

正弦波変調撮像を用いた表面形状の運動ボケ補償

松本康平[†] 栗原徹[‡]
高知工科大学^{†‡}

1 はじめに

製品の製造工程において、外観検査の自動化は検査精度の差発生の排除や人手不足対抗手段として非常に重要である。多くの製品はベルトコンベアで流され運ばれるが、メカニカルな負荷やメンテナンスコストを避けるためベルトコンベアを静止させない外観検査の手法が望まれている。

本稿では、外観検査に重要な表面形状情報を時間相関イメージセンサとリング状変調照明を用いて取得する手法 [1] に対して 1 次元運動ボケ補償を行う。運動ボケ補償の手法 [2] に着目し時間相関カメラに入力する参照信号を工夫することによって、複素相関画像の通過する空間周波数帯域を拡大できた [3]。この手法は強度画像に対しても有効であるため、運動ボケのない強度画像と複素相関画像のペアを取得できる。このペアを用いて運動ボケのない表面形状の復元を行う。

2 準備

2.1 時間相関イメージセンサ

時間相関イメージセンサとは、通常のカメラで撮影される明暗画像 $g_0(x, y)$ と、相関画像 $g_\omega(x, y)$ を出力するイメージセンサである。相関画像は、イメージセンサの各画素に入射する光強度変化 $f(x, y, t)$ と外部から入力する参照信号との 1 フレーム時間 T の時間相関値が 2 次元アレイ状に並べられたデータである。本項では参照信号に直交正弦波対 $(\cos \omega t, \sin \omega t)$ 、または周波数が異なる複数の直交正弦波対の和を用いる。異なる複数の周波数の集合を Ω とおくと、以下のように書

ける。

$$g_\omega(x, y) = \int_0^T f(x, y, t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

$$g_\Omega(x, y) = \int_0^T f(x, y, t) \sum_{\omega \in \Omega} e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

2.2 リング状変調照明

法線ベクトルの天頂角・方位角を反射光強度の振幅・位相に変調するために、リング状変調照明を用いる。これは LED をリング状に並べたものであり、周波数 ω_r で明点が回転するように強度変調される。

2.3 シングルフレーム照度差ステレオ

対象表面の法線ベクトル \mathbf{n} の天頂角を Θ 、方位角を Φ 、リング状照明光源方向ベクトル \mathbf{l} の天頂角を ψ 、方位角を ϕ とすると、対象表面上の各点における反射光強度が次のように計算される。

$$I(t) = \int_0^{2\pi} r_l L_1(\phi, t) (\mathbf{l}(\phi) \cdot \mathbf{n}) d\phi \quad (3)$$

$$= 2\pi r_l L_0 \cos \psi \cos \Theta + \pi r_l L_0 \sin \psi \sin \Theta \cos(\omega_r t + \Phi) \quad (4)$$

$$\equiv f_0(x, y) + f_c(x, y) e^{j\omega_r t} + f_c(x, y)^* e^{-j\omega_r t} \quad (5)$$

ここで r_l は物体のランバート反射率、 $f_c(x, y)$ は、

$$f_c(x, y) = \frac{1}{2} \pi r_l L_0 \sin \psi \sin \Theta(x, y) e^{j\Phi(x, y)} \quad (6)$$

である。

3 原理

3.1 表面法線の運動ぼけ

速度 V の平行移動による運動ぼけした相関画像 $g_{\omega_r}(x, y)$ は、矩形波 rect を用いて、

$$g_{\omega_r}(x, y) \simeq \int f_c(x - x') \text{rect}\left(\frac{x'}{VT}\right) \frac{dx'}{V} \quad (7)$$

Examination of motion blur correction of surface shape using sinusoidal modulation imaging

[†]Kohei Matsumoto (Kochi University of Technology)

[‡]Toru Kurihara (Kochi University of Technology)

と書かれる。この時、相関画像のフーリエ変換 $G_{\omega_r}(u, v) = \mathcal{F}[g_{\omega_r}]$ は、

$$G_{\omega_r} \simeq F_c(u, v) \text{sinc}(uVT/2) \quad (8)$$

と書かれる。この式は運動速度が増加するにつれて、通過帯域が減少することを示している。

3.2 通過帯域の拡張

1フレーム時間に1周期の基本角周波数を $\omega_T = 2\pi/T$ とおき、運動ぼけした相関画像に対して $\omega = \omega_r + \omega_T$ を考えると、

$$G_{\omega_r + \omega_T} = \text{sinc}(uVT/2 - \omega_T T) F_c(u, v) \quad (9)$$

となり、通過帯域がシフトする。異なる通過帯域を持つ相関出力の和を取ることで、通過帯域を拡張する。

$$G_{\omega_r + i\omega_T, \dots} = \sum_i \text{sinc}(uVT/2 - i\omega_T T) F_c(u, v) \quad (10)$$

また、 $\omega_r = 0$ とすることで、強度画像についても同様に通過帯域を拡張できる。

$$G_{0+i\omega_T, \dots} = \sum_i \text{sinc}(uVT/2 - i\omega_T T) F_0(u, v) \quad (11)$$

4 実験

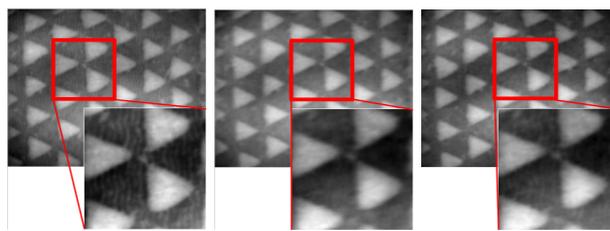
リング照明による変調照明の下、 x 軸自動ステージにより対象物体を 27.3 画素/フレーム時間で運動させ、参照信号を入力し相関撮像を行った。実験に使用した4つの参照信号 ABCD は $A: e^{-j\omega_r t}$, $B: e^{-j(\omega_r - \omega_T)t} + e^{-j(\omega_r - \omega_T)t}$, $C: e^{-j(\omega_r - 2\omega_T)t} + e^{-j(\omega_r - 2\omega_T)t}$, $D: e^{-j(-\omega_T)t} + e^{-j(\omega_T)t} + j(e^{-j(-2\omega_T)t} + e^{-j(2\omega_T)t})$ である。

(a) 静止した画像から復元した表面形状, (b) ブラーした画像から復元した表面形状, (c) 複数の相関出力によって運動ぼけを補正した画像から復元した表面形状を図1, またそのパワースペクトルの中央付近の行プロットを図2に示す。

図1から(b)に比べて(c)の方が復元された表面形状により細かいパターンが観測できることが分かる。また、図2からも(b)に比べて(c)の通過帯域が拡張されていることが分かる。

5 まとめ

時間相関イメージセンサを用いた表面形状復元の1次元運動ぼけ補償について提案した。複数の複素正弦



(a) 静止した表面形状 (b) ブラーされた表面形状 (c) 運動ぼけ補償した表面形状

図1: 表面形状の復元結果 (高さの出力)

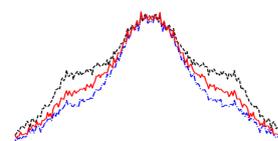


図2: (a) 黒:静止した表面形状, (b) 青:ブラーされた表面形状, (c) 赤:運動ぼけ補償した表面形状. 表面形状パワースペクトルの中央の60列200行を列方向に加算. 縦軸:振幅合計値, 横軸:行方向のピクセル

波対の和を参照信号に用いることで、空間周波数の通過帯域を拡張した。これを複素相関画像だけでなく強度画像にも同様に考えることで、これらのペアから復元される表面形状に対して運動ぼけ補償が実現できた。

参考文献

- [1] 栗原, 安藤, ”時間相関イメージセンサと多重極変調リング照明を用いた表面検査,” 第25回センシングフォーラム, pp.75-79, 2008.
- [2] Toru Kurihara, Yugo Katsuki, and Shigeru Ando, “Surface normal deblurring caused by conveyor movement for fast surface inspection”, Proc. of SPIE Vol.8788 878830, 2013.
- [3] 松本康平, 栗原徹, ”正弦波変調撮像とウィーナフィルタを用いた複素相関画像の運動ぼけ補償とその評価,” 第34回センシングフォーラム, pp111-116, 2017.