# 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 一全方位カラーモデルの生成—

○草彅真人<sup>†</sup>, 篠崎めぐみ<sup>†</sup>, 梅田和昇<sup>††</sup>, ギー・ゴダン<sup>†††</sup>, マーク・リュウ<sup>†††</sup> Masato KUSANAGI<sup>†</sup>, Megumi SHINOZAKI<sup>†</sup>, Kazunori UMEDA<sup>††</sup>, Guy Godin and Marc Rioux<sup>†††</sup>

> <sup>†</sup>: 中央大学大学院 理工学研究科, kusanagi@sensor.mech.chuo-u.ac.jp <sup>††</sup>: 中央大学 理工学部, umeda@mech.chuo-u.ac.jp <sup>†††</sup>: カナダ国立研究所 情報技術部

近年,コンピュータビジョンの分野では,実物体を三次元モデル化する試みが盛んに行われている.本論 文では,能動型の距離画像センサより反射光強度の配列として得られる距離濃淡画像を利用し,実物体の全 周形状および正しい色情報を持った三次元モデルを生成する三次元モデリングシステムを提案する.提案す る三次元モデリングシステムは,物体の全周形状を得るための距離濃淡画像および距離画像の統合処理,正 しい物体色を抽出するカラー画像の輝度補正,全方位カラーモデルを生成する幾何モデルとカラー画像との レジストレーションから成る.実物体を用いたモデリング実験により全方位カラーモデルを生成し,本手法 の有効性を示している.

# <u>1. はじめに</u>

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自動的に 生成する試みが広く行われている[1][2].観察に基づ く本手法は,従来行われていた手作業でのモデリン グを自動化,効率化出来ることから注目されている. 中でも,距離画像のような物体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 高いと言える.

テクスチャマッピングを行うには通常,物体の三 次元幾何形状を表す幾何モデルとテクスチャとなる カラー画像との正確なレジストレーションが必要に なる.一般に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付けることで行われてきたが, 最近ではこれを自動化する手法も提案され[3][4],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、このとき生成された三次元モデルの色情 報は、カラー画像撮影時の照明環境に依存したもの となっているため、レンダリングを行った際のモデ ルの見えに違和感が生じる問題がある.また、物体 の幾何形状の取得には、効率の面から能動型の距離 画像センサがよく用いられが、一般的にこれらのセ ンサはある一視点からの幾何情報しか取得できない ため、生成された三次元モデルもある視点から見た 断片的なモデルとなり、実物体を忠実に再現したと は言えない.

これまでに我々は、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光の影響を除去す るカラー画像補正手法を提案してきた[5].一対の距 離濃淡画像を持つ距離画像とカラー画像のみで適用 できる本手法は、従来のように色が単一または色の 領域分割が可能である物体に限定される [6]、多数 の入力画像が必要になる[7]などの制約がないため、 有用な手法である.本論文ではこの手法を拡張し、 複数視点から撮影された距離濃淡画像および距離画 像とカラー画像を用いて、全方位のカラー3D モデル を生成する三次元モデリングシステムを構築する.

#### 2. システムの概要

距離濃淡画像とは、レーザ光などを用いて距離を 測定する能動型距離画像センサでの距離画像取得時 に、反射光強度の配列として得られる濃淡画像のこ とである. Fig.1 に同一物体を撮影した(a)距離濃淡画 像と(b)カラー画像の一例を示す.距離濃淡画像の特 徴は、計測時の光源環境と物体の3次元形状が既知 であるため、物体表面の反射特性の推定が可能であ



(a)Range intensity image



(b)Color image Fig.1 Range intensity image and color image



Fig.2 Flow of system

ること、2 次元画像に近い特性を持つことなどが挙 げられる.本研究では、距離濃淡画像が持つこれら の特徴を利用した三次元モデリングシステムを構築 する.

システムの流れを Fig.2 に示す.まず,本システ ムの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には,光源と物体との位置関係 により影やハイライトが生じるため,これらを除去 することで明るさの真値を抽出する.続いて,全方 位幾何モデルの生成を行う.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,物体 に対して複数視点から取得した距離画像の位置合わ せ・統合処理を行うことで、物体の全体形状を表す 全方位幾何モデルを生成する.またこのとき、補正 した距離濃淡画像も同時に統合することで、全方位 幾何モデルに輝度情報を付加する.この輝度情報は、 カラー画像とのレジストレーションの際に利用する. 最後に、この全方位幾何モデルとカラー画像とのレ ジストレーションを行い、照明光の影響を除去した カラー画像をマッピングすることで、全方位カラー モデルを生成する.

## 3. 距離濃淡画像の輝度補正

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 画像は,センサ特性に由来する以下のような要因に よりその輝度値に影響を受ける.

- ・センサと各測定点との距離
- ・測定点における表面法線ベクトル
- ・センサに固有の特性

対象物の物体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の二乗に反比 例した値で観測される.また、物体表面の法線ベク トルNと光源ベクトルLとのなす角を $\theta$ 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.

$$I_{obs} = \left\{ k_i(l) \frac{\cos \theta}{l^2} I \right\}^{\gamma}$$
(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<sub>i</sub>(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、6 章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)を*I*について解 くことにより、これらセンサ特性の影響を取り除い た輝度値*I*を求めることが出来る.

#### 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



Fig.3 Torrance-Sparrow model

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ひとつである Torrance-Sparrow モデルにいくつかの仮定を設け, 簡略化したものを用いる. Fig.3 に Torrance-Sparrow モデルの概念図を示す. ここで、L は光源方向ベク トル、Vは視線方向ベクトルであり、HはLとVの 二等分ベクトルである.また,面法線ベクトルNと **H**のなす角を $\alpha$ とする.本来の Torrance-Sparrow モデ ルは, 鏡面反射成分の記述において, 物体表面を微 小平面の集まりとし、微小面どうしの遮断による光 の減衰などを考慮しているが、本論文ではこのよう な遮断は起こらないほど物体表面は滑らかであると 仮定する.また、反射光における鏡面反射の割合は 拡散反射光強度によらず常に一定であるとする.以 上の仮定により、物体表面の反射光1は式(2)のよう に簡略化できる.

$$I = I_d \left\{ 1 + k \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \right\}$$
(2)

ここで、 $I_d$ は拡散反射成分、kは反射光における鏡面 反射成分の割合を表す定数、 $\sigma$ は物体表面の粗さを 示す.このとき、 $k \ge \sigma$ を求めることが出来れば、式 (2)を $I_d$ について解くことで、鏡面反射成分を除去し た拡散反射成分のみを抽出することが出来る.

#### 4. 距離濃淡画像および距離画像の統合処理

前述のとおり,能動型の距離画像センサでは一視 点から見た断片的な形状しか取得出来ないため,複 数枚の距離画像を統合することで物体の全周形状を



Fig.4 Registration and integration

獲得する.複数の視点から取得された距離画像は異 なる座標系で表現されているため、それらの相対的 な位置あわせを行い、一つのモデルに統合すること で、全方位幾何モデルを生成する.またこのとき、 距離濃淡画像も同時に統合することで、全方位幾何 モデルに輝度情報を付加する.距離濃淡画像を単純 に統合すると、ハイライト等の影響により統合部分 に継ぎ目が生じるが、3章に示した手法を用いて 個々の距離濃淡画像を事前に補正しておくことで、 画像間の継ぎ目部分を滑らかに統合する.この輝度 情報は、カラー画像とのレジストレーション時に利 用する.レジストレーションについては 5.1 で述べ る.

本研究では, InnovMETRIC 社製の PolyWorks を用 いてこれらの処理を行う. 位置あわせから統合まで の概念図を Fig.4 に示す.

# 5. カラー画像の輝度補正

カラー画像から照明光の影響を除去し、物体色を 抽出するために、本論文では[5]の手法を適用する. 3 章に示した距離濃淡画像の輝度補正により得られ る明るさの真値に、カラー画像の輝度値を従わせる ことで、カラー画像の輝度補正を行う.

# 5.1 距離濃淡画像とカラー画像との

レジストレーション

距離濃淡画像の補正結果をカラー画像へ反映させるには、両画像の正確な位置あわせ(レジストレーション)を行う必要がある.距離濃淡画像とカラー画像とのレジストレーションは、距離濃淡画像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[4]の手法を適用する.本手法は、カラー画

像平面に投影された距離濃淡画像とカラー画像との 重複する領域内でオプティカルフローの拘束が近似 的に満たされると仮定し,反復演算によって各パラ メータを算出するものである.

カメラパラメータを求めるレジストレーション はテクスチャマッピングを行うためにも必要である ため,全方位幾何モデルとカラー画像のレジストレ ーション時にも本手法を拡張して利用する.

# 5.2 補正係数の算出とカラー画像への適用

カラー画像の輝度補正を行うための補正係数を算 出するために、まず、距離濃淡画像を 5.1 節で求め た投影パラメータを用いてカラー画像平面へ投影す る.しかし、Fig.5 に示すように、投影したカラー画 像平面における各点(この点のことを以下では対応 点と呼ぶ)の座標値は整数値にはならず、カラー画像 の画素とは一致しない.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求める.

続いて,対応点において,距離濃淡画像の輝度値 Inと内挿処理により求めたカラー画像の輝度値Lの 比c=I<sub>ri</sub>/I<sub>c</sub>を算出し、これを対応点における補正係数 とする.しかし、一般に距離濃淡画像の解像度はカ ラー画像の解像度よりも低いため、カラー画像を補 正するためには,対応点における補正係数配列から カラー画像の各画素における補正係数を新たに算出 する必要がある.本論文では、もとの補正係数配列 にパラメトリック曲面のひとつであるBスプライン 曲面を当てはめることで点間のデータを補間し、カ ラー画像各画素の補正係数を算出する. Fig.5 におけ る画像平面の高さ方向に補正係数cをとった三次元 空間を定義し、三次元空間上の補正係数データ配列 に対してBスプライン曲面を当てはめる. カラー画 像の各画素の座標値に位置する曲面の高さの値を代 入することで,カラー画像の各画素における補正係 数を算出する.

算出した補正係数配列をカラー画像の RGB 各チャンネルの画素値に乗算することで,カラー画像の 補正を行う.

## 6. 全方位カラーモデル生成実験

提案手法を用いて3Dモデルの生成実験を行った. 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 らなるシステムを用いた.本センサは赤色のレーザ 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



Color image  $I_c(u,v)$  Range intensity image  $I_{ri}(u_{ri},v_{ri})$ Fig.5 Projection of a range intensity image



Fig.6 Scanning scene with ShapeGrabber

測すると同時に、反射光強度を濃淡値として取得する. 撮影風景を Fig.6 に示す. モデル化する対象物体は円筒形の茶筒とし、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 製のデジタルカメラ D70 を用いた. 画素数は 3008×2000 である. 取得枚 数は距離濃淡画像とほぼ同視点から計9枚取得した.

また,3.1の手法を本システムに実装するにあたり, センサの幾何構成や測定原理などを考慮し,式(1)を 次式のように変更して適用した.

$$I_{obs} = \left\{ k_i (l_c) \frac{\cos \theta_c}{l_p l_c} I \right\}^{\gamma}$$

$$k_i (l_c) = a_i l_c^2 + b_i l_c + c_i$$
(3)

ここで、 $\gamma=0.45$ はCCDカメラのガンマ値、 $k_i(l_c)$ はレ ーザスリット光の不均一性やCCDカメラの周辺減 光の影響による測定点ごとの感度のばらつきを補正 する関数である.また、 $\theta_c$ は視線方向ベクトルと表 面法線ベクトルとのなす角、 $l_p$ 、 $l_c$ はそれぞれ測定点 とプロジェクタおよび測定点とCCDカメラとの距 離である.

## 6.1 距離濃淡画像の輝度補正

Fig.7(a)に取得した距離濃淡画像の一例を, Fig.7(b) に3章で示した手法を用いて補正を行った結果を示 す. このとき,式(2)における反射特性を表すk と $\sigma$ の値は実験的に求め、取得した距離濃淡画像全てに おいて k=0.178, \sigma=0.154, とした. これらを見ると, 陰影の除去された一様な濃淡分布が得られているこ 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.式 (2)のモデル式は仮定を多く含む簡易的なものであ ったが、対象物体の中央付近に生じていた鏡面反射 成分が除去されており,比較的良好な結果が得られ ている.

## 6.2 全方位幾何モデルの生成

複数枚の距離画像および補正を行った距離濃淡画 像を統合することにより生成した全方位幾何モデル を Fig.8 に示す. また, 補正を行った距離濃淡画像 と補正を行っていない距離濃淡画像の統合結果の比 較を Fig.9 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. Fig.8 より,物体の全周形状を表す全方位幾何モ デルが生成出来ていることがわかる. また Fig.9 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繋がらず、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 とがわかる.

#### 6.3 カラー画像の輝度補正

Fig.7 の距離濃淡画像とほぼ同視点から取得した カラー画像を Fig.10(a)に,距離濃淡画像の補正結果 をもとにカラー画像を補正した結果を Fig.10(b)に示 す. このとき, 距離濃淡画像を 12×12 の小領域に分 割し、データ欠損のない領域にのみ補間を行った. これを見ると、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わかる.

## 6.4 全方位カラーモデルの生成

補正したカラー画像を幾何モデルに付加すること で生成した全方位カラーモデルを Fig.11 に示す.ま た、補正をしていないカラー画像を付加した結果と 補正を行ったカラー画像を付加した結果の比較を Fig.12 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. Fig.11 より, 全方位カラーモデルが生成できていることがわかる. また, Fig.12の比較において, (b)では異なる照明環



(a)Original image (b)After correction Fig.7 Correction of range intensity image



Fig.8 Omnidirectional geometric model





(a)Original image (b)Without correction (c)With correction Fig.9 Integration result (magnified)

境で撮影されたカラー画像を付加したために、二枚 の画像の境界線がはっきり出ているが、(c)ではその 境界線が完全ではないが軽減されており、補正の効 果が見てとれる.

# <u>7. おわりに</u>

本論文では、距離濃淡画像の特徴を利用した三次 元モデリングシステムを提案した.本システムでは、 複数枚の距離濃淡画像および距離画像を統合し、全 方位幾何モデルを生成する.また、3 次元モデルの テクスチャとなるカラー画像を、距離濃淡画像の特 徴を効果的に用いることで補正し、撮影時の照明の 影響をキャンセルしたカラー画像を作成する.全方 位幾何モデルとカラー画像のレジストレーションを 行い、補正したカラー画像をテクスチャマッピング することで、見えに違和感のない全方位カラー3Dモ デルを生成した.

今後の課題としては、カラー画像補正時のデータ 欠損をなくすことや補正結果の定量的評価、またテ クスチャ同士を滑らかに繋ぐブレンディング処理、 システムの簡略化などが挙げられる.

## 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.

## 8. 参考文献

- [1] 倉爪亮,大石岳史,佐川立昌,西野恒,池内克 史,"Great Buddha Project—文化遺産のデジタル 保存—",第19回日本ロボット学会学術講演会 予稿集,pp.23-24,2001.
- [2]M.Levoy, K.Pulli, B.Curless, S.Rusinkiewicz, D.Koller, L.Pereira, M.Ginzton, S.Anderson, Jdavis, J.Ginsberg, J.Shade, and D.Fulk, "The digital Michelangelo project:3D scanning of large statues"SIGGRAPH 2000, pp.131-144,2000.
- [3] 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 スチャのアラインメント",信学論, Vol.J85-D-II, No.6, pp.1038-1046, 2002.
- [4] 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、 Vol.J88-D-II, No.8, pp.1469-1479, 2005.
- [5] 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カラー画像の輝 度補正",画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), IS3-121, pp.1173-1180, 2005.
- [6] S.Tominaga and N.Tanaka, "Estimating reflection parameters from a single color image",IEEE CGA,Vol.20,No.15,pp.58-66,2000



(a)Original image (b) After correction Fig.10 Correction of color image



Fig.11 3D model with corrected color texture images





(a)Original image (b)Without correction (c)With correction Fig.12 Texture mapping result (magnified)

[7] 町田貴史,竹村治雄,横矢直和,"複数の照明条件の組みあわせによる物体の表面反射特性の密な推定",信学論,Vol.J84-D, No.8, pp.1873-1881,2001.