

複数計測による全周 3 次元モデル生成のための 複数テクスチャのシームレスな合成手法

猪瀬 健二^{†1} 川崎 洋^{†1} 古川 亮^{†2}

本論文では、ビデオカメラとプロジェクタを用いた 3 次元計測システムを利用し、対象物体の全周形状を生成する際、シームレスな全周テクスチャを生成する手法を提案する。全周形状は計測対象物体を回転台上に載せ回転させて複数回計測を行い、それを 1 つに統合することで獲得する。各計測ごとに見える方向や光源環境などが相対的に変化するため、撮影画像上における物体表面の輝度が変化し、複数回計測したテクスチャを単純に統合するだけでは、その継ぎ目部分にテクスチャの不連続が生じる。そこで、本論文では、距離画像、カラー画像を用いた物体表面の拡散反射率の推定により視点依存による輝度変化を減少させると同時に、継ぎ目部分において距離画像を利用した重み付きアルファ値を設定することで、シームレスな物体の全周テクスチャ画像の生成を実現する。本手法では、推定した拡散反射率とアルファ値を用いれば、複数形状を統合しなくてもシームレスなレンダリング結果を生成することができる。

Seamless Texture Synthesis Method of Multiple Textures for Constructing Entire 3D Shape from Multiple Scans

KENJI INOSE,^{†1} HIROSHI KAWASAKI^{†1}
and RYO FURUKAWA^{†2}

In this paper, we describe a seamless texture synthesis method of multiple view images for entire 3D shape modeling using a 3D measurement system which consists of a single video camera and a projector. To acquire the entire shape of the object, we use a rotation table and scan the object several times by rotating it. Since color of the object changes dependent on the camera view direction, simple integration of textures results in discontinuities between textures. In this paper, we propose an efficient method to achieve seamless integration of textures by estimating albedo using range and color images, and blending them using weighted alpha value near seams. In addition, multiple models can be rendered seamlessly without integrating them by using the esti-

mated albedo and alpha values.

1. はじめに

最近 3 次元計測システムを用いて多くの現存する物体を計測し、3 次元モデル化することがよく行われるようになってきており、様々な手法やシステムが提案され実際に用いられている^{1),2)}。その際、レーザやプロジェクタなどを利用したアクティブ方式の 3 次元計測システムが精度や効率の面で利用されている。一般にこのようなシステムでは 1 度の計測では 1 方向から見える部分の形状しか計測することができないため、異なる視点から獲得した形状を位置合わせすることで全周形状を獲得することが行われる。このように異なる視点から複数回計測する手法としては、複数台の計測装置を用いたり、対象物もしくは計測装置を動かしたりするなどの手法がある。こうして得られた複数の 3 次元データを、互いの相対的な位置情報を利用し位置合わせを行うことで全周形状に統合する。

このうち、テクスチャも同時に取得可能なシステムにおいて、複数回計測したテクスチャを統合し、全周のテクスチャを合成することが行われている。しかし、単純な合成手法では、レジストレーションずれ、解像度の違い、各計測時の光源環境の違いなどにより色の不連続などが発生する。そこで、多視点から複数のテクスチャ画像を撮影しておき、3 次元モデルの任意の仮想視点からの見えを表現する際に、その視点に近い視点で撮影した画像を他の視点から撮影した画像より優先的にテクスチャとして利用することで不連続を解消する手法³⁾⁻⁶⁾が提案されている。

この実現方法としては視点依存型の合成手法^{3),4)}や法線依存型の合成手法^{5),6)}などが提案されている。視点依存型の合成手法の 1 つに、各計測時のカメラ視点が仮想視点のカメラに近いものほど重みを大きくした重み付き合成手法があり、この手法によりテクスチャの合成の不連続を抑えることができる。法線依存型の合成手法としては、3 次元データの各 3 次元点、もしくは 3 角パッチに対して、カメラ視線と物体の法線のなす角が最も小さいカメラ視点での撮影画像をテクスチャとして使う手法がある。これは面積の大きなテクスチャ

^{†1} 埼玉大学工学部情報システム工学科

Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Saitama University

^{†2} 広島市立大学情報科学部情報メディア工学科

Faculty of Computer Science, Hiroshima City University

の方が情報量が多いという原理に基づいており⁷⁾、細かい模様が潰れにくいという利点がある。また、テクスチャずれを防ぐ方法として、幾何形状のエッジとテクスチャ画像のエッジを位置合わせすることによってテクスチャの模様などのつなぎ合わせを行う手法⁸⁾なども提案されている。

しかし、仮想視点画像上の各計測において、画像撮影時の照明環境が異なる場合には、異なるカメラ間の画像のテクスチャの継ぎ目が目立ってしまうことがある。また、視点依存型の合成手法と法線依存型の合成手法によって生成される色情報を線形に合成することでそれぞれの問題点を緩和する組合せ手法も提案されている⁵⁾。

しかしながら、これらの方法は光源環境が一定であることを前提としているため、撮影のたびに照明環境が異なる場合や対象物体に強い光沢がある場合には、輝度の不連続や、ハイライトが不自然に現れてしまうことがある。照明の影響を解消する手法として、撮影した画像のカラーヒストグラム解析による鏡面反射成分の分離手法⁹⁾や、ハイライトが観測されないような環境で 1 度撮影し、その輝度勾配を利用する手法¹⁰⁾、様々な高周波パターンを投影し、観測することで反射成分を分離する手法¹¹⁾などが提案されている。特に、幾何形状が既知のとき、画像中に観察された物体表面の明るさをもとに物体の反射特性や画像撮影時の光源環境などの各パラメータを効率的に推定する方法や、対象物の物体色を忠実に再現する方法が提案されている^{12)–15)}。

そこで、本論文では計測手法として、プロジェクタカメラシステムによる空間コード化法¹⁶⁾を用いて、テクスチャのシームレスな統合を実現する。このようなシステムでは距離画像として形状が取得できるためピクセル単位での 3 次元情報および光源の位置情報が獲得でき、これを用いることでピクセルベースでの物体色の推定が実現できる。

3 次元計測と同時に反射特性を推定する手法はこれまでに提案されている。文献 17) ではカメラと光源を 1 台ずつ用いて、様々な方向から対象物を計測することによって 3 次元形状と反射特性の推定を同時に行っている。本手法も同様に全周を計測するために回転テーブルを用いて様々な方向から計測する方法である。しかし、文献 17) が各計測のたびに光源を複数回動かして多くの入力画像が必要であるのに対して、提案方法は特に光源を動かす必要がなく、5~7 視点で計測するだけで反射特性を推定することができる。また、提案手法は複数形状の重なり部分において、滑らかに変化するアルファ値をテクスチャに設定することで、複数形状を 1 つに統合処理することなく、簡易に全周形状をテクスチャなどの不連続なく表示することができる。

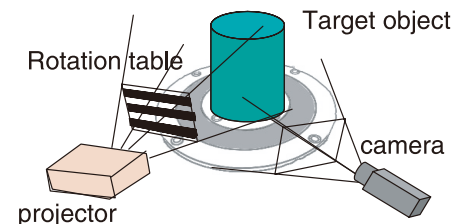


図 1 3 次元計測システムの構成
Fig. 1 Configuration of the 3D measurement system.

2. システムの概要

2.1 3 次元計測システムの構成

提案する手法では、物体の幾何情報と光源の位置情報によるテクスチャの輝度補正を行う。また、テクスチャ統合において、不連続の影響を軽減させるために、その不連続の発生に影響がある幾何形状を考慮してアルファ値を設定する。そこで、本論文では実装にあたり、物体の 3 次元情報および光源の位置情報を密に取得することが可能であるカメラとプロジェクタ各 1 台ずつで構成された 3 次元計測システムを用いる（図 1）。これは、対象物体にプロジェクタとカメラを向けプロジェクタから光パターンを投影し、これをカメラで撮影し解析することで 3 次元形状復元する手法である。

複数の形状を計測する際には、対象物体を回転台に載せて計測することにより、全周の形状を取得する。各計測で得られる形状は、テーブル上に取り付けられた LED を特徴点として自動で位置合わせされる。

2.2 3 次元計測から全周テクスチャ生成の流れ

計測は対象物体を回転台に載せて行う。全周テクスチャ生成の概要を図 2 を用いて説明する。まず、カメラ、プロジェクタを任意の位置に固定し、回転台を回すことで、複数視点からの計測を行う。これにより、各視点における距離画像とテクスチャ画像を取得することができる。次に、取得したテクスチャ画像に対して、テクスチャ合成時の継ぎ目の原因の 1 つである陰影や鏡面反射の除去を行い、視点依存のないアルベドテクスチャを生成する。同時に複雑な反射特性などの理由により、正しく陰影や鏡面反射の除去ができない領域における不連続の影響を軽減させるため、アルファ値を重なり部分に自動生成する。最後に得られたアルベドテクスチャとアルファ値を用いてブレンド処理し、全周テクスチャを生成する。

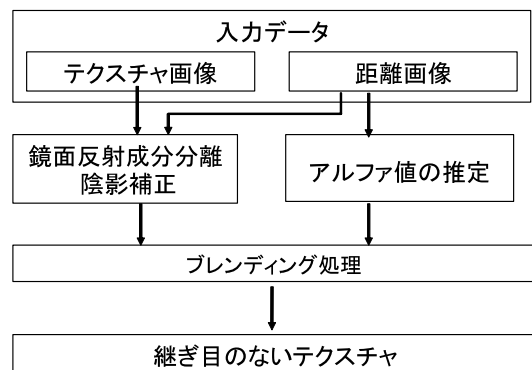


図 2 全周テクスチャ生成の流れ
Fig. 2 Flow of texture synthesis.

3. 鏡面反射成分分離および陰影の除去

3 次元計測によって得られるデータの例を図 3 (a) から図 3 (d) に示す。これは 2 つの視点から計測したテクスチャ画像と距離画像である。計測によって得られる色情報 (RGB の 3 色の強度), 幾何情報を用いて計測対象物の拡散反射率を推定し, 鏡面反射成分の分離, 陰影の除去を行う。

3.1 反射特性モデル

本研究では観測される物体表面の輝度値は拡散反射成分と鏡面反射成分の和で表現される 2 色性反射モデルに基づいて, 反射特性の解析を行う。本手法では, 拡散反射成分に関しては以下の Lambert モデルを利用する。拡散反射は視点位置によらず一定である。

$$I_d = K_d L \cdot N \quad (1)$$

ここで, I_d は拡散反射成分, N は物体表面の法線方向ベクトル, L は光源ベクトル, K_d は拡散反射率である (図 4 参照)。鏡面反射成分を表すモデルとして今回, 以下の式 (2) で表される Torrance-Sparrow モデル²¹⁾ を利用した。提案手法は特定の反射モデルを仮定しないため, このほかにも Phong や Blinn などのモデルを利用することができる。

$$I_s = K_s \frac{\exp \frac{-\alpha^2}{2\sigma^2}}{N \cdot E} \quad (2)$$



図 3 3 次元計測によって得られるカラー画像と距離画像の例。(a) 視点 0, テクスチャ画像, (b) 視点 0, 距離画像, (c) 視点 1, テクスチャ画像, (d) 視点 1, 距離画像

Fig. 3 Examples of color and range image acquired by the 3D measurement system. (a) and (b) are captured from same view point, and (c) and (d) are captured from another view point.

ここで, I_s は鏡面反射成分, E は視線方向ベクトル, N は物体表面法線ベクトル, L は光源ベクトル, K_s は鏡面反射率である (図 4 参照)。 σ は物体表面の粗さ, H は L と E のなす角の 2 等分ベクトルであり, α は H と N のなす角で, $\alpha = \cos^{-1}(N \cdot H)$ である。

また, 式 (2) から明らかなように鏡面反射成分は $N \cdot H$ の値が大きい領域で強く観測さ

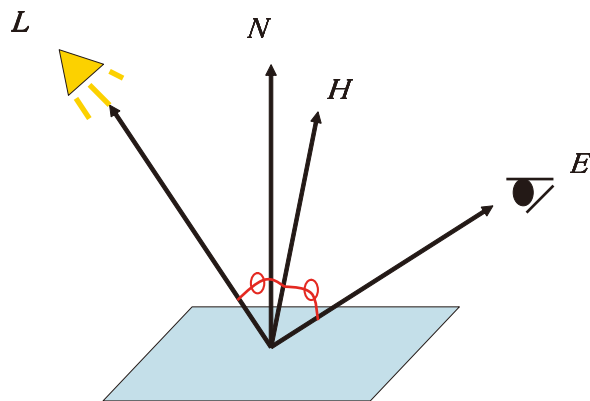


図 4 光源と視点の関係

Fig. 4 Relationship between light source and view direction.

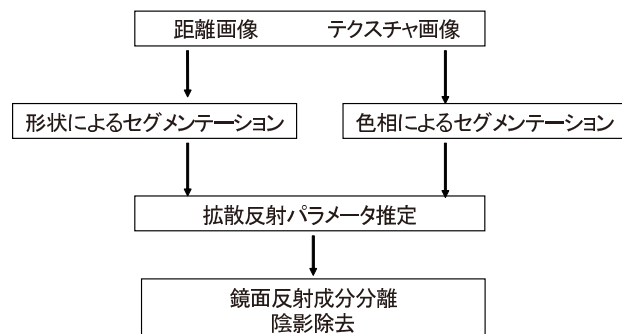


図 5 鏡面反射成分分離，陰影除去の流れ

Fig. 5 Flow of removing specular and unshading.

れ，一方で， $N \cdot H$ が小さい領域では，ほとんどその影響を無視できるほど小さくなるため，後者の領域を用いて効率良く拡散反射率を推定することができる．

3.2 分離手法の概要

処理の概要を図 5 を用いて述べる．一般に同じ材質であれば物体表面は同じ反射特性を持つため，各材質ごとにそれぞれ拡散反射率を推定すると効率が良い．そこで色情報を利用したセグメンテーション処理により，それぞれの領域に分離する．また，鏡面反射成分のな

い領域を用いて拡散反射率を推定するために，3.1 節で述べた性質を利用して $N \cdot H$ の大きな領域をはじめに検出し除外しておく．これらの処理により各材質ごとの拡散反射率が求まるため，これを用いて鏡面反射成分の分離や陰影の除去を行う．

3.3 形状によるセグメンテーション

拡散反射率推定に利用する領域は鏡面反射の影響が無視できる画素のみを用いると推定するパラメータが少なくすみ，効率が良い．そこで 3.1 節で述べたように鏡面反射ピークとなる $N \cdot H$ の値が大きくなる画素領域を除外する．提案手法では距離画像とテクスチャ画像が完全に対応しているため，距離画像を用いてこれを計算することでピクセル単位でのセグメンテーションが実現できる．具体的には当該ピクセルに対応する距離画像において 7×7 近傍の最大 49 点を用いて主成分分析することで法線を計算し，これを用いて $N \cdot H$ を計算している．

3.4 色情報によるセグメンテーション

画像上の各ピクセル点に対して，領域番号 λ を次式のように付与する．

(i) 3 次元点がないときはラベリングをしないため

$$\lambda(x) = \text{nodata}$$

(ii) 3 次元点があるとき

a) 近傍に $N \cdot H > t_{NH}$ となるピクセル点があるとき

この点においては，後述の補間を行うものとし，以下のようにラベリングする．ただし， t_{NH} は鏡面反射成分の影響が強いかを判断する閾値である．

$$\lambda(x) = \text{specular}$$

b) $L \cdot N > t_{LN}$ かつ $I < t_I$ のとき，拡散反射成分が小さく，物体色は黒と考えられるためラベリングをしない．ただし， t_{LN} や t_I は，拡散反射成分の大きさを判断する閾値である．

$$\lambda(x) = \text{nodata}$$

c) それ以外するとき，拡散反射率 K_d をピクセルごとに算出し，その RGB 値を $L^*a^*b^*$ 表色系¹⁸⁾ の値に変換し，その値をもとに k-平均法クラスタリングによって領域番号を定める．

$$\lambda(x) = i \quad (i = 0, 1, \dots, k-1)$$

K_d は式 (1) により

$$K_d = \frac{I}{L \cdot N}$$

として計算する．クラスタリングに関しては，色相，彩度の情報のみでは，ある程度正しくクラスタリング可能であるが，材質の違いによる明るさの変化を判別することができない．

そこで、ピクセルごとの K_d を求め、明るさの次元も考慮するようにした。また、クラスタリングにおいて利用する色空間として、RGB 表色系を用いると暗い赤と暗い緑など明るさが小さい場合に同じクラスタにされることがあり、HSI 表色系では、黒色や白色の表面では色相が不安定になりやすいため、色の間の距離が均等であり、人間に知覚される色の違いとよりよく対応している $L^*a^*b^*$ 表色系を利用する。また、k-平均法クラスタリングではクラスタ数 k をあらかじめ定める必要があるが、本実験では、知覚的に認識できる色の分類の数よりも十分に大きい数とし、要素数の小さいクラスタを結合することで本来の物体色の分類数にある程度近づけるようにした。これは初期クラスタ数 k が材質の種類より小さいと本来別の材質どうしの要素が同一クラスタになってしまい、拡散反射率が真値と違う値になってしまう恐れがあるためである。

3.5 拡散反射率推定

3.4 節の方法で番号を割り当てられた領域ごとに拡散反射率を求める。領域ごとに、ピクセルごとに求めた K_d のヒストグラムをとり、そのピークをその領域の拡散反射率 $K_d(i)$ とする。

3.6 ハイライト領域の補間

3.4 節で述べたセグメンテーションによってラベリングされた点の中で、 $\lambda(x) = specular$ である画素 x は、鏡面反射成分の影響を強く受けているため正しく拡散反射率を推定できない。そこで、画素 x に対応する、他の視点から計測した画像上での画素を探索し、その画素が *specular* とラベリングされていないものを利用して、画素 x の拡散反射率を推定する。対応点探索は、すべての視点における、それぞれの距離画像を用いて各ピクセルの 3 次元座標を計算し、これを注目している視点におけるカメラ画像に投影することで実現できる。

図 6 (b) は図 6 (a) で示す視点 5 の画像を視点 0 から見た画像に変換したものである。また図 6 (c) では対象物の正面は鏡面反射成分が強いため、拡散反射の推定領域から除外されている。そこで、図 6 (b) と図 6 (c) を重ねることで図 6 (d) のように、鏡面部分の拡散反射率を得ることができる。また、他のどの視点からも補間されなかったピクセルに関しては、近傍ピクセルを領域拡張処理することで推定を行う。実験では、全周を 6~7 回で計測した場合、そのような領域はセルフオクルージョン周辺など狭い領域に限られていたため違和感なく推定することができたが、サンプル数が少ない場合などには、鏡面反射部分でも何らかの手段でラベリングする必要があると考えられ、これは今後の課題である。

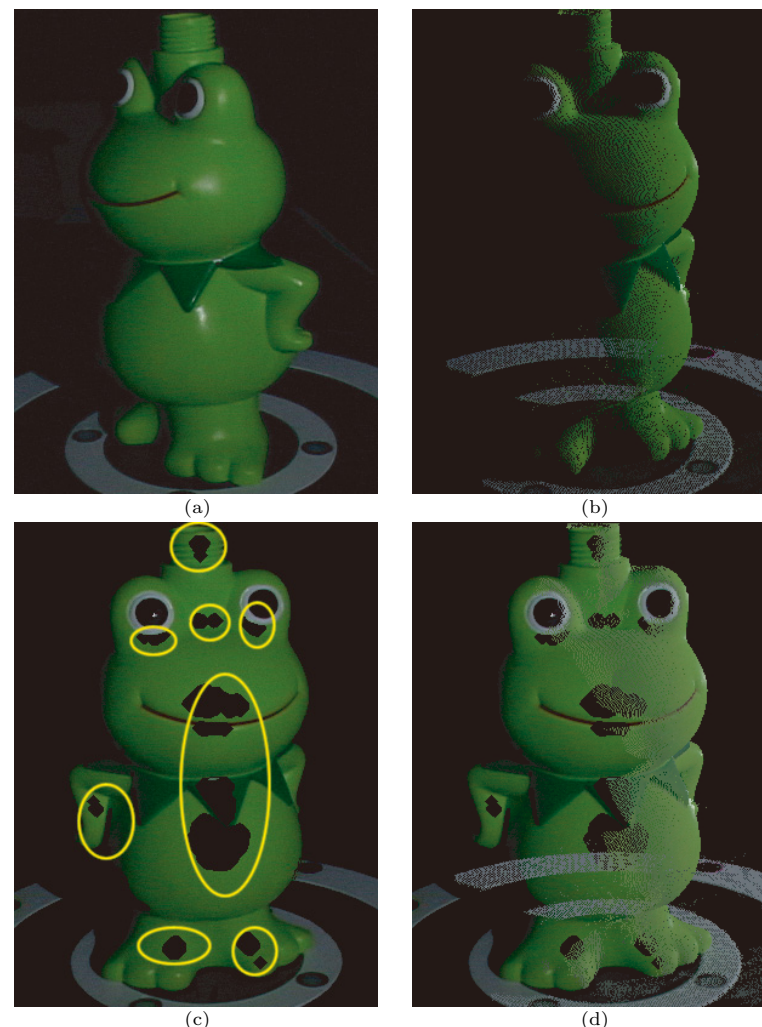


図 6 鏡面反射領域の補間。(a) 視点 5 の撮影画像、(b) 視点 5 の点を視点 0 に射影した画像、(c) ハイライト領域除外画像（黄色い楕円の内部）、(d) 射影した画像を重ねた画像

Fig. 6 Interpolation of specular areas. (a) is captured image from view 5 and (b) is warped image to view 0 from view 5. (c) is the specular excluded image (inside yellow circle). (d) is the overlapped image.

4. アルファ値の設定

4.1 設定手法の概要

3 章で述べた方法で求めた拡散反射率を用いるだけでは、ノイズなどによる推定誤差の影響により、統合時に不連続が発生する。この原因として主に次の 3 つが考えられる。図 7 を用いてこれを説明する。(A) 統合後の形状とテクスチャのずれ、(B) サンプル不足によるテクスチャの歪みや不鮮明化、(C) 拡散反射成分が小さいことにより、拡散反射パラメータが正しく推定されない、などである。

(A) は、形状の境界部分やジャンプエッジ部分に、(B) は視線と形状の法線が直交する部分（そのような場所はたいていは形状の縁である）に発生する。また (C) については、 $L \cdot N$ が小さい場所、すなわち距離画像の輪郭部で主に発生しやすい。このように (A) ~ (C) はいずれも、計測された形状の縁の部分、すなわち距離画像上におけるエッジ部分に発生する。そこで、このような部分のアルファ値（不透明度）が小さくなるようにアルファ値を設定する。

4.2 3 次元エッジの検出

4.1 節で述べた不連続が発生する領域は、距離画像上でエッジ検出することで、その領域を自動選択することができる。エッジ検出方法としては、距離画像の濃淡の変化に対して、Sobel フィルタや Laplacian フィルタなどのエッジ検出フィルタを用いることによって検出が可能である。

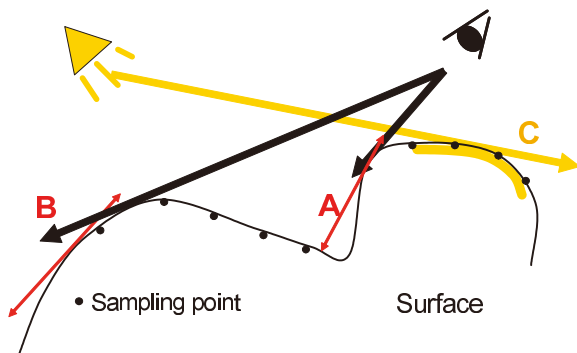


図 7 統合の不連続発生の原因

Fig. 7 Reason of discontinuities on overlapped area.

4.3 アルファ値の計算方法

4.1 節で述べた原因による不連続を緩和するために、検出したエッジ部分から物体内部に向かってアルファ値が増加するようにアルファ値を設定する。これは、エッジ部分までの距離および、そのエッジの強度に応じて設定する。エッジの強度を考慮することで、直方体の稜線など形状の不連続は発生しないものの、弱いエッジとして検出される部分については、アルファ値を大きく設定することができる。アルファ値をエッジ部分から物体内部に向かって段階的に変化させるためには、エッジ検出画像からのモーフィング処理を行うことによって実現できる。本手法では、距離変換¹⁸⁾と同様の処理をエッジ検出画像に施すことによってアルファ値を算出した。

距離変換によって生成される画像について図 8 に示す。図 8 の (a) は市街地距離による距離変換画像の例である。この処理によって各画素に背景（画素値 0）からの距離が付与される。本手法では、距離画像に対して、3 次元点が存在しない画素を背景として距離変換を行うものとし、図 8 (b) のように、エッジ検出後の画像を用いて、そのエッジ強度に応じてあらかじめ数値を与えておき距離変換を行うことで内部エッジ付近にもアルファ値が設定されるアルゴリズムとした。また、エッジ検出フィルタ処理では、ノイズ部分も検出することがあるので、閾値を設定し、その閾値以下のエッジ強度は用いないものとした。したがって、本論文における距離変換のための初期値を次式のように定める。

$$f_{uv} = \begin{cases} 0, & \text{if 3D point does not exists.} \\ m, & \text{else if } Edge_{uv} < threshold \\ m * (1 - Edge_{uv}/Edge_{Max}), & \text{else if } Edge_{uv} \geq threshold \end{cases} \quad (3)$$

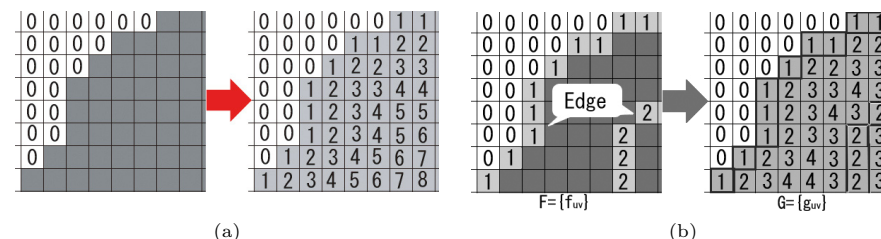


図 8 距離変換画像。(a) エッジを考慮しない距離変換、(b) エッジの強度を考慮した距離変換

Fig. 8 Distance transformation images. (a) distance transformation, (b) distance transformation with edge.

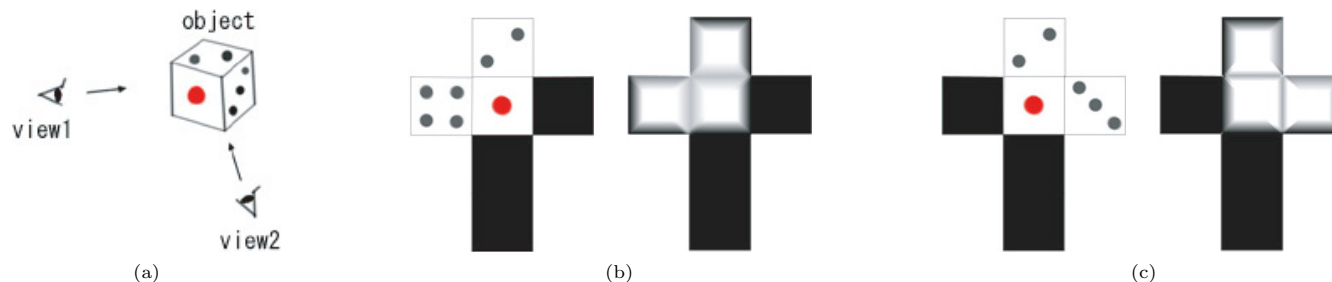


図 9 テクスチャ取得の概要．(a) 視点と物体の関係，(b) 視点 1 より取得されるテクスチャとアルファ画像，(c) 視点 2 より取得されるテクスチャとアルファ画像
Fig.9 Flow of acquisition of textures. (a) relationship between view direction and object, (b) a set of texture and alpha map acquired from view1 and (c) a set of texture and alpha map acquired from view2.

ここで， $Edge_{uv}$ は距離画像に対してエッジ検出処理を施した画像， $Edge_{Max}$ はそのエッジ検出画像の画素値の最大値である．距離変換は通常，整数値を前提とした処理となっているため，適当な m を用いてエッジを整数にする．今回は m を 100 と定めた．次に f_{uv} を初期値として距離変換画像 $G = \{g_{uv}\}$ を生成する．この G に対して次式の変換を施すことによってアルファ画像 $A = \{a_{uv}\}$ を生成する．

$$a_{uv} = \begin{cases} 0, & \text{if } g_{uv} = 0 \\ 1, & \text{else if } g_{uv} \geq d \\ g_{uv}/d, & \text{else if } g_{uv} < d \end{cases} \quad (4)$$

ここで d はエッジからのアルファ値の変化率を決定するパラメータである．したがって d が大きければ緩やかにアルファ値は変化し，小さければ急激に変化する．本実験では計測対象物が約 300×300 ピクセル程度に収まるものに対して， $d = 100$ と定めて実験を行った．

5. 形状統合によるテクスチャの統合

4 章までの手法によって得られるテクスチャとアルファ画像を用いれば，特に形状を統合しなくても，それぞれの形状を同じ座標系にレンダリングするだけでグラフィックライブラリの処理によるアルファブレンディング処理によりテクスチャの不連続を解消することができる．一方で，形状を統合した 3 次元ポリゴンのためのテクスチャを 1 つに合成する必要性もある．以下にテクスチャ合成の手順について説明する．

(1) 統合ポリゴンから，そのポリゴンのテクスチャおよびアルファ値を各視点ごとに取得

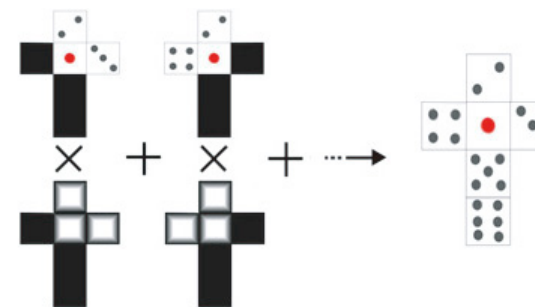


図 10 テクスチャのブレンディング
Fig.10 Blending of textures.

する (図 9 (a))．これにより図 9 (b)，(c) のようなテクスチャとアルファ画像の画像セットが各視点ごとに得られる．

(2) 最終的に生成する 1 枚の統合テクスチャ画像の各ピクセルごとに，統合に用いる各視点のアルファ値の総和で正規化し，アルファブレンディングによる合成を行う．合成の様子を図 10 に示す．

これにより統合されたテクスチャを得ることができる．

6. 実験

対象物体を回転台に載せ，回転させながら複数回計測し，得られた全周 3 次元形状のため

の統合テクスチャを生成する．前章までで図示してきたプラスチックの蛙の人形を対象物とした実験の結果を次節以降に示す．また，他の合成手法との比較実験を 6.7 節以降に示す．

6.1 鏡面反射領域の除外

3.3 節の手法で拡散反射パラメータ推定に利用しない領域を除去する．図 11 に拡散反射率推定までの処理結果を示す．図 11 (a) の計測シーンにおける鏡面ピーク検出結果を図 11 (b) に示す．拡散反射率の推定に利用しない鏡面ピーク領域を赤色で示してある．空間コード化

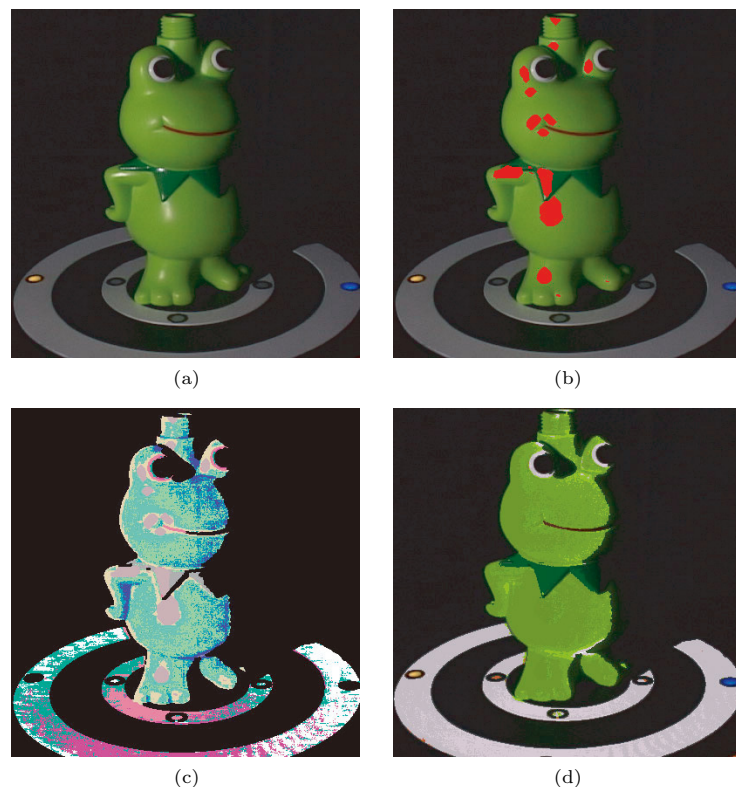


図 11 計測した画像への処理結果画像．(a) テクスチャ画像，(b) 鏡面反射ピーク部分，(c) 領域分割画像，(d) 拡散反射率

Fig. 11 The result images of measurement at one scene. (a) texture image, (b) specular reflection area, (c) segmented image and (d) estimated diffuse parameters.

法により得られた距離画像を用いることで，検出領域が鏡面反射ピーク部分とほぼ一致していることが分かる．

6.2 セグメンテーション

テクスチャ画像を 3.4 節の手法で色相に基づきセグメンテーションを行った結果を図 11 (c) に示す．セグメンテーション結果をラベルごとに別の色で表示してある．図 11 (c) より，クラスタの数が直感的に認知する色の種類より多いが，色の種類ごとに別のクラスタとなった．これは，知覚できる物体色の種類数よりも多くのクラスタ数を設定したためである．しかし，3.5 節の手法により推定した各クラスタごとの拡散反射率を示す図 11 (d) を見ると，同一の物体色領域に属するはずの各クラスタにおいてそれぞれ近い推定結果が得られていることが確認でき，クラスタ数を若干大きく設定しても最終的な生成結果にはあまり影響しないといえる．

6.3 拡散反射パラメータ推定

3.5 節に述べた方法による拡散反射パラメータ推定の実験を行った．図 11 (d) に推定した拡散反射率を示す．図 11 (d) において，蛙の腹部と足の間を見ると，他の領域よりも明るい色が求まっている．これは拡散反射に比べ，2 次反射などの反射成分が強く現れ，Lambert モデルの仮定が成り立たない領域となってしまう，誤差が大きくなってしまっているためである．これらの推定誤差の大きい影響による不連続は，アルファ値の設定により解消される．また，この得られた拡散反射率と光源および法線情報を用いて推定した拡散反射成分を図 12 (a) に示す．図 12 (b) は実測値と推定した拡散反射成分との差分を求めることによって得られた鏡面反射成分である．

図 12 (b) では鏡面反射成分が物体色の補色になっているように見える．これは撮影時にハイライト領域で観測値が飽和していたためである．ただし，鏡面反射成分が正しく取得できていない場合でも，本手法では鏡面反射成分の大きい領域は拡散反射率推定において直接利用されていないため，推定結果に大きな影響はない．

また，鏡面反射が観測される場所の輝度値をプロットしたものを図 13 の (b) ~ (d) に示す．点線で表されているのが観測された輝度値であり，実線で表されているのが，推定した拡散反射成分である．図より鏡面反射のない部分において正しく推定できていることが分かる．

6.4 アルファ値の推定

4 章の手法を用いて，各計測シーンごとの対象テクスチャのアルファ画像を作成する．図 14 (a) は 4.2 節の手法により距離画像より 3 次元エッジを検出し，エッジ強度が閾値以下

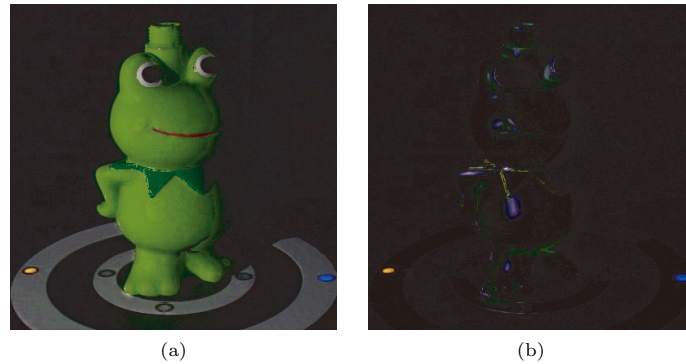


図 12 分離結果画像。(a) 拡散反射成分と (b) 鏡面反射成分

Fig. 12 Separated images. (a) diffuse component and (b) specular component.

を切り捨てたものである。奥行きの変化が大きいところほど白く表示されている。図 14 (b) は検出された 3 次元エッジ検出画像をもとに 4.3 節のモーフィング処理によって生成したアルファ値をグレースケールで表したものである。エッジの部分から内側に向かうに従い、透明度が減少して（色は白くなって）いるのが分かる。

6.5 全周統合結果

提案手法により全周のテクスチャを統合した結果を図 15 に示す。図 15 (a) はテクスチャ統合前の 1 枚のテクスチャをマッピングしたもの、図 15 (b) は提案手法によって統合したテクスチャをマッピングしたもの、図 15 (c) は仮想的に光源環境を設定して CG レンダリングした結果である。鏡面反射率や物体表面粗さなど本論文で推定されないパラメータに関しては手動で設定した。鏡面反射モデルには Phong モデルを用いた。提案手法により見た目に違和感のないテクスチャ統合が実現できていることが分かる。しかしながら、図 15 (b) を見ると、アルファブレンディングにより、図 15 (a) の下腹部に見られるような推定誤差による極端な不連続は緩和できたが、どの計測シーンからも拡散反射成分が他の反射成分に比べ小さく、またアルファ値もどの視点からも小さい値が与えられたため、重み付き合成の利点を活かすことができていなかった。そのため、本来の材質よりも明るい色になり不連続が残ってしまった。また図 15 (d) のアヒルの置物の統合結果では、2 次反射により、くちばしにアヒルの胴体の色が映り込んだ画像があったため、色相によるセグメンテーションが正しく行われず、くちばし付近に違和感が残っていることが分かる。これらの解消は今後の課題である。

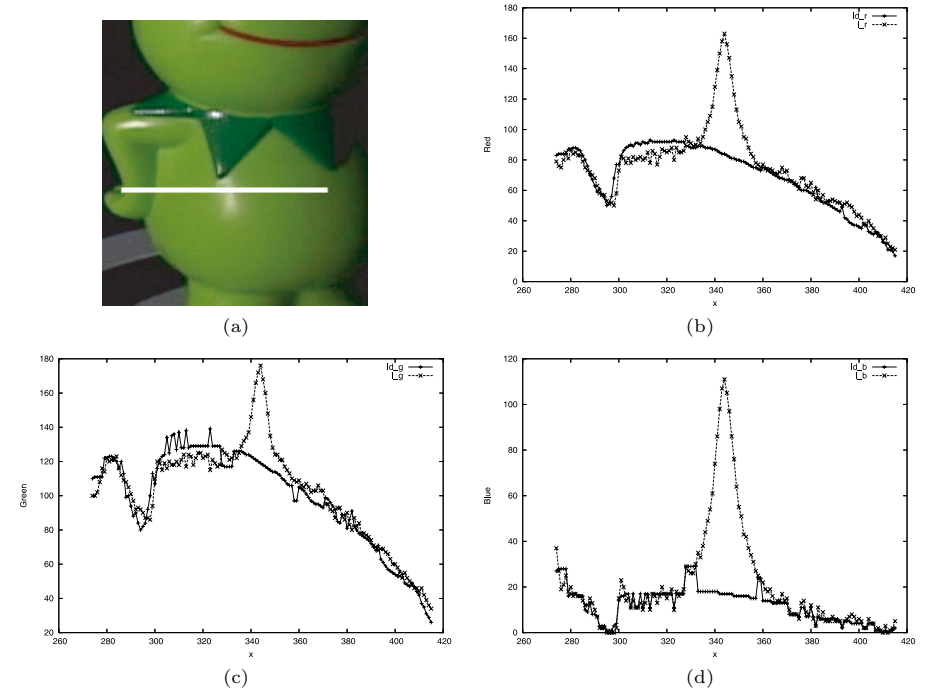


図 13 推定値と実測値の比較。(a) プロットした直線、(b) 輝度の赤成分、(c) 輝度の緑成分、(d) 輝度の青成分
Fig. 13 Comparison between estimated parameter and actual value. (a) plotted line, (b) intensity red, (c) intensity green and (d) intensity blue.

6.6 色数の多い物体での統合結果

以上の実験では、テクスチャがほぼ単色の物体を用いていたため、より物体色の多い計測対象物を用いて提案手法によるテクスチャ統合の実験を行った。実験結果を以下に示す。図 16 (a) が計測対象物であるプラスチック製のじょうろのおもちゃを撮影した画像である。図 16 (b) から図 16 (d) までは順に、距離画像、閾値処理後の 3 次元エッジ検出画像、アルファ画像、図 17 (a) から図 17 (d) までは、拡散反射率、セグメンテーション結果を色づけた画像、拡散反射成分、鏡面反射成分を図示しており、図 18 が統合後の 3 次元モデルのレンダリング結果である。鏡面反射成分は Phong モデルを用いて手動で生成した。

図 17 (c) の同じ青色の材質である領域に注目すると、クラスタごとに若干色に違いが現れ

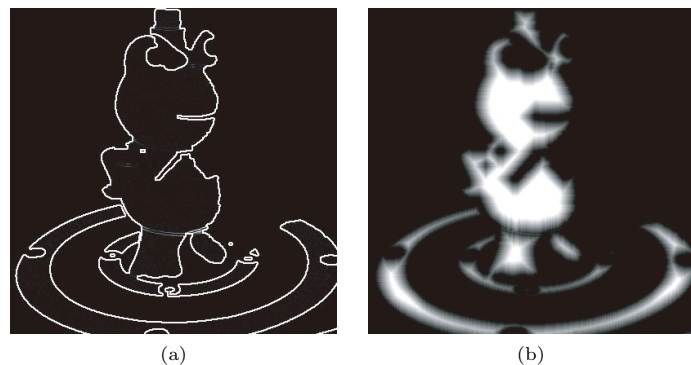


図 14 (a) 3 次元エッジ検出画像, (b) 算出されたアルファ画像
Fig. 14 (a) edges detection and (b) calculated alpha parameters.

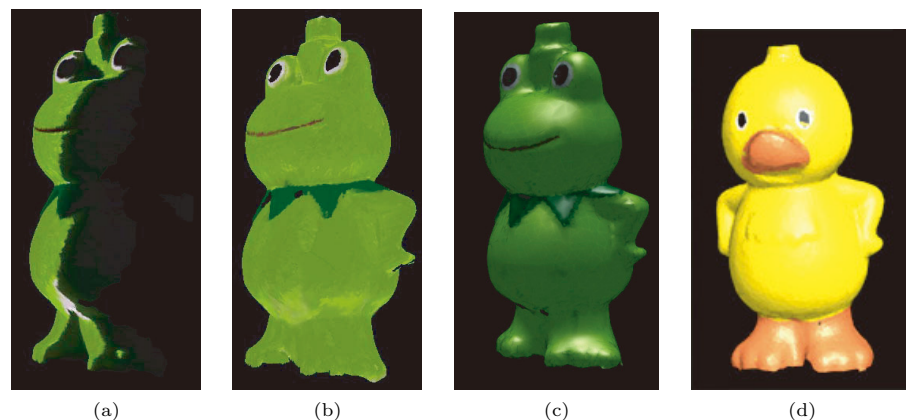


図 15 統合結果. (a) テクスチャ統合前のテクスチャ 1 枚をマッピングしたもの, (b) 提案手法によって統合したテクスチャをマッピングしたもの, (c) (b) を仮想的に光源環境を設定してレンダリングしたもの, (d) 別のレンダリング結果

Fig. 15 Integration result. (a) a texture mapped image before texture integration, (b) the integrated texture mapped image, (c) rendered image of (b) and (d) another rendered result whose texture is generated by the proposed method.

ている．これは 2 次反射や環境光など仮定したモデルでは考慮されていない成分の影響が拡散反射成分の小さい領域で相対的に大きいことが原因と考えられる．しかしながら図 18

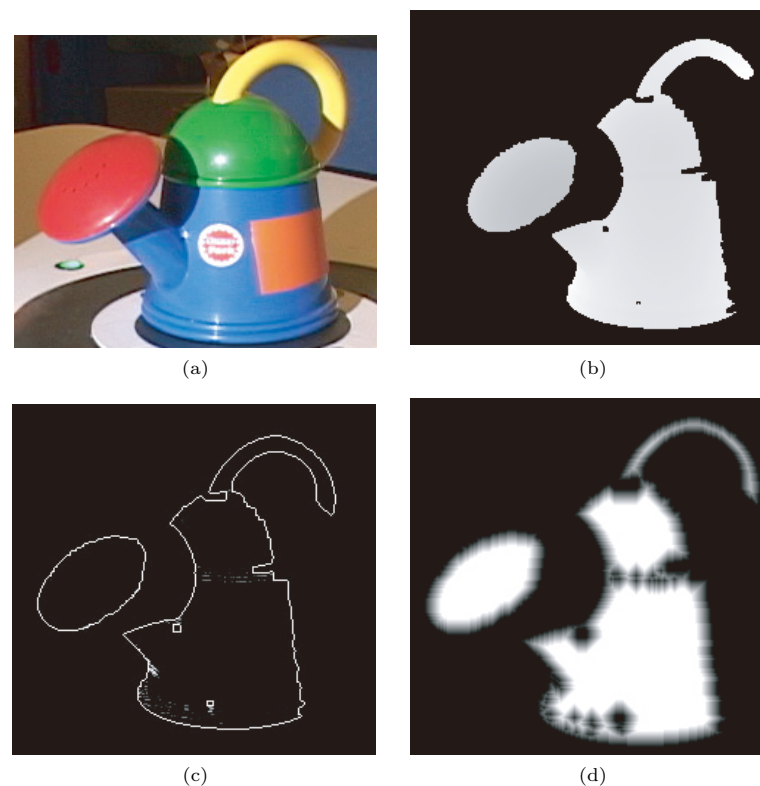


図 16 計測した画像とアルファ値算出結果. (a) テクスチャ画像, (b) 距離画像, (c) 3 次元エッジ検出画像, (d) アルファ画像

Fig. 16 The images of measurement and the result images for calculating alpha parameters.
(a) texture image, (b) range image, (c) edges detection result and (d) alpha image.

の統合後の最終的なレンダリング結果を見ると、アルファブレンディング処理により、テクスチャの不連続はほとんど観測されず、提案したアルファブレンディングによる合成手法が、境界線の無いテクスチャ合成に有効に機能していることが分かる．また、図 17 (d) では図 12 (b) と同様の理由で鏡面反射成分が物体色の補色になっていることが分かる．より精度の高い反射特性パラメータの推定をする場合には、このような問題を解決する必要がある、これは今後の課題である．

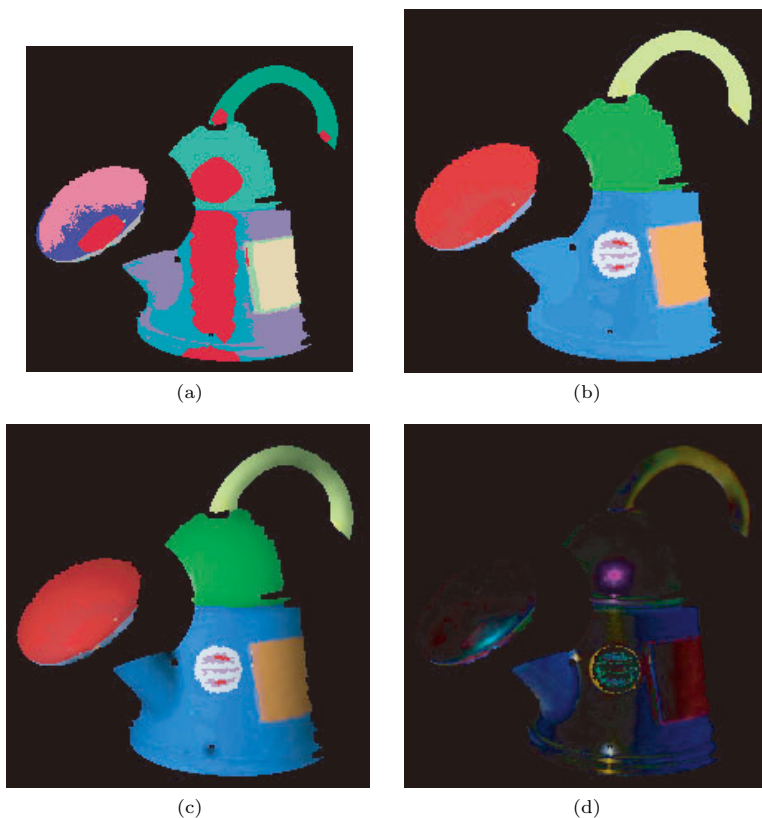


図 17 拡散反射率推定のための処理結果画像。(a) 領域分割画像, (b) 拡散反射率, (c) 拡散反射成分, (d) 鏡面反射成分

Fig. 17 The result images for estimating diffuse reflectance parameters. (a) segmented image, (b) estimated diffuse parameter, (c) diffuse reflectance component and (d) specular reflectance component.

6.7 ブレンディングの有効性の検証

図 7 で示した (A), (B), (C) の領域において, テクスチャ合成が有効に機能しているかを検証するための実験を行った。



図 18 統合後のレンダリング結果
Fig. 18 Rendered image after integration.



図 19 ブロックの計測
Fig. 19 Scanning the blocks.

6.7.1 (A) についての検証

図 19 に示すブロックを内部エッジが生じるように配置し計測を行った。

図 20 が提案手法によるアルファ値を用いた生成結果, 図 21 が一定の値をアルファ値に割り当てた生成例である。図 20 (b) および図 21 (b) を見ると, 単純な合成手法では青いブロックに赤いテクスチャが, 赤いブロックには青いテクスチャがずれてマッピングされているが, 提案手法による合成では, これらが軽減されることが確認できる。

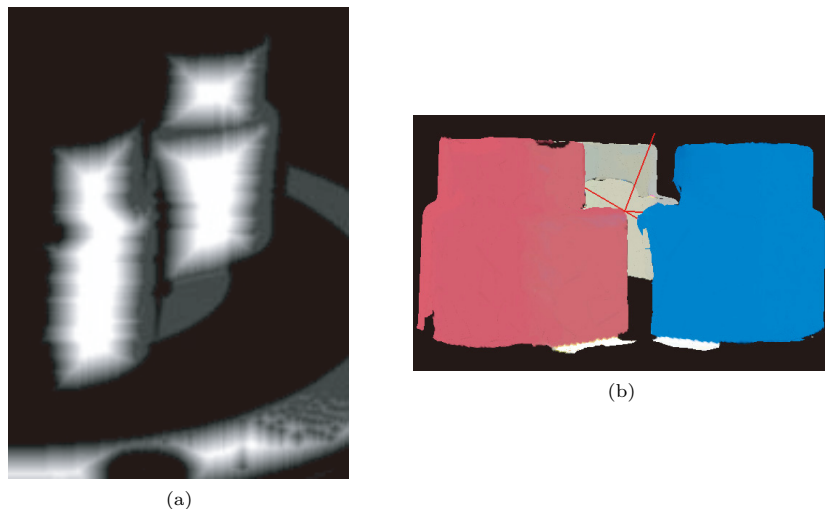


図 20 提案手法による合成結果．(a) 生成したアルファ値，(b) 合成結果

Fig. 20 The result of the proposed method blending. (a) the generated alpha values and (b) the result of the proposed method's blending.

6.7.2 (B) についての検証

次に模様のある物体を用いて、物体の縁の部分におけるテクスチャの歪みについて検証した。計測対象物は図 22 に示す筒とした。実験では 6 方向から計測を行った。図 23 は計測した 2 視点での拡散反射率の推定結果と生成したアルファ値を任意視点からの見えに変換したものである。図 23 (a), (b) が計測視点 1 における推定結果、図 23 (c), (d) が計測視点 2 における推定結果を変換したものである。図 24 (a) にアルファブレンディングにより合成した結果を示す。

図 24 (b) は各テクスチャ画像を単純に同じアルファ値で合成した結果である。丸線で囲っている部分を見ると、図 24 (b) では白線模様がにじんでいるのに対して提案手法ではにじみの少ないことが確認できる。これは図 23 (c) に示されるように視点 1 において、この部分が計測された形状の縁の部分であったためテクスチャが引き伸ばされ、単純な合成ではぼやけてしまうのに対し、提案手法ではこの縁の部分のアルファ値が小さくなるため引き伸ばされたテクスチャの影響が軽減されたためである。

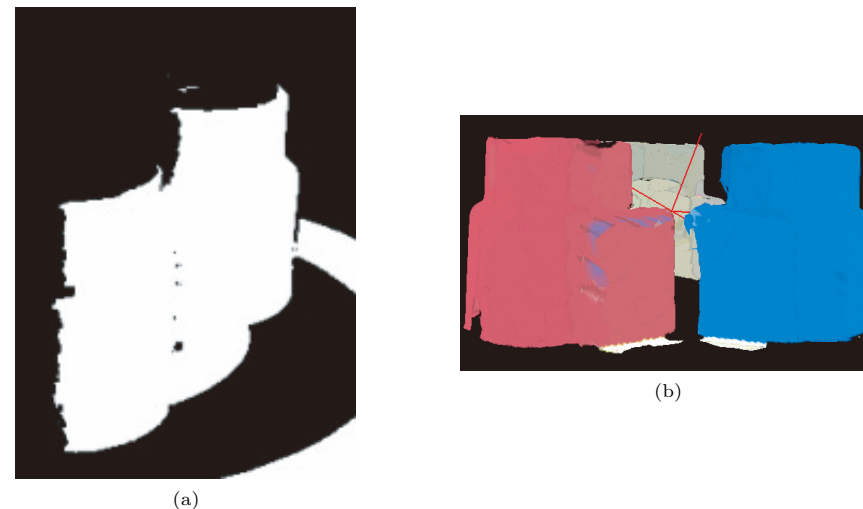


図 21 単純な合成結果．(a) 一定のアルファ値，(b) 合成結果

Fig. 21 The result of simple blending. (a) the constant alpha values and (b) the result of simple blending.

6.7.3 (C) についての検証

計測対象物は蛙の置物とした。図 25 はある 2 視点からの計測結果のテクスチャ画像とアルファ画像を任意視点からの見えに変換したものである。図 25 (a), (b) が視点 1 の推定された拡散反射率画像および生成されたアルファ画像であり、図 25 (c), (d) が視点 2 からのものである。図 26 (a) は提案手法によって生成したアルファ値を用いた合成結果であり、図 26 (b) はアルファ値を一定にしたものによる合成結果である。丸線で囲まれている部分を見ると、図 26 (b) より図 26 (a) の方が各視点から得られたテクスチャの色の違いによって生じる色の不連続が緩和されていることが分かる。

6.7.4 他の合成手法との比較実験

視点・法線依存型の合成手法による合成結果との比較実験を行い、本提案手法の有用性について検証した。実験では、おもちゃのじょうろを計測対象物とし、本提案手法で使用する 3 次元計測システムを用いて、複数回計測を行い、任意視点での見えを生成し、比較を行った。

図 27 の (a), (c) は法線依存型、視点依存型の合成手法による各視点の重みを色分けした

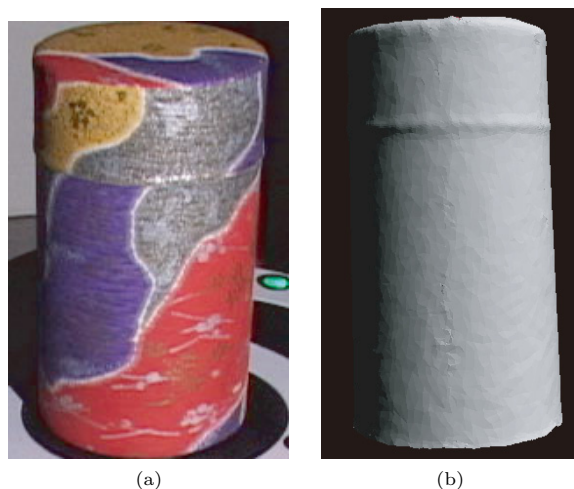


図 22 (a) 計測対象物 . (b) 3 次元形状
Fig. 22 (a) the target object and (b) the integrated 3D shape.

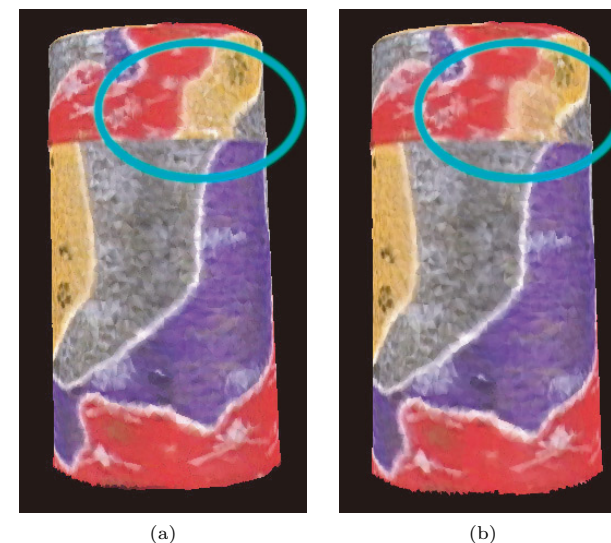


図 24 合成結果 . (a) 提案手法による合成結果 , (b) 単純な合成結果
Fig. 24 The blending results. (a) the result of the proposed method and (b) the result of simple blending.

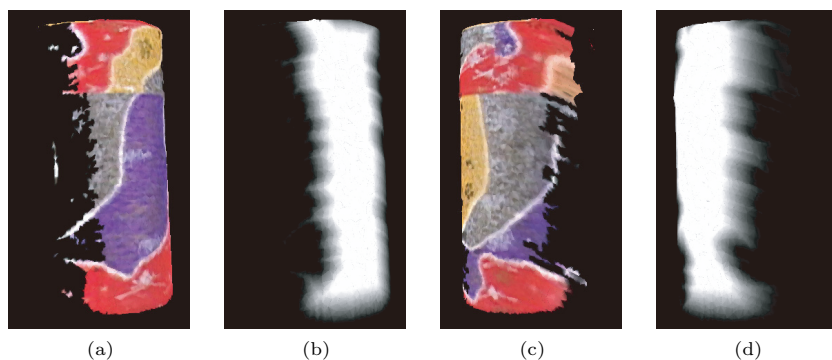


図 23 テクスチャ , アルファ画像の生成結果を任意視点で表示した例 . 視点 0 で得られるテクスチャ (a) とアルファ値 (b) , 視点 1 で得られるテクスチャ (c) とアルファ値 (d)
Fig. 23 The examples of the results of texture and alpha generation on an arbitrary viewpoint. (a) the texture and (b) alpha values acquired from view0. (c) and (d) are the ones acquired from view1.

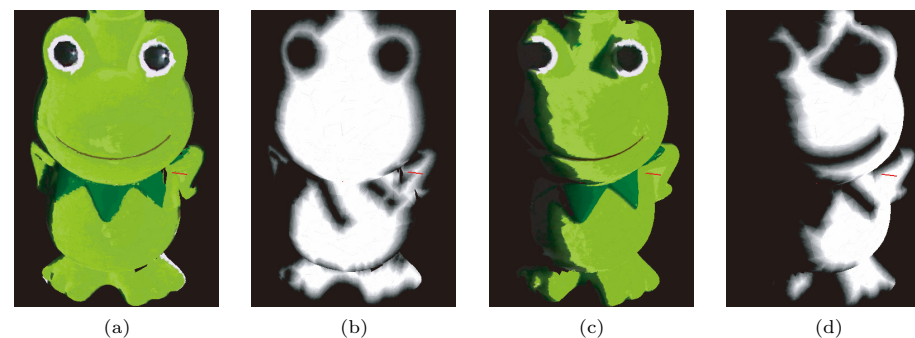


図 25 テクスチャ , アルファ画像の生成結果を任意視点で表示した例 . 視点 0 で得られるテクスチャ (a) とアルファ値 (b) , 視点 1 で得られるテクスチャ (c) とアルファ値 (d)
Fig. 25 The examples of the results of texture and alpha generation on an arbitrary viewpoint. (a) the texture and (b) alpha values acquired from view0. (c) and (d) are the ones acquired from view1.

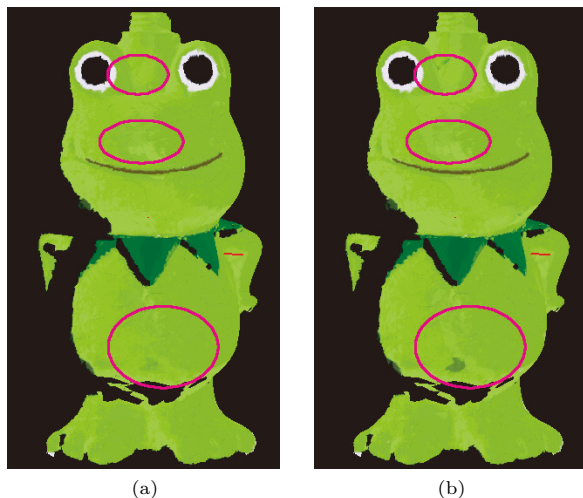


図 26 合成結果．(a) 提案手法による合成結果，(b) 単純な合成結果

Fig. 26 The blending results. (a) the result of the proposed method and (b) the result of simple blending.

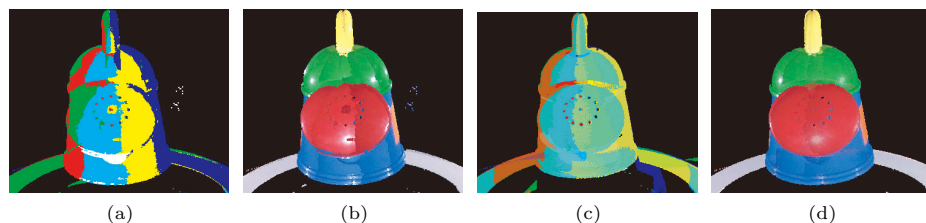


図 27 視点依存型，法線依存型の合成手法による生成結果．(a) 法線依存型での計測視点ごとの重みを色分けしたもの，(b) 法線依存型での合成結果，(c) 視線依存型での計測視点ごとの重みを色分けしたもの，(d) 視線依存型での合成結果

Fig. 27 The results of blending based on the view point and based on the surface normal. (a) colored by weight values of each camera based on the view points, (b) generated image based on the view points, (c) colored by weight values of each camera based on the surface normal and (d) generated image based on the surface normal.

ものであり，図 27 の (b)，(d) は撮影した画像を合成した画像である．

図 28 (a) は Mukaigawa ら⁵⁾ が提案した，視点と法線を組み合わせた任意視点映像生成

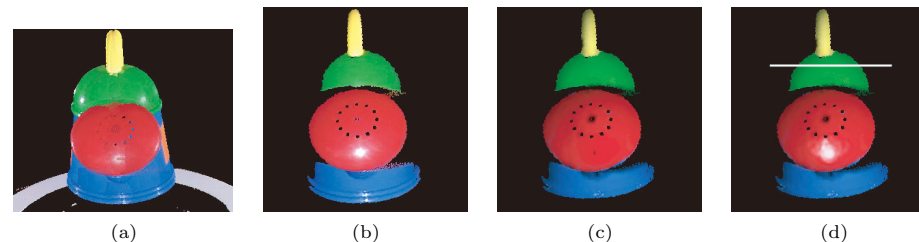


図 28 任意視点での見えの生成結果．(a) 視点・法線依存型の合成結果，(b) 計測視点 0 の計測結果，(c) 提案手法による合成結果，(d) 提案手法による合成結果に鏡面反射モデルを追加したもの

Fig. 28 The generated images on an arbitrary view. (a) captured from view0, (b) generated based on the view points and the surface normal, (c) generated based on the proposed method and (d) the image of (c) specular reflectance added.

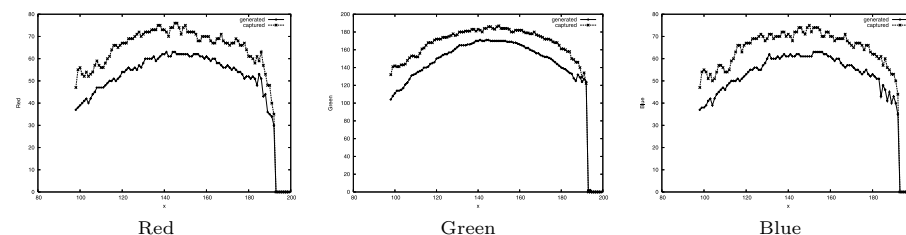


図 29 生成結果と実測値の比較

Fig. 29 Comparison between generated image and captured image.

アルゴリズムによって生成した画像である．図 28 の (b) は仮想視点位置から実際に画像を撮影したものであり，図 28 (c) は提案手法により仮想視点での見えを生成したものである．また，図 28 (d) は図 28 (c) の画像に Torrance-Sparrow モデルを用いて鏡面反射成分を付加したものである．図 28 (a) を見ると，各カメラ視点の撮影画像にハイライトがあるため，合成結果にも複数のハイライトが現れてしまい，多くの不連続が観測されるのに対して，図 28 (c) および (d) では各計測視点でのテクスチャ画像の照明環境による不連続が解消されていることが確認できる．また，図 28 (d) に図示した白い線上の輝度値を図 28 (b) と (d) で比較した結果を図 29 に示す．図 29 を見ると輝度勾配はほぼ同じであるが，全体的に図 28 (d) の輝度値が小さい．これは，環境光や 2 次反射などの影響と考えられる．提案手法では，拡散反射率以外の反射成分についての推定を行っていないため，推定値が他の反射成分も含む実測値より小さな値をとっているのは妥当と考えられる．

7. ま と め

本論文では、全周 3 次元モデル生成のためのシームレスな統合テクスチャの合成手法を提案した。これを実現するために空間コード化法による 3 次元計測システムを用いて、陰影補正および複数テクスチャの重み付きブレンディング手法を提案した。陰影除去、鏡面反射成分分離は計測によって得られるテクスチャ画像および距離画像を用いて物体表面の拡散反射率を推定することによって実現した。また、鏡面反射成分および陰影を除去後に残る不連続をアルファブレンディング処理により軽減させることで、継ぎ目のない統合テクスチャを生成する手法を述べた。実際に 3 次元形状計測を行い提案手法を適用したところ、2 次反射や物体表面の粗い鏡面反射成分が広く分散している部分では、Lambert モデルの仮定が成り立たないため、拡散反射率の推定結果に誤差が生じてしまったものの、実験により比較的現実に近い見えを生成できることが示された。今後は、さらに視点数が少ない場合でも違和感なく統合するために、このような誤差の原因である 2 次反射や鏡面反射成分の解析を行う予定である。この問題に関しては、近年、ラジオシティ法によるプロジェクタを用いた相互反射を考慮した反射特性の計測手法¹⁹⁾や、鏡面反射成分の影響も考慮したフォトンマッピング法²⁰⁾などが提案されており、これらの手法を適用することによってより正確な反射特性推定が可能と考えられる。

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) 若手 ICT 研究者育成型研究開発 (072103013) および科学研究費 (19700098, 19700157) の助成を受けて実施されたものである。

参 考 文 献

- 1) 池内克史, 倉爪 亮, 西野 恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬 裕: The great buddha project—対規模文化遺産のデジタルコンテンツ化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, pp.103–113 (2002).
- 2) Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Shade, J. and Fulk, D.: The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues, *Siggraph 2000*, pp.131–144 (2000).
- 3) Takai, T. and Matsuyama, T.: Interactive Viewer for 3D Video, *Proc. 4th International Workshop on Cooperative Distributed Vision*, pp.475–494 (2001).
- 4) Saito, H., Baba, S., Kimura, M., Vedula, S. and Kanade, T.: Appearance-Based Virtual View Generation of Temporally-Varying Events from Multi-Camera Images in the 3D Room, *Proc. 2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'99)*, pp.512–525 (1999).
- 5) Mukaigawa, Y., Genda, D., Yamane, R. and Shakunaga, T.: Color Blending based on Viewpoint and Surface Normal for Generating Images from Any Viewpoint using Multiple Cameras, *Proc. IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003)*, pp.95–100 (2003).
- 6) Rocchini, C., Cignoni, P. and Montani, C.: Multiple Textures Stitching and Blending on 3D Objects, *10th Eurographics Workshop on Rendering*, pp.127–138 (1999).
- 7) 岡田和也, 山下 淳, 金子 透: ステレオ画像対を用いた視点変換画像の生成とその合成, 精密工学会画像応用技術専門委員会サマーセミナー 2006 テキスト, Vol.15, pp.105–108 (2006).
- 8) 倉爪 亮, 西野 恒, Zhang, Z., 池内克史: 透視投影と点光源下の鏡面反射からの光源位置と反射特性の推定, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.43, No.SIG11, pp.121–129 (2002).
- 9) Schluns, K. and Koschan, A.: Global and Local Highlight analysis in color images, *Proc. 1st Int. Conf. on Color in Graphics and Image Processing CGIP*, pp.300–304 (2000).
- 10) Agrawal, A., Raskar, R., Nayar, S. and Yuanzhen, L.: Removing Photography Artifacts using Gradient Projection and Flash-Exposure Sampling, *Proc. ACM SIGGRAPH 2005*, pp.828–835 (2005).
- 11) 田中正次ほか: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High-Frequency Illumination, *ACM Trans. Graphics (TOG), Proc. ACM SIGGRAPH 2006*, Vol.25, No.3, pp.935–944 (2006).
- 12) Tominaga, S. and Tanaka, N.: Estimating reflection parameters from a single color image, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.20, No.15, pp.58–66 (2000).
- 13) 倉爪 亮, 西野 恒, 池内克史: レーザリフレクタンスとエピソード拘束を利用した複数テクスチャの同時アラインメント, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002), pp.113–120 (2002).
- 14) 宮崎大輔, T. Tan, R., 原 健二, 池内克史: 光学的アプローチに基づく現実世界のモデル化手法, 情報処理学会研究報告, CVIM, Vol.2003, No.36, pp.19–26 (2003).
- 15) Zhang, X., Kobayashi, K., Saito, S. and Nakajima, M.: Weighted Separation of Surface Reflection of an Object Illuminated By Two Light Sources, 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.1, pp.1–5 (2003).
- 16) Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range imaging system for 3-D object recognition, *Proc. 7th International Conference on Pattern Recognition*, pp.806–808 (1984).
- 17) Mercier, B., Meneveaux, D. and Fournier, A.: A Framework for Automatically Recovering Object Shape, Reflectance and Light Sources from Calibrated Images,

IJCV, Vol.73, pp.77-93 (2007).

- 18) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会 (2004).
- 19) 向川康博, 柿沼孝行, 大田友一: 非平面へのパターン投影のための相互反射の補償, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.48, No.SIG 1(CVIM17), pp.98-106 (2007).
- 20) 町田貴史, 横矢直和, 竹村治雄: 実物体の仮想化のための相互反射を考慮した表面反射特性の推定, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 講演論文集, Vol.1, pp.9-14 (2004).
- 21) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory of off-specular reflection from roughened surfaces, *Journal of the Optical Society of America*, Vol.57, No.9, pp.1104-1114 (1967).

(平成 19 年 9 月 22 日受付)

(平成 20 年 3 月 10 日採録)

(担当編集委員 岡部 孝弘)



猪瀬 健二

2006 年埼玉大学工学部情報システム工学科卒業。現在、埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程。



川崎 洋 (正会員)

1994 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2003 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。現在、埼玉大学工学部情報システム工学科准教授。主としてコンピュータ・ビジョン, 3 次元計測, 街のモデリング, コンピュータ・グラフィクスに関する研究に従事。



古川 亮 (正会員)

1993 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。1997 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。広島市立大学情報科学部助手を経て、現在、広島市立大学大学院情報科学研究科講師。コンピュータ・ビジョン, テクスチャ解析, コンピュータ・グラフィクスに関する研究に従事。