

Depth From Focus 法を用いた鏡面の距離・形状計測

A specular surface measurement method using depth from focus

高野 雅士
Masashi Takano森本 雅和
Masakazu Morimoto藤井 健作
Kensaku Fujii石垣 博行
Hiroyuki Ishigaki

1. はじめに

エンジンのシリンダヘッドなどの工業製品では表面の摩擦を低減するために鏡面加工が施されている。このような鏡面加工された金属の性状評価として、JIS において表面粗さ規格が規定されている。しかし、人間の目視による主観評価と JIS 規格での評価は必ずしも一致せず、一般的には目視が優先されている。そこで、鏡面度を客観的に評価するために、鏡面にパターン光を反射させ、カメラに写る画像の輝度分布の標準偏差から表面単位の傾斜角の分布を推定することで表面粗さを計測する手法が提案され、鏡面度計として製品化されている[1]。しかし、この鏡面度計同製品では対象を平面のみとしており、曲面を持つ物体の鏡面度を測定することはできない。また、カメラの焦点距離が固定されているため、計測対象に計測機を密着させる必要があり、鏡面仕上げされた製品に傷をつける可能性がある。

そこで本研究では、まず非接触式の鏡面度計測を目的とする。この場合、投影パターン・撮影カメラと計測対象鏡面との位置関係が不定であるため、最初に鏡面の相対位置を測定する必要がある。鏡面物体の位置・形状を計測するために、カメラと投影パターンの位置関係は既知であるものとし、計測を行う方法が提案されている[2]。これは、パターン板を移動させることにより、移動前のパターンと移動後のパターンとの対応点の変化から、鏡面の位置を特定するものである。我々の研究では、投影パターンを固定しておくことで、反射により鏡面に映る投影パターンの虚像までの距離を、カメラのフォーカス調整により取得する手法を提案する。これにより計測装置の簡略化を図る。また、同時に完全合焦画像を作成し、合焦画像中のパターンの変化から、鏡面物体の三次元計測するとともに、鏡面度を同時に計測することが可能になる。

2. 提案方式

本報告ではまず、計測対象鏡面を平面に限定する。対象が平面である場合、投影パターンは鏡面に対して対称な位置に虚像を結ぶため、虚像までの距離を計測することができれば、実像と虚像の中点を鏡面位置として測定できる。ここでは、虚像までの距離を計測するために Depth from Focus (DFF)法[3]を用いる。鏡面の位置が特定できれば、カメラで撮影した投影パターンの虚像の変化から、より正確な鏡面の形状を測定できる。

2.1 Depth from Focus(DFF)法

DFF 法は、カメラのフォーカスを移動させながら連続的に取得した多重フォーカス画像に対して、そのエッジ強度の変化から合焦判定を行ない、合焦時のフォーカス位置から距離を求める方法である。ここでは合焦判定に Sobel フィルタによるエッジ検出を用いる。多重フォーカス画像では合焦時にエッジ強度がピーク値を持つため、

エッジ強度の変化から合焦判定が可能になる。この合焦時のフォーカス距離から、対象までの距離を取得すると同時に、画像中のすべての画素においてエッジが先鋭となる完全合焦画像を作成できる。

2.2 物体に投影した縞模様と投影面の位置関係

DFF 法で取得した合焦画像から、物体までの距離と法線方向の角度を推定する。一般的な物体に対して DFF 法を適用して得られる焦点距離はカメラ-物体間の距離となるが、表面が鏡面加工された物体に対して測定を行うと、虚像までの距離を得ることになる。このため、単純に DFF 法を用いただけでは鏡面までの距離を測ることはできない。そこで鏡面に対し既知パターンとして縞模様を投影し、合焦画像中の縞のエッジ位置と、DFF 法で取得した焦点距離を用いて鏡面までの距離を計測する。DFF 法で取得した合焦画像では、全ての縞のエッジがはっきりしているため、画像中のエッジの位置を正確に決定することができる。

まず、図1に示すようにカメラ、投影パターン面を設置する。カメラ、投影面の位置関係は既知であり、カメラ水平面と投影面は垂直である。投影する縞模様は白と黒の2色で、それぞれの幅が同じ縦縞模様とする。さらに、鏡面に映り込んだパターンは、鏡面に対して対象である位置に存在すると考えることができる。この設置条件で、DFF 法を用いて取得した合焦画像上の縞のエッジ点 s と、そのエッジに対応する投影面での縞のエッジ点 e の関係、DFF 法で得られる焦点距離 $\text{dist}(=oe=or)$ から、鏡面からカメラへの反射角 ϕ を計算する。また、 ϕ の計算結果を用いて、カメラから鏡面までの距離 os を計算する。

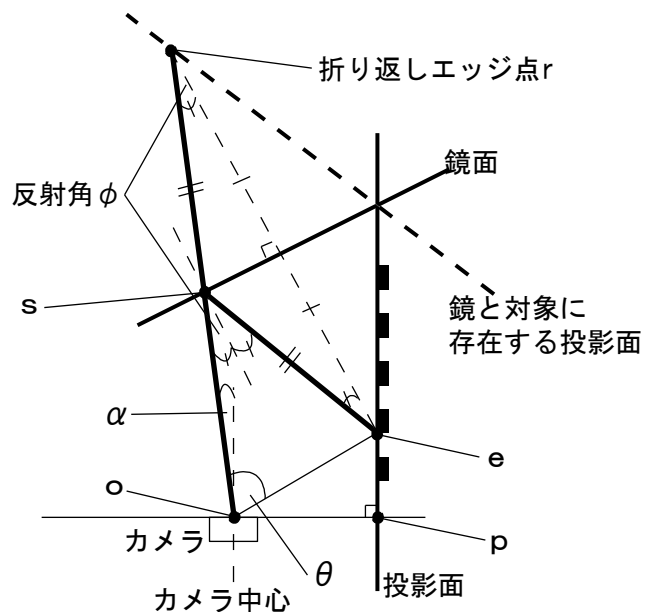


図1 鏡面で投影面を折り返した状態

図1において、投影面とカメラの位置関係が既知であることから、 op , ep は既知のパラメータである。また、 oe は op , ep から三平方の定理で求めることができる。まず、反射角 ϕ を計算する。カメラから折り返しエッジ点 r の距離は DFF 法で得られる焦点距離 $dist$ となる。 $\angle roe$ を θ とすると、 θ は op , ep と画像中のエッジの位置で計算することができる。 or とカメラ中心が成す角と α とすると、以下の式(1)が成り立つ。

$$\theta = \alpha + (90 - \tan(ep/op)) \quad (1)$$

次に、三角形 roe で、式(1)で求まる θ と $dist$, oe を用いて余弦定理から re を計算する。計算式を式(2)に示す。

$$re = \sqrt{dist^2 + oe^2 - 2 \times dist \times oe \times \cos \theta} \quad (2)$$

同様に三角形 roe で、式(2)で求まる re を用いて正弦定理より ϕ を計算する。計算式を式(3)に示す。

$$\frac{re}{\sin \theta} = \frac{oe}{\sin \phi} \quad (3)$$

式(3)を ϕ について解くことで、反射角 ϕ を求めることができる。ここで、点 r は点 e を鏡面で線対象に折り返した点であるので、 re は鏡面で距離が半分になる。また、 re と鏡面は直角になる。これらを用いて、式(3)から求まる ϕ と、 $re/2$ から余弦を計算することで $sr(=er)$ を計算することができる。求める式を式(4)に示す。

$$\cos \phi = \frac{sr}{r/2} \quad (4)$$

式(4)で求まる sr と $dist$ との差分がカメラから鏡面までの距離 os となる。

3. 実験・結果

今回の実験では、撮影には Canon 製のパンチルトズームカメラ VC-C50i、鏡面を持つ物体にステンレス板を用いた。カメラ中心から鏡面までの距離は約 13 センチ、投影面とステンレス板のなす角度は 25° 、投影面-カメラ間距離 d は約 8.5 センチとなるように設置した。図2のグラフに得られたカメラから鏡面までの角度をうち、中心付近の上下 20 点分を平均した値と、理論値を示す。

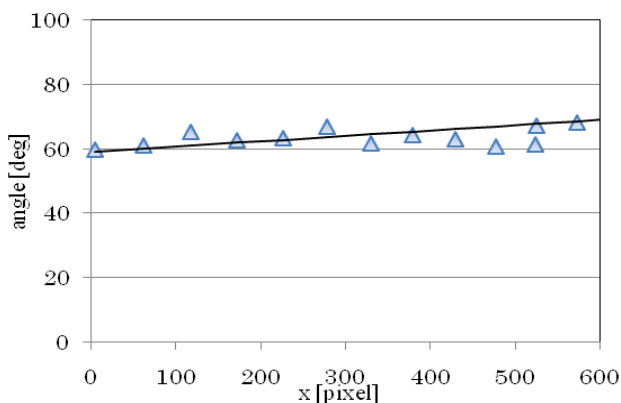


図2 鏡面からカメラへの反射角の測定値と理論値

x-axis は画像中の x 軸、直線は理論値、マークは測定値を表している。理論値は設置条件から計算で求めた。設置条件から x 軸の値が大きくなるにつれて、角度も大きくなる。投影面とステンレス板のなす角を 25° にしたので、画像中心、つまり $x=360$ のあたりで理論では 65° になる。計算結果では約 64.1° であり、約 1 度の精度で測定が行え

ている。計算結果には多少ばらつきはあるが、ほぼ理論値の直線に沿っている。ばらつきの原因として DFF 法による距離取得時の誤差、カメラ、投影面の設置が手作業のため正確ではない、などが考えられる。同様に、図3のグラフに得られた距離のうち、中心付近の上下 20 点を平均した値と、理論値を示す。

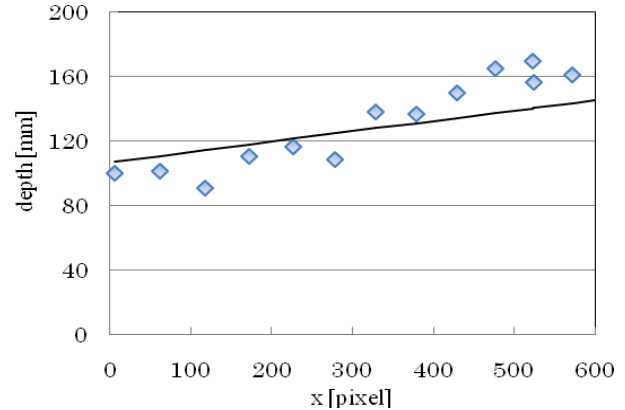


図3 カメラから鏡面までの距離の測定値と理論値

設置条件から、角度と同様に x 軸の値が大きくなるにつれて距離も遠くなる。こちらも角度と同様、多少ばらつきはあるがほぼ理論値の直線に沿っている。距離は角度を元に計算するため、角度のずれがそのまま距離のずれに反映される。理論値では中心付近では 13 センチとなる。計算値は約 13.6 センチであり、数ミリ程度の誤差で測定できている。

4. まとめ・考察

本報告では、鏡面物体としてステンレス平板を対象に実験を行った。ステンレス平板では映り込みの先に焦点が合うことを利用して、DFF 法で得られる投影パターン of 虚像までの焦点距離と、投影面、カメラの位置関係、および撮影した縞パターンの変化から、鏡面までの距離と角度を、距離では 1 センチ~3 センチ程度、角度では $1^\circ \sim 5^\circ$ 程度程度の精度で計測することができた。

今回の実験では対象を平面に限定したため、焦点は鏡面に対して対称な位置にある虚像に合わせることもできた。しかし、曲面を持つ鏡面物体では、その曲率により焦点位置は変化してしまう。そこで、今後の課題として、目的とする物体が曲面、または平面のどちらか、あるいは両方で構成される場合の焦点距離の判定基準や、任意の曲面を持つ物体に対して 3 次元的な計測、DFF 法の精度改善、得られた角度を用いて鏡面モデルへの適用などが挙げられる。

参考文献

- [1] <http://www.arcl.co.jp/product/mirror.html>
アークハリマ 鏡面度計 SPOT
- [2] 永峰 和也 川端晃一 他, 三角測量原理に基づく受動式鏡面位置・形状計測法, 2007 年電子情報通信学会総合大会, D-12-66.
- [3] 浅田尚紀 藤原久永 松山隆司 多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測, 信学論, Vol. J77-D-II No. 6 pp. 1048-1058, 1994.