

ガラス板を対象にした受動式位置・形状計測手法の検討

Passive measurements of positions and shapes of glass plates

上野 健司[†]

Kenji Ueno

吉場 拓也[†]

Takuya Yoshiba

伊藤 稔[†]

Minoru Ito

1. はじめに

ガラスを含む透明物体の3次元位置・形状を光学的手段により非接触計測する方法がいくつか提案されている。その一つとして、偏光を使って物体の形状を計測する方法が Saito により提案されている。[1] Miyazaki らは Saito らの手法を改良して、曖昧性のない形状計測手法を提案している。[2][3] 一方、偏光を使わずに透明物体の3次元形状を計測する方法として Murase は水面が波打つ現象を解析することにより、水面の形状を推定する手法を提案している。[4] また、Hata らはプロジェクターから透明物体にマルチストライプパターン光を当てて、そのパターンが変形する様子を解析することにより透明物体の表面形状を計測する手法を提案している。[5] また、Ohara らは、カメラのフォーカスを調節することにより、透明物体のエッジ部分とカメラとの距離を推定する手法を提案した。[6] さらにまた、Ben-Ezra らは、動画像を使ってパラメータで表現可能な曲面を持つ透明物体を計測し、そのパラメータを計算することにより、その透明物体の3次元形状を計測する手法を提案している。[7] このように種々の手法が提案されているが、安定性、精度、簡易性、汎用性等の面からは、実用に十分耐えうる計測手法がまだ確立されていなく、新規な手法の開発が待たれていた。

我々は既に、カメラ1台とパターン表示板2枚を用い、鏡面を介してパターン板の虚像を観測し、三角測量原理を適用することにより鏡面の位置・形状を計測する新規な受動式手法を提案している。[8-10] 本稿では、正反射成分の割合が極めて低いフロートガラス板、すりガラス板の計測にこの手法が適用できるかどうかを検討し、その結果、その計測が可能であることが明らかになったので、報告する。

2. 計測原理

計測対象であるガラス板を任意の位置に置き、パターン板上に表示されたパターン映像の虚像をカメラで観測する。図1は計測原理を説明するためのものである。ここでは説明の都合上 xy 面上の2次元で扱うこととする。

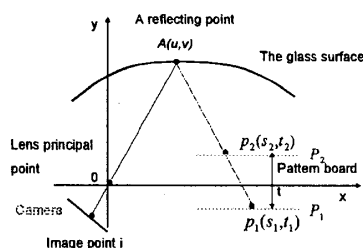


図1 計測原理

カメラ撮像素子上のある結像点が、パターン板 P_1 上の位置

[†] 工学院大学 Kogakuin University

p_1 の虚像が投影された画像点位置に対応し、同時にパターン板 P_2 上の位置 p_2 の虚像が投影された画像点にも対応し、これら p_1 、 p_2 の座標を検出することができれば、 p_1 と p_2 を通る直線としてガラス表面反射前の光線軌跡を特定することができる。一方、その光線はガラス面上（反射点）で反射した後にレンズ主点を通って結像点に入射するため、反射後の光線軌跡を特定できる。このため、三角測量原理によりガラス表面の反射点 A の位置 (u, v) を確定することができる。

3. 計測実験

カメラ板及びパターン板を図1とほぼ同様に配置した。カメラとして1280×1024画素のモノクロデジタルカメラに焦点距離25mmのレンズを装着したものを用い、パターン板は1枚のみを移動することにより2枚分を代用することとした。パターン板 P_1 は $y=0\text{mm}$ 、パターン板 P_2 は $y=30\text{mm}$ に x 軸に平行に設置している。

ガラス上の反射点位置を高い分解能で検出するには、画像上の各画素が対応しているパターン板上の位置を高精度・高安定に検出することが望まれる。その方法として、パターン板上に先ず鋸状縦縞パターンを、その位相を順次シフトしながら表示し、続いて横縞パターンを、その位相を順次シフトしながら表示した。ガラス表面での正反射成分の割合は高々数%と極めて低いが、位相を検出することには支障がなく、画像の各画素とパターン板上位置の対応を得ることができた。

計測対象として厚さ2mmのフロートガラスA、5mmのフロートガラスB、厚さ5mmのすりガラスの3枚を用意し、それぞれ $y=138\text{mm}$ 、 $y=137\text{mm}$ 、 $y=137\text{mm}$ の位置に、 x 軸にほぼ平行に設置した。

図2~4に、それぞれフロートガラス板A、Bとすりガラス板の表面の計測結果を示す。正反射成分が極めて低いガラス表面であってもほぼ計測が出来ていることが分かる。計測範囲はフロートガラス板A、Bがそれぞれ約 55cm^2 、 36cm^2 、すりガラス板が約 55cm^2 であった。図3中の右上部分の計測できていない部分は、正反射成分の光量が不足して位相検出できなかったことに依っている。

図5に、ガラスAの表面上反射点の1断面位置を示す。横方向と縦方向の計測位置分解能はそれぞれ 0.08mm 、 0.06mm である。図6に、ガラスBの表面上反射点の1断面位置を示す。計測位置分解能は図5とほぼ同じである。また、図7に、すりガラス板の1断面を示す。計測位置分解能はやはり図5とほぼ同じである。このように、図5、6、7ともに横方向と縦方向の1断面を示したものであったが、他の位置における断面もほぼ全く同じ計測結果であった。

検出結果について、ガラスAの表面は平均位置誤差 0.42mm 、誤差の絶対値（以降、誤差絶対値と称す）の平均 0.62mm 、標準偏差 0.64mm であり、ガラスBの表面は平均位置誤差 -0.67mm 、誤差絶対値平均 0.74mm 、標準偏差 0.56mm 、すりガラスは平均位置誤差 -0.34mm 、誤差絶対値平均 0.40mm 、標準偏差 0.34mm であった。

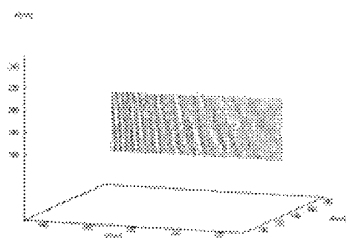


図2 計測結果 ガラス表面 (2mm)

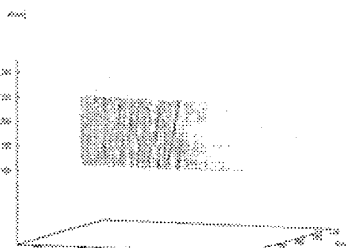


図3 計測結果 ガラス表面 (5mm)

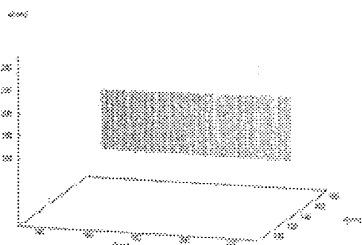


図4 計測結果 すりガラス

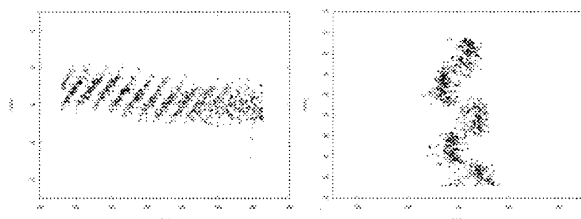


図5 計測結果 ガラス表面 (2mm) (左: 横方向断面 右: 縦方向断面)

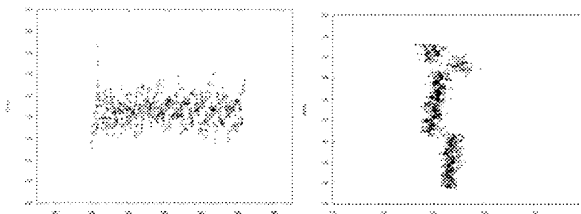


図6 計測結果 ガラス表面 (5mm) (左: 横方向断面 右: 縦方向断面)

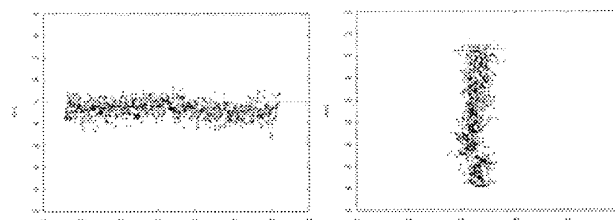


図7 計測結果 すりガラス (左: 横方向断面 右: 縦方向断面)

4. おわりに

鏡面の3次元位置形状計測法を正反射成分割合が極めて低いガラス板2種類とすりガラス板に適用し、高い精度で各表面位置の絶対位置を計測できることを明らかにした。絶対位置誤差の平均は0.7mm以内、誤差絶対値誤差は0.8mm以内、標準偏差0.5mm以内となり、高い分解能かつ高い検出精度が得られることが明らかになった。画像を介した他の受動式計測手法では従来計測できなかったこのような非完全鏡面物体に本提案手法が容易に適用できたことの実用上の意義は大変大きいと考えられる。今後の課題として誤差の更なる低減を進めると共に、他の非完全鏡面計測への適用性も調べていきたい。

参考文献

- [1] M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, and H. Kashiwagi, "Measurement of surface orientations of transparent objects by use of polarization in highlight," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 16, no. 9, pp. 2286-2293, Sep. 1999.
- [2] D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 19, no. 4, pp. 687-694, Apr. 2002.
- [3] D. Miyazaki, M. Kagesawa, and K. Ikeuchi, "Transparent surface modeling from a pair of polarization images," *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, vol. 26, no. 1, pp. 73-82, Jan. 2004.
- [4] H. Murase, "Surface shape reconstruction of an undulating transparent object," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, pp. 313-317, Osaka, Japan, Dec. 1990.
- [5] S. Hata, Y. Saitoh, S. Kumamura, and K. Kaida, "Shape extraction of transparent object using genetic algorithm," *Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition*, pp. 684-688, Vienna, Austria, Aug. 1996.
- [6] K. Ohara, M. Mizukawa, K. Ohara, and K. Taki, "3D modeling of micro transparent object with integrated vision," *Proc. IEEE Conf. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 107-112, Tokyo, Japan, July-Aug. 2003.
- [7] M. Ben-Ezra and S. K. Nayar, "What does motion reveal about transparency?," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, pp. 1025-1032, Nice, France, Oct. 2003.
- [8] 大嶋, 佐藤, 伊藤, "環境パターンを用いた鏡面形状計測", 画像センシングシンポジウム, June. 2000
- [9] Kazuya Nagamine, Yu Suzuki and Minoru Ito, "Passive specular surface measurements from virtual images of pattern boards", *MVA2005, IAPR Conference on Machine Vision Applications*, May. 2005
- [10] 永峰, 川端, 伊藤, "パターン板の虚像からの受動式鏡面位置・形状計測法", 電子情報通信学会論文誌 D VOL. J91-D NO. 6 pp. 1625-1633, June 2008