

文章编号: 0253-2239(2010)05-1349-05

含镜面反射面形的傅里叶变换轮廓术

陈利娟 徐利华

(西南交通大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要 对于反射光含镜面反射的物体而言,由于镜面反射的存在,将会导致图像中存在许多的高亮区。因为镜面反射光强相对较强,因此图像中高亮区镜面反射光会不可避免地掩盖漫反射光场分布中的相位信息,从而导致错误的三维面形测量。从分析傅里叶变换轮廓术中光场的偏振特性出发,利用光学器件的滤光作用,结合现有傅里叶变换轮廓术和 Phong 光照模型,实现了含镜面反射的物体面形的三维测量。理论分析与实验结果均证明了镜面反射将影响调制光场的高度分布,并且还证明了提出的测量方法可有效消除投影光源造成的高反光区域,极大地扩展了傅里叶变换轮廓术的测量领域。

关键词 表面光学;高光的消除;傅里叶变换轮廓术;镜面反射;Phong 光照模型

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1349

Fourier Transform Profilometry for Surface with Specular Reflection

Chen Lijuan Xu Lihua

(College of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Because of the specular reflection of the object, there must be many high-light areas in the image. The intensity of the specular reflection is relatively strong, so phase information of structured optical field is inevitably covered up by specular reflection. If the reflected light field of the surface with specular reflection by general Fourier transform profilometry is directly measured, wrong 3D surface data must occur. According to polarization properties of the light field, using light-filtering function of optical components, and combining Fourier transform profilometry with Phong illumination model, 3D surface of the object with specular reflection can be correctly measured. Both theoretical analysis and experimental results not only prove that specular reflection will affect the modulation field of the surface, but also prove that the proposed measurement method can measure the surface with specular reflection. So application fields of Fourier transform profilometry could be greatly expanded.

Key words surface optics; elimination of high light; Fourier transform profilometry; specular reflection; Phong illumination model

1 引 言

光学三维传感由于其具有非接触性、精度高、测量速度快以及自动化程度高等特点而得到广泛应用^[1],比如实时测量^[2]、质量控制、逆向工程^[3]和 CAD/CAM 等领域^[4]。但是,现有技术主要针对的是漫反射物体,而难以有效地测量具有镜面反射的物体。例如现代工业中的汽车制造业在车身、抛光模具等具有镜面反射性质的表面需要高精度测量。目前表面具有镜面反射性质的这类零件的测量一般

采用两种办法^[5]:1)采用坐标测量机等接触式测量设备,速度较慢;2)喷涂其表面,改变其反射特性为漫反射后用光学方法测量。机械测量方法由于其本身的局限性很难在工业现场中进行使用;喷涂表面法尽管可改变物体表面的反射特性,但在很多场合下不能甚至无法进行物体表面喷涂。

面形测量过程中,含镜面反射的物体表面的镜面反射光主要来源有两个:1)环境光造成的镜面反射光;2)投影光源造成的镜面反射光。本文将重点

收稿日期: 2009-06-01; 收到修改稿日期: 2009-09-03

基金项目: 西南交通大学基础研究基金(2007B18)资助课题。

作者简介: 陈利娟(1986—),女,硕士研究生,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: maomao500240@126.com

导师简介: 徐利华(1974—),男,博士,副教授,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: xulihua@home.swjtu.edu.cn

放在描述投影光源造成的镜面反射光上,从傅里叶变换轮廓术投影光场的偏振特性出发,利用光学器件的滤光作用,结合现有傅里叶变换轮廓术,实现了含镜面反射的物体面形的三维测量。同时给出了含镜面反射的面形测量的理论分析和实验结果。

2 理论分析

2.1 镜面反射光对测量的影响

由于傅里叶变换轮廓术快速的特性,所以选取傅里叶变换轮廓术作为测量方法,其中投射光为强度按正弦分布的面阵平行自然光,条纹的栅线垂直于图平面。当被测物为漫反射物体时,经物体反射后的光强分布为^[6]

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)]. \tag{1}$$

当被测物为含镜面反射的面形时,由 Phong 光照模型^[7]可知,反射光场包含环境光反射分量、特定光源的漫反射分量和特定光源的镜面反射分量。光是电磁波,大部分情况下,只需考虑电场分量^[8]。当入射光为平行光时,各路镜面反射光仍相互平行,合成后电矢量平行于入射面,这种光表征物体的光泽,即所谓的“高光”;由于物体面形变化导致的漫反射光,各路漫反射光线由于各点的法线方向不一致,造成反射光线向不同的方向无规则地反射,不再是平行光,因此各路漫反射光相对于镜面反射光的入射面既有平行的电矢量分量又有垂直的电矢量分量。

若用传统的傅里叶变换轮廓术计算此类有镜面反射的面形时,由以上分析可知,经物体表面反射后的光强信息可由在测量漫反射物体时表面反射光强信息的基础上引入附加镜面反射项得到,可表示为

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)] + c(x,y)\cos(2\pi f_0 x), \tag{2}$$

式中 $a(x,y)$ 是代表环境自然光反射分量振幅, $b(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)]$ 表示对投影光源的漫反射分量振幅, $c(x,y)\cos(2\pi f_0 x)$ 表示对投影光源的镜面反射分量振幅,且该镜面反射分量与 CCD 拍摄的方向有关,只在某些区域有值,其它区域为零。 f_0 是在 x 方向的载波频率,物体的高度信息包含在漫反射项中的相位 $\varphi(x,y)$ 中。

由于自然光可等效为两个振幅相等,振动面互相垂直,没有相位关系的线偏振光,因此可将(2)式右边的 3 个反射光分量各分解成垂直于入射面的电矢量分量和平行于入射面的电矢量分量,于是可得到

$$g(x,y) = \sqrt{a_s(x,y)^2 + a_p(x,y)^2} + \sqrt{b_s(x,y)^2 + b_p(x,y)^2} \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)] + \sqrt{c_s(x,y)^2 + c_p(x,y)^2} \cos(2\pi f_0 x), \tag{3}$$

式中 $a_p(x,y), a_s(x,y)$ 分别表示物体对环境光反射分量平行于入射面的电矢量分量模和垂直于入射面的电矢量分量模。 $b_p(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)], b_s(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)]$ 分别表示物体对投影光源的漫反射分量平行于入射面的电矢量分量振幅和垂直于入射面的电矢量分量振幅。 $c_p(x,y)\cos(2\pi f_0 x), c_s(x,y)\cos(2\pi f_0 x)$ 分别表示物体对投影光源的镜面反射分量平行于入射面的电矢量分量模和垂直于入射面的电矢量分量模。

由于投影光和环境都是自然光,所以此时有,

$$\begin{aligned} a_p(x,y) &= a_s(x,y) \\ b_p(x,y) &= b_s(x,y). \end{aligned} \tag{4}$$

$$c_p(x,y) = c_s(x,y)$$

由光的反射机理可知,

$$\begin{aligned} c(x,y) &\gg b(x,y), \\ c(x,y) &\gg a(x,y). \end{aligned} \tag{5}$$

$$\tag{6}$$

因此在 $c(x,y)$ 不为零的区域,镜面反射占主导地位,将这些区域称为高亮区。由(2)式或(3)式可见,在高亮区镜面反射掩盖了漫反射项,无法分辨出漫反射项,从而无法正确分辨出包含在漫反射项中的物体相位信息。因此在高亮区直接用传统的傅里叶变换轮廓术无法得到正确的相位信息。

2.2 镜面反射光的消除

由以上分析可知,镜面反射分量的存在会导致无法正确分辨漫反射分量中包含的物体相位信息。则可以将镜面反射分量消除后再应用传统的傅里叶变换轮廓术,这样就能得到含镜面反射物体的正确相位信息。

测量光路如图 1 所示。其中 P_1 是起偏器,用于得到满足要求的线偏振光。 P_2 是检偏器, $E_{p'}$ 和 E_p

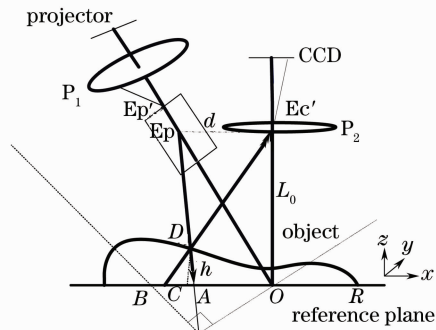


图 1 测量光路

Fig. 1 Light path for measurement

分别是投影系统的入瞳和出瞳, E_c' 是成像系统的入瞳, 两光轴相交于参考平面 R 上的 O 点。 d 是 E_p 和 E_c 间的距离, L_0 是 E_c 到参考平面 R 间的距离, A 和 C 是参考平面上的两点, D 是物面上的点, “ h 是物面上点 D 到参考面 R 间的距离”, CCD 是接收变形光栅像的面阵探测器。 投射光为强度按正弦分布的面阵平行自然光, 条纹的栅线垂直于图平面。 使投射的平行自然光经过起偏器 P_1 后成为电矢量 E 平行于入射面的线偏振光, 即

$$f(x, y) = E \cos(2\pi f_0 x + \varphi_0), \quad (7)$$

$$f_{P_1}(x, y) = E_p \cos(2\pi f_0 x + \varphi_0), \quad (8)$$

(7) 式中 $f(x, y)$ 表示投影发出的自然光表达式, (8) 式中 $f_{P_1}(x, y)$ 表示 $f(x, y)$ 通过起偏器 P_1 后的光强, 此时只剩下平行于入射面的分量, $E_p \cos(2\pi f_0 x + \varphi_0)$ 投影发出的平行于入射面的电矢量分量的振幅, 垂直于入射面的电矢量分量不能通过检偏器 P_2 。 由菲涅耳公式得出, 只要投射角不等于布儒斯特角, 那么反射光的电矢量平行于入射面。 则当投影光源的投射角不等于布儒斯特角时, $f_{P_1}(x, y)$ 经含镜面反射的物体反射后中的镜面反射电矢量分量平行于入射面, 对镜面反射来说, 入射面只有一个, 因此镜面反射电矢量分量为平行于入射面的完全线偏振光, 其中的漫反射电矢量分量也平行于入射面, 但是由于漫反射因物体的高度分布而导致各个入射面不相互平行, 因此各路漫反射电矢量分量合成后为非完全线偏振光。 再结合 (3) 式, $f_{P_1}(x, y)$ 经含镜面反射的物体反射后的的光强分布可写为

$$g(x, y) = \sqrt{a_s(x, y)^2 + a_p(x, y)^2} + \sqrt{b_s(x, y)^2 + b_p(x, y)^2} \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] + c_p(x, y) \cos(2\pi f_0 x), \quad (9)$$

$$c_s(x, y) = 0.$$

旋转 P_2 , 当 P_2 与 P_1 相互垂直时, 此时反射光中只有垂直于入射面的光矢量分量能通过检偏器 P_2 , 则经 CCD 接收到的变形光栅像表达式可写为

$$g_{\text{CCD}}(x, y) = a_s(x, y) + b_s(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]. \quad (10)$$

由 (10) 式可见, 由于 P_2 阻止了平行于入射面的光矢量分量通过, 因此起偏器和检偏器的引入消除了投影光源产生的镜面反射光, 虽然通过消光后环境光分量与漫反射分量振幅系数同时也发生了变化, 但是与高度分布密切相关的相位信息并没有改变。 此时光场分布形式回复到只存在漫反射光的状态, 则可使用一般的傅里叶变换轮廓术解调出面形

数据。 因此起偏器和检偏器的引入保证了强镜面反射面形解调的正确性。

3 实验验证

测量的装置图如图 2 所示, 测量系统的几何参数为 $L_0 = 160 \text{ cm}$, $d = 34 \text{ cm}$ 。 被测物体是一个陶瓷材质的水杯。 投影仪 (VPL-CX21) 的功率为 200 W, 正弦光栅的频率为 6 cm^{-1} , 图像传感器为 CCD (RETIGA 2000R FAST), 偏振片直径为 100 mm, CCD 先采集 1 帧参考条纹图, 然后采集 1 帧变形条纹图。 图 3 是未加检偏器 P_2 时采集的 1 帧变形光栅像, 图 4 是当 P_2 与 P_1 相互垂直时 CCD 获取的 1 帧变形条纹图。

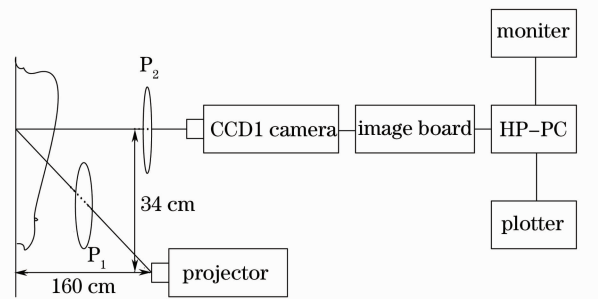


图 2 实验装置框图

Fig. 2 Block diagram for experimental setup



图 3 不加 P_2 的变形条纹图

Fig. 3 Deformed fringe pattern without P_2



图 4 P_2 与 P_1 垂直的条纹图

Fig. 4 Deformed fringe pattern with P_2 perpendicular to P_1

在不失一般性的前提下,我们对具有高光区域的图像放大显示为图 5,其对应的消高光区域为图 6。由于镜面反射光的存在,图 5 中的高亮区域面形的调制被高光掩盖,破坏了投影光场的分布;利用 P_2 滤光后,图 6 展示了高亮区被有效消除,此时的光场分布退化到了常规的漫反射光场分布。在对它们进行傅里叶变换轮廓术处理后分别得到了消除参考面后的包裹相位灰度图,如图 7 和图 8 所示。相对于图 8 的均匀包裹相位,图 7 显示出了高光对相位的影响,使得相位产生了严重的偏差。图 9 和图 10 是分别对图 7 和图 8 经相位展开后得到的真实相位图,图 9 表明高光区域的高度分布严重偏离了物体的真实面形高度,而图 8 经相位展开后得到了物体的真实面形分布,如图 10 所示。

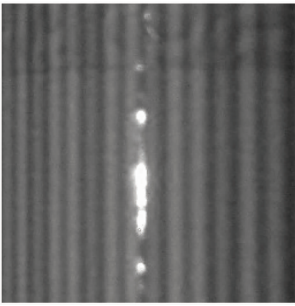


图 5 高光区域

Fig. 5 Region of specular reflection

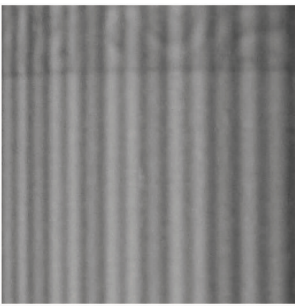


图 6 高光消除后的区域

Fig. 6 Region of eliminated specular reflection

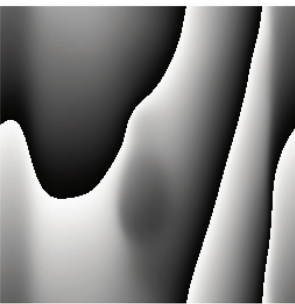


图 7 包含高光的包裹相位图

Fig. 7 Wrong wrapped phase by specular reflection



图 8 消除高光的包裹相位图

Fig. 8 Correct wrapped phase after eliminating high light

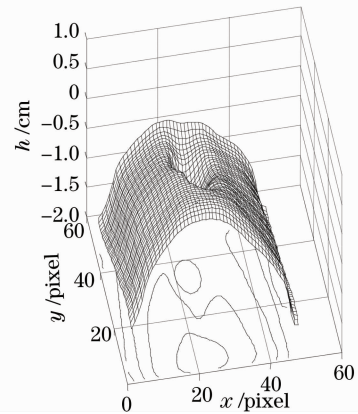


图 9 具有高光的展开相位

Fig. 9 Unwrapped phase of wrong profile

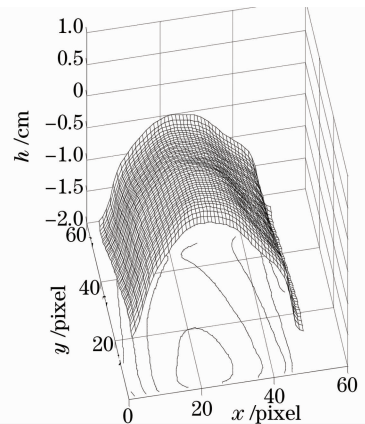


图 10 消除高光后的展开相位

Fig. 10 Unwrapped phase of correct profile after eliminating high light

4 结 论

以光的反射偏振态和 Phong 光照模型为理论依据结合一般的傅里叶变换轮廓术,提出了含镜面反射面形的傅里叶变换轮廓术,由以上给出的理论分析和实验结果可见,二者均证明了由于镜面反射的存在,导致高亮区的面形调制被高光掩盖,从而得到错误的相位信息。同时证明了提出的含镜面反射

面形的傅里叶变换轮廓术可有效地消除投影光源的镜面反射,最终使 CCD 拍摄到的光场分布回复为漫反射物体的反射光场分布,从而可应用一般的傅里叶变换轮廓术解调出含镜面反射物体的正确面形分布,这种方法不仅适合于陶瓷材质的物体还适合于涂漆反光塑料材质的物体测量等。可以极大地扩展傅里叶变换轮廓术的测量领域。具有极好的理论研究和实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liquan *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233
苏显渝,谭松新,向立群等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 2 Yue Huimin, Su Xianyu, Li Zeren. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 767~771
岳慧敏,苏显渝,李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 767~771
- 3 Jiang Tao, Xi Juntong, Yan Junqi. Optical 3D profilometry integrated with feature capturing in reverse engineering [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(2): 19~22
姜涛,习俊通,严隽琪. 反求工程中融合特征捕捉的光学三维测量方法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(2): 19~22
- 4 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 5 Tao Tao, Guo Hongwei, He Haitao. Overview of optical three-dimensional measurement technique for specular reflection surfaces[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(2): 90~95
陶涛,郭红卫,何海涛. 镜面反射面形光学三维测量技术综述[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(2): 90~95
- 6 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. New method to eliminate extension of zero component in FTP[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 740~744
陈文静,苏显渝,曹益平等. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 740~744
- 7 Zhang Yousai, Chen Fumin. Accelerated volume rendering using texture mapping with phong shading [J]. *J. Image and Graphics*, 2003, **A8**(9): 1048~1054
张尤赛,陈福民. 基于纹理映射与 Phong 光照模型的体绘制加速算法[J]. *中国图象图形学报*, 2003, **A8**(9): 1048~1054
- 8 Xu Linhua, Li Xiangyin, Xu Fulong. Polarization analysis on reflection of linearly polarized light[J]. *J. Chongqing Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 2007, **21**(7): 70~73
徐林华,李相银,徐福龙. 线偏振光反射时的偏振态分析[J]. *重庆工学院学报(自然科学版)*, 2007, **21**(7): 70~73
- 9 Li Yong, Su Xianyu. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(11): 76~79
李勇,苏显渝. 用于可靠性导向相位展开的快速算法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 76~79