

光切断法による3次元形状計測における解像度と形状誤差のモデル化 A Model of a Relations of a Resolution and the 3D Shape Error for Light-Section Method

北口 勝久†
Katsuhisa Kitaguchi

齋藤 守†
Mamoru Saito

1. はじめに

光切断法[1]は、図1に示すようにスリット光を物体に照射したときの切断線形状から物体の3次元形状を計算する手法であり、現在市販されている非接触型の3次元形状入力装置の多くがこの手法を採用している。切断線形状からの3次元形状復元は、3角測量の原理で説明される。実際に3角測量の原理で物体までの距離は求まるが、ここにはデジタル化による誤差が考慮されていない。実際には切断線形状はCCDやCMOSカメラで記録されるので離散化誤差が生じる。光切断法において3次元形状の復元精度は切断線の位置の精度に左右される。そこで本研究ではこの離散化誤差と3次元形状復元誤差の関係を調べることが目的とする。

2. 光切断法における離散化誤差

通常、光切断法で3次元形状を復元するには、図1のように切断線画像を撮影し、切断線位置 $P_i(u_i, v_i)$, $i=0,1,2,\dots,W$ (W :画像の横画素数)を求め、3角測量に当てはめて3次元形状を復元する。このとき整数値である画素値 u_i, v_i から仮想的に設置したイメージプレーン上での光学中心からの距離 x_i, y_i へ変換を行い、物体上の点の座標値 (x_o, y_o, z_o) を得る。

$$x_i = k_u (u_i - W/2 + 0.5) \tag{1}$$

$$y_i = k_v (H/2 - v_i - 0.5) \tag{2}$$

$$z_o = fL / (y_i + f \tan \theta) \tag{3}$$

$$x_o = \beta x_i \tag{4}$$

$$y_o = \beta y_i \tag{5}$$

$$\beta = z_o / f \tag{6}$$

ここで、 k_u, k_v はそれぞれ1画素のu方向、v方向の大きさ、Hは画像の縦画素数である。f, L, θ はそれぞれカメラの焦点距離、カメラ光学中心とスリット光源間の距離、スリット光の仰角を表す。この式(1)、(2)ではカメラからの視線は画素の中心を通ると仮定している。 u_i, v_i は整数なので式(1)、(2)から求まる x_i, y_i は離散値とな

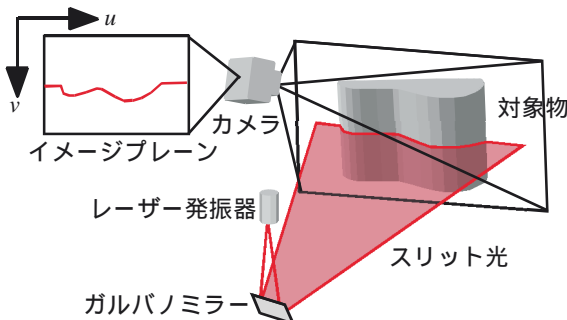


図1 光切断法

り、この値を3角測量に用いて3次元形状を復元すると離散化誤差が生じる。これを防ぐためにv方向については空間重心 vg_i を採用しサブピクセル精度で切断線位置を決定する場合がある。 vg_i の求め方を図2に示す。図2左側は切断線画像を拡大したイメージ図であり、赤線は仮想的に描いた切断線位置を示している。図2右側は図中の右列の輝度値の棒グラフに実際のスリット光の輝度のイメージを点線で重ねて描いたものである。スリット光は点線のように幅を持っておりその中心部が明るく端になるほど暗くなっている。したがって切断線は画像中に切断線位置を中心に広がりを持って記録される。 vg_i は、各 u_i 列中で切断線が記録されている画素のv座標値の、輝度値で重み付けした平均値である。 vg_i から y_i を求めるには次式を用いる。

$$y_i = k_v (H/2 - vg_i) \tag{7}$$

u方向については精度を高めるための工夫は報告されておらず、画素の中心を用いるしかない。 vg_i は理想的には図2の各 u_i 列中の切断線位置を平均化した位置に一致するので、図中の左列や右列のように切断線が直線状であれば vg_i (図2の破線)は画素幅の中心における切断線位置 vc_i (図2の印)と一致する。この場合は式(1)、(7)で求まる x_i, y_i を用いれば3次元形状は正しく復元される。しかし図中の真中の列のように切断線が直線でない場合、 vg_i と vc_i は一致しない。したがって式(1)、(7)で求まる x_i, y_i を用いれば3次元形状復元時に誤差を生じる。

3. 3次元形状復元時の誤差

2章で述べた、切断線が曲線の場合に vg_i を用いて復元した3次元形状の誤差を検証する。測定対象物をY軸と平行で半径r、中心線が(0,0, $Z_{cy}+r$)を通る円柱とする。この

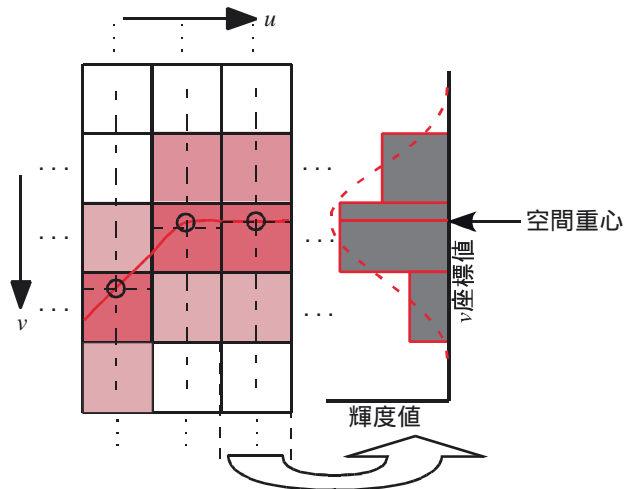


図2 空間重心

円柱に $(0, Y_r, 0)$ の位置から仰角 θ でスリット光を当てたときに出来る切断線座標 $P_{cy}(\gamma)(x_o(\gamma), y_o(\gamma), z_o(\gamma))$ は次のようになる。

$$x_o(\gamma) = r \cos \gamma \quad (8)$$

$$y_o(\gamma) = (Y_r \cos \theta + r \sin \gamma \sin \theta) / \cos \theta \quad (9)$$

$$z_o(\gamma) = r \sin \gamma \quad (10)$$

ここで γ は円柱の形状を表すために用いたパラメータである。図 2 で $P_{cy}(\gamma)$ とカメラの光学中心 $(0, Y_c, 0)$ を結ぶ直線とイメージプレーンはそれぞれ次のように表される。

$$(x - x_o(\gamma)) / -x_o(\gamma) = (f - y_o(\gamma)) / (Y_c - y_o(\gamma)) = (z - z_o(\gamma)) / -z_o(\gamma) \quad (11)$$

$$z = f \quad (12)$$

これらの直線とイメージプレーンの交点座標 $P_{im}(\gamma)(x_{im}(\gamma), y_{im}(\gamma), z_{im}(\gamma))$ は次の通り。

$$x_{im}(\gamma) = x_o(\gamma) / z_o(\gamma) (f - z_o(\gamma)) + x_o(\gamma) \quad (13)$$

$$y_{im}(\gamma) = -(y_c - y_o(\gamma)) / z_o(\gamma) (f - z_o(\gamma)) + y_o(\gamma) \quad (14)$$

$$z_{im}(\gamma) = f \quad (15)$$

ここで r を 5, 10, 20mm とし、 γ を 0° から 0.1° きざみに 180° まで変化させ 3次元形状復元時の誤差を検証する。このときに使用したパラメータの値を表 1 に示す。 $P_{im}(\gamma)$ 、 k_u 、 k_v から各 $P_{im}(\gamma)$ が切断線画像のどの画素に記録されるかを求め、各 u_i 画素列における v_{g_i} と v_{c_i} を求めた。 v_{g_i} は各 u_i 画素列に入る $P_{im}(\gamma)$ から求まる v 座標値の平均とし、 v_{c_i} は画素幅の中央を挟む $P_{im}(\gamma)$ の補間により決定した。これら v_{g_i} と v_{c_i} を用いて 3次元形状を復元し、 v_{c_i} からの形状を真値として v_{g_i} からの形状の誤差を求めた。結果を図 3 に示す。また $r=20\text{mm}$ のときの $P_{im}(\gamma)$ を図 4 に示す。図 3 から、半径が長い円柱ほど 3次元形状の復元誤差が小さいことが分かる。これは半径の大きい円柱ほど切断線が緩やかな曲線になり v_{g_i} と v_{c_i} の差が小さくなることから、予想される通りである。また各円柱とも中央部で誤差が小さくなっている。これは図 4 で分かるようにイメージプレーン上で中央部の切断線が端部の切断線より緩やかな曲線になり、 v_{g_i} と v_{c_i} の差が小さくなるためである。次に図 4 でプロットされたイメージプレーン上の切断線位置の各点を、切断線画像で記録される時の u 画素毎に集計し、画素ごとに曲率を求めた。この曲率と 3次元形状復元時の誤差の関係を図 5 に示す。これより円柱の半径の長さに関係なくイメージプレーン上での曲率により復元時の誤差の大きさが決まることが分かる。これから、 $r=5\text{mm}$ の円柱でも計測装置に近づけることで $r=20\text{mm}$ の円柱と同じような曲率で計測すれば $r=20\text{mm}$ の円柱と同程度の誤差で計測が可能になると考えられる。

表 1 計算に使用したパラメータ

Y_r	-100mm	Y_c	100mm
θ	-1°	f	7.7mm
		k_u, k_v	0.01mm

4. おわりに

本研究では光切断法を用いた 3次元形状復元時における、切断線位置の決定精度と復元形状の精度の関係を調べた。空間重心と画素幅の中央を切断線位置とする方法では切断線が曲線の場合に 3次元形状復元誤差が生じることを説明し、円柱を計測した場合に生じる復元誤差を示し、半径が長く切断線が緩やかな曲線になるほど復元誤差が小さくなることを確かめた。またイメージプレーン上の曲率と復元誤差に比例関係があることを示した。この関係を利用して、計測対象物の形状に応じた計測精度を満たすのに必要な計測解像度を求めるための指針を作ることを今後の課題とする。

参考文献

[1] 井口, 佐藤, "三次元画像計測", 昭晃堂 (1990)

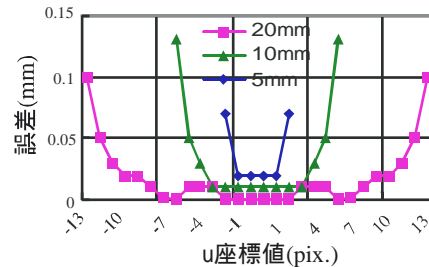


図 3 3次元形状の復元誤差

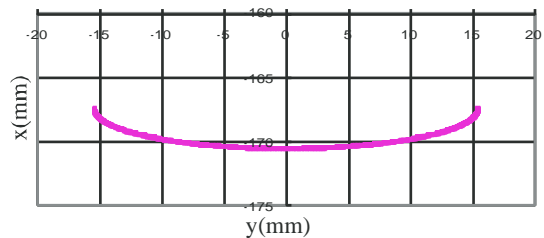


図 4 イメージプレーン上の切断線位置

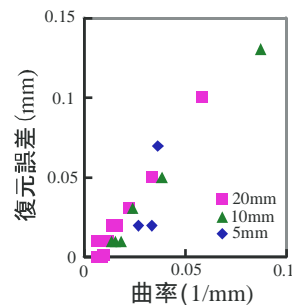


図 5 曲率と復元誤差