

90度の回転を利用した物体色の計測

北口 勝久 齋藤 守

大阪市立工業研究所

本研究では光源に対する物体の向きを90度変えて撮影した画像と形状データから物体色を推定する手法を提案する。市販されている3次元スキャナには形状計測と画像撮影の両方を行うものがあるがその画像には光源環境の影響を含んだ色情報が記録されており、そのままでは3次元モデル化などには使用出来ない。提案手法では3次元スキャナと回転台、平行光光源によるシンプルな機器構成で、かつ他の手法より少ないデータ計測回数で光源環境の影響を除いた物体色の計測を実現する。画像に記録される輝度値が0縮退を起こしていなければ2枚の画像から物体色の計測が可能であることを示し、実験によりその精度を評価する。

Measurement of Object Color by Turn of 90 Degrees

Katsuhisa KITAGUCHI Mamoru SAITO

Osaka Municipal Technical Research Institute

This paper proposes a method for measurement of object color using shape data and the images which are taken from 90 degrees different direction. The system consists of 3D scanner, turntable and parallel-light's source, which can measure object color from fewer images than other methods. For example, it can measure the object color from 2 images and shape data when brightness value doesn't cause stuck-at 0 fault. The effectiveness was confirmed through several experiments.

1. はじめに

物体に当たり反射した光が人の目やセンサに入ることで色が認識される。そしてこの反射光の波長成分は光源の波長成分、物体表面の分光反射特性、および形状、光源と観察する方向によって決まる。このような光の反射をモデル化したものとしてPhongやTorrance-Sparrowのモデルがよく知られている。これらは反射光を鏡面反射と拡散反射の和で表現する2色性反射モデルに属する。鏡面反射は光源色を表し拡散反射は与えられた環境での物体色を表す。この2色性反射モデルは富永らによって詳しく検証されている[1]。物体の形状および色を計測することはコンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスの分野で重要な問題とされており、両方を計測する装置も販売されている[2]。しかしこれらの装置で計測される色は計測時の光源や装置の向き、物体の姿勢といった計測環境の影響を受けた色であり、上記のような用途に用いるには計測環境の影響を除去する必要がある。また計測した形状データから得られる法線

ベクトルは誤差が大きいので使用しないことが望ましい。計測環境に依存しない物体色や表面反射特性の推定については数多くの研究が行なわれている。町田ら[3]は60個の光源設置可能位置を備えた計測装置を作成することで物体表面の反射特性を密に推定している。小俣ら[4]は回転台とカメラ、平行光源を用いて得られた60枚の画像データから表面反射特性を推定している。これらの手法は特殊な装置や数多くの計測データを用いたパラメータ推定が必要である。森ら[5]は単色の材質で出来た直方体を撮影し、互いに直行する3面の色情報から物体色を計測する手法を提案している。この手法はカメラと平行光源以外の特殊な装置を必要とせず、また光源や観察方向に関する幾何学的精度を必要としない。また必要な計測データは1枚の画像から得られるという利点を持つ。しかし対象物体が単色で直方体もしくは互いに直行する3面を持つ物に限られる。

本研究では森らの手法に対して、回転台により物体の向きを90度変えて撮影した2枚の画

像と形状データを用い、光源を回転台の回転軸に直交させる条件を付加することで任意形状の物体の物体色を計測する手法を提案する。

2. 提案手法

2.1 拡散反射成分の推定

図1は回転台、カメラおよび光源からなる計測装置および絶対座標系O-XYZを真上から見たものである。座標系は回転台の回転軸を通り台面と鉛直方向にY軸、台面に一致するX-Z平面を持つ。光源は平行光で、光線方向がY軸に直交するように設置する。以下、本報告では全て絶対座標系で記述する。平行光の向きを持つ単位ベクトルを $\mathbf{l} = (l^x, 0, l^z)$ 、回転台の回転角 Φ が ϕ の時の物体表面上の点 p の単位法線ベクトルを $\mathbf{n}_\phi = (n_\phi^x, n_\phi^y, n_\phi^z)$ とする。 p における拡散反射光の強さ $Ld_\phi(\lambda)$ はTorrence-Sparrowモデルの拡散反射の項を用いて

$$Ld_\phi(\lambda) = \alpha \cos(\theta_\phi) S(\lambda) E(\lambda) \quad (1)$$

で与えられる。ここで $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布、 θ_ϕ は $\Phi = \phi$ における光源の入射角、 α は重みである。次にこの拡散反射光をセンサで観測した場合のRGB各成分は次のようになる。

$$\begin{aligned} C_\phi &= \int_{[\lambda]} Ld_\phi(\lambda) c(\lambda) d\lambda \\ &= \alpha \cos(\theta_\phi) \int_{[\lambda]} S(\lambda) E(\lambda) c(\lambda) d\lambda \\ &= C_{\max} \cos(\theta_\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$C_{\max} = \alpha \int_{[\lambda]} S(\lambda) E(\lambda) c(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

であり、 $\theta = 0$ の輝度値である。なお、 C はR、G、Bを、 $c(\lambda)$ は当該カラー成分に対するセンサの分光感度を表す。 $[\lambda]$ は可視光の波長領域である。次に $\Phi = \phi + 90$ (deg)まで回転が進んだ場合を考える。センサで観測されるRGB各成分は(2)式と同様に

$$C_{\phi+90} = C_{\max} \cos(\theta_{\phi+90}) \quad (4)$$

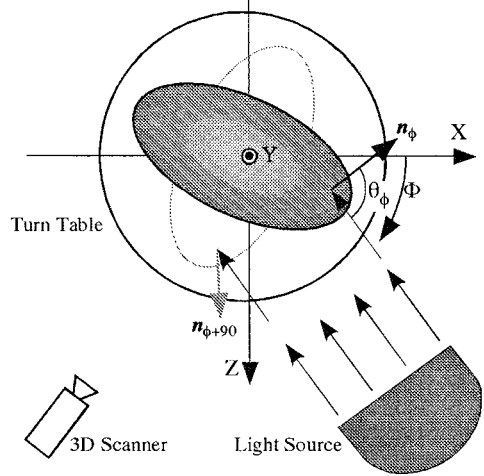


図1 計測装置および座標系

となる。ここで90度回転後の p での単位法線ベクトルの各成分は $\mathbf{n}_{\phi+90} = (-n_\phi^z, n_\phi^y, n_\phi^x)$ であるので

$$\cos(\theta_\phi) = \mathbf{n}_\phi \cdot \mathbf{l} = n_\phi^x l^x + n_\phi^z l^z \quad (5)$$

$$\cos(\theta_{\phi+90}) = \mathbf{n}_{\phi+90} \cdot \mathbf{l} = n_\phi^z l^z - n_\phi^x l^x \quad (6)$$

となる。ただし \cdot はベクトルの内積計算を表す。これから

$$\begin{aligned} \cos^2(\theta_\phi) + \cos^2(\theta_{\phi+90}) &= (l^x{}^2 + l^z{}^2) (n_\phi^x{}^2 + n_\phi^z{}^2) \\ &= 1 - n_\phi^y{}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

が成立する。物体表面上の点 p における法線ベクトルのY成分は Φ の値によらず一定(以降 n^y とする)であるので、90度回転する前後で計測されるカラー成分の2乗和は

$$\begin{aligned} C_\phi^2 + C_{\phi+90}^2 &= C_{\max}^2 (\cos^2(\theta_\phi) + \cos^2(\theta_{\phi+90})) \\ &= (1 - n^y{}^2) C_{\max}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

となり任意の Φ に対して一定となる。これより90度回転する前後の輝度値と法線ベクトルのy成分が分かれば R_{\max} 、 G_{\max} 、 B_{\max} すなわち物体色が求まる。 R_{\max} 、 G_{\max} 、 B_{\max} から任意の入射角 θ の場合の拡散反射輝度値 $[R_\theta, G_\theta, B_\theta]^t$ は

$$[R_\theta, G_\theta, B_\theta]^t = \cos(\theta) [R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}]^t \quad (9)$$

で与えられる。

2.2 0縮退の補正

入射角 θ が変化するとき、 C_ϕ は(2)式のように \cos 曲線となり理想的には $\theta=0$ で最大値 C_{\max} 、 $\theta=90$ で0となる。しかし実際にはセンサ感度の限界から $\theta < 90$ で輝度値が0となる場合がある。これは0縮退と言われる。このような場合、(8)式の関係が成り立たないので次の補正を考える。0縮退を起こした時の輝度値曲線は \cos 曲線が下方に平行移動した部分と0の部分から成っていると考えられる。つまり

$$C_\phi = \begin{cases} C'_{\max} \cos(\theta_\phi) - \beta & \text{if } 0 < C'_{\max} \cos(\theta_\phi) - \beta \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

ただし

$$C'_{\max} = C_{\max} + \beta \quad (11)$$

であり、 β は輝度値曲線を平行移動させるための変数である。この式を用いると(8)式は

$$(C_\phi + \beta)^2 + (C_{\phi+90} + \beta)^2 = (1 - n^y)^2 C'_0{}^2 \quad (12)$$

となり、 C_ϕ 、 $C_{\phi+90}$ 、 β 、 n^y より C_0 を求めることが出来る。

3. 実験

3.1 標準色票による実験

提案手法の有効性を検証する為に ϕ が90度異なる状態で標準色票を撮影した画像を用いて、拡散反射強度の2乗和から求まる C_0 が一定であることを確かめる。またその値を $\theta=0$ での拡散反射強度の実測値と比較する。図2に示すように光源および3DスキャナはYZ平面上に設置し、光源の向きはY軸に直交させる。標準色票は特

定の色票の中心をY軸が通り、 $\Phi=0$ の時にXY平面と一致するよう設置する。 $12 \leq \Phi \leq 168$ の範囲を6度間隔で変化させ27枚のカラー画像を取得した。画像撮影の設定はゲイン固定、ガンマ補正無しである。本実験では標準色票の形状は平面($n^y=0$)とみなしている。各画像のY軸部分を真中に含む 3×3 画素領域のカラー成分平均値を C_ϕ とし、 $d\Phi = 90$ となる画像対から(8)または(11)、(12)式によりそれぞれ C_{\max} を求める。得られた C_{\max} の平均値 Ave と標準偏差 Std 、 $\theta_\phi=0$ ($\Phi=90$)での実測値との差 Err を評価する。

表1に実験に用いた標準色票と実験結果を示す。表中、*印がついているものは(8)式、その他は(11)、(12)式より C_{\max} を求めたものである。5G6/10と2.5BG6/10のR成分は、輝度値が低すぎた為 C_{\max} を算出不能であった。また5Y8/10、5YR7/10のB成分については、 $\theta=0$ の時に鏡面反射成分のようなノイズが観測された為、他の角度の輝度値から得られる \cos 曲線から $\theta=0$ 時の輝度値を推定して Err を求めている。計測結果の一定度合いを示す Std は Ave にほぼ比例して Ave の約3%の大きさである。実測値との比較についてはR、G成分については良く一致している。B成分のみ Err が大きいことに関してはカメラや光源の分光特性の検討が必要である。

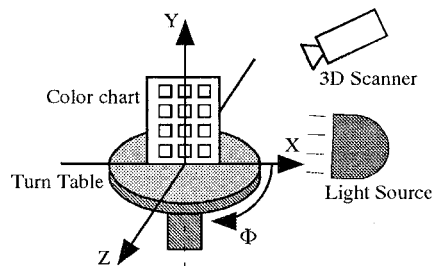


図2 実験装置

表1 C_{\max} 推定結果

色票	Ave			Std			Err		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
5R6/10	85.8	32.7	99.5*	2.7	0.7	3.2*	3.1	-2.0	-4.5*
10B6/10	11.3	71.8	239.7*	0.2	2.5	14.4*	-1.0	1.8	22.1*
5G6/10	-	60.3	117.5*	-	2.0	4.3*	-	-1.0	-3.1*
2.5BG6/10	-	64.8	160.6*	-	2.0	7.0*	-	0.1	5.0*
5Y8/10	96.3	82.5	68.8	3.2	2.6	2.3	2.0	0.2	-2.5
5YR7/10	96.9	52.3	76.4	3.2	1.7	2.7	2.3	-1.3	-1.5
7.5P4/10	29.0	15.3	126.5*	0.8	1.2	4.8*	-0.4	-1.3	-0.3*

*は(8)式、その他は(11)、(12)式より C_{\max} を求めた

3.2 球を用いた実験

図3に示すような一様なテクスチャのプラスチック球の形状データと画像を用いて提案手法の精度の検証を行う。使用したプラスチック球はテクスチャを持たず回転前後の画像は同じであるから、1回の計測結果の複数の点を利用して本手法を適用出来る。光源は3.1同様に設置する。プラスチック球をその中心が3次元スキャナ光軸を含む鉛直平面Fに含まれるよう設置し、形状及び画像を取得する。ここで平面Fでプラスチック球を切断した時の切断線から図3に示す5点 P_i ($i=0\sim 4$)を計測対象とする。 P_i が球の中心を通る鉛直軸周りに ϕ 回転した場合の3次元座標値から画像上での2次元座標値を計算し(図3の黒点)、その画素の輝度値を得る。本実験では $\phi=\pm 30, \pm 40, \pm 50, \pm 60$ で計測を行い、 P_i ごとに4組の $d\phi=90$ となるデータ対を作る。各点の近傍4画素の3次元座標値からその点における法線ベクトルを求め(12)式により C_{max} を求め

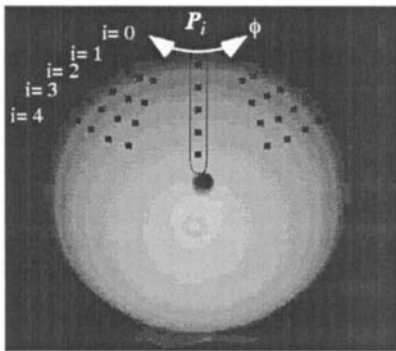


図3 プラスチック球

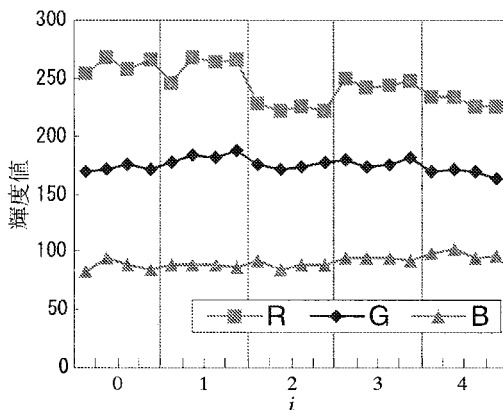


図4 実験結果

る。実験の結果を図5に示す。図4は各 P_i で得られた4個の C_{max} のRGB成分を示したものである。各成分の平均値は(244, 175, 91)、標準偏差は(16.6, 6.0, 5.9)であった。B, G成分については異なる部位からでも近い値が推定出来ていることが分かる。

4. おわりに

本研究では物体の形状データと物体を90度回転させて撮影した画像から物体色を求める手法を提案した。この手法により90度回転する前後の画像と形状データを用いて2画像上の対応する点の輝度値から物体色を求めることが可能となる。0縮退を起こした場合についても対応可能なことを示した。また実験により確認した。実験により誤差が大きい成分が生じたことは検討課題である。

提案手法で物体色を正しく求めるには物体表面法線ベクトルのY成分 ny を精度良く求める手法が必須である。これについては画像の輝度値やシルエット情報を手がかりにするなどして ny の精度向上を図ることを検討中である。実際に物体色を計測するには、回転前後の物体上の対応点検出処理や輝度値から拡散反射成分のみを取り出す処理が必要である。これらは多数ある先行研究例を参考にして行なう予定である。また0縮退を起こした場合の β の推定に必要なデータ数の検討、カメラ依存の除去も今後の課題に挙げられる。

参考文献

- [1] 富永昌治, 大橋伸一郎, “物体のカラー反射モデル”, 情処学論, vol. 33, no. 1, pp. 37-45, 1992.
- [2] コニカミノルタ社 VIVIDシリーズ等
- [3] 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(MIRU2004)講演論文集, vol. 1, pp. 113-118, Jul. 2004
- [4] 小俣和子, 斎藤英雄, 小沢慎治, “光源の相対的回転による物体形状と表面反射特性の推定”, 信学論, vol. J83-D-II, No. 3, pp. 927-937, 2000.
- [5] 森克己, 渡邊栄治, 渡辺浩司, 片桐重和, “直方体を用いた物体色と光源色・光源方向の推定”, 信学論, vol. J87-D-II, No. PP. 1973-1982, 2004