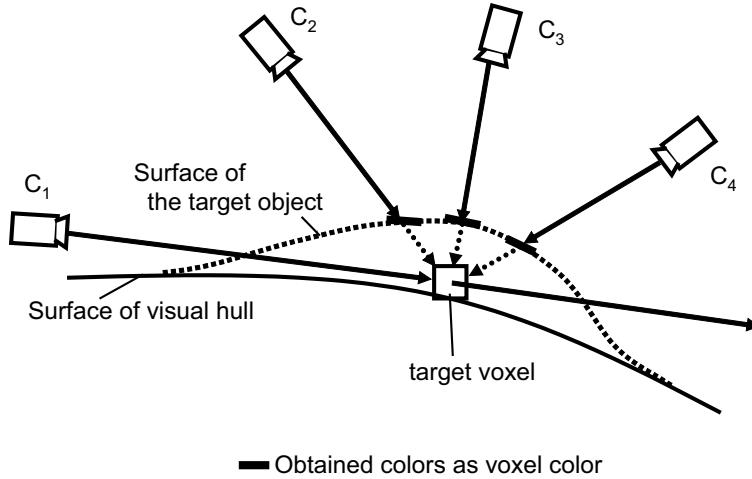


図 19: 大きな欠落のため推定色間の分散が大きくなる場合

視体積欠落部分の物体表面の各箇所で観測される物体色が異なるような物体でなければ、観測色の分散 $Var_U(a), Var_V(a)$ は大きくならない。このときには、 a が投影される画素はシルエット要素に加えられるので問題とはならない。逆に視体積欠落部分の表面の色変化が大きければ、 a の色の推定に用いた観測色の分散 $Var_U(a), Var_V(a)$ は大きくなる。これにより、 a は視体積が大きく欠落している部分に内包されるか、または、凹面部分の余分な領域に隣接するボクセルであると判定される。 a が視体積が大きく欠落している部分に内包される場合には a は復帰されるべきであり、 a が凹面部分の余分な領域に隣接するボクセルである場合には復帰されるべきではない。しかし、分散だけでは両者を区別することはできない。

本研究では、観測色の分散 $Var_U(a), Var_V(a)$ が大きくなるときには、 a が投影されるシルエットの修復を行わないことにした。これにより、 a が視体積が大きく欠落している部分に内包される場合に a が復帰されないことがある。このことは本手法の問題であるが、物体表面に位置するものが正しく復帰視体積に加えられれば、この問題は解決する。なぜならば、物体表面に位置する復帰判定ボクセルが復帰判定されれば、復帰判定ボクセルが投影される画素は新た

にシルエット要素に加えられ、その結果、シルエットを修正するので物体内部に位置する復帰判定ボクセルも復帰されるからである。

鏡面反射が観測される場合のボクセルの拡散反射色推定

次に、鏡面反射が起こる部分について考える。鏡面反射が起こっている部分を観測するカメラでは、拡散反射色とは異なる色を観測することになる。このため推定される拡散反射色とこのカメラで観測される色が異なってしまう。鏡面反射が観測されるカメラの影響を受けて、推定される拡散反射色が鏡面反射光の色に近くなることが問題となる。

そこで、鏡面反射を考慮に入れ、復帰判定ボクセル a が投影される画素 $q_m(a)$ で U と V の値が平均値に近いもののみを使って、 $Ave_U(a), Ave_V(a)$ を再計算することでこの問題を解決する。以下の分散条件を満たす画素 $q_m(a)$ で得られる画素値 $f_{m,Y}(q_m(a)), f_{m,U}(q_m(a)), f_{m,V}(q_m(a))$ を平均値に近いとみなすこととする。

分散条件

$$f_{m,U}(q_m(a)) \in [Ave_U(a) - \beta Sig_U(a), Ave_U(a) + \beta Sig_U(a)] \quad (C_m \in \mathcal{C}_{in}(a))$$

かつ

$$f_{m,V}(q_m(a)) \in [Ave_V(a) - \beta Sig_V(a), Ave_V(a) + \beta Sig_V(a)] \quad (C_m \in \mathcal{C}_{in}(a))$$

ただし、 β は鏡面反射でないことを許す範囲を表す定数とする。 β を小さくするほど鏡面反射色の影響を受けずに拡散反射色の推定を行うことができるが、カメラごとの観測色のわずかな違いに影響を受けやすくなる。

観測するカメラ台数が少ない場合のボクセルの拡散反射色推定

最後に、visible であるカメラ台数が少ないボクセルの復帰判定について考える。複雑な表面形状をもつ物体ほど visible であるカメラ台数 $N_{vis}(a)$ が小さいボクセルが視体積表面上に存在することが予想される。少ない台数のカメラから拡散反射色を推定するときには、先に述べた方法を用いても鏡面反射の影響を軽減させることはできない。

このことから、復帰判定ボクセル a に対して鏡面反射が高々 N_{spec} 台のカメラでしか観測されないと仮定できるとするときに、 $N_{vis}(a)$ が $2N_{spec} + 1$ 以上でないときには復帰判定を行わないようとする。たとえば、 $N_{spec} = 1$ とするときは 3 台以上のカメラから visible であると判定されないボクセルについては復帰

判定を行わない。

4.5 シルエット欠損修復手法のまとめ

これまでの議論より、以下の手順で視体積に復帰領域を新たに加えた復帰視体積を構築することができる。

画像取得・シルエット抽出、初期視体積の構築 2章で説明した通常の視体積交差法の手法に従って、初期視体積を構築する。初期視体積をはじめの復帰視体積とする。

1. 復帰判定領域の決定 $N_{allow} = N_{th}$ ($N_{th} \geq 1$) に設定した視体積を求め、初期視体積との差分領域を復帰判定領域に設定する。

復帰判定領域に含まれるボクセルに対して、視体積表面からのマンハッタン距離を値として与える。この値が小さいものから順に、手順 2. の復帰判定ボクセルの集合として渡す。

2. 復帰判定ボクセルの拡散反射色の推定 復帰判定ボクセル a の各カメラでの visibility を計算する。レンズ中心からボクセルまでのベクトルを考え、このベクトルのカメラの光軸方向を Z 軸とし、光軸方向成分の大きさを $z_m(q_m(a))$ とする。カメラ C_m の各画素 $I_m(x, y)$ に対応する Z バッファ $z_m(x, y)$ に Z 値として格納する。 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。

復帰判定ボクセル a の拡散反射色の U と V の推定値 $Ave_U(a), Ave_V(a)$ 、観測色の標準偏差 $Sig_U(a), Sig_V(a)$ を以下の式で求める。

$$\begin{aligned} Ave_U(a) &= \frac{\sum_{C_m \in \mathcal{C}_{in}(a)} f_{m,U}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \\ Ave_V(a) &= \frac{\sum_{C_m \in \mathcal{C}_{in}(a)} f_{m,V}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \\ Var_U(a) &= \frac{\sum_{C_m \in \mathcal{C}_{in}} (f_{m,U}(q_m(a)) - Ave_U(a))^2}{N_{vis}(a)}, Sig_U(a) = (Var_U(a))^{\frac{1}{2}} \\ Var_V(a) &= \frac{\sum_{C_m \in \mathcal{C}_{in}} (f_{m,V}(q_m(a)) - Ave_V(a))^2}{N_{vis}(a)}, Sig_V(a) = (Var_V(a))^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

ただし $N_{vis}(a)$ は、 a を visible であると判定するカメラ台数であり、 $\mathcal{C}_{in}(a)$ の要素数である。

鏡面反射を考慮に入れ、 $Ave_U(a), Ave_V(a)$ の計算には復帰判定ボクセル a が投影される画素 $q_m(a)$ で U と V の値が、以下の分散条件を満たすもののみを使って再計算されたものを用いる。

分散条件

$$f_{m,U}(q_m(a)) \in [Ave_U(a) - \beta Sig_U(a), Ave_U(a) + \beta Sig_U(a)] \quad (C_m \in \mathcal{C}_{in}(a))$$

かつ

$$f_{m,V}(q_m(a)) \in [Ave_V(a) - \beta Sig_V(a), Ave_V(a) + \beta Sig_V(a)] \quad (C_m \in \mathcal{C}_{in}(a))$$

観測色の分散が大きいときには、それぞれのカメラで得られている観測色が同一のボクセルを観測したものであるとは考えにくい。よって、観測色の分散 $Var_U(a), Var_V(a)$ が大きくなるときには、 a が投影されるシルエットの修復を行わない。

また、復帰判定ボクセル a に対して鏡面反射が高々 N_{spec} 台のカメラでしか観測されないと仮定できるとするときに、 $N_{vis}(a)$ が $2N_{spec} + 1$ 以上でないときには復帰判定を行わないようとする。

3. シルエット欠損の検出・修復 再計算された復帰判定ボクセル a の拡散反射色に対して、以下の平均条件を満たすの画素 $q_m(a)$ では欠損が起こっていると判定し、シルエットに新たに含める。

平均条件

$$| Ave_U(a) - b_{m,U}(q_m(a)) | < U_{th} \text{ または } | Ave_V(a) - b_{m,V}(q_m(a)) | < V_{th}$$

4. 復帰視体積の再構築 欠損が修復されたシルエットを基に、視体積を再構築し、新たな復帰視体積とする。手順 2. に戻る。

4.6 単一色背景を持つ環境下での適用可能性

従来の单一色背景を持つ環境下においても、本章で提案した拡散反射色を推定することによるシルエット欠損修復を適用ことができる。この場合には、背景色と同一の拡散反射色を持つ物体に対しては、多くのカメラでシルエット欠損が生じることが予想されるので、復帰判定ボクセルの集合の範囲を大きく取らざるを得ない。このような欠損に対して、十分なシルエット欠損修正が行われると考えにくい。

ただし、図 20 のように、背景の中で影になっているような特異な部分が存在

するときに、物体領域中の影の部分が重なってシルエットが欠損することがある。このような場合には、他のカメラで同じ部分を観測するカメラで正しくシルエットが得られていることが予想できる。よって、このような欠損に対して本章で説明した手法は有効である。また、鏡面反射が観測されていたり、カメラノイズが発生することによって生じるシルエット欠損についても同じことがいえる。5.2節の実験結果において、通常の单一色背景で行われる視体積交差法で提案手法を適用し、その結果を示す。

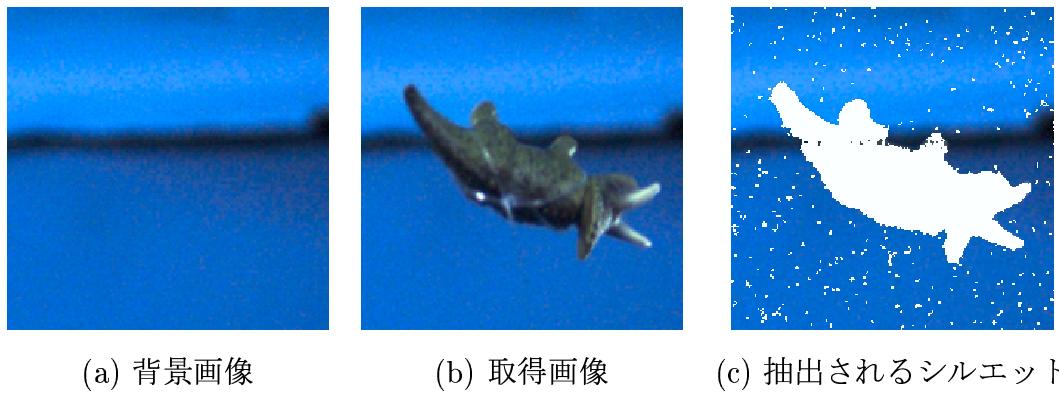


図 20: 単一色背景を持つ環境下でのシルエット欠損

第5章 実験

5.1 実験環境

計測には図 21 に示す 4π システム [14] を利用した。 4π システムでは、撮影時には周囲を青色の布で覆い、全方位方向からの取得画像に対して背景差分を抽出しやすくしている。物体表面で直接光の鏡面反射が観測されることがないよう間接光のみを物体に照射し、物体色を正確に取得することをめざすシステムである。カメラは 4π システムに組み込む前に、それぞれ単独でカラーキャリブレーションが行われており、同じ色が各カメラで同じ色に写るように設定されている。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 台のカメラを用いて行った。

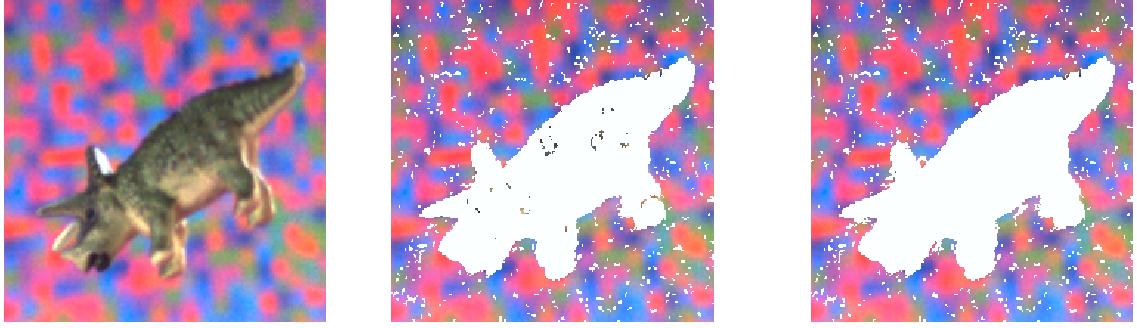


図 21: 4π システム概観

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

ランダムパターン背景を設定した環境下で、19 台のカメラを持つ 4π システムで観測を行った。YUV 表色系でシルエットを抽出し、 V_{th}, U_{th} はいずれも 10 とし、 $z_{th} = 2, N_{th} = 1, N_{spec} = 1, \beta = 0.5$ とした。実験では恐竜模型を対象とした。この恐竜模型の大部分は緑色であり、背景と同一の拡散反射色をほとんど持たないといえる模型である。シルエット修復の結果を図 22 に示す。

図 22(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 22(b) の白色で示す領域が得られる。これに対して、物体色推定によるシルエット修復を行うと図 22(c) の白色で示す領域が得られた。物体の観



(a) 取得画像 (b) 手法適用前のシルエット (c) 手法適用後のシルエット

図 22: ランダムパターン背景環境下でのシルエット欠損修復

測色と背景色の近さによる欠損が軽減された。

次に、シルエット修復の結果を図 23 に示す。図 23(a) は対象物体の写真であり、図 23(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た視体積である。本研究では、この視体積を正解の復元形状として評価を行う。図 23(c) は通常の視体積交差法で得られる視体積である。図 23(d) は N_{allow} を 1 に設定した視体積であり、図 23(e) は提案手法を適用して得られた視体積である。それぞれの視体積に対しマーチングキューブ法 [15] 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ている。

図 23(c) に示した通常の視体積では、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 23(d) の N_{allow} を 1 に設定した視体積や、図 23(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 1 に設定した視体積と比べて、たてがみの裏や角の周りに確認される余分な領域が少ないことがわかる。

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、それぞれの視体積に対して数値評価を行った。正解の視体積に含まれないが復元形状に含まれるボクセル数 (additional voxels)，および、正解の視体積に含まれるが復元形状に含まれないボクセル数 (missing voxels)，両者の和 (error voxels) を表 2 に示す。

通常の視体積では、正解の視体積の 55.2% のボクセルが欠損した。これはランダムパターン背景を設定したためである。これに対し、復帰視体積ではあまり余分なボクセルを増加させることなく、ほとんどの欠損を修復している。error



図 23: ランダムパターン背景環境下での復帰視体積

voxelsについても、通常の視体積や $N_{allow} = 1$ 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 $N_{allow} = 1$ 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。この際、復帰すると決められた復帰判定ボクセルが投影される画素をシルエットに含める。これにより、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。これにより、復帰視体積の missing voxels が $N_{allow} = 1$ の視体積のそれよりは少なくなることがある。また、additional 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

表 2: ランダムパターン背景環境下での誤差であるボクセル数の変化

	Visual Hull	Additional Voxels	Missing Voxels	Error Voxels
正解の視体積	266702	-	-	-
通常の視体積	121699	8297	153300	161597
$N_{allow} = 1$ の視体積	239438	30428	57692	88120
復帰視体積	274209	23273	15766	39039

があると考えられる。この現象がどの程度発生するかについては議論の余地が残るが、あまり複雑な形状を持たない恐竜模型では、結果として error voxels は減少しているので、視体積の再現性を妨げるものとはなっていないといえる。

5.3 単一色背景環境下でのシルエット修復

4章で提案したシルエット修復手法は、従来の形状復元のためのシステムにも適用が可能である。そこで、ランダムパターン背景の設定は行わずに4章で提案したシルエット修復手法を用いて復帰視体積を構築した。周囲を青色の布で覆い、5.2節と同様に恐竜模型の形状を復元した。シルエット修復の結果を図24に示す。



図 24: 単一色背景環境下でのシルエット欠損修復

図 24(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 24(b)の白色で示す領域が得られる。これに対して、物体色推定によるシルエット修復を行うと図 24(c)の白色で示す領域が得られた。物体の観

測色と背景色の近さによる欠損が軽減された.

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 25 に示す.

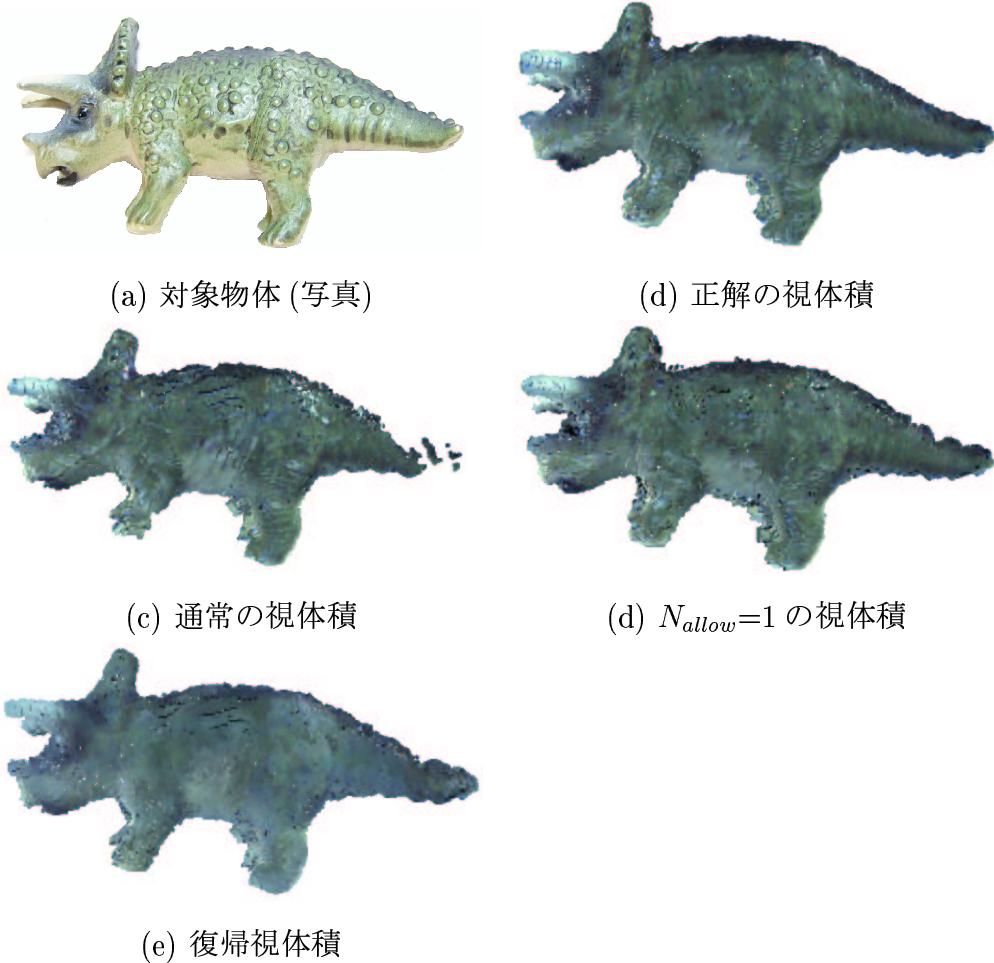


図 25: 単一色背景環境下での復帰視体積

図 25(c) に示した通常の視体積交差法で復元される視体積では尻尾の部分で欠落が確認できるが、図 25(d), (e) に示した N_{allow} を 1 に設定した視体積および復帰視体積では欠落が修復されていることがわかる。また、復帰視体積では N_{allow} を 1 に設定した視体積と比べて、たてがみの裏や胴回りに確認される余分な領域が少ないことがわかる。

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、それぞれの視体積に対して数値評価を行った。正解の視体積に含まれないが復元形状に含まれるボクセル数 (additional voxels)，および，正解の視体積に含まれるが復元形状に

含まれないボクセル数 (missing voxels), 両者の和 (error voxels) を表 3 に示す.

表 3: 単一色背景環境下での誤差ボクセル数の変化

	Visual Hull	Additional Voxels	Missing Voxels	Error Voxels
正解の視体積	277496	-	-	-
通常の視体積	265472	10502	22526	33028
$N_{allow} = 1$ の視体積	309424	34652	2724	37376
復帰視体積	276426	12252	13322	25574

N_{allow} を 1 に設定した視体積および復帰視体積では、通常の視体積と比べて missing voxels が減少した。 N_{allow} を 1 に設定した視体積では additional voxels が通常の視体積に比べ、大きく増加しているのに対して、復帰視体積ではあまり増加していない。逆に復帰視体積では missing voxels を十分に修復できていないが、error voxels の値では元の視体積からわずかながらも減少している。これらのことから、本研究で提案したシルエット欠損修復手法は单一色背景を持つ環境下において、欠損したボクセルの多くを修復し、余分なボクセルをあまり増やさない手法であり、視体積交差法のための有効な手法であるといえる。

また、恐竜模型は背景からの間接光を受けて、全体的に青く観測された。図 23 と図 25 に示した、それぞれの背景を設定した環境下における対象物体の写真と復元形状の色の比較すると、ランダムパターン背景ではこのような色が観測されていないことがわかる。

ここで单一色背景を持つ環境で得られた復帰視体積と、ランダムパターン背景を持つ環境での復帰視体積とを比較し、ランダムパターン背景の有効性について検討する。

单一色背景で得られる復帰視体積と比べて、ランダムパターン背景で得られる復帰視体積は additional voxels が 2 倍程度あり、missing voxels は同数程度あった。また、error voxels を比較すると、ランダムパターン背景で得られる復帰視体積のほうが多い。これらのことから、物体色がある程度既知で单一色背景を持つ環境下でもある程度シルエットが正確に得られる場合には、ランダムパターン背景を用いて得られる復帰視体積よりも单一色背景で得られる復帰視体積のほうが、より再現性の高い形状を得ることができるといえる。

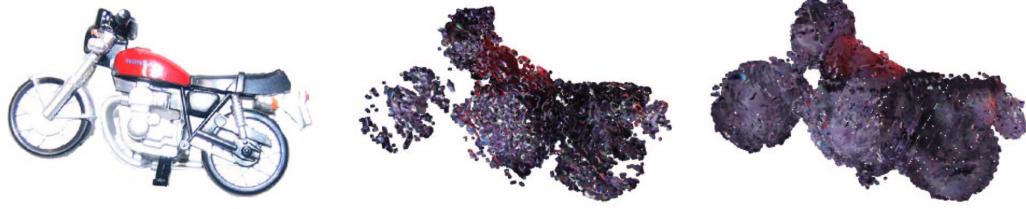
ただし、多様な色を持つ物体を対象に視体積交差法を行う際には、ランダムパターン背景を設定した環境下で行った方が、欠損の少ない視体積が得られることが保証できる。本節の実験では背景と同じ拡散反射色を持たない模型を対象とした。背景と同じ拡散反射色を持つ模型に対しては、多くのカメラのシルエットが欠損し大きな視体積欠損が生じる場合には、シルエット欠損修復手法は適用できないということは4章で議論したとおりである。ランダムパターン背景を設定した環境下では、シルエット修復手法を用いて、単一色背景を設定したときに近い error voxels を持つ視体積を得ることができることが実験により確認された。ランダムパターン背景を設定した環境下では、従来は再現性が著しく低下する背景と同じ拡散反射色を持つ模型に対しても、物体色がある程度既知の物体と同等の再現性が得られることが期待できる。

5.4 多様な物体に対する手法の適用

提案手法があらゆる色を持つ物体を対象とする場合に欠損の少ない復元形状を与えることを示すために、ランダムパターン背景を設定した環境下で、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26から図45までに示す。いずれの対象にも見た目に欠損の少ない視体積が得られていることがわかる。



図 26: 鹿



(a) 対象物体 (写真)

(b) 通常の視体積

(c) 復帰視体積

図 27: バイク



(a) 対象物体 (写真)

(b) 通常の視体積

(c) 復帰視体積

図 28: バイク 2

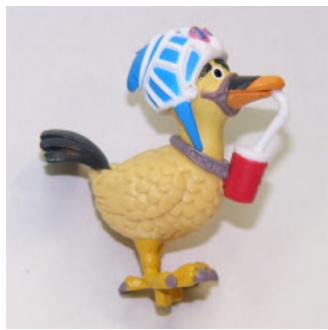


(a) 対象物体 (写真)

(b) 通常の視体積

(c) 復帰視体積

図 29: 黒い車



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積

(c) 復帰視体積

図 30: 鳥



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積

(c) 復帰視体積

図 31: あひる



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積

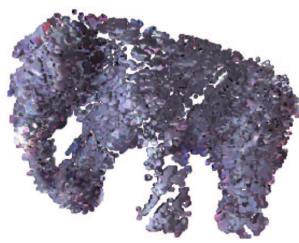


(c) 復帰視体積

図 32: えび



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 33: 象 1



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 34: 象 2



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 35: にわとり



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 36: かば



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 37: 馬



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 38: マスコット



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積

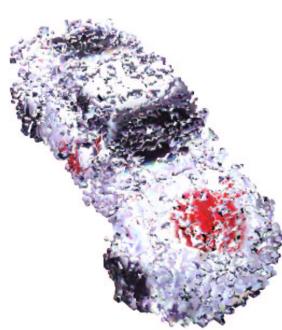


(c) 復帰視体積

図 39: 猫



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 40: 白い車



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積

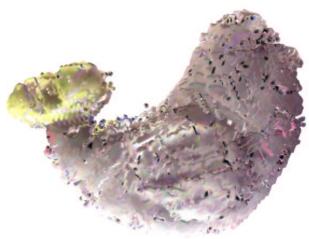


(c) 復帰視体積

図 41: パンダ



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積

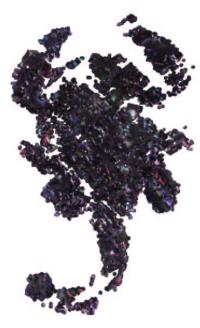


(c) 復帰視体積

図 42: ひよこ



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 43: サソリ



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 44: 男性マスコット



(a) 対象物体 (写真)



(b) 通常の視体積



(c) 復帰視体積

図 45: 犬

第6章 まとめ

本研究では、多様な色を持つ物体に対して、欠損の少ない視体積を構築するためにランダムパターン背景を用いた環境下で得られる画像からシルエット抽出を行い、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することでボクセルの拡散反射色を推定して、シルエットの修復を行った。

ランダムパターン背景を用いることで、様々な拡散反射色を持つ物体に対して、すべての領域で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。

また、ランダムパターン背景を用いても残るシルエット欠損を、複数のカメラが同じ対象物体を観測していることを利用して修復した。シルエット欠損手法では、シルエット欠損が生じていないカメラ画像より、視体積外部の各ボクセルの拡散反射色を推定する。あるカメラでの背景色に対し、別のカメラから得られるボクセルの拡散反射色とを比較し、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、まず、従来の青色の布を背景に持つ形状復元システムにおいて、拡散反射色推定によるシルエット修復を行い、シルエット欠損の修復が示された。次に、ランダムパターン背景を設定した環境下で実験を行い、シルエット欠損が修復されることが示せた。最後に様々な物体に対して提案手法を適用し、多様な色を持つ物体に対して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、以下の2点を挙げる。

まず、ランダムパターン背景を実環境で設定するときに、カメラやプリンタの表現色の限界や観測時に起こる焦点ぼけによって、ランダムパターン背景のランダム性が失われ、特定の拡散反射色を持つ物体に対してシルエット欠損が生じる可能性が高くなることが考えられる。これに対し、設定環境ごとのランダム性の保存について検証することが挙げられる。

また、視体積を時系列に統合することで、実際に用いたよりも多くの台数を用いたときに得られる視体積を仮想的に得ることができる[10]。理論的には、カメラ台数が増えれば増えるほど視体積に残る余分な領域が減少して、再現性の高い視体積が得られるが、シルエット欠損による視体積の欠損はカメラ台数が増えれば増えるほど蓄積する。よって各時刻で得られる視体積は、余分な領域は多少残っても、欠損は少ない視体積であることが求められる。視体積を時系

列に統合して再現性の高い視体積を得るために，欠損領域と余分領域に非対称な評価を与えて，各時刻でできるだけ欠損の少ない視体積を得ることが考えられる.

謝辞

本研究を行うにあたり多くの御教示、熱心な御指導を賜わりました美濃導彦教授に深く感謝致します。また、本論文をご査読いただき有用な御意見を賜りました松山隆司教授に深くお礼を申し上げます。さらに、研究について数多く助言を頂き、本報告書の作成においても御指導を頂きました美濃研究室の角所考助教授、飯山将晃助手に感謝の意を表します。最後に、本研究を進めるにあたり貴重な議論の場を提供していただきましたモデルグループの方々、並びに、美濃研究室の皆様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 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.
- [2] W.N.Martin and J.K.Aggarwal, “Volumetric Description of Objects from Multiple Views, ” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.5, No.2, pp.150-158, 1983.
- [3] Aldo Laurentini, “How Far 3D Shapes Can Be Understood from 2D Silhouettes, ” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, No.2, pp.188-195, 1995.
- [4] Dan Snow, Paul Viola and Ramin Zabih, “Exact Voxel Occupancy with Graph Cuts, ” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 2000.
- [5] 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, 2001.10.
- [6] Kentaro Toyama, John Krumm, Barry Brumitt and Brian Meyers, “Wallflower: Principles and Practice of Background Maintenance, ” Proceedings of International Conference on Computer Vision, pp.255-261, 1999.
- [7] C. Hernàndez Esteban and F. Schmitt “Silhouette and Stereo Fusion for 3D Object Modeling, ” Computer Vision and Image Understanding, vol. 96, no. 3, pp. 367-392, December 2004.
- [8] J. Mulder, RV Liere, “Fast Perception-Based Depth of Field Rendering,” Proceedings of ACM VRST2000, 2000.
- [9] 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, ” 画像の認識と理解シンポジウム (MIRU) P3-6, pp.II-31-36, July 30-Aug.1, 2002.
- [10] 豊浦 正広, 飯山 将晃, 角所 考, 美濃 導彦, “時系列視体積の統合による3次元復元形状の再現性の向上, ” 画像の認識・理解シンポジウム 2004(MIRU2004), Vol.II, pp.139-144, 2004-7.
- [11] Andrea Bottino and Aldo Laurentini, “The Visual Hull of Smooth Curved Objects, ” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence,

No.12, pp.1622-1632, 2004.

- [12] C. Hernandez Esteban and F. Schmitt, "A Snake Approach for High Quality Image-based 3D Object Modeling," 2nd IEEE Workshop on Variational, Geometric and Level Set Methods in Computer Vision, October 12, 2003, Nice, France.
- [13] 大浜 郁, 延原 章平, 松山 隆司, "多視点画像を用いた高精度対象領域抽出," 情報処理学会 CVIM 研究会論文誌, vol.43, no.SIG11(CVIM5), pp.53-63, 2004.
- [14] Masaaki IIYAMA, Yoshinari KAMEDA and Michihiko MINOH, "4pi Measurement System: A Complete Volume Reconstruction System for Freely-moving Objects," IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003), pp.119-124, 2003.
- [15] William E. Lorensen and Harvey E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '87), Vol. 21, No. 4, pp. 163-169.