

三角測量法による受動式鏡面位置・形状計測法

Passive specular surface measurements from virtual images of pattern boards
based on the triangulation principle

永峰 和也†
Kazuya NAGAMINE

鈴木 融†
Yu SUZUKI

伊藤 稔†
Minoru ITO

1. はじめに

鏡面の置かれた位置と形状を計測する方法として、従来、レーザ光を走査して求める能動的手法、干渉による方法が用いられていた。一方、環境パターンをカメラ入力した虚像から鏡面の位置と形状を得る受動的手法は未だ確立されていない。我々は、パターン表示板を2枚用い、それぞれについて計測対象の鏡面を介して虚像を観測した後に、三角測量原理に基づいて鏡面の位置と形状を幾何学的に算出する手法を開発してきた。[1,2] この方法の特徴は、従来に比べて極めて簡易でありながら、参照面や他の反射点座標等を前もって知っておく必要なしに、鏡面各点の位置を直接検出することができることである。しかし、量子化誤差が現れるという問題点があった。今回、量子化誤差を見積もり、実験の結果、見積もり通りの傾向が見られたので報告する。

2. 計測原理

本手法は、2枚の構造化パターンの虚像をカメラ入力し、三角測量法を用いることによって対象物の反射点座標を直接検出することができる。図1に計測原理を示す。図の横軸をx軸、縦軸をy軸とし、その原点をカメラのレンズ主点とする。1つ目のパターン板 P_1 はx軸上に設置し、もう1つのパターン板 P_2 は P_1 から t 離れた位置に設置する。実際にはパターン板は1枚のみ準備し、 P_1 から P_2 へ平行移動して用いる。まず、 P_1 に明暗の構造化パターンを表示し、その虚像をカメラ入力する。そして、カメラ入力した虚像の各画素とパターン位置の対応付けを行う。対応付け処理については3章で説明する。同じ手続きを P_2 に対しても行う。カメラ素子上の任意の結像点 i を通る光線軌跡、パターン板 P_1 、 P_2 上の位置 p_1 、 p_2 の座標をそれぞれ $(s_1, 0)$ 、 (s_2, t) で表す。 p_1 、 p_2 それぞれを通る光線は

$$y = \frac{t}{s_2 - s_1}(x - s_1) \quad (1)$$

で表される。反射点 A で反射した光線はレンズ主点と結像点 i を通る。この反射光線軌跡は

$$y = -\frac{L}{\eta(i_x - i_0)}x \quad (2)$$

で表される。ただし、 L は光軸長、 i_0 は光軸点座標、 i_x は結像点座標をそれぞれ表し、また、 η は画像の1画素間隔と撮像面上の物理的距離を関連付ける変換パラメータである。反射点 A は(1)と(2)の交点として求めることができる。こうして、対象物の反射点座標は三角測量法によって簡易に求めることができる。

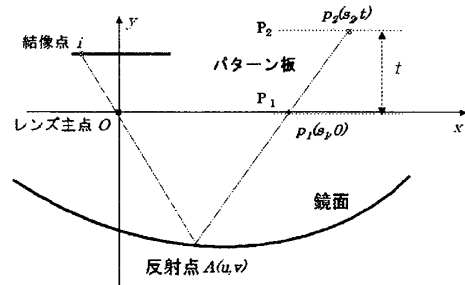


図1. 計測原理

3. 対応付け処理

撮影画像の各画素とパターン板のパターン位置との対応付け処理について説明する。パターン板として液晶ディスプレイを、入力装置として CCD カメラを用いると、撮影画像にはモアレが発生してしまうため、対象画素以外の輝度値を利用する対応付け手法を用いるのは困難である。そこで、今回の実験では、構造化パターンをシフトして得られる位相情報を使い対応付け処理を行う、位相シフト法を用いた。この手法では、各画素で位相を算出しパターン板と撮影画像を対応させるため、モアレの影響を受けずに対応付けを行うことができる。

4. 計測結果

カメラ及びパターン板を図1と同じ配置で設置した。カメラレンズは焦点距離が 25mm のものと 16mm のものを使用し、計測の直前にカメラ方向がほぼ 45 度になるように設置した。パターン板は PC 用 15 インチ液晶ディスプレイを使用した。また、雑音除去のために、入力画像に 3×3 の空間フィルタを施した。

図2は平面鏡の計測結果例である。平面鏡はy軸に平行に、奥行き約 -173mm の位置に設置し計測を行った。図中の太い点は計測した鏡面反射点分布を示しており、細い破線は設置した鏡面位置分布を示している。この計測空間分解能は約 0.20mm であり、解像度はフィルタの影響も考慮すれば約 0.28mm である。位置、形状ともにほぼ正確に復元されている。図3は図2をy方向に拡大したものである(設置した鏡面位置分布と計測値が 0.3mm 程ずれているのは、設置誤差によるものと考えられ、鏡面位置分布の真値は -173.3mm と考えられる)。周期的に現れている誤差は液晶ディスプレイのドットピッチと、カメラの素子間隔による量子化誤差と考えられる。量子化誤差については5章で説明する。誤差の絶対値の平均は約 0.213mm、標準偏差は約 0.183mm であった。なお誤差には計測対象鏡面の設置誤差を含んでいない。

図4は凹面鏡の計測結果例である。この凹面鏡の曲率半径は製造スペックによれば 304.8mm である。図2と同様に

†工学院大学, Kogakuin University

図中の太い点は計測した鏡面反射点分布、細い破線は鏡面枠の位置と曲率半径より導出した、設置した鏡面位置分布を示している。この計測空間分解能は約 0.18mm であり、解像度はフィルタの影響も考慮すれば約 0.25mm である。平面鏡と同様に位置、形状ともにほぼ正確に復元されている。図5は図4をy方向に拡大したものである。誤差の絶対値の平均は約 0.138mm、標準偏差は約 0.114mm であった。平面鏡の計測結果と比べて標準偏差が減少しているのは、鏡面とパターン板との距離がやや短くなって、量子化誤差が小さくなったためである。

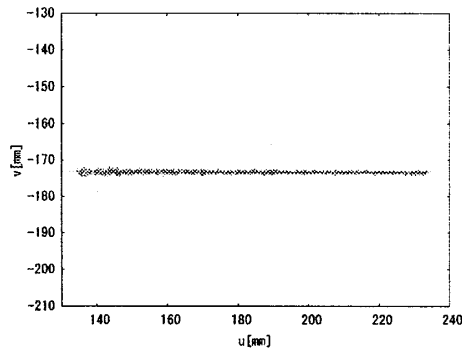


図2. 計測結果—平面鏡

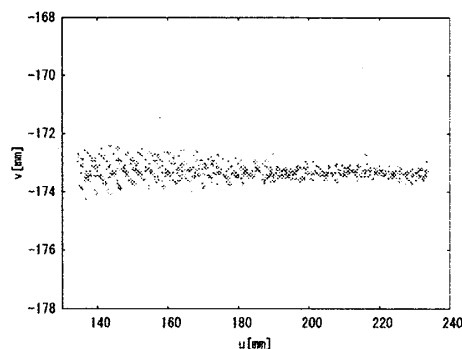


図3. 計測結果—平面鏡 (拡大)

5. 量子化誤差

図6を用いて量子化誤差の見積もりを行う。点Jは2章(1)と(2)の交点である。しかし、パターン板のドットピッチDEの影響で点Bから点Eまで移動してしまう。BCは

$$BC = \frac{2}{t} \left(\frac{t}{2} + h \right) DE \quad (3)$$

で与えられる。tは2枚のパターン板間の距離であり、hはパターン板と鏡面間の距離である。

4章の計測条件で平面鏡の量子化誤差の見積もりを行う。(3)に実験時のt、h、DEを与えると、BCは2.0mmと計算される。GFは(2)の光線軌跡の角度が小さくなるほど、即ちカメラからx軸方向に遠ざかるほど小さい値になる。この角度が45度のとき、GFは約1.0mmとなり、量子化誤差は±0.5mmと見積もられる。図3を見ると、見積もり通りuが大きくなるほど量子化誤差は減少しており、上記の角度が45度に近いu=190mm周辺では、量子化誤差は約±0.5mmであり、見積もりの大きさに良く対応している。またドットピッチによる理想値と計測値の差の変化により、計測値は周期的に右上がり又は右下がりのノコギリ波状に変化する

ことがわかった。図5においても、量子化誤差によりノコギリ波状の周期的特徴が現れている。

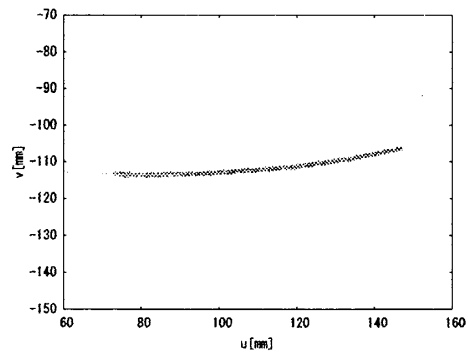


図4. 計測結果—凹面鏡

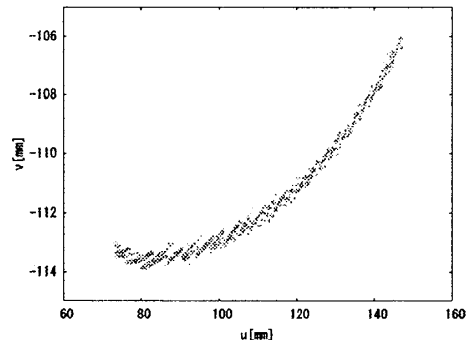


図5. 計測結果—凹面鏡 (拡大)

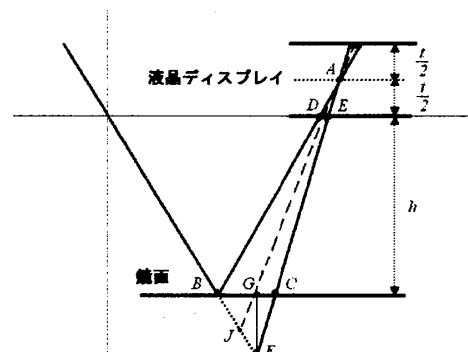


図6. 量子化誤差

6. おわりに

我々が開発してきた三角測量法による受動式鏡面位置・形状計測法には、計測結果に誤差が現れる問題点があった。本論文では、量子化誤差の見積もりを行うことにより、計測誤差の主要因が量子化誤差によるものであることがわかった。この問題点は、よりドットピッチの小さな液晶ディスプレイと、素子間隔の小さいカメラを用いることで解決できると考えられる。

参考文献

- [1] 徳竹、鈴木、小野、伊藤：“環境パターンを用いた簡易な鏡面位置、形状計測法の提案”、電子情報通信学会、2004年総大会(2004-03)
- [2] 鈴木、永峰、伊藤：“鏡面位置・形状計測における誤差の検討”、電子情報通信学会、2005年総大会(2005-03)