

振動計測のためのカラー構造化照明法の投影・撮影及び色補正の自動化*
☆ 松島惟人, 吉野夏樹, 矢田部浩平 (農工大)

1 はじめに

カラー構造化照明を用いた形状計測手法の 1 つに Phase Shifting Profilometry (PSP) がある [1]. PSP は、図-1 のように、計測対象に正弦波パターン (縞) を投影して撮影し、物体の高さに応じた縞の位相変化から高さを計測する手法である。通常はモノクロの縞を複数回投影するが、図-2 (a) の縞を用いれば、1 枚のカラー画像から各画素の高さ情報を得られる利点があり、動画像を用いた振動計測に有効である。しかし、色を分離するフィルタの不完全性や、入出力応答の非線形性によって、縞の輝度が変化し (図-2 (b)), 位相の復元が難しくなる。これらの誤差はシステムの設置や環境ごとに変化し、それに応じた補正には事前撮影による計測を要するため、自動計測による補正手法が求められる。そこで本稿では、誤差特性の計測に基づく色補正システムを提案し、その実装を行う。

2 PSP による形状計測

PSP は、物体表面に対して斜め方向から、初期位相をずらして正弦波縞を複数回投影し、物体の高さに応じた縞の位相変化から三角測量の原理で高さ情報を得る手法である [1]. 正弦波縞の各画素の輝度は、直流成分、振幅、位相の 3 つの未知数を含み、解析的に位相を得るためには、直流成分と振幅が一致した、初期位相が異なる最低 3 つの観測輝度を要する。カラー構造化照明を用いた手法では、図-2 (a) の縞を投影し、色分離を行って 3 枚の観測画像を得ることで、1 枚のカラー画像から位相復元できる。

3 観測画像の補正

カラー構造化照明を用いる PSP では、表-1 左の誤差要因によって、投影した縞と観測画像には差異があるため (図-2 (b)), 位相復元が難しくなる。本稿ではこれらの誤差要因に対して、表-1 右の補正手法を、図-3 の手順で用いる。また、投影光には色むらが発生するが、画素ごとと独立に補正行列や輝度の Lookup Table (LUT) を適用して、その影響を取り除く。

3.1 クロストークとゲインの補正

プロジェクタやカメラのクロストーク量を画素ごとに測定するため、まず赤、緑、青のみを含む画像

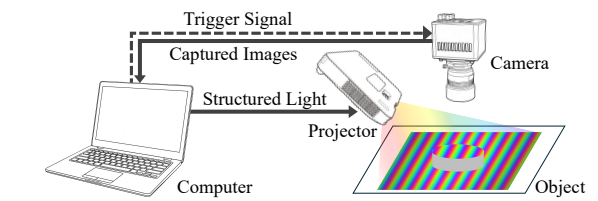


図-1 システム構成図。本システムはプロジェクタ、高速カメラ、コンピュータで構成され、投影、撮影、補正処理などをコンピュータ上から操作する。

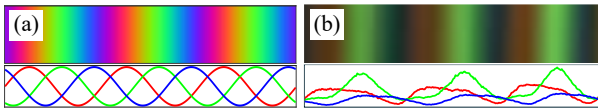


図-2 (a) 投影する正弦波パターン、(b) 観測画像の例。RGB 各色の初期位相を $2\pi/3$ ずつずらして重ねている。上段に 2 次元画像、下段に対応する輝度値を示した。

表-1 誤差要因とそれに対する補正手法。ここで、クロストークとは、プロジェクタやカメラが色を表現するために色を分離するフィルタが不完全で、色が漏れて互いに混ざり合うことを指す。ゲイン差は各色の輝度の倍率差を指す。

誤差要因	補正手法
クロストーク・ゲイン差	補正行列
輝度の非線形性	輝度 LUT / デフォーカス
残存する周期誤差	位相 LUT の適用

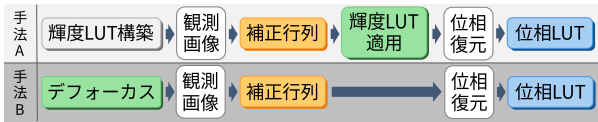


図-3 誤差補正の手順。手法 A では事前に輝度 LUT を構築して観測画像に適用する。手法 B ではデフォーカスによる正弦波投影を行う。

を投影する。ここで、色を表す添字を $i, j \in \{r, g, b\}$ とし、色 j 投影時に色 i のセンサで観測した輝度を m_{ij} とする。輝度応答を線形と仮定すると、投影輝度 $\mathbf{p} = [p_r, p_g, p_b]^T$ ($0 \leq p_r, p_g, p_b \leq 1$) と観測輝度 $\mathbf{c} = [c_r, c_g, c_b]^T$ ($0 \leq c_r, c_g, c_b \leq 1$) の関係は、クロストークを表す混合行列 $\mathbf{M}$ を用いて、

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{p}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{rr} & m_{rg} & m_{rb} \\ m_{gr} & m_{gg} & m_{gb} \\ m_{br} & m_{bg} & m_{bb} \end{bmatrix}$$

と表される。行列 $\mathbf{M}$ には混色に加えて色ごとのゲイン差を含むため、 $\mathbf{M}$ の逆行列を作用させることで、クロストークとゲイン差が補正された輝度 $\tilde{\mathbf{p}} = [\tilde{p}_r, \tilde{p}_g, \tilde{p}_b]^T$ を $\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{c}$ として得る。

* Automation of projection, image capture, and color correction for color structured light-based vibration measurement. By Yuito MATSUSHIMA, Natsuki YOSHINO and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology).

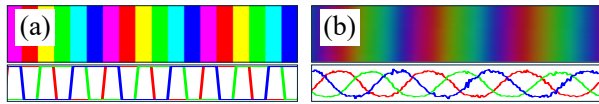


図-4 (a) 投影するバイナリパターン, (b) 観測画像 (クロストーク補正後). 上段に2次元画像, 下段に対応する輝度値を示した. (a) のデューティ比は 50%である.

3.2 輝度の非線形性の補正

入力輝度に対する観測輝度の応答は非線形な特性を示し, 位相に周期的な誤差を生む. これに対し, 本稿では LUT による補正とバイナリデフォーカスによる投影 [2] の2種類の異なるアプローチで対処する.

LUT は, 入出力の値を一对一に対応づける対応表である. 手法 A では, 各画素における入力輝度と観測輝度を対応づける輝度 LUT を事前に構築し, 観測画像に適用する. まず, 事前計測として, RGB 各色の単色画像を, 輝度を段階的に変えて投影・撮影し, クロストーク補正を適用する. 次に, 色 $k \in \{r, g, b\}$ における入力輝度 p_k とクロストーク補正後の観測輝度 $\tilde{p}_k$ から得られる入出力応答を多項式近似し, 近似関数 f_k を得る. この逆関数 f_k^{-1} に基づき, 観測輝度 $\tilde{p}_k$ から線形な推定入力輝度 $p_k^* = f_k^{-1}(\tilde{p}_k)$ への変換関係を保持する輝度 LUT を構築する. 最後に, 輝度 LUT を縞の観測画像に適用し, 補正画像を得る.

手法 B では, 図-4 のように, 輝度が 0 と最大の二値のパターンをばかして正弦波縞を投影するバイナリデフォーカス法 [2] を用いる. この手法では, ばけが光学的なローパスフィルタとして働くため, 投影光の輝度の非線形性が影響せずに正弦波を投影できる.

3.3 位相の LUT 補正

前述の補正を適用したうえで位相復元してもなお, 高調波による周期誤差が残存する. そのため, 復元した位相に応じた誤差量に対応づける位相 LUT を構築して誤差を低減する. まず, 基準平面の位相に縞周期幅の移動平均を適用して高調波を含まない位相を得る. 次に, これを理想値とした誤差を, 正弦波フィッティングによって高調波の総和として定式化することで位相 LUT を構築する. 最後に, 復元した位相に対応する LUT の値を参照し, 補正された位相を得る.

4 実装

図-1 で構築した測定システムを用いて白いコーン紙のスピーカを撮影し, 観測画像の補正, および振動の可視化を行った. 本稿ではカメラとして Photron FASTCAM Mini AX50, プロジェクタとして EPSON EB-1785W を使用した. 計測手順として, まず図-1 のシステムを構築する. 次に, 撮影者が計測対象を置かず計測を開始すると, 自動的に誤差特性の計測が

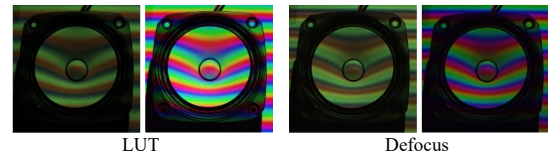


図-5 観測画像の色補正. 画像のサイズは 512×512 である. 左は正弦波の投影に対してクロストーク補正と LUT による非線形補正を適用した. 右はデフォーカスによる投影に対してクロストーク補正を適用した.

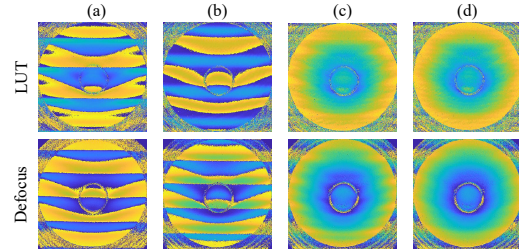


図-6 観測画像の補正による復元位相の比較. スピーカのコーン部分を示す. 上段は正弦波投影, 下段はデフォーカス法による結果である. (a) は無補正, (b) はゲイン差補正のみ, (c) はクロストーク補正 (上段は輝度 LUT による補正を含む), (d) は (c) に位相 LUT を適用した.

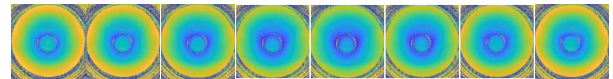


図-7 50 Hz の信号を再生したスピーカの 2.5 ミリ秒ごとの位相. 位相 LUT を適用したデフォーカス法の画像から位相復元した結果を示す.

行われる. 最後に, 計測対象を置いてから自動的に振動計測が行われ, 補正後の結果が出力される.

観測画像の色補正の結果を図-5 に示す. 元の画像では緑色が強く, 色が滲んでいるが, 補正後にはいずれも均一になっている. 次に, 図-6 に位相の復元結果を示す. (a), (b) ではクロストークやゲイン差に起因する周期的な誤差が生じているが, (c) では解消され, (d) では周期的な誤差がさらに低減されている. また, この結果から位相 LUT を適用したデフォーカス法の結果が最も誤差が小さいことが確認できる. 位相の時間変化を図-7 に示す. 位相の時間変化から, コーンが奥に動いて手前に動く様子が確認できる.

5 むすび

本稿では, カラー構造化照明に基づく PSP について, 誤差特性の計測に基づく色補正を自動化する手法を提案した. 今後は, 適切なデフォーカス量の測定や, 輝度 LUT の近似の改良を目指す.

参考文献

- [1] C. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin and Q. Chen, "Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review," *Opt. Lasers Eng.*, **109**, 23–59 (2018).
- [2] B. Li, Y. Fu, Z. Wang and J. Zhang, "High-speed, high-accuracy 3D shape measurement based on binary color fringe defocused projection," *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.*, **10**, 15038 (2015).