

カラー格子を用いた三次元形状計測の高精度化

High accuracy three-dimensional shape measurement using color grating

○山崎 翔吾

吉川 宣一

○ Syougo Yamazaki Nobukazu Yoshikawa

1. はじめに

非接触かつ高精度な三次元形状計測は、ロボットビジョンやセキュリティなど幅広い分野に求められる技術である。フーリエ変換形状計測法(FTP)[1]は三次元計測技術の一つであり、物体に格子パターンを投影し、別角度から撮影することで生じる格子の歪みをフーリエ変換を用いて解析することにより三次元情報を回復することができる。一般に、FTPを用いて高精度に計測するためには、複数の変形格子像を用いることが考えられるが、撮影回数の増加や移動物体への適用が困難になるという問題も生じる。そこで、投影する格子パターンを空間周波数領域[2]や波長領域[3]で多重化して、一度に複数の変形格子像を得る手法が検討されている。本研究では、波長領域(色)による格子パターンの多重化を考える。しかし、一般に利用できるプロジェクタとカラー CCD カメラを考えた場合、RGB に分離することは容易であるが、プロジェクタの輝度変化が線形でないことや、物体の表面色の影響によって適切な色分解が困難であるという問題がある。

本研究では CCD 素子の直接の値を記録する RAW 画像を用いて色分解の最適化と三次元形状の高精度化を提案する。

2. 原理

プロジェクタとデジタルカメラを用いてカラー変形格子像を取得し、デジタル的に色分解するとき、カラー CCD で受光した輝度信号とプロジェクタの色信号は次の関係式で表すことができる [4]。

$$C_{RAW} = AKP \{C_{Proj}\} + C_o \quad (1)$$

ここで、 C_{RAW} はベイヤー配列で取得される RAW データを表し、 A は各色チャンネル間の結合行列、 K は物体の反射特性、 P はプロジェクタに起因する非線形関数、 C_{Proj} はプロジェクタの各色の画素値、 C_o は各色の背景成分を表す。一般に用いられる単板カラーイメージセンサではカラー画像はベイヤー配列からデジタルカメラ内のデモザイキング処理によって生成される。この時のデモザイキング処理に起因する非線形関数を D とし、得られるカラー画像を C_{Jpeg} とすると、(1) 式を用いて $C_{Jpeg} = D[C_{RAW}]$ と書くことができる。このデモザイキング処理は、通常の用途では問題ないが、三次元計測においては格子の微小なずれやコントラスト変化などが変形されている可能性があり最適なものではない。非線形関数の出力を線形になるように調節することにより、正確に色分解することもできるが、一般に用いられる画像情報は RGB それぞれ 8bit の値しか持たず、十分な線形化が困難である。そこで本研究では、デジタルカメラの CCD 素子が出力

する 12bit をそのまま記録する RAW 画像を用いることを考える。このフォーマットでは画像処理がされずおらず大きな階調の輝度分布を得ることができるため、線形化が容易になる。

カラー格子パターン投影法を用いる場合、物体自身の色の影響によって適切な色分解が困難となる問題がある。そこで、次のような分光反射特性を求めるアルゴリズムを提案する。はじめに、RGB 毎に設定した線形領域の最大輝度を投影するようにプロジェクタを設定する。次に、白色基準平面にプロジェクタを投影し、得られた画像データを C_w とする。次に、表面色を持つ物体にプロジェクタを投影し、得られた画像データを C_o とする。 C_w と C_o の各成分の比を求めることにより、この物体の分光反射特性を得ることができる。

3. 実験

図 1 に三次元計測システムを示す。プロジェクタ(CASIO XJ350)とデジタルカメラ(OLYMPUS C5050)を 0.21m 離して配置した。カメラから基準平面までの距離は 1.28m であった。プロジェクタの輝度は RAW 画像が飽和しないように調整した。

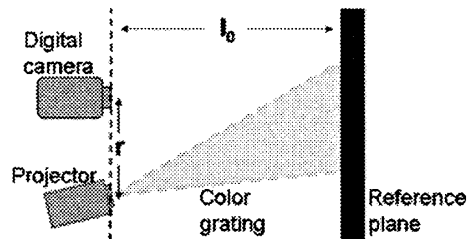


Fig.1 Three-dimensional measurement system.

RGB を 0 から 255 に変化させてつくったグレースケール画像を基準平面に投影し、CCD カメラで撮影したときの RAW 画像の各チャンネルの画素値を図 2 に示す。G チャンネルはほぼ画素値全体を利用できるのに対し、R と B チャンネルは半分程度しか利用することができない。色フィルタの特性と色漏れに影響されるため、各チャンネルで大きく異なる非線形特性を持っていることがわかる。RAW 画像では画素値の範囲が広いため、各チャンネル間の非線形な範囲を除くことにより、線形性を確保することができる。今回の実験では、プロジェクタの R: 60 ~ 250, G: 40 ~ 170, B: 60 ~ 210 の範囲が線形性を満たす範囲であった。このときの RAW 画像の画素値は、R: 50 ~ 530, G: 100 ~ 1300, B: 80 ~ 1000 であり、従来よりも大幅な拡大が可能になった。

次にこの結果を用いて結合行列を求めた。結合行列の対角成分は格子パターンとチャンネルの色が同じ場合なので、これを 1 として正規化した場合を考えると、結合行列は次のような値が得られた。

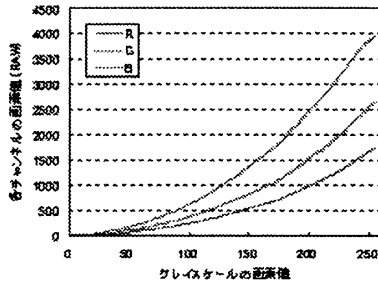


Fig.2 Pixel value of CCD camera as a function of pixel value of projector.

$$A = \begin{pmatrix} 1.000 & -0.279 & 0.059 \\ -0.265 & 1.000 & -0.414 \\ 0.002 & -0.246 & 1.000 \end{pmatrix}$$

この結合行列 A を用いて、正弦波の位相を $\pi/2$ ずつずらして多重化したカラー格子パターンに対して補正を行った。R チャンネルの結果を、単色格子の場合と比較したところ、平均誤差は各チャンネル (R_e, G_e, B_e) において補正前 (180.8, 335.4, 161.4) から補正後 (58.6, 92.9, 85.9) と大幅に減少しており、位相はほぼ一致した結果が得られた。

図 3 に表面に色を持つ平面にカラー格子を投影した場合における分光反射特性を補正した結果を示す。(a) は今回用いた表面色を持つ平面である。これに対して分光反射特性を求める。(b) は分光反射分布を画像化したものである。(c) はカラー格子を投影したときの画像であり、表面色の影響によりカラー格子の色分布が変わることがわかった。分光反射特性を補正すると (d) が得られ、表面色の影響が除かれていることがわかった。(e) に表面色が白色と緑色の部分を抜き出した R チャンネルの画素値を示す。比較のために、理想的な状態として白色基準平面に R のみを単色で投影した時の R チャンネルの値の分布も図示した。表面色の影響によって大きく画素値がずれているのに対して、補正を行った場合には理想的な場合とほぼ等しくなることがわかった。RGB いずれの場合においても、色漏れや、表面色の影響が除去できていることが確認できた。

提案手法を用いてカラー多重格子を用いた FTP による三次元計測実験を行った。対象物体は高さ 30mm の白色の円錐台を用いた。図 4 に変形格子像に対して補正なし、線形補正のみ、線形および色漏れ補正を行った場合、そして JPEG 画像を用いた場合の平均誤差を示す。各チャンネルにおいて線形および色漏れ補正を行った場合に全チャンネルにおいて誤差の低減が可能になった。すなわち、カラー多重化格子を補正法とともに用いることにより、1 回の測定で同時に高精度な 3 回の測定結果を得ることができる。

4. おわりに

本研究では、RAW 画像を用いたカラー多重格子の補正法を提案した。色漏れ、分光反射特性を補正することによって、正確な色分解ができることを示した。実験より、三次元物体にカラー格子を投影することで 1 回の測定で独立した 3 回の三次元計測を行うことができることを示した。

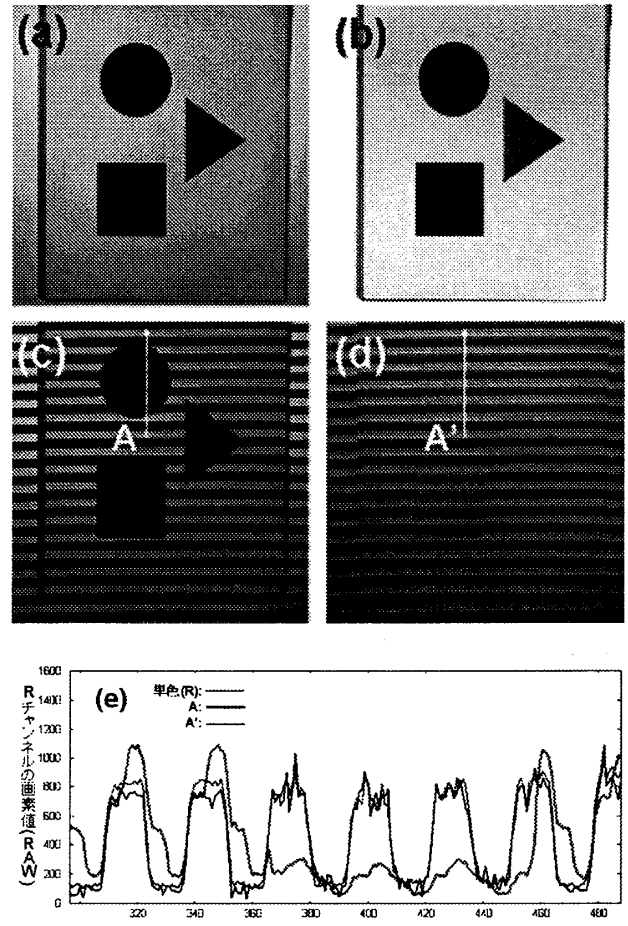


Fig.3 (a) Target object, (b) Reflectance property (c) Color grating pattern projected on a plane with a superficial color, (d) Compensated color grating pattern and (e) Correction of color crosstalk in R channel.

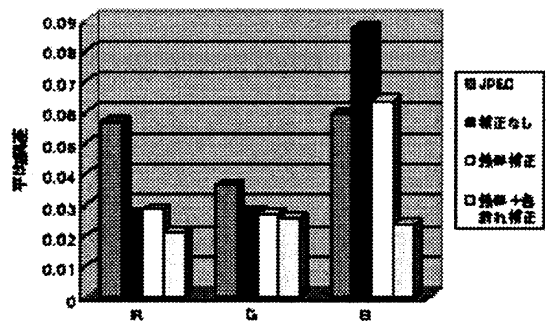


Fig.4 Error of the three-dimensional measurement value.

参考文献

1. M. Takeda and K. Motoh, Appl. Opt. 22, 3977-3982(1983).
2. M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita, H. Takai, and Y. Takahashi, Appl. Opt. 36, 5347-5354 (1997).
3. Z. Zhang, C. E. Towers and D. P. Towers, Opt. Exp. 14, 6444-6455 (2006)
4. D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 20, 470-480 (1998).