

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^{†a)} 飯山 将晃^{††} 角所 考^{†††} 美濃 導彦^{†††}

Silhouette Refining for the Volume Intersection Method with Random Pattern Backgrounds

Masahiro TOYOURA^{†a)}, Masaaki IYAMA^{††}, Koh KAKUSHO^{†††},
and Michihiko MINOH^{†††}

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、物体色と背景色が近い場合にシルエットが大きく欠損し、その結果、復元形状も欠損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、物体色によらず一定以上の割合で正しくシルエットを抽出できるようにすることを提案する。更に、この処理によって残るシルエット欠損について、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、物体色を推定し、これと背景色を比較して修復することで、更に欠損を少なくする。実験では、シルエットを手動で抽出したときの復元形状と提案手法で得られる復元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、その結果、復元形状も同時に修復されることを確認する。

キーワード 視体積交差法, シルエット欠損修復, 物体色推定, ランダムパターン背景

1. ま え が き

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、画像上での物体存在領域を表すシルエットから、物体形状を復元する手法である。視体積交差法は、形状復元にシルエットのみを用いるので、対象物体の色や表面特性の影響を受けにくい汎用的な形状復元手法である。物体表面がテクスチャ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、視体積交差法では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。また、レーザ光の走査などを用いたステレオ視による形状復元手法と比べて観測時間が大変短く、運動物体の形状復元を行う際などにも有用である [2] ~ [4]。

しかし逆に、視体積交差法では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、復元形状にも欠損が起こってしまうという問題がある。一般にシルエット抽出は、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ることで行う。このときの差分が大きな画素の集合がシルエットである。シルエットは物体色が背景色と近い場合に大きく欠損する。例えば、クロマキーなどで用いられる青色単一色背景を設定した環境では、物体の中にたまたま青色の部分が含まれる場合に、その部分のシルエットは大きく欠損する。この結果、復元形状にも欠損が起こり、復元精度は低くなる。近年、電子博物館や電子教材のためのコンテンツ作成には多くの労力がかけられてきていることから、様々な物体をその色によらずに形状復元できることは、身近にある様々な物体の三次元形状を手軽に電子化し、コンテンツ作成の労力を減らす上で重要

[†] 京都大学大学院情報学研究所, 京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{††} 京都大学大学院経済学研究所, 京都市
Graduate School of Economics, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{†††} 京都大学学術情報メディアセンター, 京都市
Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

a) E-mail: toyo@mm.media.kyoto-u.ac.jp

な課題であるといえる。

従来、このような物体色によらないシルエット抽出のための手法として、背景色を切り換えて撮影する手法が提案されている [5], [6]。これらの手法では、二つの異なる単一色背景を用意し、それぞれの背景のもとで得られるシルエットを統合することで欠損のないシルエットを得ることを実現している。しかし、この手法では物体を固定した状態で背景を切り換える必要があるため、前述のような観測時間が大変短いという視体積交差法の特長が失われてしまう。

また、異なる2色がストライプ状に配置されている背景を用いてシルエット抽出を行う手法も提案されている [7]。この手法では、観測画像中のストライプ境界付近で2色の混合色が観測されることを利用する。混合色がなす直線が観測されない領域をシルエットとして抽出することによって、背景と同じ色を含む物体に対してもシルエット抽出を行うことができる。混合色のなす直線の断点が物体領域の境界付近で観測されるので、この断点を結んでシルエットを抽出する。しかし、この手法では対象物体の境界線が複雑なものである場合に正しくシルエットを抽出することができない。

上述のような従来研究に対して、本論文ではランダムパターンの背景を用いることにより、対象物体の形状の複雑さによらず、物体色が背景色を含む場合でも、実時間観測でシルエットを抽出することを提案する。ここでランダムパターンとは、別々の色をもつ多数の小領域がランダムに配置されたパターンのことである。ランダムパターン背景を用いることで、物体色によらず常にある一定以上の物体投影領域をシルエットとして抽出できるようになる。更に、ランダムパターン背景を設置した環境下での視体積交差法では、物体の各部分に対して異なるカメラから見た背景部分の色が高確率で異なることが期待できることを利用して、あるカメラについて背景色がたまたま物体と同じような色となってしまう場合に、シルエットの欠損が起こったことを検出し、これを修復することができる。

以上のようにランダムパターン背景とシルエット欠損修復手法とを組み合わせることで、物体色によらず欠損の少ないシルエットを得ることができ、その結果、シルエット欠損の影響が少ない復元形状を得ることができる。

以下、2. ではまず視体積交差法の原理とシルエット欠損が復元形状に与える影響について整理する。次に3., 4. ではそれぞれ上述のようなランダムパターン背

景によるシルエット抽出とシルエット欠損修復のための具体的な手法を提案する。更に5. では実環境での実験による提案手法の有効性を示し、6. 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

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。ただし、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。以下ではまずカメラ台数を N として、視体積交差法の原理を簡単に述べる。

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、その投影像が C_m の画像上のシルエット R_m として得られる。

このことから、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分かる。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 の三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 の三次元形状に関する情報を統合することができる。

本研究では、この視体積 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、三次元空間をボクセルと呼ばれる微小領域で分割し、各ボクセルが視体積 V に含まれるか否かを2値で表現する。

上のような手法で得られる視体積 V がもつ特徴と

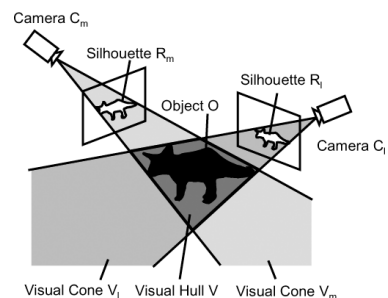


図 1 視体積交差法

Fig. 1 Volume intersection method.

して次の二つが挙げられる .

(1) 対象物体 O は視体積 V に常に内接する .

(2) カメラ台数 N が増加すればするほど視体積 V の体積は減少する .

これらの特徴より, カメラ台数 N が多ければ多いほど視体積 V に含まれる物体領域以外の領域が減少し, 視体積 V は物体形状に近づくといえる . つまり, 復元形状の再現性を向上させるためにはカメラ台数 N を増やせばよい .

しかしこのとき, 物体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, 視錐体も欠損してしまう . 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, 結局, 各カメラで生じる欠損はそのまま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, 視体積の再現性は向上するはずであるが, 実際にはシルエット欠損が生じる領域が増えるために視体積が欠損し, 復元形状の再現性がかえって悪くなることも多いといえる .

3. ランダムパターン背景の利用

3.1 物体色によらないシルエット抽出

視体積交差法において, 上のようなシルエット欠損が起こらないようにするには, 背景色をなるべく物体と違う色にすることが望ましいが, 物体色が未知である場合, 同一の背景色によってこれを実現することは不可能である . その一方, 物体によって背景色を変えることも, コストや手間の点で望ましくない . そこで本研究では, 同一の背景を利用しつつ, 物体の色によらずシルエット欠損を常に少数の割合以下に抑えたとともに, その欠損を修復するというアプローチを考える .

従来のように単一色背景を設置した環境下でシルエットを抽出する手法では, 背景色と同一色が物体に含まれる場合にシルエットをほとんど抽出することができない . これに対して本研究では図 2 のように別々の色をもつ小領域がランダムに配置された画像を用意し, 背景部分にこれを設置する . 本論文では, このように別々の色をもつ小領域がランダムに配置された画像を “ランダムパターン” と呼び, ランダムパターンが設置された背景を “ランダムパターン背景” と呼ぶ .



図 2 ランダムパターン背景
Fig. 2 Random pattern background.



(a) Dark pattern (b) Appropriate pattern (c) Bright pattern

図 3 ランダムパターン背景の輝度値の選択
Fig. 3 Selection of brightness values of random pattern background.



(a) Fine pattern (b) Appropriate pattern (c) Coarse pattern

図 4 ランダムパターン背景の領域の大きさの選択
Fig. 4 Selection of sizes of random pattern background.

ランダムパターン背景を用いれば, どのような色をもつ物体に対しても, 少なくと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ことが期待できるようになる .

図 5 は単色物体の物体色として様々な色を考えたときに, どの程度の割合のシルエット欠損が生じ得るかを模式的に表したものである . 横軸は物体色を, 縦軸はシルエット欠損率をそれぞれ示している . 単一色背景を設置した環境下では, 図 5 中の実線 (a) で示すように, 背景色と異なる色の物体に対してはシルエットを正しく抽出することができ, 欠損の割合はほぼ 0 となるが, 物体色と背景色との差が背景差分に用いるしきい値 (図中の Δ_1) 以下になると, シルエット欠損が物体全体にまで飛躍的に増加し, 欠損の割合はほぼ 1 になる . これに対して, ランダムパターン背景を設置した環境下では, 粗い点線 (b) で示すように, 物体色によらずほぼ一定の割合 (図中の Δ_2) でシルエット

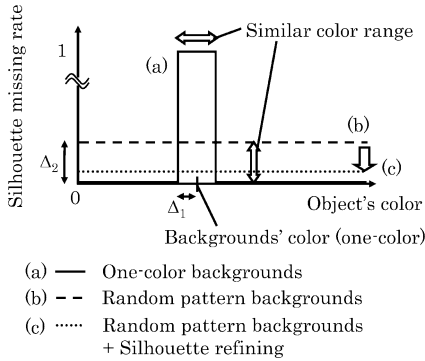


図 5 ランダムパターン背景による効果
Fig. 5 Relation between the object's color and silhouette missing rate for each kind of backgrounds.

トが正しく抽出されることが期待できる。
更に、物体に含まれる色が複数である場合、単一色背景を設定した環境下では、このようなシルエット欠損率のピークが物体に含まれる色ごとに現れることになる。一方、ランダムパターン背景を設定した環境下では、その場合でも引き続き、一定以上の割合でシルエットが正しく抽出されることが期待できる。

また、ランダムパターン背景を設定した環境下で物体を複数方向から観測する場合、物体の各部分に対して多くのカメラで物体色と背景色が異なることが期待できる。このことから、物体色を推定することでシルエットの欠損を検出し、これを修復できるようになる。シルエット欠損の修復手法については、4. で述べる。

次節では、このようなランダムパターン背景を用いたシルエット抽出を行うときの欠損率の大きさについて、より詳細に検討する。

3.2 ランダムパターン背景を用いたシルエット抽出精度

背景差分を求めるための色空間には様々なものがあるが、以降では、その色空間の具体例として、YUV 表色系の輝度値 Y を除いた UV 空間を用いて説明を行う。UV 空間での背景差分は、物体や背景に生じる影の影響を受けにくい。ただし、本論文で提案する手法自体は色空間の選択によらず適用可能である。

図 6 の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 のとり得る値の範囲を示している。一組の R, G, B が与えられるとき、Y, U, V は以下の式で与えられる。

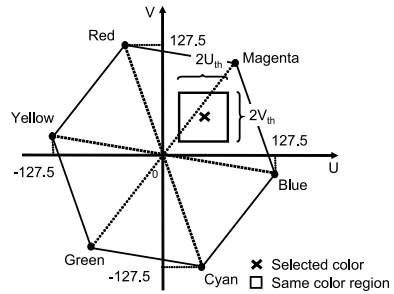


図 6 同一色の値の範囲
Fig. 6 Same color region for a color of x.

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2)$$

逆に Y, U, V の組から R, G, B を求めるには、式 (2) を変形して式 (3) を得る。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0 & 1.402 \\ 1.000 & -0.344 & -0.714 \\ 1.000 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (3)$$

物体色が図中の × 印で与えられるとき、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の四角形で示すように、× を中心として辺の長さがそれぞれ $2U_{th}$, $2V_{th}$ である長方形の内部となり、この範囲を本論文では物体色の“類似色領域”と呼ぶ。ただし、 U_{th} , V_{th} はそれぞれ背景差分の U, V に対するしきい値とする。一方、背景色に設定するランダムパターンの各領域がもつ色が、UV 空間でとり得る値の範囲に等確率に存在するとすると、3.1 で述べたように、シルエットが物体色によらず一定以上の割合で抽出されることになる。このようなランダムパターンを“理想的なランダムパターン”と呼ぶ。物体のある部分の背景色としてその部分の類似色領域内の色が設定されていた場合、物体のその部分が投影される画素はシルエットに含まれない。

類似色領域は、最大で $2U_{th} \times 2V_{th}$ の面積を占め、物体色が U, V のとり得る値の範囲の境界近くにある場合には、それより狭くなる。つまり、物体のある部分が投影される画素が背景差分によってシルエットに含まれない確率 p は、U, V のとり得る値の範囲を示す六角形の面積を S とすると、

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

以下となる．この結果，例えば， $U_{th} = 10$ ， $V_{th} = 10$ のときには $p = 5.21\%$ であると計算することができる．

以上から，理想的なランダムパターン背景下ではどのような物体に対しても理論上は欠損の割合が p 以下で抑えられるといえる．

3.3 ランダムパターンの作成手順

ここでは，ランダムパターンの具体的な作成手順について説明する．

3.3.1 各領域の色の選択

U ， V の値は六角形の内部でランダムに選択するが，輝度値 Y には自由度が残る． 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 空間での分布が偏り，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可能性がある．よって，観測時の光源環境に応じて適切な Y の目標値 Y_t を設定し，与えられた U ， V から決まる Y のとり得る値の範囲内で，最も Y_t に近くなるような Y の値を設定することが必要となる．

図 3(a) 及び図 3(c) は，ランダムパターン背景のもつ Y の値が不適切であるために，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，黒つぶれて観測される領域がある．図 3(c) では， Y のもつ値が大きく，背景色が明るすぎ，白飛びして観測される領域がある．これに対して，観測される背景色の UV 空間での分布が偏らないように Y_t の値を設定した背景が図 3(b) である． Y_t は複数の目標値を設定したランダムパターンを作成し，実際に観測環境に設置することで決定する．こうして決定した目標値は物体に応じて変える必要はない．図 3(b) では，それぞれの領域で観測される色が異なることが期待できる．

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， YUV のとり得る範囲は図 7 に示す六面体の内部及び境界となる．六面体の各境界は，方程式 $R = 0$ ， $G = 0$ ， $B = 0$ ， $R = 255$ ， $G = 255$ ， $B = 255$ でそれぞれ表現される．図から分かるように $Y \in [0, 255]$ ， $U, V \in [-127.5, 127.5]$ となるような Y, U, V の組を選択しても，六面体の内部に含まれないことがある．このことは，選択された Y, U, V で表現される色が $R, G, B \in [0, 255]$ で表現されないことを示す．任意に選択された U, V からランダムパターンの各領域の色を作成するには， R, G, B の値がそれぞれ $[0, 255]$ の範囲に収まるような Y を選択す

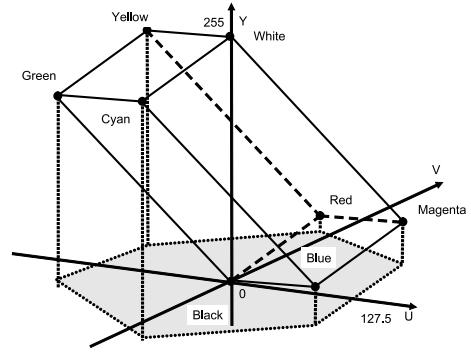


図 7 領域色の選択
Fig. 7 Selection of a color of each region.

る必要がある．

以上のことから， UV 空間で等確率となる色の選択は，次のように行う．

(1) $U, V \in [-127.5, 127.5]$ でランダムに U, V を 1 組選択し， U_s, V_s とする．

(2) Y の目標値 Y_t に対し， (Y_t, U_s, V_s) が図 7 の六面体の内部であるか判定する．六面体の内部であれば， (Y_t, U_s, V_s) を選択して終了する．六面体の内部でなければ (3) に進む．

(3) 六面体の境界と，直線 $(U, V) = (U_s, V_s)$ の交点 Y_s を求める． Y_s が一つ以上存在すれば，より Y_t に近い Y_s がなす組 (Y_s, U_s, V_s) を選択して終了する． Y_s が存在しなければ (1) に戻って，再度 U_s, V_s を選択する．

ただし (2) において，六面体の境界と直線 $(U, V) = (U_s, V_s)$ の交点の Y_s は，六面体の境界を表す方程式 $R = 0$ ， $G = 0$ ， $B = 0$ ， $R = 255$ ， $G = 255$ ， $B = 255$ のいずれかを満たす Y_s であることを利用して式 (3) から，

$$Y_s = -1.402V_s \quad (5)$$

$$Y_s = 0.344U_s + 0.714V_s \quad (6)$$

$$Y_s = -1.772U_s \quad (7)$$

$$Y_s = 255 - 1.402V_s \quad (8)$$

$$Y_s = 255 + 0.344U_s + 0.714V_s \quad (9)$$

$$Y_s = 255 - 1.772U_s \quad (10)$$

として求める．ただし， $R, G, B = 0, 255$ がなすそれぞれの平面は六面体の外部にも続くので， (Y_s, U_s, V_s) が $R, G, B \in [0, 255]$ を満たし六面体の内部の色となるかどうかを，式 (3) に当てはめて再度判定する必要

がある．

なお、各領域色 (Y_s, U_s, V_s) 及び目標とする輝度値 Y_t の設定は、対象物体の色を仮定せずに行われる．

3.3.2 各領域の大きさの選択

ランダムパターンの作成のためには、各小領域の大きさも問題となる．この問題は焦点ぼけ [8], [9] によって起きる．ぼけが起こる領域では、隣接する領域間で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 空間での分布が偏る．ぼけが観測されてしまう背景を図 4 (a) に示す．観測される背景色が偏らないようにするためには、観測される背景色が多様なものとなるように、各小領域をできるだけ小さくすることが望ましいが、その場合、ぼけが生じやすいためにかえって多様性が損なわれる．逆に、ぼけを観測しないように各小領域を大きく設定すると観測される背景色の多様性が失われるとともに、視体積に大きな欠損が生じ、シルエット欠損修復が難しくなる．各領域が大きすぎる背景を図 4 (c) に示す．物体に対してシルエット欠損があまり大きくなりすぎないように、また、ぼけができるだけ起こら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．各小領域の大きさは、複数の大きさを設定したランダムパターンを作成し、実際に観測環境に設置することで決定した．このときには、ぼけができるだけ観測されない程度の小さなものを選択すればよい．こうして決定した各小領域の大きさは物体に応じて変える必要はない．図 4 (b) では、それぞれの領域で観測される色が UV 空間でそれぞれ異なる色となることが期待できる．

各領域の形状の違いは、観測される各領域の色に影響を与えないので、同一形状で平面を埋めつくすことができるものであればどのような形状でもよいが、本研究ではランダムパターンを印刷するプリンタに対して境界でエイリアスの起こりにくい正方形を選択した．

4. 複数のカメラの観測情報の統合によるシルエット欠損修復

4.1 物体色推定によるシルエット欠損修復

3.2 で示したようなランダムパターン背景を設定した環境下で視体積交差法を行う場合には、ランダムパターン背景が物体の各部分に対して別々の背景色を与えるので、物体の同じ部分に対して背景色がカメラごとに異なるものとなることが期待できる．このとき図 8 に示すように、物体の各部分に対して多くのカメラでは物体色と背景色が異なり、正しくシルエットが

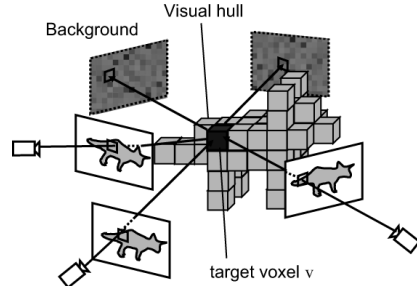


図 8 物体色の推定

Fig. 8 Object's color estimation.

抽出できる．

従来、少数のカメラでシルエット欠損が起こる状況に対して、 N_{allow} 台以内のカメラにおいて視錐体外と判定されるボクセルについて、これを復元形状に含めることで、シルエット欠損の影響を軽減する手法が提案されてきた [10]．ランダムパターン背景を設置した環境下で得られるシルエットに対してこの手法を適用することで、欠損の少ない視体積を得ることができる．しかしこの手法では、得られるシルエットに対して、実際に欠損が起こっているかどうかの判定まではせず、 N_{allow} 台以内のカメラにおいて視錐体外と判定されるボクセルを無条件ですべて復元形状に含めてしまうため、その結果として余分な領域まで復元形状に含めてしまうことが起こる．そこで本研究では、 $N_{allow} = N_{th}$ ($N_{th} \geq 1$) のときと $N_{allow} = 0$ のときの視体積の差領域を対象として、その領域内の各ボクセルにおける物体色を推定して背景色と比較を行うことによって、各カメラの画像中での欠損領域を検出し、この領域だけを修復することを考える．ただし、 N_{th} は N_{allow} に対して、欠損修復処理となるボクセルを決定するための設定値である．

4.2 visibility の計算

4.1 で述べたようにランダムパターン背景を設定した環境下で視体積交差法を行う場合には、物体の各部分に対して多くのカメラでは物体色と背景色が異なり、正しくシルエットが抽出できるため、そのような多数のカメラでの観測色から、各ボクセルにおける物体色を推定することが可能である．この推定色が個々のカメラにおいてそのボクセルの背景色と近いかどうかを調べることにより、そのカメラでシルエット欠損が起こっているかどうかを判定することができる．その結果、シルエット欠損が起きていると判定された画素を

新たにシルエットに加えることで、シルエットの欠損を修復できる。この処理によって、図 5 中の細かい点線 (c) で示すように、どのような色の物体に対しても、更に高確率でシルエットを抽出することができるようになる。

上で述べたような処理を行うために、まず多数のカメラ画像に基づいて各ボクセルにおける物体色を推定する必要がある。この物体色推定のためには、各カメラで得られる画像上でどの画素がどのボクセルを観測して得られたものなのかを知る必要がある。今、複数のカメラで観測されるそれぞれの画素が同じボクセルを観測したものであるためには、各カメラのレンズ中心とそれぞれの画素を結ぶ視線が同じボクセルで交わる必要がある。しかし、これを満たす場合でも、その視線上でそのボクセルをカメラから覆い隠す他のボクセルが存在するような自己隠れがどれかのカメラで起きると、すべてのカメラから同じボクセルが観測されないことが起こる。このため、物体色の推定のためには、物体色推定の対象となる各ボクセルについて自己隠れの有無を判定する必要があり、これを visibility の計算 [11], [12] と呼ぶ。

visibility を正しく判定するためには、厳密には正しい三次元形状が必要となるが、本研究では三次元形状復元のためのシルエット抽出が目的であるので、あらかじめ正しい三次元形状が得られていることは期待できない。しかし、ここでは 4.1 で述べたように $N_{allow} = N_{th}$ ($N_{th} \geq 1$) のときの復元形状を欠損修復処理の対象としており、これは N_{th} 台以外のカメラでシルエット内に含まれる領域を示す。一方、3.2 の議論から、あるボクセルを観測できるカメラの台数を n とすると、シルエット欠損が起きるカメラ台数の期待値は np であり、 n は形状復元に用いるカメラ台数 N より小さいので、 $np \leq Np$ が成り立つ。したがって、 $N_{th} \geq Np$ と設定すれば、物体色と背景色の偶然の一致によって生じたシルエット欠損の影響を受けるボクセルのおおよそすべてを、処理の対象として選ぶことができる。

欠損修復の処理を行うには、まず、これらのボクセルをその時点で得られている視体積に近い方から順にその視体積に加えて仮の視体積を構成する。次に、この仮の視体積をもとにして visibility の計算をし、4.3 と 4.4 に述べる物体色推定と欠損修復を行う。このときの仮の視体積は正しく visibility を判定するためのものであり、物体色推定と欠損修復を行った結果、シ

ルエットが修復されなければ、仮に視体積に含められたボクセルは最終的な視体積には含められないことになる。視体積に近い方から徐々に視体積に加えるのは、互いの visibility の計算に影響を与えにくいようなボクセルだけを同時に修復処理対象とすることで、正しい visibility の計算が行われるようにするためである。更に、修復されたシルエットをもとに視体積と欠損判定領域を再計算し、再度、仮の視体積を構成し処理を繰り返す。この処理は、新たにシルエットに含められる画素がなくなった時点で処理を終了する。最終的に得られた視体積を本処理により修復された視体積とする。

4.3 物体色の推定

欠損判定領域内のボクセル a の物体色の推定には、4.2 で述べた visibility に基づいて a を観測し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、欠損判定領域内のボクセル 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 を観測しているカメラ台数とする。物体色は $C_{in}(a)$ に含まれるカメラの画素の値を用いて推定する。このときの例として、 $C_m \in C_{in}(a)$ 、 $C_l \in C_{out}(a)$ の場合のこれらの関係を図 9 に示す。

カメラ C_m において a が投影される画素 $q_m(a)$ の U, V の値を $f_{m,U}(q_m(a))$ 、 $f_{m,V}(q_m(a))$ とする。また、カメラ C_m の背景画像において a が投影される画素の U, V の値を $b_{m,U}(q_m(a))$ 、 $b_{m,V}(q_m(a))$ とする。このとき、 a の物体色の U と V の推定値 $Ave_U(a)$ 、 $Ave_V(a)$ が以下の式により求まる。

$$Ave_U(a) = \frac{\sum_{C_m \in C_{in}(a)} f_{m,U}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \quad (11)$$

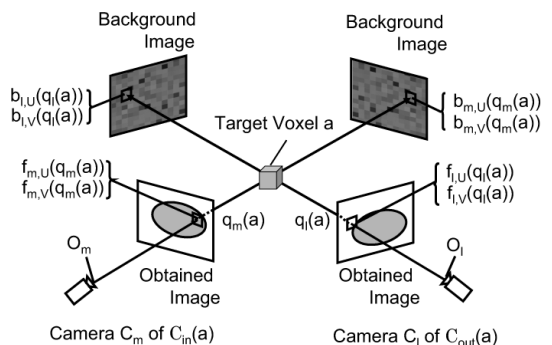


図 9 各画素値の関係
Fig. 9 Relationship among color values.

$$Ave_V(a) = \frac{\sum_{C_m \in C_{in}(a)} f_{m,V}(q_m(a))}{N_{vis}(a)} \quad (12)$$

4.4 シルエット欠損の検出と修復

カメラ $C_i \in C_{out}(a)$ において、ボクセル a の推定色 $Ave_U(a)$, $Ave_V(a)$ と a に対応する背景画像の画素の U, V の値 $b_{i,U}(q_i(a))$, $b_{i,V}(q_i(a))$ 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 $q_i(a)$ では、シルエット欠損が起きていると判定し、 $q_i(a)$ をシルエットに含めることとする。

$$|Ave_U(a) - b_{i,U}(q_i(a))| < U_{th}$$

または

$$|Ave_V(a) - b_{i,V}(q_i(a))| < V_{th} \quad (13)$$

5. 実験

5.1 実験環境

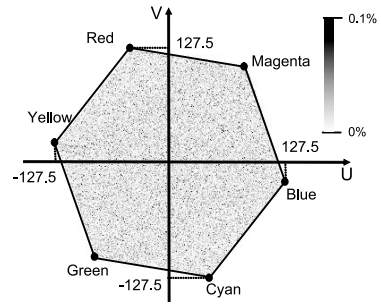
実験では表面に凹凸のある恐竜模型及び馬の模型を形状復元の対象とし、この物体を全方向から観測できるように配置された19台のカメラを用いて、各カメラの背景部分にランダムパターンを設置して観測を行った。ランダムパターンは各微小領域が UV 空間でランダムに選択された色をもつように作成し、カラープリンタで印刷したものをプラスチック板に固定した。

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に写るように調整した。また、シルエット抽出に用いるしきい値 V_{th} , U_{th} はいずれも10とし、欠損判定領域の決定に用いる N_{th} の値を2、 Y の目標値 Y_t を128とした。

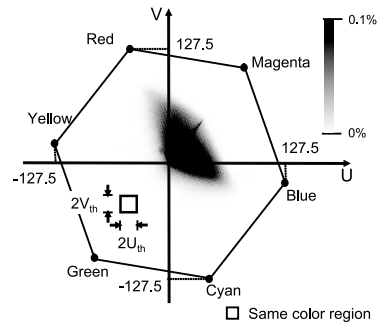
5.2 ランダムパターン背景とシルエット欠損

まずはじめに、ランダムパターンの設置によって生じるシルエット欠損の割合が、実際に3.で示したような割合となるのかについて調べた。

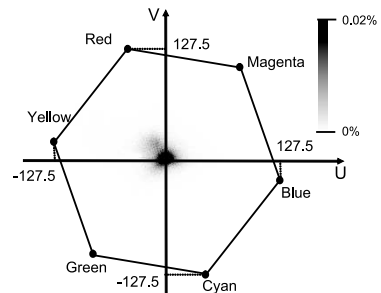
図11(a)及び図12(a)は対象物体の写真であり、図11(b)及び図12(b)は観測時に得られた取得画像のうちの1枚である。この取得画像に対して、 YUV 表色系においてシルエット領域を求めると、図11(c)及び図12(c)の白色で示す領域が得られる。このように面積の小さな少数のシルエット欠損しか観測されていないことから、ランダムパターン背景をもつ環境下においては、シルエット欠損は生じるものの、一定以上の割合の領域で正しくシルエットが抽出され、大き



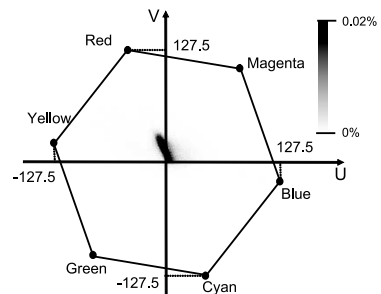
(a) Histogram of generated random pattern images



(b) Histogram of random pattern images obtained by cameras



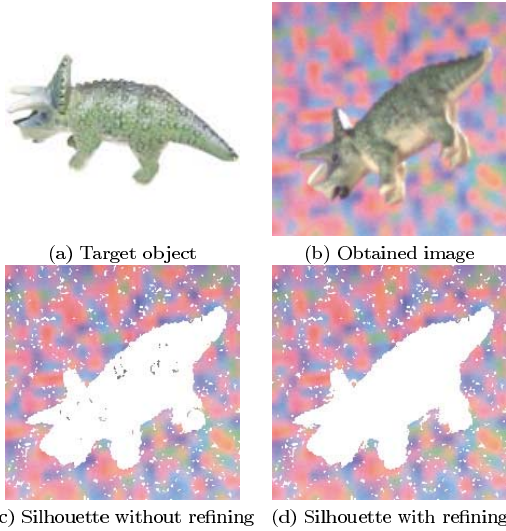
(c) Histogram of regions of Triceratops



(d) Histogram of regions of Horse

図10 ランダムパターン画像と物体投影領域のヒストグラム

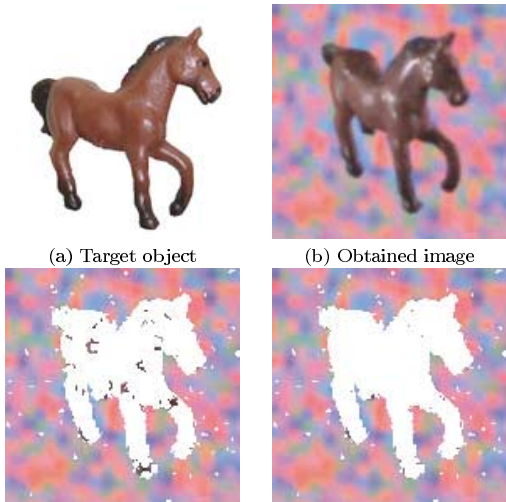
Fig. 10 Histograms of random pattern images and target objects.



(c) Silhouette without refining (d) Silhouette with refining

図 11 ランダムパターン背景下でのシルエット欠損修復 (恐竜模型)

Fig. 11 An example of silhouette refining with random pattern backgrounds. (Triceratops)



(c) Silhouette without refining (d) Silhouette with refining

図 12 ランダムパターン背景下でのシルエット欠損修復 (馬模型)

Fig. 12 An example of silhouette refining with random pattern backgrounds. (Horse)

な欠損は生じにくいことが確認できる。

実際に、19 台のカメラ画像のそれぞれについてシルエット欠損の割合を調べてみると、恐竜模型で平均 3.55% (最大 14.11%, 最小 0.87%), 馬の模型では平均 4.88% (最大 12.57%, 最小 2.23%) の面積を占め

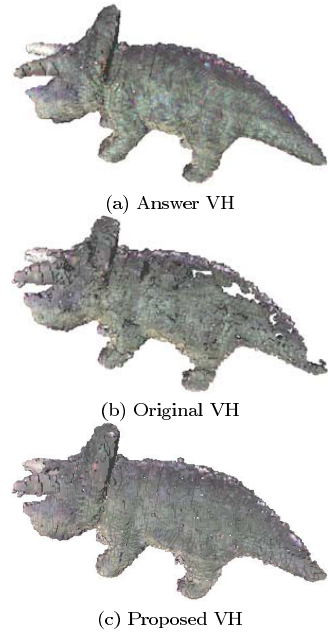


図 13 修復視体積の構築 (恐竜模型)
Fig. 13 VH with silhouette refining. (Triceratops)

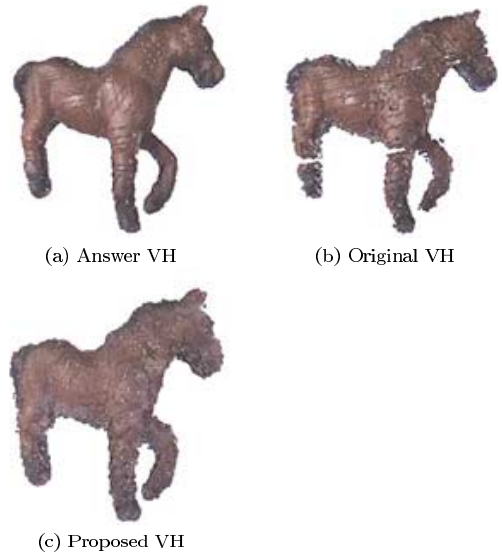


図 14 修復視体積の構築 (馬模型)
Fig. 14 VH with silhouette refining. (Horse)

る領域でシルエット欠損が起きていた。ただし、正解のシルエットには、手動で抽出したシルエットを用いた。式 (4) によれば、シルエット欠損が理論的には 5.21% 以下の領域で起こるはずなので、実際のシルエット欠損率は、いずれも平均でこれを下回ること

なる．ここで、最小値が理論値を下回っているのは、ランダムパターンを構成する各小領域がもつ色に偏りがあるためであると考えられる．計算機上で生成したランダムパターン画像ファイル 19 枚に含まれる色の UV 空間でのヒストグラムを図 10(a) に、実際にカメラで観測されるランダムパターンに含まれる色の UV 空間でのヒストグラムを図 10(b) に、画像上で恐竜模型と馬模型が投影された領域に含まれる色のヒストグラムをそれぞれ図 10(c)、図 10(d) に示す．ただし、図中の各点での濃淡値は、それぞれ画像全体に対する各色成分が占める面積の割合を示している．図 10(a) では、各領域の色が UV 空間のとり得る範囲にほぼ一様に分布していることが見てとれ、“理想的なランダムパターン”に近いことが分かる．一方、図 10(b) では各領域の色に偏りが見られる．これは生成されたランダムパターンの各領域の色が、プリンタやカメラの設定及び光源環境の影響によって偏ったためであると考えられる．しかしながら、図 10(b) に示す同一色領域の範囲に対して、観測される色の範囲はこれを十分にカバーする．つまり、3.2 に示したランダムパターンに要求される“多くのカメラで物体色と背景色が異なること”が期待できるといえる．実験に用いた二つの模型はいずれも、観測されるランダムパターンに含まれる色と一部重なる色をもつが、これらの模型に対してシルエット欠損を理論値以下に抑えることができている．このことから、観測されるランダムパターンに含まれる色に偏りが多少あっても、ランダムパターン背景に期待する“多くのカメラで物体色と背景色が異なる”という効果が得られるといえる．

また、求められたシルエットに対して、4. で述べたシルエット修復を行うと図 11(d) 及び図 12(d) 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．欠損修復後のシルエットでは、欠損領域が恐竜模型では平均 0.89% (最大 1.81%, 最小 0.09%), 馬の模型では平均 2.23% (最大 4.33%, 最小 0.97%) の面積を占めるとどまった．シルエットの欠損が完全に修復されないのは、上に述べたように、観測されるランダムパターン背景に色の偏りが起こっており、複数の画像で同じ背景色が観測されてしまったためであると考えられる．この問題は、プリンタやカメラ及び光源の設定を適切に行うことによって軽減されるものと考えられる．

5.3 提案手法で得られる視体積の評価

次に、5.1 で述べたシルエット欠損の修復が、視体

積の欠損の修復にどの程度貢献するのかについて調べた．図 13(a) 及び図 14(a) 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 13(b) 及び図 14(b) はランダムパターン背景下で通常の視体積交差法を用いたときに得られる視体積である．図 13(c) 及び図 14(c) は提案手法を適用して得られた視体積である．なお、各図は表示にあたって、それぞれの視体積に対しマーキングキューブ法 [13] を適用し、表面のパッチを構成して表示している．また、表面の色は各ボクセルに対する推定色を与えている．

図 13(b) に示した視体積では、背中や尻尾の部分で、図 14(b) に示した視体積では足の付け根の部分で大きな欠損をもつことが分かる．これは、1 台のカメラにおけるシルエット欠損が、全体の復元形状である視体積に影響を与えるためである．これに対して、図 13(c) や図 14(c) に示した提案手法を用いて得られた復元形状では、ほぼ欠損した領域だけが修復されていることが分かる．

更に、ランダムパターン背景を設定した環境下において、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、得られた修復視体積に対する数値評価を行った．結果を表 1 及び表 2 に示す．数値評価は、正解形状に含まれずそれぞれの視体積に含まれる余分なボクセル (additional voxels)、正解形状に含まれそれぞれの視体積に含まれない欠損しているボクセル (missing voxels)、更に、両者を足し合わせたもの (error voxels) を評価した．

表 1 に示すように、通常の視体積 (Original VH)

表 1 誤差ボクセル数の変化 (恐竜模型)
Table 1 Numbers of error voxels. (Triceratops)

	Additional voxels	Missing voxels	Error voxels
Original VH	8297 (3.1%)	153300 (57.5%)	161597 (60.6%)
Proposed VH	30068 (11.3%)	7252 (2.7%)	37320 (14.0%)

表 2 誤差ボクセル数の変化 (馬模型)
Table 2 Numbers of error voxels. (Horse)

	Additional voxels	Missing voxels	Error voxels
Original VH	5720 (2.5%)	153129 (67.2%)	158849 (69.8%)
Proposed VH	25297 (11.1%)	18051 (7.9%)	43348 (19.0%)

では、正解の視体積に対して 57.5%のボクセルが欠損しているが、修復視体積 (Proposed VH) では、通常の視体積 (Original VH) と比べて missing voxels が大幅に減少している。一方、誤った欠損修復によって additional voxels については増加している。しかし、両者の和である error voxels については、やはり通常の視体積に比べて大きく減少している。これらの結果から、シルエット欠損修復の割合がたとえわずかであっても、全体の統合結果である視体積の修復には大きく貢献することが分かる。

6. むすび

本研究では、視体積交差法を行う際に、ランダムパターンの背景を用いることにより、物体色が背景色を含む場合でも、物体形状の複雑さによらず実時間観測でシルエットを抽出する環境を実現した。更に、ランダムパターン背景を設置した環境下での視体積交差法では、物体の各部分に対する各カメラでの背景色が高精度で異なることを利用して、これに基づいて背景色がたまたま物体色と同じような色に設定されてしまった画素を検出することにより、シルエット欠損を修復した。

実験では、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、欠損の少ない復元形状が得られることを確認した。

今後の課題として、観測されるランダムパターン背景に色の偏りを軽減するために、プリンタやカメラ及び光源の設定を適切に行うことを挙げる。

文 献

- [1] W.N. Martin and J.K. Aggarwal, "Volumetric description of objects from multiple views," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.5, no.2, pp.150–158, 1983.
- [2] M. Iiyama, Y. Kameda, and M. Minoh, "4pi measurement system: A complete volume reconstruction system for freely-moving objects," *MFI2003*, pp.119–124, 2003.
- [3] T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and S. Nobuhara, "Real-time 3D shape reconstruction, dynamic 3D mesh deformation, and high fidelity visualization for 3D video," *Int. J. Computer Vision and Image Understanding*, vol.96, no.3, pp.393–434, 2004.
- [4] G.K.M. Cheung, S. Baker, and T. Kanade, "Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture," *Proc. CVPR*, vol.1, pp.77–84, 2003.
- [5] A.R. Smith and J.F. Blinn, "Blue screen matting," *Proc. SIGGRAPH '96*, pp.259–268, 1996.
- [6] H. Matsuoka, T. Takeuchi, H. Kitazawa, and A. Onozawa, "Representation of pseudo inter-reflection and transparency by considering characteristics of human vision," *Computer Graphics Forum (Eurographics2002)*, vol.21, pp.503–510, 2002.
- [7] 縣 弘樹, 山下 淳, 金子 透, "動的輪郭モデルを用いたストライプ状クロマキー," *MIRU2005*, pp.1185–1192, 2005.
- [8] J.D. Mulder and R. van Liere, "Fast perception-based depth of field rendering," *Proc. VRST2000*, pp.129–133, 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," *MIRU2002*, vol.II, pp.31–36, 2002.
- [10] D. Snow, P. Viola, and R. Zabih, "Exact voxel occupancy with graph cuts," *Proc. CVPR*, vol.1, pp.345–352, 2000.
- [11] S.M. Seitz and C.R. Dyer, "Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring," *Proc. CVPR*, pp.1067–1073, 1997.
- [12] K.N. Kutulakos and S.M. Seitz, "A theory of shape by space carving," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.38, pp.199–218, July-Aug. 2000.
- [13] W.E. Lorensen and H.E. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm," *Proc. SIGGRAPH '87*, vol.21, no.4, pp.163–169, 1987.

(平成 17 年 11 月 28 日受付, 18 年 4 月 30 日再受付)



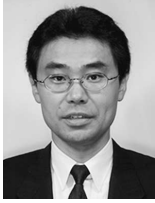
豊浦 正広 (学生員)

平 15 京大・工・情報卒。平 17 同大学院情報学研究所修士課程了。現在、同大学院情報学研究所博士後期課程在学中。コンピュータビジョン・三次元モデルの研究に従事。IEEE、日本バーチャルリアリティ学会各会員。



飯山 将晃 (正員)

平 10 京大・工・情報卒。平 15 同大学院情報学研究所博士後期研究指導認定退学。同年同大学学術情報メディアセンター助手。平 18 同大学経済学研究所講師。コンピュータビジョン・三次元データ処理の研究に従事。IEEE、情報処理学会各会員。



角所 考 (正員)

昭 63 名大・工・電気卒．平 5 阪大大学院工学研究科通信工学専攻博士課程了．平 4～6 日本学術振興会特別研究員．平 5～6 スタンフォード大学ロボティクス研究所客員研究員．平 6 大阪大学産業科学研究所助手．平 9 京都大学総合情報メディアセンター助教授．平 14 同大学学術情報メディアセンター助教授．視覚メディア処理，コミュニケーション，インタラクションに関する研究に従事．博士（工学）．IEEE，ACM，情報処理学会，人工知能学会各会員．



美濃 導彦 (正員)

昭 53 京大・工・情報卒．昭 58 同大学院博士課程了．同年工学部助手，昭 62～63 マサチューセッツ州立大学客員研究員，平元京都大学工学部付属高度情報開発実験施設助教授，平 7 同教授，平 9 京都大学総合情報メディアセンター教授，平 14 京都大学学術情報メディアセンター教授，画像処理，人工知能，知的コミュニケーション関係の研究に従事．工博，IEEE，ACM，情報処理学会，画像電子学会，日本ロボット学会各会員．