論　文

実物体の三次元モデル生成における距離濃淡画像を利用した色情報の改善

草嶺　真人[†a)]　篠崎めぐみ[†]　寺林　賢司[††b)]　梅田　和昇[††c)]
ギー　ゴダン[†††]　マーク　リュウ[†††]

Improvement of Color Information Using Range Intensity Images in Three-Dimensional Modeling of Real-World Objects

Masato KUSANAGI[†a)], Megumi SHINOZAKI[†], Kenji TERABAYASHI[††b)], Kazunori UMEDA[††c)], Guy GODIN[†††], and Marc RIOUX[†††]

あらまし　色情報をもつ三次元モデルの生成には，物体形状を表す幾何モデル上にカラー画像をテクスチャとして貼り付けるテクスチャマッピングが有効である．しかし，テクスチャとなるカラー画像は撮影時の照明環境の影響を受け，複数のテクスチャを単純にマッピングするだけではテクスチャの継ぎ目が生じる．本論文では，物体表面の反射特性の推定が可能である距離濃淡画像に着目したカラー画像補正手法を用いて，見えに妥当な特性をもつ三次元モデルの生成手法を提案する．距離濃淡画像とは，能動型の距離画像センサを用いた距離画像取得と同時に得られる，物体表面の反射特性にかかわる一種の濃淡画像のことである．距離濃淡画像を利用することで，カラー画像に対して物体表面の反射特性を考慮した補正を行うことができ，三次元モデルの見えに妥当な反射特性を付加することができる．更に本手法を複数のテクスチャに適用することで，テクスチャマッピング時の色の継ぎ目を解消することが可能である．実物体を用いたモデリング実験により本手法の有効性を示している．

キーワード　距離画像，カラー画像，距離濃淡画像，三次元モデル，テクスチャマッピング

1. まえがき

近年，実在する物体の幾何形状や色情報を計測することによりその物体の三次元モデルを生成する試みが広く行われている [1], [2]．センサより得られる情報を利用する本手法は，従来の手作業でのモデリングに対し，モデル化の作業を自動化・効率化できるという点から注目されている．中でも，物体の三次元の幾何形状を表すモデルの表面に，実写画像をテクスチャとして付加するテクスチャマッピングは，現実感の高い三次元モデルを迅速かつ容易に生成できるため，利用価値は高いといえる．

一般にテクスチャマッピングに用いられる幾何モデルとカラー画像は，レンジファインダとディジタルカメラといった異なる計測装置により取得される．そのため，テクスチャマッピングを実現するには幾何モデルとカラー画像との正確なレジストレーション（位置合せ）が必要になる．従来，このレジストレーションは，両画像の特徴点を手動で対応づけることで行われていた [3] が，最近ではこれを自動化する手法も提案され [4], [5]，三次元モデルの自動生成が可能となってきている．

しかし，三次元モデルの色情報となるカラー画像には，撮影時の照明環境の影響によりハイライトや陰影が生じるため，物体表面の反射特性そのものを再現できているとはいえない．また，異なる照明環境で取得された複数のカラー画像を単純にマッピングすると，

† 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻，東京都
Course of Precision Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, 1–13–27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112–8551 Japan
†† 中央大学理工学部精密機械工学科，東京都
Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1–13–27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112–8551 Japan
††† カナダ国立研究所情報技術部視覚情報技術グループ，カナダ
Visual Information Technology, Institute for Information Technology, National Research Council, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada
a) E-mail: kusanagi@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
b) E-mail: terabayashi@mech.chuo-u.ac.jp
c) E-mail: umeda@mech.chuo-u.ac.jp

画像の継ぎ目部分が不連続になり，モデルの見えに違和感が生じることになる．よって，カラー画像中の照明環境の影響を除去することが必要であり，これらを解決するために様々な手法が提案されている．Satoら [6]，町田ら [7] は，画像中の対象物体表面の明るさをもとに，撮影時の光源環境や物体表面の反射特性などのパラメータを推定する手法を提案している．しかし，これらの手法は，物体を回転台に載せて撮影した多数枚の入力画像を必要とするものである．一方，1枚のカラー画像から光源の位置・色や表面反射特性を推定する手法も提案されている [8], [9] が，適応可能な光源環境に制限があるものとなっている．また別のアプローチとして，運天ら [10] は一般光源環境を点光源の集まりとみなし，点光源下における色度の不変性を利用してテクスチャ画像間の色調を補正する手法を提案している．猪瀬ら [11] は，陰影補正と重み付きアルファブレンディングを用いて，テクスチャをシームレスに合成する手法を提案している．

これまでに我々も，距離濃淡画像の特徴を利用することでカラー画像中から照明環境の影響を除去するカラー画像補正手法を提案してきた [12]．距離濃淡画像とは，能動型の距離画像センサを用いた距離画像取得と同時に得られる，物体表面の反射特性にかかわる一種の濃淡画像のことで，リフレクタンス画像とも呼ばれる [13]．図 1 に同一物体を撮影した距離濃淡画像とカラー画像の一例を示す．カラー画像撮影時の光源環境が一般に未知であるのに対し，距離濃淡画像は計測時に光源として用いるレーザ光の入射角や強度が制御されているため，これと既知の三次元形状をもとに物体表面の反射特性を推定できる有用な特徴をもつ．そこで，まず距離濃淡画像に対して輝度補正を行い，得られた距離濃淡画像の輝度値を規範としてカラー画像の輝度補正を行うことで，カラー画像中から物体の反射特性を再現することができる．1 枚のカラー画像に対して 1 対の距離濃淡画像及び距離画像のみで適用できる本手法は，多数の入力画像が不要であること，カラー画像撮影時の照明環境に制約がないことなどの利点があり，有用な手法である．更に文献 [14] において，幾何モデルを全方位化することで，物体の全周形状及び色情報をもつ三次元モデル生成手法の検討を行った．しかしながら，カラー画像補正時のテクスチャの部分的欠損や，テクスチャの質感の低下等の課題が残されていた．

(a) Range intensity image　(b) Color image

図 1　距離濃淡画像とカラー画像
Fig. 1　Range intensity image and color image.

本論文では以上の手法を拡張し，照明環境により生じる影響を除去した，見えに妥当な特性をもつ三次元モデルの生成手法を提案する．距離濃淡画像を利用する本手法は，カラー画像に対して物体表面の反射特性を考慮した補正を行うことができ，三次元モデルの見えに妥当な反射特性を付加することができる．また，複数のテクスチャをマッピングしたときに生じるテクスチャの継ぎ目を解消することができ，見えに違和感のない三次元モデルを生成することが可能である．

以降，**2.** で提案手法の概要について述べ，**3.** 距離濃淡画像の輝度補正，**4.** 濃淡情報をもつ全方位幾何モデルの生成，**5.** カラー画像の輝度補正，**6.** レンダリングと，本手法の構成要素となる各手法について示す．**7.** で提案手法を用いたモデリング実験の結果を示し，**8.** で結論と今後の課題について述べる．

2. 三次元モデル生成手法の概要

本章では三次元モデル生成の流れについて述べる．本研究では入力として，複数枚の距離画像，距離濃淡画像，カラー画像を用いる．各画像の取得には，距離画像にはレーザレンジファインダのような能動型の距離画像センサを，カラー画像には一般的なディジタルカメラを用いる．また，距離濃淡画像は距離画像と同時に同サンプリングで取得されるため，距離濃淡画像取得のための新たな装置や余分な計測は不要である．以上を入力として三次元モデルを生成する．

処理の流れを図 2 に示す．まず，規範となる距離濃淡画像の輝度補正を行う．取得した距離濃淡画像は，光源と物体との位置関係により陰影やハイライトが生じるため，これらを除去することで拡散反射成分のみを抽出する．続いて，幾何モデルの全方位化を行う．

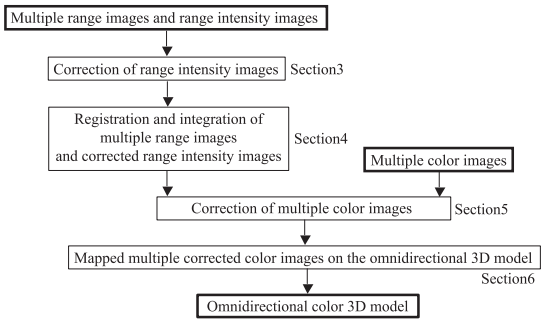


図 2　三次元モデル生成の流れ
Fig. 2　Flow of constructing a 3D model.

一般的な能動型距離画像センサは，ある一視点から見える範囲内にある幾何情報しか取得することができない．そこで，幾何情報を複数視点から取得し，一つに統合することで全周形状を得ることがよく行われる．本研究においても上記の手法を利用する．またこのとき，幾何形状を統合すると同時に補正後の距離濃淡画像も統合することで，幾何モデルに濃淡情報を付加する．この濃淡情報がカラー画像を補正する際の規範となる．最後に，カラー画像を幾何モデルの濃淡情報に従わせることで，照明光の影響を除去した補正テクスチャを生成する．この補正テクスチャを幾何モデルにマッピングすることで，色の継ぎ目のない三次元モデルを生成する．

以降の章で，各処理について詳しく述べる．

3.　距離濃淡画像の輝度補正

本章では，距離濃淡画像の輝度補正手法について述べる．距離濃淡画像の輝度値が受ける影響を二つに分類し，それぞれの影響を解消する補正式ないし補正手法を示す．本手法を用いて距離濃淡画像から物体色を表す拡散反射成分のみを抽出し，カラー画像を補正する際に規範となる濃淡情報を取得する．

3.1　能動型距離画像センサのカメラ特性の考慮

能動型距離画像センサにより観測された距離濃淡画像の輝度値は，センサ特性に由来する以下のような影響を受けると考えられる．

- センサと各測定点との距離
- 測定点における法線ベクトル方向
- センサに固有の特性

対象物体の表面を完全拡散面と仮定すると，計測点の輝度値は光源と計測点との距離 l の 2 乗に反比例した値で観測される．また，物体表面の法線ベクトル $\boldsymbol{N}$ と光源ベクトル $\boldsymbol{L}$ とのなす角を θ とすると，画像中の測定点で観測される輝度値は $\cos\theta$ に比例して低下する．これらの要因を考慮すると，センサにより観測される輝度値 I_{obs} は次式のように表現できる．

$$I_{obs} = \left\{ k_i(l) \frac{\cos\theta}{l^2} I \right\}^{\gamma} \tag{1}$$

ここで，γ はセンサに用いられている CCD カメラのガンマ値であり，$k_i(l)$ はセンサ感度のばらつきを補正する関数である．これらセンサに固有の特性の補正については，**7.1** において本論文で使用したセンサに特化して触れることにする．式 (1) より，これらセンサ特性の影響を取り除いた輝度値 I を求めることができる．

3.2　鏡面反射成分の除去

距離濃淡画像中の物体表面には，光源と物体の位置関係によりハイライト成分が生じるため，これを除去する必要がある．反射光におけるハイライト成分の記述には，二色性反射モデル [15] がよく用いられる．これは物体からの反射光が拡散反射（diffuse reflection）と鏡面反射（specular reflection）の二つの反射成分の線形和で記述できることを仮定している．拡散反射は，物体表面に入射した光が物体内部に入り着色層で多重に反射したのち外部に放射されるもので，物体自身の色が現れる．一方鏡面反射は，物体表面での直接反射によるもので，光源の色がそのまま現れる．画像中のハイライト成分はこの鏡面反射によるものである．

本論文ではこの鏡面反射成分の除去にあたって，代表的な二色性反射モデルの一つである Torrance-Sparrow モデルを用いた文献 [16] の手法を適用する．Torrance-Sparrow モデルは金属をはじめ様々な材質の物体に適用できるモデル式であるが，直接用いるにはパラメータの数が多く，それらを取得または推定するために様々な測定等を行う必要がある．そこで文献 [16] では，いくつかの仮定を設けることでモデル式を簡略化し，少ないパラメータを実験的に求めることで拡散反射成分を抽出している．

4.　濃淡情報をもつ全方位幾何モデルの生成

本章では，複数枚の距離濃淡画像及び距離画像の位置合せ・統合処理について述べる．前述のとおり，一般的な能動型の距離画像センサでは，一視点から見た断片的な幾何情報のみしか取得することができない．そこで，複数視点から取得した幾何情報を共通の座標系に統一し，一つの幾何モデルに統合することで全体

形状を獲得する．

個々の座標系で表現された複数の幾何情報を一つの座標系に統一する処理を位置合せ処理という．この問題に対しては，回転台等を用いて個々の座標系を計算する手法や，ICP 法に代表される距離画像同士の対応点間の誤差を最小化する手法 [17], [18] などが提案されている．一般に前者では特殊な装置を必要とする場合が多いことから，本研究では後者の考え方を採用する．

続いて，位置合せ後の幾何情報は単に幾何情報を並べ直しただけであるため，それらを一つの幾何モデルにつなぎ合わせる統合処理が必要である．この統合処理においても，ジッパーのように二つの幾何情報をつなぎ合わせる手法 [19] や，符号付距離場を利用する手法 [20] など，様々な手法が提案されている．また本研究では，幾何情報とともに距離濃淡画像の統合も行う．**3.** で示したように，距離濃淡画像は光源環境の影響を受けているため，単純な統合では明るさの継ぎ目が生じるが，事前に補正を行うことで滑らかな濃淡情報を生成することができる．この濃淡情報は，**5.** のカラー画像の補正に利用する．位置合せから統合までの概念図を図 3 に示す．本論文では，距離画像・距離濃淡画像の位置合せ・統合は市販のモデリングソフトを用いて行った．

なお，このような距離濃淡画像の補正及び統合は，文献 [20] においても行われている．文献 [20] は，光源との距離及び法線の向きを考慮した補正により濃淡値の連続性を得る有用な手法であるが，対象物からの反射光は拡散反射成分のみであると仮定している．一方，本論文では，二色性反射モデルを用いて鏡面反射成分も考慮している．

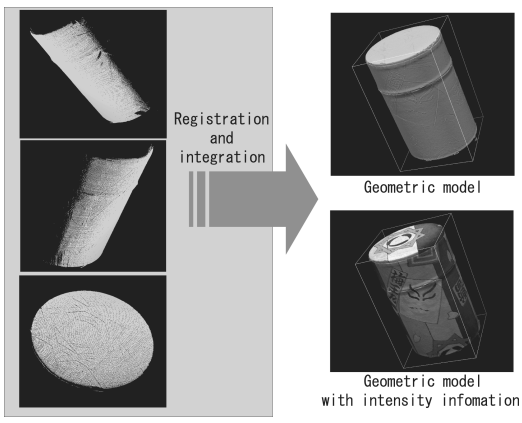


図 3　距離画像及び距離濃淡画像の位置合せと統合処理
Fig. 3　Registration and integration of multiple range and range intensity images.

5.　カラー画像の輝度補正

本章では，照明環境の影響を受けているカラー画像の輝度補正手法について述べる．カラー画像の輝度値を **4.** で生成した全方位幾何モデルがもつ濃淡情報に従わせることで，陰影やハイライトといったカラー画像撮影時の照明環境の影響を除去する．補正したカラー画像は拡散反射成分に照明色が乗ったものとなるが，視点や光源の位置には依存しない画像である．

5.1　幾何モデルとカラー画像のレジストレーション

全方位幾何モデルがもつ濃淡情報をカラー画像へ反映させるには，まず，両画像の相対的な位置関係を求めるレジストレーション処理が必要である．幾何モデルとカラー画像とのレジストレーションは，幾何モデルを記述している座標系におけるカラー画像を取得したカメラの内部パラメータと外部パラメータを求めることに相当する．これらのパラメータを得るために，本論文では文献 [5] の手法を適用する．本手法は，距離濃淡画像とカラー画像の類似性に基づき，カラー画像平面に投影された幾何モデルとカラー画像が重複する領域内においてオプティカルフローの拘束が近似的に成り立つと仮定し，反復演算によって各パラメータを算出するものである．

文献 [5] では断片的な幾何モデルのみ考慮されていたが，本論文では全方位の幾何モデルに対応できるように拡張して利用する．

5.2　補正係数の算出とカラー画像への適用

カラー画像の補正を行うための補正係数を算出するために，まず，幾何モデルの各点を **5.1** で求めた投影パラメータを用いてカラー画像平面へ投影する．このとき，図 4 に示すように，投影したカラー画像平面における幾何モデルの各点（以下対応点と呼ぶ）は一般に整数値にはならず，カラー画像の画素位置とは一致しない．そこで，対応点におけるカラー画像の輝度値を，その周辺に存在する画素の輝度値から共一次内挿法を用いて算出する．各対応点において幾何モデルがもつ濃淡値 I_{ri} と内挿処理により求めたカラー画像の輝度値 I_c の比 $c = I_{ri}/I_c$ を計算し，これを対応点における輝度補正係数とする．このとき，カラー画像は通常 RGB の 3 チャネルからなるので，補正係数の算出には距離画像センサの光源の色に最も近いチャネルの画像を利用する [16].

続いて，カラー画像各画素における補正係数を，対応点における補正係数配列を補間することで算出する．図 4 の画像平面の高さ方向に補正係数 c をとった三次元空間を定義するとき，カラー画像のある画素 (u_p, v_p) における補正係数 c_p は，図 5 の点 P を求めることに相当する．ここで，点 P を内包する対応点 3 点を考える．このとき，補正係数 c_p は対応点 3 点からなる平面上に存在することになり，式 (2) から算出することができる．

$$\begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - u_3 & u_2 - u_3 \\ v_1 - v_3 & v_2 - v_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_p - u_3 \\ v_p - v_3 \end{bmatrix}$$
$$c_p = (c_1 - c_3)s + (c_2 - c_3)t + c_3 \qquad (2)$$

本処理をカラー画像の全画素に対して行うことで，カラー画像各画素の補正係数を算出する．またこのとき，平均化フィルタを用いてカラー画像各画素における補正係数配列を滑らかにする．これにより，距離濃淡画像のノイズの影響を低減し，滑らかな補正を行うことができる．算出した補正係数をカラー画像の RGB 各チャネルの画素値に乗算し，カラー画像の補正を行う．

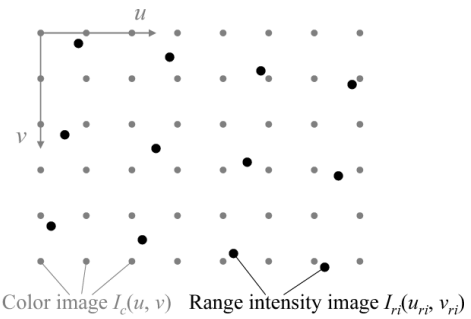


図 4　距離濃淡画像のカラー画像平面への投影
Fig. 4　Projection of a range intensity image on a color image.

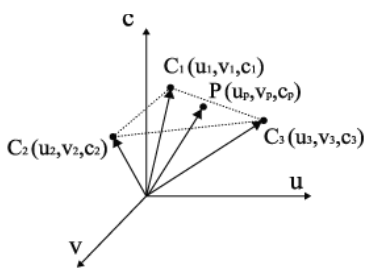


図 5　画像平面の高さ方向に補正係数軸をとった三次元空間
Fig. 5　Three-dimensional space that takes correction factor axis in direction of height of image plane.

6.　レンダリング

補正後のカラー画像を **4.** で生成した幾何モデルにマッピングすることで，テクスチャの継ぎ目のない三次元モデルを生成する．具体的には，**5.1** で算出したパラメータを用いて幾何モデルと各カラー画像との対応点を対応づけ，対応点で囲まれる各領域は OpenGL を用いてテクスチャマッピングを行う．テクスチャが重複する領域においては，カラー画像が適切に補正されていれば，どのテクスチャを優先してもテクスチャは滑らかにつながることになる．

7.　三次元モデル生成実験

以上で提案した手法の有効性を実験により検証した．

7.1　実験装置及び各種設定

距離画像及び距離濃淡画像の取得には，ShapeGrabber 製のレーザレンジファインダ SG-102 と走査レール PLM300 からなるシステム [21] を使用した．本センサは赤色（波長 670 nm）のレーザスリット光を照射するプロジェクタと CCD カメラから構成され，三角測量の原理を用いて距離値を計測すると同時に，レーザの反射光強度を濃淡値として取得する．撮影風景を図 6，センサの幾何学的配置を図 7 に示す．モデル化する対象物体は図 1 の茶筒（寸法：ϕ70 mm × h105 mm）とし，約 45° ずつ回転させて側面 8 枚，上面 1 枚の計 9 枚取得した．カラー画像の取得には Nikon 製のディジタルカメラ D70 を用い，RAW 形式で取得した．画素数は 3008 × 2000 である．取得枚数は約 90° ずつ回転させて側面 4 枚，上面 1 枚の計 5 枚取得した．なお，提案手法では，距離濃淡画像とカラー画像を取得する視点は異なっていてよい．

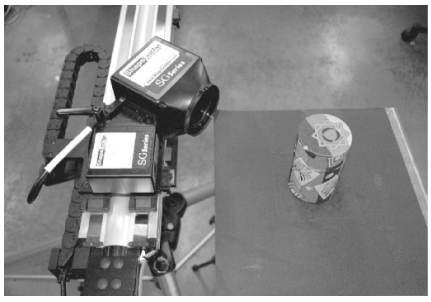


図 6　撮影風景
Fig. 6　Scanning scene by ShapeGrabber range image sensor.

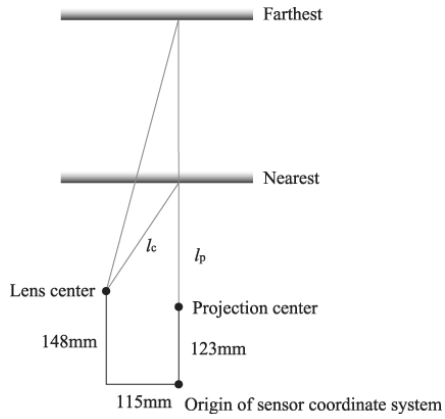
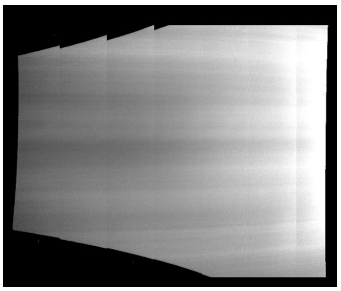
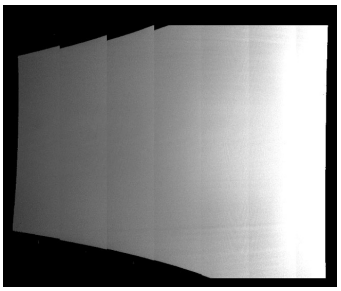


図 7　センサの幾何学的配置
Fig. 7　Configuration of ShapeGrabber range image sensor.



(a) Original image (with gamma correction)



(b) Compensated image

図 8　各測定点の感度の補正
Fig. 8　Compensation of each sensor element.

3. 1 で述べた輝度補正手法を実装するにあたり行った処理について以下に示す．

まず，CCD カメラの入出力の関係が線形となるよう，CCD カメラの推定ガンマ値を 0.45 として補正を行う．

続いて，センサ感度のばらつきの補正について示す．図 8 (a) は，傾斜した平面を観察した 7 枚の距離濃淡画像を並列に配置したものである．画像左方向へ距離が遠くなるに従って輝度値が低下していることが確認できるが，縦方向にも輝度値の変化が見られ，計測点の感度にばらつきがあることが分かる．これは照射されるレーザスリット光の不均一性や CCD カメラの周辺減光によるものと考えられる．そこでレーザスリット光の 1280 の測定点それぞれに二次関数を当てはめ，このばらつきを補正する措置を行った．具体的には，7 枚の距離濃淡画像を用いて，測定点ごとに，センサと測定点間の距離 l_c を横軸，輝度値を縦軸とした二次曲線をフィッティングし，ルックアップテーブルを作成した．測定時には，作成したルックアップテーブルを用いて測定点ごとに補正を行う．図 8 (b) は，その補正が有効に働いていることを示している．

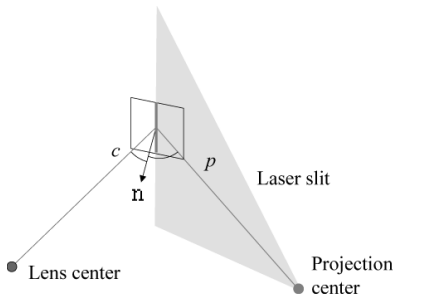
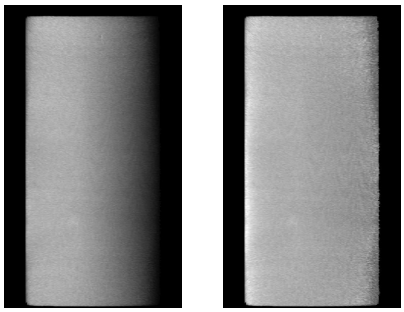


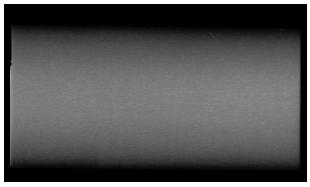
図 9　センサの幾何学的配置と面法線の関係
Fig. 9　Important angle for ShapeGrabber range image sensor.

また，式 (1) の l^2 を $l_p l_c$，$\cos\theta_p$ を $\cos\theta_c$ に修正した．これは，本研究で用いたセンサの幾何構造及びセンサが輝度値を取得する際のアルゴリズムに起因する．物体表面の放射照度は，光源と対象物との距離の 2 乗 l_p^2 に反比例する．また，本研究で用いたセンサは図 7 のような幾何構造をもっており，プロジェクタと CCD カメラの位置関係により，カメラで観測されるスリット光の幅は l_p/l_c に比例するといえる．また，本センサはスリット光のピーク値ではなく幅全体の積分値を輝度値として取得すると考えられ，$1/l_p^2 \times l_p/l_c = 1/(l_p l_c)$ より，放射照度は $l_p l_c$ に反比例すると考えられる．これと同様に，拡散反射を考えると，物体表面の放射照度は光源ベクトルと表面法線ベクトルのなす角の余弦 $\cos\theta_p$ に比例するが，カメラで観測されるスリット光の幅が $\cos\theta_c/\cos\theta_p$ に比例するため，$\cos\theta_p \times \cos\theta_c/\cos\theta_p = \cos\theta_c$ より，$\cos\theta_c$ のみが残る（図 9 参照）．この妥当性は，図 10 及び図 11 から確認される．それぞれ垂直方向と水平方向の二つの姿勢の円柱物体を観察した入力画像が (a) で

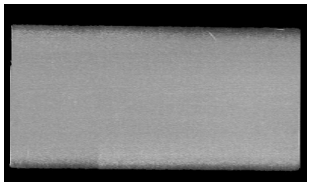


(a) Original image　(b) Compensated image

図 10　面法線に対する補正：円柱（縦）
Fig. 10　Compensation of normal vector: Vertically-laid cylinder.



(a) Original image



(b) Compensated image

図 11　面法線に対する補正：円柱（横）
Fig. 11　Compensation of normal vector: Horizontally-laid cylinder.

あり，これらに補正を行った結果が (b) である．これを見ると，面の傾きによる陰影が除去され，円柱物体の濃淡値が平たんに補正されていることが分かる．

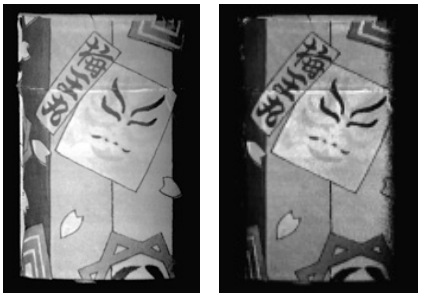
以上の処理を適用することにより，最終的に式 (1) は次のように書き換えられる．

$$I_{obs} = \left\{ k_i(l_c) \frac{\cos\theta_c}{l_p l_c} I \right\}^{0.45}$$
$$k_i(l_c) = a_i l_c^2 + b_i l_c + c_i \qquad (3)$$

ここで，$k_i(l_c)$ はセンサ感度のばらつきを表す二次関数であり，添字 i（$0 \leq i \leq 1279$）は測定点の番号（得られる距離画像の行番号）を表す．

7.2　距離濃淡画像の輝度補正

図 12 (a) に取得した距離濃淡画像の一例を，(b) に **3.** で示した手法を用いて補正を行った結果を示す．これらを見ると，陰影の除去された一様な濃淡分布が得



(a) Original image　(b) After correction

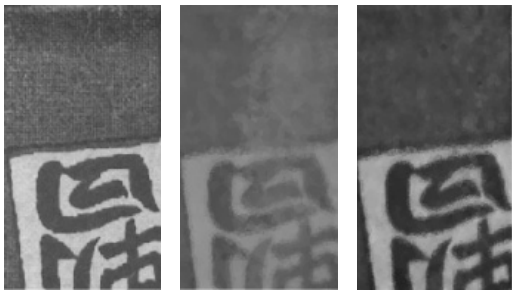
図 12　距離濃淡画像の輝度補正
Fig. 12　Correction of range intensity image.

図 13　濃淡情報をもつ全方位幾何モデル
Fig. 13　Omnidirectional geometric model with intensity information.

られていることが分かる．対象物体の側面においてデータの欠損が見られるのは，式 (3) のモデル式に当てはまらない法線の傾きが大きい部分を除去したためである．また，対象物体の中央付近に生じていた鏡面反射成分が除去されていることが分かる．この鏡面反射成分の除去に用いた文献 [16] のモデル式は，仮定を多く含む簡易的なものであったが，比較的良好な結果が得られているといえる．

7.3　濃淡情報をもつ全方位幾何モデルの生成

複数枚の距離画像及び補正を行った距離濃淡画像を統合した全方位幾何モデルを図 13 に示す．また，補正を行った場合と行っていない場合での距離濃淡画像の統合結果の比較を図 14 に示す．(a) は対象部分におけるカラー画像，(b) は補正なし，(c) は補正ありの統合結果である．距離画像及び距離濃淡画像の統合処理は，いずれも InnovMETRIC 社製の PolyWorks [22] を用いて行った．図 13 より，物体の全周形状を表す全方位幾何モデルが生成できていることが分かる．また図 14 を見ると，距離濃淡画像の補正を行っていない (b) では，統合部の輝度値が滑らかにつながらず，継ぎ目部分に輝度値のばらつきが見られる．それに対



(a) (b) (c)

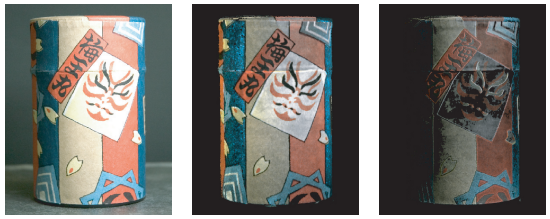
図 14 統合結果（拡大図）：(a) 対象部分，(b) 補正なし，(c) 補正あり

Fig. 14 Integration result(magnified): (a) Original image, (b) Without correction, (c) With correction.

(a) Original image (b) After correction

図 15 カラー画像の輝度補正：一般環境下

Fig. 15 Correction of color image: General environment.



(a) Original image (b) After correction (c) Specular reflection

図 16 カラー画像の輝度補正：鏡面反射が強い場合

Fig. 16 Correction of color image: With high specular reflection.

し (c) では，継ぎ目部分も目立たず，滑らかな濃淡分布が得られており，距離濃淡画像の補正が有効に働いていることが分かる．

7. 4 カラー画像の輝度補正

取得したカラー画像のうちの 1 枚を図 15 (a) に，幾何モデルがもつ濃淡情報をもとに補正を行ったカラー画像を図 15 (b) に示す．このとき，本研究で用いた距離センサの光源の色が赤であるため，補正係数の算出

(a) Original image (b) After correction (c) Specular reflection

図 17 カラー画像の輝度補正：より鏡面反射が強い場合

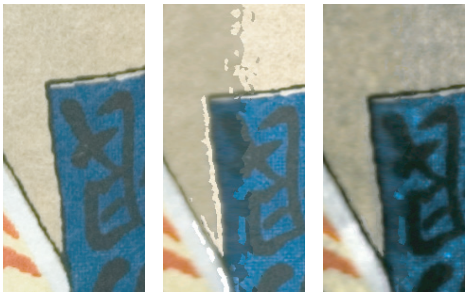
Fig. 17 Correction of color image: With higher specular reflection.

(a) Without correction

(b) With correction

図 18 色情報をもつ三次元モデル

Fig. 18 3D model with color texture images.



(a) (b) (c)

図 19 テクスチャマッピング結果（拡大図）：(a) 対象部分，(b) 補正なし，(c) 補正あり

Fig. 19 Texture mapping result (magnified): (a) Original image, (b) Without correction, (c) With correction.

にはカラー画像の R チャネルを用いた．また，補正係数配列を滑らかにする平均化フィルタは 3×3 を用いた．図 15 より，カラー画像の明るさが距離濃淡画像の明るさに従うように補正されていることが分かる．

続いて，鏡面反射成分及び陰影が生じている場合の本手法の効果を検証するため，図 15 とは異なる照明環境下における補正結果を図 16 に示す．(a) が補正前，(b) が補正後の結果であり，分離した鏡面反射成分を (c) に示す．本画像では対象物に対して右上方から照明を当てたため，右側面部に鏡面反射成分が，左側面部に陰影が生じているが，(b) より良好に補正されていることが見て取れる．分離した鏡面反射成分が (c) のように有色となっているが，これは実験に用いた対象物の表面の粗さが原因であると考えられる．対象物の表面が粗い場合，入射光が物体表面上で複雑な反射を起こし，鏡面反射成分が有色になることがある [23]．また，鏡面反射が物体表面上の広い範囲に低い輝度値で観測されたため，正確なパラメータ推定が行えなかった可能性も考えられる．以上が原因で鏡面反射が有色になったと考えられるが，図 15 (b) と図 16 (b) が同等に補正されていることから，異なる照明環境下においても補正が有効であることが確認できる．また，図 17 に他の対象を使いより強い鏡面反射成分が生じている場合の実験結果を示す．図 17 (a) が補正前，(b) が補正後の結果であり，分離した鏡面反射成分を (c) に示す．この場合にも鏡面反射成分は有色でありこの点は今後の課題であるが，強い鏡面反射成分を含む場合にも，鏡面反射成分が良好に補正されていることが確認できる．

7.5 三次元モデル生成

補正を行った複数のテクスチャを幾何モデルにマッピングした結果を図 18 に示す．(a) は補正を行っていないとき，(b) は補正を行ったときの結果である．テクスチャが重複した領域は，後からマッピングしたテ

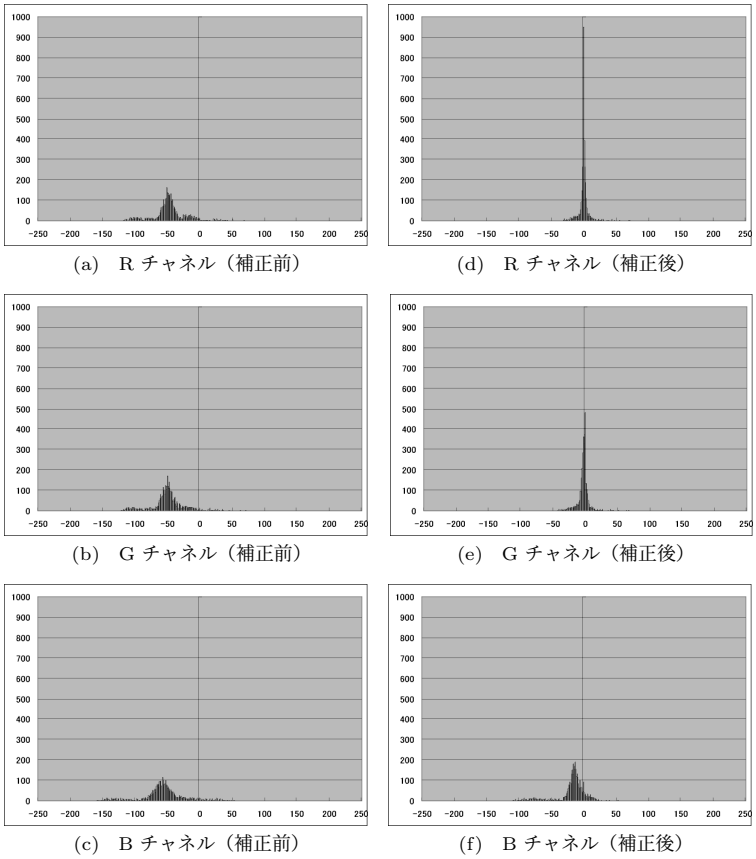


図 20 オーバラップ部における差分のヒストグラム
Fig. 20 Histograms of differences of textures at overlap region.

クスチャを優先して表示している．また，特に顕著に生じたテクスチャの継ぎ目部の拡大図を図 19 に示す．(a) は対象部分のカラー画像，(b) は補正なし，(c) は補正ありの結果である．図 18 を見ると，(a) 右図の右側面部に生じてたテクスチャの継ぎ目が，(b) の補正後では低減されていることが分かる．図 19 の拡大図からも，テクスチャ間の輝度値が滑らかにつながっていることが見て取れ，色の継ぎ目のない三次元モデルが生成できていることが分かる．

また，図 20 にテクスチャのオーバラップ部における画素値の差分のヒストグラムを示す．(a)，(b)，(c) の補正前では 256 階調の RGB 各チャネルにおいて −50 前後にピークがあるのに対し，(d)，(e) の補正後では R と G チャネルにおいてほぼ 0 付近にピークが見られ，テクスチャ間の輝度値の連続性が得られていることが分かる．しかし，(f) の B チャネルにおいては，補正前よりは良いものの，ピークが −13 前後に得られる結果となった．これは，カラー画像の補正において，R チャネルで算出した補正係数を用いて，カラー画像の RGB すべてのチャネルを同じ比率で補正していることが原因と考えられる．この問題は今後解決すべき課題の一つであるが，文献 [24] で提案したカラーラインサーチを用いた照明色推定手法を適用し，テクスチャの色合いを補正することで解消できると考えている．

8. むすび

本論文では，距離濃淡画像の特徴を利用した，見えに妥当な特性をもつ実物体の三次元モデル生成手法を提案した．反射特性の推定が可能な距離濃淡画像を用いることで，カラー画像に対して反射特性を考慮した補正を行うことができ，三次元モデルの見えに妥当な反射特性を付加することができる．また，本手法を複数視点から取得したカラーテクスチャに適用し，全体形状を再現した幾何モデル上にマッピングすることで，色の継ぎ目のない三次元モデルを生成することが可能である．実物体を用いたモデリング実験により本手法の有効性を示した．

今後の課題として，上述したテクスチャの連続性の更なる向上や色情報の正確な再現，補正結果の定量的評価について検討していく予定である．また，カラー画像に鏡面反射成分が混ざることによる色合いの変化を求め，補正することも課題である．

謝辞 本研究の一部は，科学研究費補助金・若手研究（B）16700191 の補助により行われた．

文　献

[1] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk, “The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues,” SIGGRAPH2000, pp.131–144, 2000.

[2] 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—大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, no.1, pp.103–113, 2002.

[3] K. Yoshida and H. Saito, “Registration of range image using texture of high-resolution color images,” IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA02), pp.150–153, Nara, Dec. 2002.

[4] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, “Simultaneous 2d images and 3d geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute,” Proc. Fifth ACCV, pp.99–106, 2002.

[5] 梅田和昇，ギー　ゴダン，マーク　リュウ，“こう配拘束と距離濃淡画像を用いた距離画像とカラー画像のレジストレーション，” 信学論（D-II），vol.J88-D-II, no.8, pp.1469–1479, Aug. 2005.

[6] Y. Sato, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation,” SIGGRAPH’97, pp.379–387, 1997.

[7] 町田貴史，竹村治雄，横矢直和，“複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定，” 信学論（D-II），vol.J84-D-II, no.8, pp.1873–1881, Aug. 2001.

[8] S. Tominaga and N. Tanaka, “Estimating reflection paramerters from a single color image,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol.20, no.15, pp.58–66, 2000.

[9] 原　健二，R.T. Tan，西野　恒，中澤篤志，池内克史，“単一画像からの光源位置・色と表面反射特性の推定，” 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.41, no.SIG9(CVIM7), pp.94–104, 2003.

[10] 運天弘樹，池内克史，“テクスチャマッピングにおける擬似albedo に基づく色調補正手法—点光源下の画像及び一般光源環境での画像への拡張，” 信学論（D-II），vol.J87-D-II, no.12, pp.2156–2164, Dec. 2004.

[11] 猪瀬健二，榎本和史，川崎　洋，古川　亮，“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，” 画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2007），pp.325–332, 2007.

[12] M. Shinozaki, K. Umeda, G. Godin, and M. Rioux, “Correction of intensity of a color image using a range intensity image,” Proc. 18th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR06), pp.774–777, 2006.

[13] 倉爪　亮，西野　恒，M.D. Wheeler，池内克史，“リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアライメント，” 信学論（D-II），vol.J85-D-II, no.6, pp.1038–1046, June 2002.

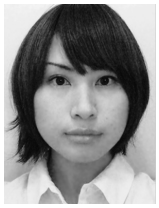
[14] 草薙真人，篠崎めぐみ，梅田和昇，ギー　ゴダン，マーク　リュウ，“距離濃淡画像を用いた実物体の三次元モデリングシステム—全方位カラーモデルの生成，” 動的画像処理実利

用化ワークショップ DIA2008 講演論文集，pp.253–258, 2008.
[15] S.A. Shafer, “Using color to separate reflection compornents,” Color Research and Application, vol.10, pp.210–218, 1985.
[16] K. Umeda, M. Shinozaki, G. Godin, and M. Rioux, “Correction of color information of a 3D model using range intensity image,” Proc. Fifth 3DIM, pp.229–236, 2005.
[17] P.J. Besl and N.D. McKay, “A method for registration of 3-d shapes,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.14, no.2, pp.239–256, 1992.
[18] Y. Chen and G. Medioni, “Object modeling by registration of multiple range images,” Image Vis. Comput., vol.10, no.3, pp.145–155, 1992.
[19] G. Turk and M. Levoy, “Zippered polygon meshes from range image,” SIGGRAPH’94, pp.311–318, 1994.
[20] R. Sagawa, K. Nishino, and K. Ikeuchi, “Adaptively merging large-scale range data with reflectance properties,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.27, no.3, pp.392–405, 2005.
[21] ShapeGrabber: “http://www.shapegrabber.com”
[22] PolyWorks: “http://www.innovmetric.com”
[23] 三宅洋一（編），分光画像処理入門，東京大学出版会，2006.
[24] 篠崎めぐみ，梅田和昇，ギー ゴダン，マーク リュウ，“実物体の三次元モデリングのためのカラー画像補正，” 動的画像処理実利用化ワークショップ DIA2007 講演論文集，pp.55–60, 2007.

（平成 20 年 8 月 7 日受付，12 月 19 日再受付）

草彅 真人

2007 中大・理工・精密機械工学卒．2009 同大大学院理工学研究科精密工学専攻修士課程了，現在，（株）リコー勤務．



篠崎めぐみ

2005 中大・理工・精密機械工学卒．2007 同大大学院理工学研究科精密工学専攻修士課程了．現在，（株）小森コーポレーション勤務．

寺林 賢司

2002 北大・工・システム工学卒．2004 同大大学院システム情報工学専攻修士課程了．2008 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程了，博士（工学）．同年，中央大学理工学部精密機械工学科助教，現在に至る．ヒューマンインタフェース，バーチャルリアリティ等の研究に従事．日本ロボット学会，日本バーチャルリアリティ学会，日本機械学会等各会員．

梅田 和昇 （正員）

1989 東大・工・精密機械工学卒，1994 同大大学院精密機械工学専攻博士課程了，博士（工学）．同年中央大学理工学部精密機械工学科専任講師，1998 より同助教授，2006 より同教授，現在に至る．ロボットビジョン，距離画像処理，ヒューマン・インタフェースの研究に従事．画像の認識・理解シンポジウム 2004 MIRU 長尾賞受賞．日本ロボット学会，精密工学会，日本機械学会，IEEE 等各会員．

Guy Godin

Guy Godin is a senior researcher with the Visual Information Technology Group of the Institute for Information Technology at the National Research Council of Canada. His research interests include 3D computer vision and image analysis, shape and reflectance modeling, and interactive visualization. He was program co-chair of the Fourth International Conference on 3D Imaging and Modeling in 2003. He holds degrees in electrical engineering from École Polytechnique de Montréal and McGill University. He is a member of IEEE and ACM.

Marc Rioux

Marc Rioux is a Pricipal Research Officer of the Institute for Information Technology at the National Research Council Canada. His present interests are in the development of three-dimensional digitizing, modeling and display for machine vision, optical dimensional inspection and visual communication in the Visual Information Technology Group. He received his bachelor’s degree in engineering physics in 1971 and a master’s degree in physics in 1976, both from Laval University. He worked five years on CO_2 laser development and applications and two years in infrared holography and joined the National Research Council in 1978 to work on 3D digitizing.