

# 基于无衍射栅型结构光投影的角膜轮廓测量

周莉萍 干江红 徐 龙

(华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 角膜轮廓测量在眼科学上有重要意义,但角膜的高透光率增加了其测量难度。根据角膜生物特性,结合无衍射栅型结构光条纹投影测量的优点,通过对角膜表面涂覆荧光素的方法实现角膜表面轮廓测量。介绍了无衍射栅型结构光条纹投影系统测量模型,角膜表面轮廓测量实验设计。搭建测量平台对涂有荧光素的兔眼角膜进行了测量,并观察了眼压升高引起兔眼角膜的变形现象。实验结果表明,利用无衍射栅型结构光投影可以实现角膜表面轮廓测量,验证了通过测量角膜表面轮廓曲率半径变化实现眼内压力非接触测量的可行性。

**关键词** 测量;无衍射栅型结构光;角膜轮廓测量;投影测量;眼压;荧光

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0308001

## Corneal Contour Measurement Based on Non-Diffracting Grating Structure Light Projection

Zhou Liping Gan Jianghong Xu Long

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Corneal contour measurement has significant meaning in ophthalmology, but it is difficult because of high transmittance of cornea. According to the characteristics of cornea and by taking advantage of non-diffracting grating structure light projection system, the contour of corneal surface coated with fluorescein is measured. A model of non-diffracting grating structure light projection system is proposed and experiment of corneal surface contour measurement is designed. A measurement platform is set to realize rabbit corneal contour measurement, and corneal deforming phenomenon caused by increasing intraocular pressure is observed. Experimental result shows that the corneal contour can be measured precisely by non-diffracting grating projection system. Feasibility of intraocular pressure measurement according to variation of corneal contour curvature is validated.

**Key words** measurement; non-diffracting grating structure light; corneal contour measurement; projection measurement; intraocular pressure; fluorescence

**OCIS codes** 050.1950; 110.2650; 120.4290; 280.1415

## 1 引 言

角膜是一种凸形的高透明物质,位于人眼眼球的最前端,其前表面可近似认为是球面,成年人角膜前表面曲率半径均值为 7.83 mm。角膜轮廓测量对于眼科学、配镜学等都很重要,在角膜屈光手术、接触镜验配、圆锥角膜及干眼症的诊断等领域有应用价值。另外,角膜是具有一定弹性的生物组织,眼内压力的变化会引起角膜的变形<sup>[1,2]</sup>,而眼压的升高和波动是青光眼发生、发展、致盲的危险因素,也

是唯一能加以控制的危险因素。因此,通过对整个角膜表面轮廓进行精密测量,精确计算角膜表面轮廓的曲率半径,进而建立眼内压力与角膜表面轮廓曲率半径之间的关系,通过测量角膜表面轮廓曲率半径实现眼内压力的测量,对青光眼的预防与诊断具有重要意义。

条纹投影轮廓术<sup>[3~5]</sup>是以现代光学为基础,融光电子学、计算机图像处理、图形学和信号处理等技术为一体的现代测量技术,它把光学图像当作检测

收稿日期: 2012-09-15; 收到修改稿日期: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(50975112)资助课题。

作者简介: 周莉萍(1965—),女,博士,副教授,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: zhoulp@mail.hust.edu.cn

和传递信息的手段或载体加以利用,其目的是从图像中提取有用的信号。条纹投影轮廓术具有非接触、快速和全场测量的特点,是目前工程应用中最有发展前途的物体三维轮廓测量方法,测量精度可以达到  $10\ \mu\text{m}$  甚至更高<sup>[6]</sup>。无衍射栅型结构光<sup>[7,8]</sup>具有焦深长、强度成正弦分布和线宽细等优点,用于投影测量可以提高测量分辨率。从技术上来讲,基于无衍射栅型结构光的条纹投影轮廓术可以满足整个角膜表面轮廓精密测量的要求。

本文结合角膜表面轮廓测量的需求及无衍射栅型结构光条纹投影轮廓术的技术优势,提出利用基于傅里叶变换相位计算<sup>[9~11]</sup>的条纹投影轮廓术实现角膜表面轮廓精密快速测量的方法。介绍了条纹投影轮廓术基本原理和角膜表面轮廓的测量实验设计,对测量结果进行了分析。观察了眼内压力的升高引起角膜变形的现象,验证了通过角膜曲率半径变化测量眼内压力的可行性。

## 2 无衍射栅型结构光条纹投影测量原理

条纹投影轮廓测量系统一般由结构光条纹投影设备、图像获取设备(摄像机)和图像处理设备组成。其基本测量原理是:利用投影设备向被测物体投射具有一定特征的结构光图样,同时用摄像机获取物体表面变形的结构光图样,对获取的图像进行处理并结合测量系统模型从变形条纹中提取物体表面高度信息。为了提高测量精度,这里采用干涉方法实现具有正弦强度分布的无衍射栅型结构光条纹投影,即等相位投影光平面相互平行,条纹间距相等。投影测量系统模型如图 1 所示,利用针孔摄像机模型描述摄像机的几何光学特性,建立投影光平面方程与相位的关系,结合机器视觉基本原理实现物面三维轮廓测量。

无衍射栅型结构光投影可看做是一簇平行的光平面,不同光平面对应不同的相位,通过标定可以建立无衍射栅型结构光条纹相位与对应投影光平面方程系数的关系。根据摄像机获取的条纹相位分布确定物面空间坐标的过程可以描述为:对于被测量物体上的任意一点  $P$ ,根据物面条纹分布计算出  $P$  点的相位,且根据  $P$  点的条纹相位值及标定出的投影光平面方程系数与相位关系,计算出过  $P$  点的投影光平面方程系数  $(m, n, p, D)$ ,进而确定过  $P$  点的投影光平面方程

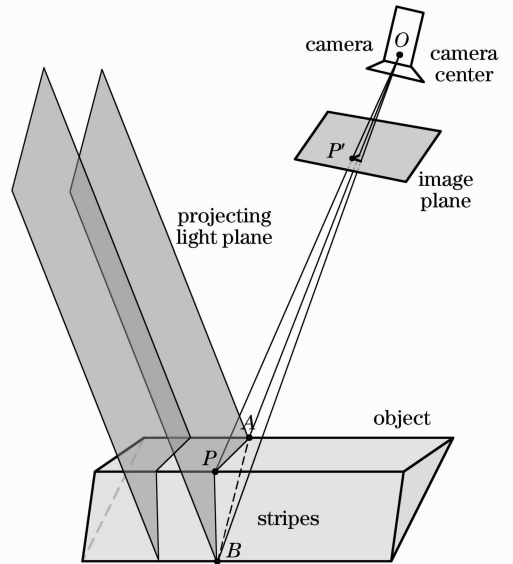


图 1 条纹投影系统模型

Fig. 1 Model of fringe projection system

$$mx + ny + pz + D = 0, \quad (1)$$

根据摄像机模型的透视投影关系可知,  $P(x, y, z)$  点位于摄像机光心  $O(x_0, y_0, z_0)$  和  $P$  点的图像坐标  $P'(x_{ip}, y_{ip}, z_{ip})$  确定的直线  $OP'$  上。根据  $O$  点和  $P'$  点的坐标,结合直线两点式方程可以确定直线  $OP'$  的方程为

$$\frac{x - x_0}{x_{ip} - x_0} = \frac{y - y_0}{y_{ip} - y_0} = \frac{z - z_0}{z_{ip} - z_0} = t, \quad (2)$$

被测物体上任意点  $P$  的坐标可以通过求取过  $P$  点的投影光平面与直线  $OP'$  的交点获得,即求(1)式和(2)式的交点:

$$\begin{cases} x = t_p(x_{ip} - x_0) + x_0 \\ y = t_p(y_{ip} - y_0) + y_0 \\ z = t_p(z_{ip} - z_0) + z_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $t_p = \frac{-(mx_{ip} + ny_{ip} + pz_{ip} + D)}{mx_0 + ny_0 + pz_0 - (mx_{ip} + ny_{ip} + pz_{ip})}$  为计算获得的空间直线  $OP'$  参数方程的参数,摄像机内部参数可以通过摄像机标定获得。

## 3 角膜测量实验设计

角膜具有高的透光率,透光率达 90% 以上,直接对兔眼角膜进行投影测量很难获得瞳孔部分的条纹图像,且巩膜部分的条纹图像对比度很低。本实验通过对角膜表面滴荧光素钠溶液的方法解决角膜透光的问题。荧光素钠溶液呈黄红色,并带有极强的黄绿色荧光,最大吸收波长为 493.5 nm,是医学上的诊断用药<sup>[12]</sup>,常用于眼角膜损伤、溃疡和异物诊断,眼底血管造影和循环时间测定等。

为了进行荧光测量,无衍射栅型结构光投影光源采用 30 mW,波长为 488 nm 的温度稳定性很高的半导体激光器。488 nm 波长的激光可对医学上常用的荧光素钠激发出黄绿色荧光,在生物学荧光方面具有广泛的应用。摄像机的图像传感器尺寸为 0.4 inch (1 inch = 25.4 mm),像素尺寸为  $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ ,摄像机镜头是焦距为 50 mm 的变焦镜头。根据系统参数,采用亚像素处理技术,系统横向分辨率为  $2.2 \mu\text{m}$ ,纵向分辨率为  $0.40 \mu\text{m}$ 。测量前先对无衍射栅型结构光投影系统及摄像机进行标定,计算出系统参数。为了提高测量效率,利用傅里叶变换的方法计算投影条纹相位分布,该方法仅需要一幅条纹图像即可计算出角膜表面条纹相位分布。

考虑安全性问题,利用投影测量系统实现兔眼角膜轮廓测量,投影条纹间距为 0.590 mm。对兔子进行麻醉,然后在兔眼角膜滴上质量分数约为 2% 的荧光素钠溶液。图 2 为获得的滴有荧光素钠溶液的兔眼角膜测量图像,并对选中的兔眼角膜部分条纹图像进行放大显示。从图 2 中可以看出获得的条纹图像对比度较高,角膜透射的影响可以忽略不计,并且所获得的条纹图像基本不存在散斑噪声。

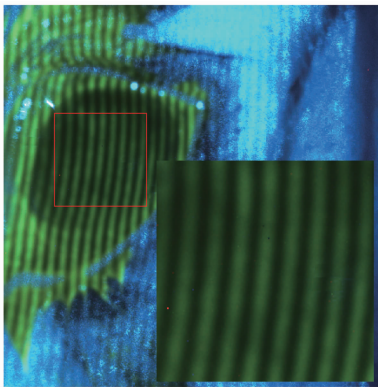


图 2 滴有荧光素钠溶液的兔眼角膜测量图像  
Fig. 2 Rabbit corneal measuring image with fluorescein solution

#### 4 角膜轮廓还原及分析

利用条纹投影测量系统模型及标定的系统参数,对图 2 中矩形框区域兔眼角膜表面三维轮廓进行还原,图像条纹对比度高且不存在散斑噪声,利用傅里叶变换方法计算条纹的相位分布。图 3 为还原的部分角膜表面三维轮廓图,有效测量区域约为  $5.62 \text{ mm} \times 5.62 \text{ mm}$ 。兔眼角膜部分近似为球面的一部分,曲率半径约为 7 mm,对测量获得的兔眼角

膜三维轮廓离散点进行球面拟合,拟合后的球面如图 4 所示,拟合后的角膜所在球面的中心坐标为  $(-0.6962, 5.8578, -19.4866)$ ,单位为 mm,曲率半径为 6.19 mm。对测量得到的兔眼角膜表面三维形貌离散数据进行曲面拟合后的数据与原始测量数据的相关系数为 0.9587,说明兔眼角膜可近似为球面的一部分。

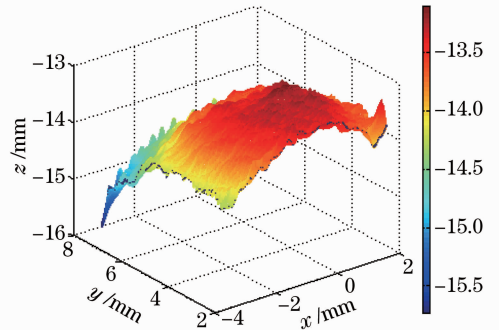


图 3 兔眼角膜表面轮廓还原

Fig. 3 Reconstruction of rabbit corneal surface contour

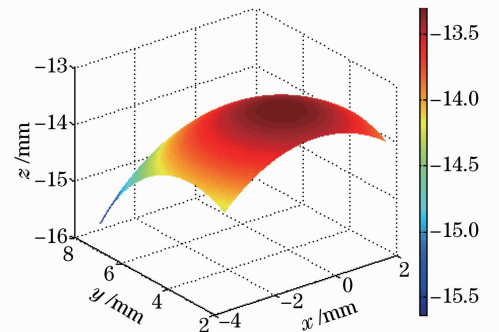


图 4 对测量的兔眼角膜表面轮廓球面拟合

Fig. 4 Sphere fitting of measured rabbit corneal surface contour

角膜曲率半径和眼内压力存在一定的关系<sup>[13,14]</sup>,在获得二者之间的关系后,可以通过测量角膜表面曲率半径推算眼内压力,进而实现眼内压力的非接触测量。通过对兔眼注射生理盐水,可急性升高兔眼眼内压力,注射的生理盐水约为 10 mL,兔眼眼压升高量约为 35 mmHg (1 mmHg = 133 Pa)。利用条纹投影测量系统对眼压升高后的兔眼角膜进行测量,其曲率半径为 6.96 mm,相关系数为 0.9704,相对于眼压升高前曲率半径的变化量有 0.83 mm。从实验结果可以看出,采用在角膜表面滴荧光素钠的方法,可以实现角膜表面三维形貌精密测量,兔眼眼压的升高会引起角膜曲率半径的变化。另外,荧光素溶液的堆积及涂覆的不均匀会引起测量的误差,对于角膜形貌测量来说,若采用带有荧光素钠溶液的隐形眼镜进行间接测量,可实

现角膜表面三维形貌更精确的测量,同时也可避免荧光素对生物体带来的眼睛不适等副作用。

## 5 结 论

利用无衍射栅型结构光条纹投影轮廓术及傅里叶变换相位展开法对涂有荧光素钠的兔眼角膜表面轮廓进行了精密快速测量,实际测量获得了较好的实验效果。对兔眼眼压进行急性升高,观察了兔眼眼压升高引起的角膜表面轮廓曲率半径的变化,为进一步实际应用进行了可行性研究并获得较好的结果。下一步将提高测量精度,并进行详细的生物实验设计,建立角膜表面轮廓曲率半径和眼内压力之间的关系。

## 参 考 文 献

- Henryk T. Kasprzak, Werner Forster, Ger von Bally. Measurement of changes of the central corneal curvature due to intraocular pressure differences using holographic interferometry [C]. *SPIE*, 1993, **1889**: 175~183
- Kira Brenman, Hassan Tahri, Fabrice Manns *et al.*. Assessment of changes in corneal shape as a function of intraocular pressure; a pilot study[C]. *SPIE*, 2000, **3908**: 109~114
- V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- S. S. Gorthi, P. Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt. Lasers in Eng.*, 2010, **48**(2): 133~140
- Hu Luyao, Da Feipeng, Wang Luyang. A novel color fringe projection method for 3D measurement of colorful objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212002  
胡路遥, 达飞鹏, 王露阳. 一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0212002
- M. Thakur, C. Quan, C. J. Tay. Surface profiling using fringe projection technique based on Lau effect [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(3): 453~459
- Gan Jianghong, Zhou Liping, Chen Liangzhou *et al.*. Novel non-diffract grating structure for light projection system [J]. *J. Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **39**(5): 14~17  
干江红, 周莉萍, 陈良洲 等. 新型无衍射栅型结构光投影系统 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(5): 14~17
- Zhai Zhongsheng, Zhao Bin. Experiments and theoretical analyses of non-diffracting beams interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1503~1507  
翟中生, 赵 斌. 无衍射光的干涉实验与理论分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1503~1507
- Wenjing Chen, Xianyu Su, Yiping Cao *et al.*. Fourier transform profilometry based on a fringe pattern with two frequency components [C]. *SPIE*, 2006, **6027**: 602711
- Wang Chenxing, Da Feipeng. A novel adaptive windowed Fourier transform for phase retrieval in 3D shape measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0612005  
王辰星, 达飞鹏. 三维测量中一种新的自适应窗口傅里叶相位提取法 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0612005
- Chen Lijuan, Xu Lihua. Fourier transform profilometry for surface with specular reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1349~1353  
陈利娟, 徐利华. 含镜面反射面型的傅里叶变换轮廓术 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1349~1353
- Zhai Ping, Ma Lili. Application and nursing in fundus fluorescein angiography [J]. *Chinese J. Modern Nursing*, 2002, **8**(11): 855  
翟 萍, 马莉莉. 荧光素钠在眼底血管造影中的应用与护理 [J]. *现代护理*, 2002, **8**(11): 855
- Mattero Leonardi, Peter Leuenberger, Daniel Berrand *et al.*. First step toward noninvasive intraocular pressure monitoring with a sensing contact lens [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2004, **45**(9): 3113~3117
- Mattero Leonardi, Stefan Metz, Daniel Bertrand *et al.*. Intraocular Pressure Recording System [P]. United States Patent, 7137952B2, Nov. 21, 2006

栏目编辑:何卓铭