

カラー照度差ステレオによる3次元形状の復元

富田 安, 金子 俊一, 本多 庸悟

東京農工大学 工学部 電子情報工学科

〒184 東京都小金井市中町2-24-16

あらし

本論文は独立な3種類の色光(ここでは赤色光, 緑色光, 青色光)による照明を用いた照度差ステレオ法について述べている. 通常の照度差ステレオに比べて, 1回だけの撮像で済むなどの特徴をもつ. 対象物表面の画素の色は, 3種類の色光の混色により決定され, そこでは色の加法則および比例則が成立することを仮定している. この仮定に基づいて, 画素の色度をキーとして傾き値を引くためのルックアップテーブルを作成する. この表は参照球から得られる画素ごとの色度と内挿計算によって作られる. 対象物上のすべての画素の傾きはこの表を引くことにより算出される. 得られた傾き値を用いた漸化式により対象物の輪郭形状を再構成する. 白色の実対象物を用いた実験により, 提案する形状復元手法の有効性を示す.

和文キーワード 3次元形状復元, カラー照度差ステレオ, 色度

A Method for Shape Reconstruction of Solid Objects based on Color Photometric Stereo

Yasushi TOMITA, Shun'ichi KANEKO and Tsunenori HONDA

Department of Computer Science, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16 Naka-machi, Koganei-shi, Tokyo 184

Abstract In this paper, a new version of the photometric stereo which utilizes three independent color illuminations is described. In this study, the R(red), G(green) and B(blue) color lightings have been used. The proposed method needs only one color image while conventional photometric stereo methods need three images. The chromaticity coordinates of surface patches of an object are determined by a mixture of color stimuli with three color illuminations and the additivity law and the proportionality law are assumed to be realized. Based on these assumptions, we construct a look-up table for finding a gradient pair of each surface patch through the chromaticity coordinates as a key. This table is calculated with the three primitive color values and interpolating calculations. The gradient pair of each surface patch is derived from this table. The contour shape of the object is reconstructed through a recurrence equation with the gradients. Fundamental experiments with white mat objects show the effectiveness of the proposed method.

英文 key words shape reconstruction of solid object, color photometric stereo, chromaticity

1. まえがき

本研究は、独立な3色光（R, G, B）による照明を用いた照度差ステレオによる3次元物体の形状の復元手法を確立することを目的としている。2次元画像の輝度情報から対象物の3次元形状を復元する手法として、Hornにより提案されたShape from Shading¹⁾や、Woodhamにより提案された照度差ステレオ²⁾がある。照度差ステレオは、独立な3方向から白色照明を独立に投射して、3枚の画像により形状の復元を行う。この手法では、各照明方向ごとに3枚の画像を撮像することが必要である。本研究では、3色光による照明を独立な3方向から同時に視野内に投射して通常の照度差ステレオと同じ効果を得ている。この方法では、1回のみの撮像で得られるカラー画像（RGB各1枚）から3次元形状の復元が可能である。

対象物表面の面素における傾きの算出は、観測された面素の色度と傾きとを対応させた表を表引きする方法で行う。面素の色度は、3色光の混色により決定し、そこでは加法混色が成立すると仮定する。これを原理とする手法を表面が白色のマット面である対象物の形状の復元実験を行うことで検証する。

2. カラー照度差ステレオ

2.1 原理

照度差ステレオは、独立な3方向からの照明を独立に投射して、各照明に投射された対象物表面の面素の輝度の組み合わせによって傾きを決定する³⁾。それに対して、本研究のカラー照度差ステレオは、3方向からの色光を同時に投射したときの対象物表面の面素の色度 (x, y) によって傾きを決定する。面素の色は3色光の照明による混色により生成される。このとき、まず加法則が成立し（加法混色）、次に比例則（RGBの比が等しい色は同じ色度をもつ）が成立すると仮定している。すなわち、通常の輝度の組み合わせによる照度差ステレオにおいては輝度の違いによって傾き量を推定するが、カラー照度差ステレオにおいては色度の違いによって傾き量が推定できると仮定している。一般に理想的な加法混色は白色板にスペクトル光を照射する場合に観測できる⁴⁾。

2.2 観測システム

カラー照度差ステレオの観測システムの構成を図1に示す。カメラは透視投影によるピンホールモデルとする。3つの照明の位置は、Rの照明が画像座標系の縦軸上に、G, Bの照明が横軸上に設定されており、平行照明の仮定を満たす視野の領域を広くするために、対象物の座標系の原点を向いて設定されている。

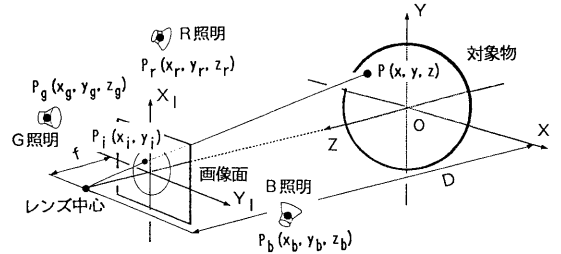


図1. 観測システム

2.3 ルックアップテーブルの作成

傾きを求める手法として表引き法を採用する。これにより、たとえば完全拡散表面の仮定に基づき数式モデルだけによって色度と傾きの関係を導出する場合に比べてデータ量は増えるが、理論モデルからの隔たりを吸収することが容易である。さらに、照明やカメラなどの実際の撮像環境の影響による系統誤差にも対処可能となると考えられる。実際に白色のマット面である球体（半径：50mm）を撮像してルックアップテーブル（以下、LUT）を作成する。LUT作成の手続きを図2に示す。すなわち、

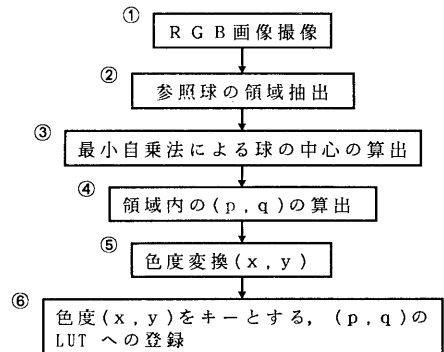


図2. LUT作成過程

- ①：RGB 色光を同時に投射して撮像する。
- ②：参照球の画像を二値化することによって画像上の円の領域を抽出する。
- ③：円の中心を算出する。抽出した輪郭に円のあてはめを行う。輪郭点座標値を用いた最小自乗法により、円の中心座標を算出する。
- ④：求めた中心座標を (x_c, y_c) とすると、球をモデルとした傾きは半径を R として、

$$p = \frac{c^2(x-x_c)}{\sqrt{R^2 - (c(x-x_c))^2 - (c(y-y_c))^2}} \quad (1)$$

$$q = \frac{c^2(y-y_c)}{\sqrt{R^2 - (c(x-x_c))^2 - (c(y-y_c))^2}} \quad (2)$$

$$c = \frac{D}{f} \quad (3)$$

と表される。傾きを登録すべき点として、上記の円内の点を選び、式(1)、(2)を用いて対応する (p, q) を算出する。

- ⑤：画像では色は RGB で表されているが、これを色度座標 (x, y) に変換する。変換には RGB 表色系を XYZ 表色系に変換する変換行列を用いる⁵⁾。そして XYZ を正規化して、色度座標 (x, y) を得る。
- ⑥： (x, y) をキーとして (p, q) を LUT に登録する。また、ある色度座標に対して、登録する傾きが複数存在する場合はそれらの平均値を登録することとする。

サンプルとなる点の数により、この手続きだけでは LUT 全体に (p, q) を登録することができない。そのために LUT をこの手続きで登録された (p, q) を用いて内挿する。内挿方法は登録されていない色度座標の 4 近傍を探索し、それらの平均値をその色度座標の (p, q) として登録する。この処理を反復して行い、LUT を更新させていく。色度座標値は 0.001 刻みで定義されている。LUT のサイズは約 0.7MB である。

ここでは、上述の表に加えて、新たに点数表を作成する。これは、傾きごとに次の 3 つの属性値が登録されているものである。すなわち、何回目の更新で LUT に登録された (p, q) であるかを示す点数： $\alpha(p, q)$ 、平均値を求めたときの点の個数を示す点数： $\beta(p, q)$ 、そして登録のときに複数の対応については平均値を登録する

ため、参照球を復元したとき傾きに生じた誤差を示す点数： $\gamma(p, q)$ である。図 2 の手続きで登録された (p, q) については前者の 2 つの点数は 0 である。この表は、形状（奥行き）を復元するときの計算開始点の決定に利用する。

3. 3次元形状の復元

3.1 奥行き計算

3次元形状の復元方法は、対象物の領域において開始点を設け、この点から領域内の点について経路を設定する。この経路に沿って漸化式により奥行き量を計算する。その計算方法について述べる。

奥行きの計算式は、基準点における奥行きの初期値を $z(x_0, y_0)$ とすると、点 $p(x', y')$ の奥行き量 $z(x', y')$ は、

$$z(x', y') = z(x_0, y_0) + \int_{(x_0, y_0)}^{(x', y')} (p(x, y)dx + q(x, y)dy) \quad (4)$$

となる³⁾。式(4)を漸化式で表す場合、経路が n 回のステップで構成される時、

$$\left. \begin{aligned} z(x_i, y_i) &= z(x_{i-1}, y_{i-1}) \\ &\quad + h p(x_{i-1}, y_{i-1}) dx \\ &\quad + v q(x_{i-1}, y_{i-1}) dy, \\ &\quad i=1, \dots, n \\ z(x_i, y_i) &= z(x_0, y_0), i=0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 h および v は経路の方向によって異なり、水平方向では $(h, v) = (1, 0)$ 、垂直方向では $(h, v) = (0, 1)$ 、斜め方向では $(h, v) = (1, 1)$ となる。また、表引きによって傾きが未定義である点に経路が設定された場合には、 $(h, v) = (0, 0)$ とする。また、傾きを積分していくときに、それぞれの傾きの顕著な誤差については、対象とする画素の近傍について、

$$\left. \begin{aligned} \iint (p(x, y) - p(x', y'))^2 dx' dy' &< \varepsilon \\ \iint (q(x, y) - q(x', y'))^2 dx' dy' &< \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

で評価する。式(6)を満たさないときは、それぞれの傾きは近傍の傾きの平均とする。

3.2 開始点の設定

奥行き計算のための開始点 (x_s, y_s) として次式で定義する点を用いる。

$$(x_s, y_s) = \{ (i, j) \mid \min(\alpha(p(i, j), q(i, j)) + \beta(p(i, j), q(i, j)) + \gamma(p(i, j), q(i, j)) + \delta(i, j)) \}, \quad (i, j) \in O \quad (7)$$

ここで、集合 O は 2 値化処理により抽出した対象物に対応する領域を示す。 $\alpha(p(i, j), q(i, j))$ は点 (i, j) の表引きされた (p, q) の点数 α である。また点数 β, γ も同様である。また奥行き計算の誤差を少なくするために設定される経路の最長距離を短くしたい。その評価をするのが各点の対象物の領域の重心点からの距離を示す点数 $\delta(i, j)$ である。 $\delta(i, j)$ は点 (i, j) と領域の重心点の距離を示す。この 4 つの点数の合計で評価する。

また、複数個選択された場合には、自動的に最も左上の点としている。式 (7) により、傾きの推定の精度が高いと考えられる点を奥行き計算の開始点として選択することができる。

3.3 奥行き計算の経路の設定

奥行き計算は対象物の領域内のすべての点について行う。そのために、開始点と領域内の点を連結する経路を指定する必要がある。このとき、後述する漸化式のステップ数は少ない程復元誤差が小さいと考えられるので、経路に含まれる経由点の数は少ないほど望ましい。ここでは、両方の点を結んだ直線補間 (simple DDA) により経路を生成する。ただし、補間で重なる点については、奥行き量を保存することによって無駄な計算を避けている。

4. 実験

4.1 実験方法

実対象物による 3 次元形状の復元実験を行う。参照球と同じ塗料 (つや消し白) を対象物に塗布する。2 種類の対象物の結果について述べる。

各 RGB 色光による照明はハロゲンランプとカラーフィルタを組み合わせて生成する。各照明を図 1 の各位置に設定する。それぞれの照明を

画像平面の中心の領域に向けることにより、その領域は平行光線照明であると仮定する。対象物はこの領域に対応させて、画像平面の中心に設置させる。撮像は 3 色光を同時に投射し、RGB の分解能が 8 ビットの CCD カラーカメラで 1 回のみ行う。撮像距離は 800mm、画像のサイズは 640(H) × 484(V) 画素である。

4.2 カラー照度差ステレオ処理

RGB 画像の撮像から対象物の奥行き量を表示する復元画像生成までのカラー照度差ステレオ処理プロセスを図 3 に示す。すなわち、

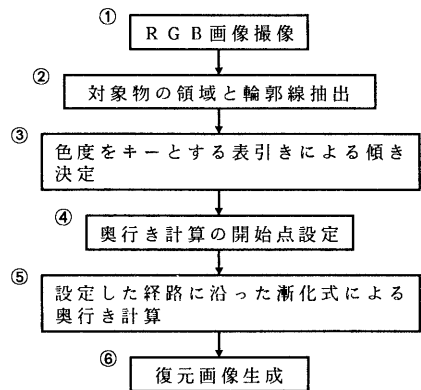


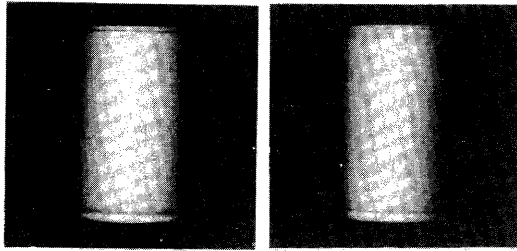
図 3. カラー照度差ステレオ処理プロセス

- ①: RGB 色光を同時に投射して撮像する。
- ②: 対象物の領域を抽出して、その領域から輪郭線を抽出する。
- ③: 領域内の画素の RGB を色度座標 (x, y) に変換し、表引きによって傾きを決定する。
- ④: 式 (7) を用いて開始点を設定する。
- ⑤: 設定する開始点から式 (5) により、開始点と領域内の各画素を結ぶ経路に沿って奥行き量を計算する。異なる開始点を 4 点設定し、それぞれの計算結果の平均を奥行き量とする。
- ⑥: 奥行き量を濃淡値で表示する復元画像を生成する。この画像は明るい点 (濃淡値が大きい点) はカメラの位置に近い位置であることを示す。

4.3 実験結果

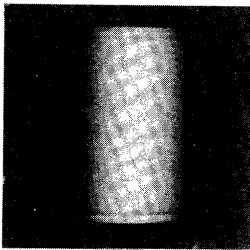
まず対象物を円柱型の缶 (高さ: 100mm, 半径: 30mm) とした実験結果を示す。RGB の各画像

を図4に示す。そして表引きした (p, q) による形状復元の結果を、真値を缶と同一サイズの円柱として比較し、復元画像と3次元グラフィックで図5および図6に示す。



(a) R画像

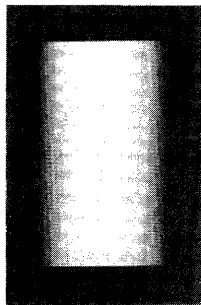
(b) G画像



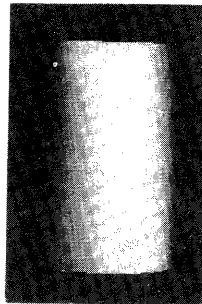
(c) B画像

30mm

図4. RGB画像

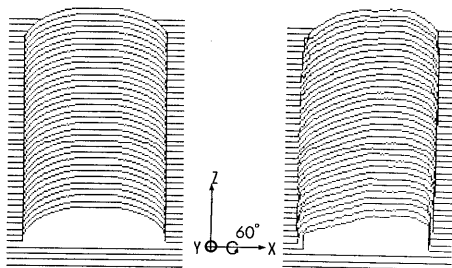


真値



復元結果

図5. 復元画像



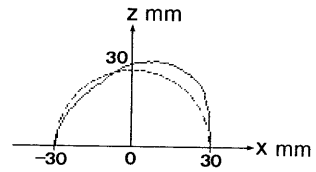
真値

復元結果

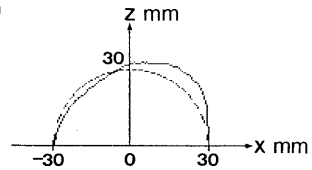
図6. 3次元復元形状

また図2の座標系のX軸とZ軸による断面図を真値と比較して真値を破線で、復元結果を実線で図7に示す。

① $Y=0\text{mm}$



② $Y=10\text{mm}$



③ $Y=-10\text{mm}$

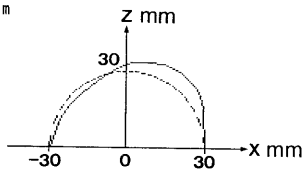


図7. 断面図

つぎに複雑な形状として凹凸のある曲面体(マイティマウス)を対象物とした実験結果を示す。原画像から抽出されたR画像を図8に示す。また復元画像と3次元グラフィックを図9および図10に示す。

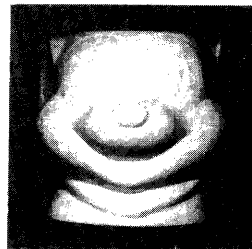


図8. R画像

30mm

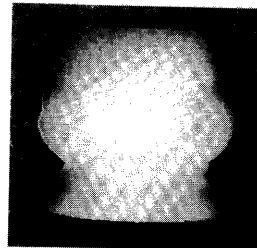


図9. 復元画像

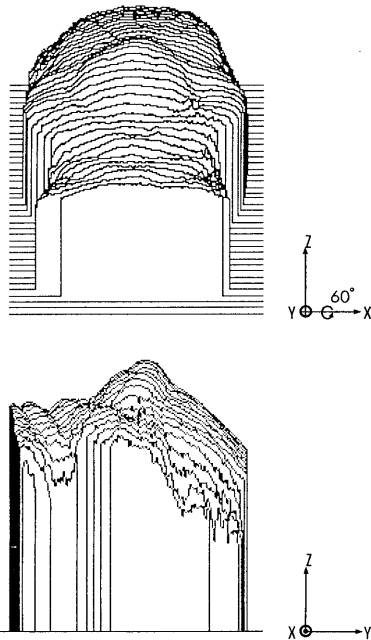


図10. 3次元復元形状

実験結果については、次のようにまとめられる。

(A) 円柱型の缶の場合

- (1) 形状復元は、最大奥行き量は真値が 30mm であるのに対して結果は 35mm であった。
- (2) 式(5)による (p, q) の修正は、 p が対象物の領域画素数の 0.2%, q が 0.1% であった。
- (3) 開始点の設定については領域の重心点より横軸方向に 2 画素ずれた点が設定された。他の領域内の点を開始点として設定した場合には最大奥行き量が 1~6mm 誤差が大きくなった。
- (4) 奥行き計算の経路の設定については他の経路と比較すると、経路を図 2 の座標系の X 軸と Y 軸にそれぞれ平行なものに設定した場合、最大奥行き量は 45mm であった。

(B) マイティマウスの場合

- (1) 形状復元は最大奥行き量については真値が 110mm に対して復元結果は 122mm であった。形状については実際の凹凸よりも滑らかなものとなった。
- (2) 修正された (p, q) は p が領域画素数の 0.5% であり、 q が 0.3% であった。
- (3) 開始点の変更による奥行き量の影響は、誤

差が 2~6mm 大きくなった。

(4) (A) と同様に経路を変更した場合、最大奥行き量は 156mm であった。

(A), (B) の (3), (4) から開始点と奥行き計算の経路の設定について有効性が示される。また開始点と奥行き計算の経路の変更については、最大奥行き量に対する誤差は小さくなるが復元した形状が歪んでしまう場合もあった。

(B) の復元結果については照明光の向きによって陰影が生じる領域があり、そのために表面の面素の色度が影響されて誤差が生じたと考えられる。

5. むすび

本論文では対象物表面の面素の観測される色度は比例則の成り立つ加法混色を仮定した RGB の色光による照明の混色により決定すると仮定し、その色度と (p, q) を対応させた LUT の表引きによって 3 次元形状の復元を行うカラー照度差ステレオ法を提案した。そして実対象物に対して適用し 3 次元形状の復元を行い、その有効性を確認した。また奥行き計算の開始点と経路の設定についても有効性を確認した。

今後の課題は奥行き精度の向上のために形状の復元結果に対する得られたカラー情報を利用した奥行き量の検証方法の検討や今回は白色の場合であったが対象物が有色の場合についての形状復元の実験の検討などを行いたい。

参考文献

- (1) Berthold K. P. Horn: "Understanding Image Intensities", Artificial Intelligence 8, pp.201-231(1977)
- (2) Robert J. Woodham: "Analysing Images of Curved Surface", Artificial Intelligence 17, pp.117-140(1981)
- (3) Berthold K. P. Horn: "Robot Vision", The MIT Press (1986)
- (4) 日本色彩学会: "新編 色彩科学ハンドブック", 東京大学出版 (1989)
- (5) 千々岩英彰: "色彩学", 福村出版 (1983)