

最小二乗法による位相高さ変換を用いたリアルタイム三次元計測

Real-time 3D shape measurement using phase height conversion by least square method

萩原 辰則 開陽介 吉川 宣一

Tatsunori Hagiwara and Yousuke Hiraki and Nobukazu Yosihikawa

埼玉大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science & Engineering, Saitama University

E-mail:s10mm320@mail.saitama-u.ac.jp

1 はじめに

現在、様々な分野で非接触で高精度なリアルタイムの三次元形状計測が求められている。パターン光投影法を用いた三次元形状計測はプロジェクタを用いることによって容易に実行できるという利点から広く応用されている。しかし、プロジェクタは発散光を投影するため、平行光を前提としたパターン光投影法では計測に誤差が生じてしまう。また、正確な実験系パラメータが必要であり、これを実測で正確に測定することは極めて難しい。この問題に対処するために最小二乗法を用いた位相高さ変換式の推定法が提案されている [1]。この手法は、既知の大きさのゲージブロックとその位相情報から、最小二乗法を用いて位相高さ変換式の最適化を行う。しかし、この手法は位相シフト法を用いているために計測に複数の撮影が必要である。本研究ではフーリエ変換形状計測法に基づいて最小二乗法による位相高さ変換式の最適化を行い、リアルタイムでの三次元情報の取得を行う。フーリエ変換法はシングルフレームからの計測が可能であり、並列性の高いFFTアルゴリズムを用いている。そこで、本研究では画像入力以外の演算を並列演算性能が高いグラフィックスプロセッシングユニット (GPU) で行うことにより計測速度の向上を行う。

2 原理

図1に測定系の関係図を示す。点A、点Cはそれぞれレンズの中心であり、点Dから発せられたパターンは点Pに投影され、カメラ画像平面上の点Bにおいて観測される。 Φ を位相情報、 (I, J) を画像上の座標とすると、高さ情報 Z_P は式(1)のように書き表せる。

$$z_P = \frac{1+C_1\Phi_B+(C_2+C_3\Phi_B)I_B+(C_4+C_5\Phi_B)J_B}{D_0+D_1\Phi_B+(D_2+D_3\Phi_B)I_B+(D_4+D_5\Phi_B)J_B} \quad (1)$$

ここで、各係数 C_1-C_5 、 D_0-D_5 は測定系パラメータの値を含む定数であり、これらを最小二乗法を用いて推定する。具体的には、既知の高さ情報を持ったゲージブロックとその位相情報を代入した z_P の残差の二乗和を最小二乗法により最小化することにより、各係数の推定を行う。これにより得られた位相高さ変換式を用いてリアルタイム三次元計測を行う。

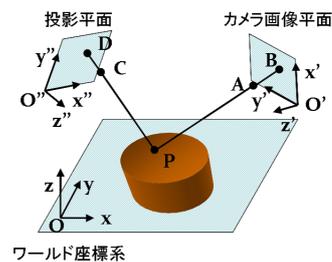


図1 測定系の幾何学的配置図

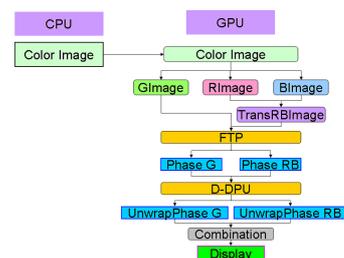


図2 計測プロセス

GPUを用いたリアルタイム計測は図2のように実行される。投影する格子パターンは周期の異なるカラー格子を多重化したものを用いる。これにより、一度に複数の変形格子像を取得することが可能となる。本研究では、G格子とRB格子の二種類を用いることでシングルフレームから二つの位相情報を取得する。得られた位相情報をアンラッピング処理後に結合することで計測精度の向上と測定感度

の拡大を行う。本研究では、これら二つの位相情報を並列型決定論的位相アンラッピング (Dual-DPU) アルゴリズムを用いて並列的に処理することで、計測速度が低下することなく計測が実行できる [2]。

3 実験

ゲージブロックに格子パターンを投影し、位相情報の検出を行う。得られたゲージブロックの位相情報を代入した位相高さ変換式と実際のゲージブロックの高さの値の残差が最小になるように、最小自乗法を用いて位相高さ変換式の係数を推定した。係数はそれぞれ、 $C_1 = -45726.53$, $C_2 = 150.22$, $C_3 = 11638.61$, $C_4 = 140.35$, $C_5 = 15105.49$, $D_0 = -172970.4$, $D_1 = 11665.75$, $D_2 = 46744.91$, $D_3 = -1216.03$, $D_4 = 50382.79$, $D_5 = 387.43$ となった。

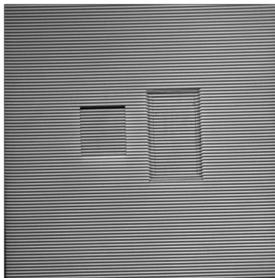


図3 対象物体

得られた位相高さ変換式を用いて図3の物体を計測し、正確性を検証する。計測対象物体は、それぞれ高さ12.8mmの正方体、10.2mmの長方体を用いた。基準面上、対象物体上において本来の高さと計測結果の平均二乗誤差を取ることで、従来の手法 [3] との精度比較を行った。提案法は従来法に比べ実際の物体の大きさに近い高さ情報が得られており、その測定誤差は従来法がブロック上で約0.4mm、参照面上で約0.06mmに対し、提案法はそれぞれ約0.1mm、約0.04mmであった。

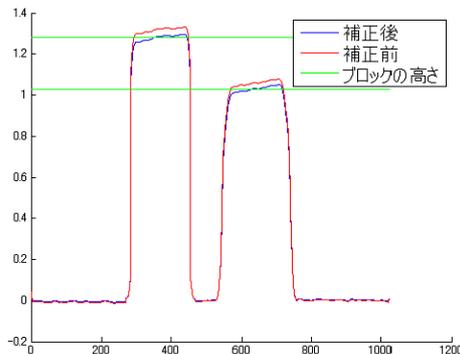


図4 断面図

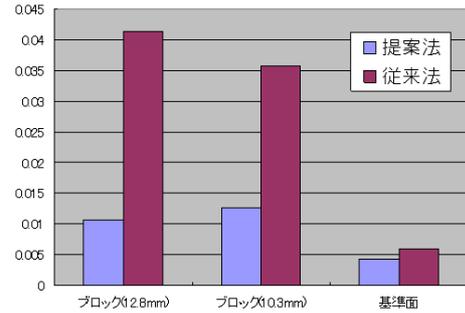


図5 測定誤差

次に、移動物体に対しての計測を行い提案法の有効性を検証した。対象物体に格子パターンを投影し、位相情報の取得を行う。対象物体は手に持って計測中に随時動かし、リアルタイムで三次元情報に回復した。計測は1024 × 1024画素で、CPU: Intel Core2 Duo E8400、GPU: NVIDIA GeForce GTX 280を用いて行った。実験の結果、15FPSでのリアルタイム三次元形状計測が実現された。

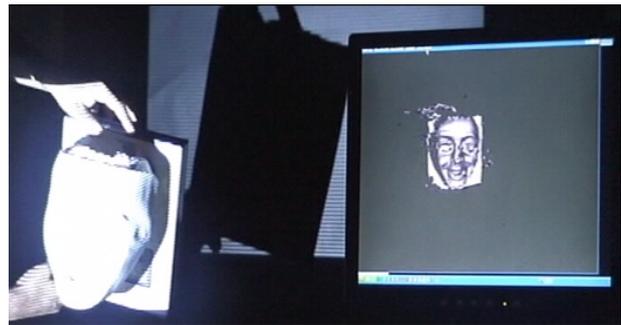


図6 リアルタイム三次元計測

4 おわりに

本研究では、フーリエ変換形状計測法に基づいて最小二乗法による位相高さ変換式の最適化をし、計測システムの較正を行った。また、GPUを用いたリアルタイムカラー多重三次元形状計測法を提案し、実験により有用性を確認した。

参考文献

- [1] Z.Wang, H.Du, S.Park, H.Xie, Appl.Opt, Vol.48, No.6, pp.1052-1061, (2009)
- [2] 山崎, 吉川, Optics & Photonics Japan 2008 講演予稿集, 4aE3, (2008)
- [3] M.Takeda, K.Mutoh, Appl.Opt, 22, pp.3977-3982, (1983)