

205 改良型微分両眼視法による曲面の座標値と傾斜の同時測定

北海道大学工学部 ○速田正之 五十嵐悟 齊藤勝政

要旨

前報では、ステレオ画像による形状測定の一手法である微分両眼視法を改良し、曲面の座標値と傾斜を同時に測定することのできる改良型微分両眼視法を提案した。本報では傾斜平面の測定を想定したシミュレーションを行い、傾斜角度と測定精度の関係について検討する。

1. はじめに

通常のステレオ画像による測定では、測定面上の1点に対応する左右両画像上の点を求める必要があるが、微分両眼視法では厳密な対応づけを必要とせず、画像の濃度値のみを利用して測定が行えるという利点がある。しかし、従来の方法¹⁾では、座標値しか測定できず、面法線は測定後に着目点近傍の測定値を処理して求められる。これに対して先に提案した改良型微分両眼視法²⁾では座標値と傾斜の同時測定が可能である。

本報では改良型微分両眼視法を用いて、傾斜平面の測定を想定したシミュレーションを行い、傾斜角度と測定精度の関係を検討する。

2. 改良型微分両眼視法の原理

図1に示すように、 xy 平面に正対しこの平面から距離 H の位置に、間隔 $D = 2d$ で2台のカメラが x 軸に平行に置かれている系を考える。 xy 平面を基準面と呼ぶ。対象物表面の基準面からの高さ $h(x, y)$ は小さく、表面は滑らかであり、適度な濃度分布 $f(x, y)$ があるものとする。上の仮定から、点 (x, y) の近傍で表面を

$$h(x, y) = p - \alpha x - \beta y, \quad (1)$$

で表される斜面で近似する。このとき、左右のカメラが基準面上の点 (x, y) を捉えようとしたとき、実際に両カメラが捉える点の座標は次式で与えられる。

$$x_R = x + \Delta x_R, y_R = y - \Delta y_R,$$

$$x_L = x - \Delta x_L, y_L = y - \Delta y_L,$$

$$\Delta x_R = H_R^{-1}(d - x)h(x, y), \Delta y_R = H_R^{-1}yh(x, y),$$

$$\Delta x_L = H_L^{-1}(d + x)h(x, y), \Delta y_L = H_L^{-1}yh(x, y), \quad (2)$$

$$H_R = H - \alpha x - \beta y + \alpha d, \quad H_L = H - \alpha x - \beta y - \alpha d. \quad (3)$$

左右両画像を $f_R(x, y), f_L(x, y)$ と書けば、

$$f_R(x, y) = f(x + \Delta x_R, y - \Delta y_R) \\ \approx f(x, y) + \Delta x_R f_x(x, y) - \Delta y_R f_y(x, y), \quad (4)$$

$$f_L(x, y) = f(x - \Delta x_L, y - \Delta y_L) \\ \approx f(x, y) - \Delta x_L f_x(x, y) - \Delta y_L f_y(x, y), \quad (5)$$

を得る。ここで添字 x, y は x, y に関する偏微分を意味する。式(4)、(5)から f_x, f_y を消去すれば次式を得る。

$$f_- - C h(x, y) f_x = 0, \quad C = d(H - \alpha x - \beta y)^{-1}. \quad (6)$$

ここで $f_- = f_R - f_L, f_+ = f_R + f_L, f_x$ は f_+ の x に関する偏微分を表す。いま測定点の座標を (x_m, y_m) 、高さを h_m とおけば、測定点近傍では

$$h(x, y) = h_m - \alpha(x - x_m) - \beta(y - y_m), \quad (7)$$

と書ける。また C は次式で近似できる。

$$C = d(H - \alpha x_m - \beta y_m)^{-1}. \quad (8)$$

式(7)、(8)を式(6)に代入し、 $Ch_m, C\alpha, C\beta$ を新しい変数として局所最小自乗法を用い、測定点近傍 Γ 内で

$$J = \iint_{\Gamma} [f_- - C\{h_m - \alpha(x - x_m) - \beta(y - y_m)\}f_x]^2 dx dy, \quad (9)$$

を最小にするような $Ch_m, C\alpha, C\beta$ を求める。この解と式(8)から

$$C = (d + C\alpha x_m + C\beta y_m)H^{-1}, \quad (10)$$

が求められ、これと解 $Ch_m, C\alpha, C\beta$ から h_m, α, β を求めることができる。

これに対して従来法では着目点近傍で表面を高さ一定 ($h = \text{const}$) の平面で近似する。この場合、 $\alpha = \beta = 0$ なので、式(6)の第2項は dh/H となり、高さ h だけが求められる。

3. シミュレーションによる検討

傾斜角と測定精度の関係を調べるために、 $\tan \theta_\alpha = \alpha, \tan \theta_\beta = \beta$ とし、 $\theta_\alpha, \theta_\beta$ がそれぞれ $0 \sim 80$ 度の傾斜を持つ斜面 (測定範囲は $x: -50\text{mm} \sim 50\text{mm}, y: -50\text{mm} \sim$

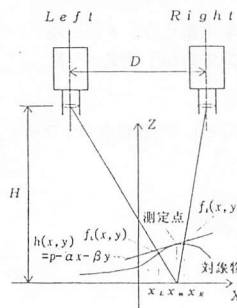


図1 改良型微分両眼視法の配置図

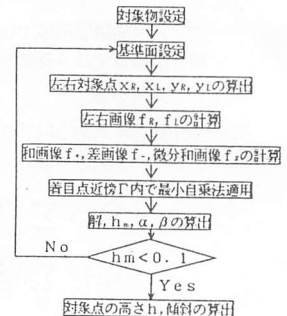


図2 高さ、傾斜算出の処理フロー

50mm) を想定し、この斜面を測定するシミュレーションを行った。シミュレーションの条件は $H = 700\text{mm}$, $D = 74\text{mm}$ 測定単位は1画素 (0.5mm)、近傍領域は予備的な実験から $\Gamma = 11 \times 11$ 、対象物表面の濃度は正弦波状 ($f = 3 + \sin(\omega x)\sin(\omega y)$, $\omega = 2\pi/T$) に変化するものとし周期を $T = 0 \sim 200\text{mm}$ とした。また、測定結果を用いて基準面を測定点に近づけ測定を繰り返す方法³⁾をとった。シミュレーションの処理フローを図2に示す。

4. シミュレーション結果とその検討

x方向の傾斜45度の斜面を想定し $T = 50\text{mm}$ としたときの従来法のシミュレーション結果を図3、改良型の結果を図4に示す。図3で周期的な誤差の変化は濃淡模様の影響である。従来法での高さの最大誤差は約40mm (平均誤差 -0.26mm) にも達するのに対し、図4での高さの最大誤差は約0.01mm (平均誤差 $5 \times 10^{-5}\text{mm}$) であり、改良型は従来法に比べて、極めて精度が高いことが解る。

斜面の傾斜角と精度の関係を調べた結果の一例として、y方向の傾斜角 θ_β を60度に固定し、x方向の傾斜を0~80度に変化させたときの、高さ h_m と傾斜角 $\theta_\alpha, \theta_\beta$ 斜面の誤差の平均 (ϵ) と標準偏差 (σ) をそれぞれ図5、6、7に示す。周期は $T = 50\text{mm}$ とした。いずれの誤差も θ_α が約70度までは傾斜の増加と共に徐々に増加している。しかし、 $\theta_\alpha = 80^\circ$ では誤差が急増している。これはこのように傾斜が大きい場合には、「着目点近傍で基準面からの高さ h が小さい」という仮定が成り立たなくなるからである。

この例では、 $\theta_\alpha = 60^\circ$ までの傾斜に対しては、高さの誤差は平均値 $\pm 5.6 \times 10^{-6}\text{mm}$ 以下、標準偏差 $4.7 \times 10^{-2}\text{mm}$ 以下、 θ_α の誤差は平均値 $\pm 2.4 \times 10^{-2}$ 度以下、標準偏差 4.7×10^{-2} 度以下、 θ_β については、 θ_α よりも誤差はさらに小さく、高精度な測定が可能であることが分かる。

5. おわりに

改良型微分両眼視法を用いたシミュレーションにより斜面の傾斜角と測定精度の関係を検討し次の結果を得た。

- 1) 提案した改良型微分両眼視法は、高さと同様に傾斜角が同時に測定できるばかりでなく、高さの測定精度は従来法に比べて高い。
- 2) 傾斜角60度程度までは、傾斜角の増加に対する誤差の増加は小さく、高精度な測定が可能である。
- 3) あらかじめ要求精度を指定し、測定誤差を 3σ 等で評価すれば、測定可能な傾斜角度を予測することができる (上述の例では、高さの測定誤差を0.1mm以下と指定すれば、 $\theta_\alpha = 50^\circ$ までの傾きをもつ面がこの誤差以内で測定できる)。
- 4) 改良型微分両眼視法によれば、70度程度までの傾斜角をもつ曲面の測定が可能である。

参考文献

- 1) 安藤他：計測自動制御学会論文集, 24, 6(1988)84/90.
- 2) 遠田他：精密工学会北海道支部学術講演会論文集 (1993)17/18.
- 3) 五十嵐他：精密工学会誌, 58, 7(1992)1167/1172.

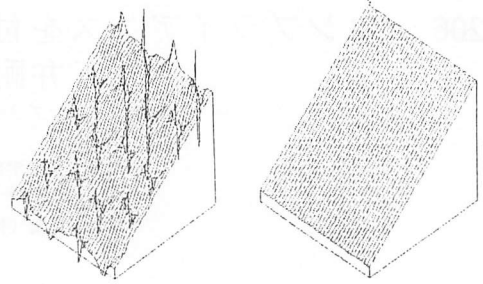


図3 従来法での測定結果 ($\theta_\alpha = 45^\circ, \theta_\beta = 0^\circ$) 図4 改良型での測定結果 ($\theta_\alpha = 45^\circ, \theta_\beta = 0^\circ$)

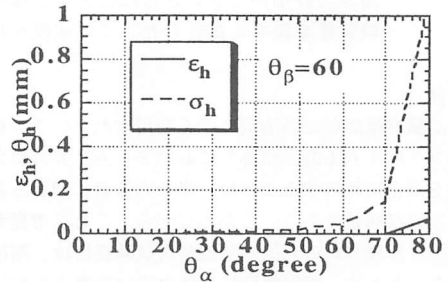


図5 高さの測定誤差 (ϵ_h, σ_h)

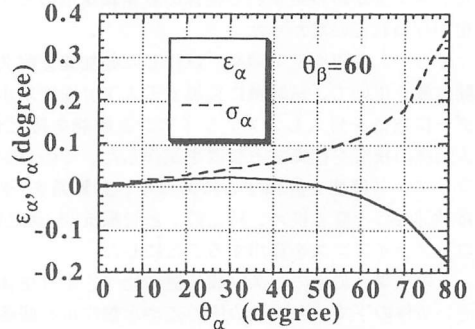


図6 x方向の傾斜の測定誤差 ($\epsilon_\alpha, \sigma_\alpha$)

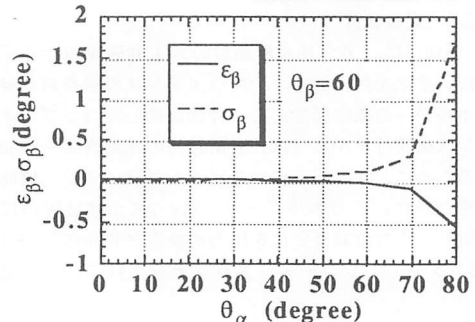


図7 y方向の傾斜の測定誤差 ($\epsilon_\beta, \sigma_\beta$)