

# 沟槽轮廓的激光双三角测量

刘恒彪<sup>1</sup> 刘成林<sup>2</sup> 葛剑敏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 同济大学声学研究所, 上海 200092; <sup>2</sup> 高意通讯有限公司, 福建 福州 350014)

**摘要** 只有一个成像透镜的激光三角测量系统不适于测量沟槽轮廓。因为系统的投影光轴与成像光轴成一定角度, 沟槽的陡峭边沿会遮挡物体表面照明点的漫反射光进入成像透镜, 形成测量死角。为解决这个问题, 在满足 Scheimpflug 条件的激光三角测量法基础上, 开发了测量沟槽轮廓的激光双三角测量系统; 讨论了像斑探测器积分时间的自动调节、像斑强度分布数据的数字滤波、像斑中心位置的提取和成像光束被凹槽边缘遮蔽的像斑的判别等问题; 通过标定实验, 确定了双三角测量映射关系。对轮胎胎面轮廓的静态受压变形测量实验表明本系统测量沟槽轮廓的有效性, 其可测量的轮胎花纹沟槽轮廓深宽比达到 1。

**关键词** 测量; 沟槽轮廓测量; 光学三维传感; 激光三角法

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s112006

## Laser Dual-Triangulation for Groove Profile

Liu Hengbiao<sup>1</sup> Liu Chenglin<sup>2</sup> Ge Jianmin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China*)  
(<sup>2</sup> *Photop Kocent, Inc., Fuzhou, Fujian 350014, China*)

**Abstract** Laser triangulation system with single imaging lens is not suitable for measuring the groove profile. Diffuse reflected light of illumination point on object surface is blocked by steep groove edges and a measurement blind zone is formed, because the projection axis and the imaging axis are in a certain angle. To solve this problem, a laser dual-triangulation system based on the laser triangulation method with Scheimpflug condition is developed for groove profile measurement. The autoregulation of integral time of image spot detector and the digital filtering of image intensity data are discussed. Extraction of image spot center and discriminance of imaging point due to imaging beam shaded by groove edge are also studied. The dual-triangulation mapping relationship is determined by calibration experiment. The compressive deformation measurement of tread profile indicates the validity of this system and the measurable depth-to-width ratio of the groove profile is more than or equal to 5 mm.

**Key words** measurement; groove profile measurement; optical three-dimensional sensing; laser triangulation method

**OCIS codes** 120.6650; 280.4788; 220.4830

## 1 引 言

沟槽轮廓的测量是一个经常会遇到的技术问题。飞行时间法<sup>[1,2]</sup>、调制度测量轮廓术<sup>[3,4]</sup>和共焦成像<sup>[5,6]</sup>等光学三维传感技术理论上能够实现对沟槽底部的垂直测量, 但面对实际的测量任务往往受到各种限制。飞行时间法因距离信息靠光波传播的时间差得到, 对信号处理的时间分辨率有很高的要求, 一般用于大范围绝对距离测量。在调制度测量

轮廓术、共焦成像的测量过程中, 需要投影系统或成像系统相对于被测物体进行轴向移动, 测量范围较小。具有单个成像透镜的激光三角测量<sup>[7~9]</sup>是一类基本的光学三维传感技术, 能胜任起伏平缓表面的轮廓测量, 但对于起伏急剧的沟槽轮廓, 受系统中投影光轴与成像光轴存在一定角度的限制, 会出现测量盲区。

为发挥激光三角测量所具有的仪器结构简单、测量速度快和精度高的优势, 在一定沟槽深度比条

收稿日期: 2012-11-12; 收到修改稿日期: 2012-12-25

作者简介: 刘恒彪(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: liuhb62@tongji.edu.cn

件下解决测量盲区问题,本文提出了一套激光双三角测量方案。研究了小角度激光双三角测量头的光学结构设计、像斑探测器积分时间的自动调节、像斑强度分布信号的数字滤波、像斑中心位置的提取和像斑中心测量稳定性的改进、测量盲区的判别及成像光斑的取舍、双三角测量映射关系的标定和轮胎胎面轮廓的静态受压变形测量实验。

## 2 激光双三角测量头的光学结构设计

一个典型的激光三角测量光学系统<sup>[7]</sup>如图1所示。由点状激光光源发出的投影光束照明被测物体表面。一个成像透镜将物体表面上的照明点  $O$  成像在探测器光敏面的  $O'$  上。当物体表面的照明点位置发生改变时,在探测面上的像点位置也相应变动。根据几何关系可以建立物体表面照明点位置与探测面上像点位置之间的关系式。通过检测像点位置,运用关系式可算出物体表面照明点的位置。在这个光路中,探测面与成像光轴成  $\beta$  角,它与投影、成像两光轴的夹角  $\theta$  满足 Scheimpflug 条件:  $\tan \theta = k \tan \beta$ , 其中  $k$  是成像系统的垂轴放大率。探测面的这种设置是为了克服物体表面照明点的离焦而导致的像点弥散,提高测量精度。

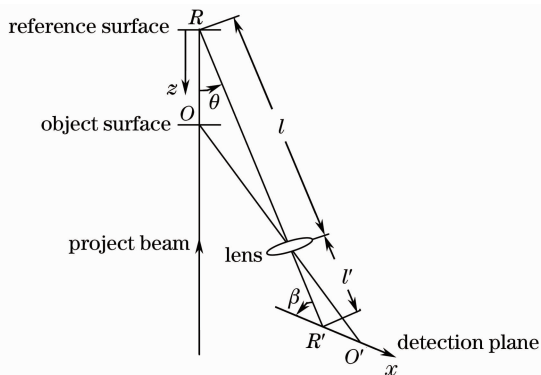


图1 激光三角测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser triangulation

在图1中,以投影、成像两光轴的交点  $R$  为坐标原点量度物体表面照明点  $O$  的位置  $z$ 。在成像光轴上,物距、像距分别为  $l, l'$ 。在探测面上,以轴上点  $R'$  为坐标原点量度像点  $O'$  的位置  $x$ 。根据几何关系得到三角测量公式

$$z = \frac{lx \sin \beta}{l' \sin \theta + x \sin(\theta + \beta)}, \quad (1)$$

对(1)式求导得到三角测量灵敏度表达式

$$\frac{dz}{dx} = \frac{l' \sin \theta \sin \beta}{[l' \sin \theta + x \sin(\theta + \beta)]^2}, \quad (2)$$

当物体表面照明点在参考点附近,即  $l' \sin \theta \gg$

$x \sin(\theta + \beta)$  时,灵敏度公式简化为

$$\frac{dz}{dx} \approx \frac{l \sin \beta}{l' \sin \theta} = \frac{\sin[\arctan(\tan \theta / k)]}{k \sin \theta}, \quad (3)$$

成像系统的放大率  $k$  是影响三角测量灵敏度的一个重要因素。 $k$  过小,致使测量灵敏度不够; $k$  过大,就有限的像点探测器长度而言,会缩小测量范围。

如果采用图1所示的单三角光路测量沟槽轮廓,在投影光束右侧的陡峭边沿会遮挡物体表面照明点的漫反射光进入成像系统,形成测量死角。对于具有一定深度比的沟槽,为避免测量死角,可以采用图2所示的双三角光路。在成像透镜和探测器之间加平面反射镜使光路发生偏折,以使两个三角光路所成的像点落在同一片线阵 CCD 上。这种设计既使仪器的结构更加紧凑、小巧,又节约了测量头的制造成本。为消除物方背景杂散光的影响,在成像透镜前加装干涉滤光片。

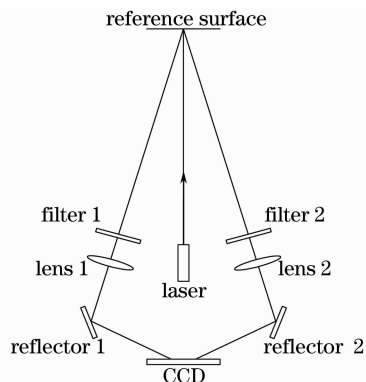


图2 激光双三角测量头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser dual-triangulation head

按照图2的光路构型,设计了一个激光双三角测量头。在左、右三角测量光路中,选取了相同的结构参数,其中成像透镜焦距  $f' = 60$  mm,物距  $l = 250$  mm,像距  $l' = 78.95$  mm,垂轴放大率  $k = l'/l = 0.32$ ,投影光轴与成像光轴的夹角  $\theta = 10^\circ$ ,探测面与

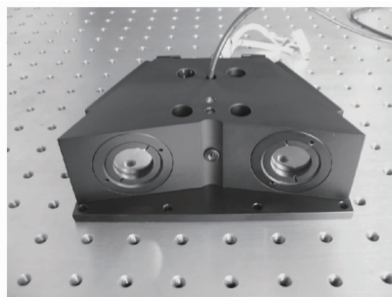


图3 激光双三角测量头的蝶形底座照片

Fig. 3 Photo of butterfly-shaped pedestal of laser dual-triangulation head

成像光轴的夹角  $\beta=29.18^\circ$ 。测量头采用的光学、电子元器件列于表 1。测量头中,线阵 CCD 的信号通过一个数据采集卡(AD08S-USB,采样精度 8 bit,最高采样频率 10 MHz)传入计算机进行数据处理。

表 1 激光双三角测量头采用的光电元器件

Table 1 Optical and electronic devices of laser dual-triangulation head

Device	Type	Parameter
Semiconductor laser	DC635-2, 2-3(5)	Wavelength 635 nm, power 2.2 mW, divergence angle $<0.4$ mrad
Interference filter	GCC-202004	Central wavelength 632.8 nm, peak transmittance 55%
Imaging lens	GCL-010622	Focal length 60 mm, diameter 20 mm
Reflector	GCC-102204	Average reflectance $>92\%$ , diameter 40 mm
Linear array CCD	TCD1501D	Pixel 5000, cell size 7 $\mu\text{m}$

### 3 双三角测量的数据采集和处理

激光双三角测量的数据采集和处理由计算机程序控制进行。程序功能包括:安装测量头使其实现二维扫描的电动平移台的参数设置及控制、CCD 参数设置和积分时间自动调节、像斑强度分布信号数据采集和处理、测量结果显示和存储等。程序开发工作主要涉及:

#### 1) 像斑探测器积分时间的自动调节

在表面轮廓扫描测量过程中,如果 CCD 的积分时间恒定,当测量点处于平坦、反射率高的位置时,由于成像系统接受的光能过大,CCD 会出现饱和;反之,当测量点处于大角度倾斜、反射率低的位置时,CCD 探测到的光强信号过低,甚至与背景噪声幅度不相上下。为了解决这个问题,可对 CCD 积分时间实施自动调节:在 CCD 出现饱和时,逐步缩短积分时间,直至所有像素上的光强信号小于 CCD 的最大灰度值;在 CCD 探测到的光强信号过低时,逐步延长积分时间,直至光强信号的最大值大于某个阈值。

#### 2) 数字滤波

进行三角测量时,必须确定像斑的中心位置。对于一个实际的测量系统,由像点探测器采集的像斑图像信号不可避免地带有噪声。图像噪声会降低像斑中心提取的精确度。

这里,采取均值滤波方法对采集到的像斑强度分布数据进行数字滤波。为获得好的滤波效果,滤波器长度的选取非常关键。长度太小,滤波后的像斑强度分布的平滑性依然较差,长度太大,滤波后的像斑强度分布的峰值会变得太低。对于下面将介绍的用激光双三角法测量轮胎胎面轮廓的应用来说,

为了保证测量头的工作稳定性,特设计了整体蝶形座(如图 3 所示)来安装干涉滤光片、成像透镜、平面反射镜和线阵 CCD、半导体激光器。蝶形座及 CCD 驱动电路封装在一个带有玻璃窗口的方盒中。

滤波器长度取在 15~21 pixel 时,可以兼顾对像斑强度分布的平滑程度和峰值高度的要求。

#### 3) 像斑中心位置的提取

点状投影激光束近似为高斯光束。确定高斯强度分布的像斑的中心有多种算法,一般采用灰度重心法<sup>[10]</sup>;另一种自然的思路是,以高斯函数为数学模型,通过对像斑光强分布进行曲线拟合找出其中心。两种方法都要先确定一个阈值。该阈值比像斑最大强度值小,但比背景强度值大。阈值的确定既可按最大强度值的百分比,也可在背景平均强度值基础上附加一个增量。按最大强度值百分比的方式能自动适应像斑强度的变化。

对阈值线上方的像斑强度分布曲线计算重心,即得像斑中心位置。通过对轮胎橡胶材料表面上同一投影照明点所成的像斑,从小到大取不同的阈值来确定其重心的位置。结果表明:阈值取为像斑最大强度值的 0.1~0.7 倍之间时,求出的像斑重心位置相当稳定,波动范围在 0.3 pixel 以内。曲线拟合法求像斑中心位置也是在阈值线上方的像斑强度分布曲线上进行的。拟合函数的对称中心即是像斑中心。

在本文的实验工作中,分别用灰度重心法和曲线拟合法,对呈水平和倾斜状态( $10^\circ$ 左右)下的橡胶材料平面上的同一测量点提取了 5000 次像斑中心,来验证和比较两种方法的可靠性和稳定性,实验结果如表 2 所示。通过表 2 可以看出,两种方法求得的像斑中心位置标准偏差在 0.4 pixel 以内;总体来看,灰度重心法得到的中心位置标准偏差略小于曲线拟合法。

表 2 两种像斑中心提取法的稳定性比较(单位:像素)

Table 2 Comparison of stability between two methods of image-spot-center extraction (unit: pixel)

Center extraction	Surface state	Left/right triangle	Extremum deviation	Standard deviation
Gray-gravity method	level	left	2.81	0.28
		right	2.58	0.23
	inclined	left(blocked)	3.92	0.38
		right	2.45	0.23
Curve-fitting method	level	left	2.46	0.22
		right	3.27	0.34
	inclined	left(blocked)	3.14	0.38
		right	2.83	0.30

4) 像斑中心测量稳定性的改进

表 2 的实验结果是通过单次采集像斑强度分布所求得的像斑中心。这个结果不能满足预期的精度要求。为提高像斑中心测量的稳定性,可采取下列措施:① 对同一表面测量点,多次采集像斑强度分布数据,计算平均分布,并在像斑强度平均分布基础上提取像斑中心位置;② 多次重复上述过程,最后计算平均像斑中心位置。

图 4 给出了对同一表面测量点,每采集 5 次像斑强度分布计算一次平均强度分布和像斑重心,在不同重心平均次数下求得的平均重心位置的标准偏差和极值偏差的实验结果,其中每一实验结果的统计样本数为 500。从实验结果可以看出,随着重心平均次数的增加,稳定性有了很大程度地改善。当重心平均次数为 17 时,标准偏差在 0.04 pixel 左右,极值偏差可控制在 0.4 pixel 以内。

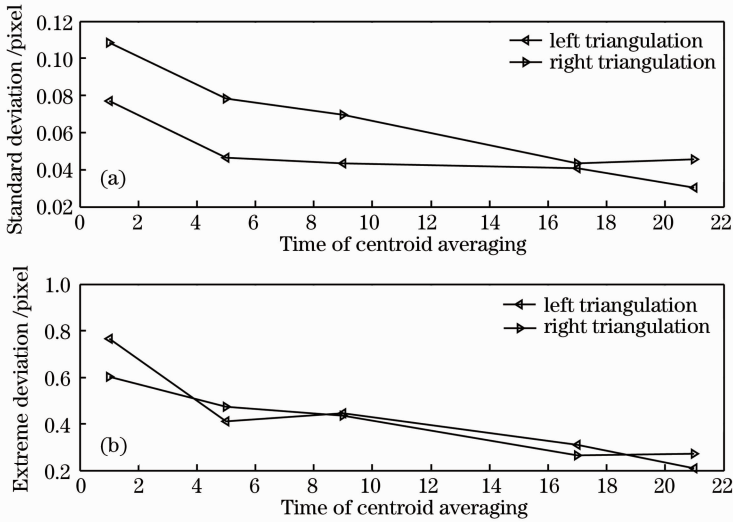


图 4 像斑重心稳定性随平均次数的变化。(a)标准偏差;(b)极值偏差

Fig. 4 Stability of image spot centroid influenced by averaging time. (a) Standard deviation; (b) extreme deviation

5) 测量盲区的判别及成像光斑的取舍

当激光双三角测量头的投影光束靠近一个凹槽的边缘射入槽底时,由于凹槽边缘对其中一个三角光路成像光束的遮蔽,对应像斑的强度相对于测量平坦表面时的像斑强度会有明显减弱。根据这个特征,可以判定成像光束受遮蔽的像斑,并予以剔除。在测量表面轮廓的一般部位时,也要按照取强舍弱的原则,选留一个像斑进行后续处理。

出表面测量点的位置  $z$ , 必须首先确定每个三角测量光路的 4 个参数  $l, l', \theta, \beta$ 。虽然在进行激光双三角测量头设计时,这些参数是已知的,但在测量头的加工、装配过程中难免带来误差。另外,测量头上附加的干涉滤光片及测量头封装盒的玻璃窗口也会改变系统的结构参数。为保证三角测量精度,必须对测量头进行实验标定。

激光双三角测量头的标定实验在光学平台上按如下方式进行:在一个受计算机程序控制、由步进电机驱动、重复定位精度小于  $2 \mu\text{m}$  的电动平移台上安装一块作为被测物面的抛喷丸表面样板 ( $R_a =$

4 双三角测量系统的标定实验

根据(1)式,若要通过像斑中心位置  $x$  来计算

1.6  $\mu\text{m}$ ),并使样板平面与平移台的运动方向基本垂直。安装三角测量头,使其投影光轴与平移台的运动方向平行,投影光点落在样板表面上,并使测量头前端面到样板表面的距离约为 200 mm。控制平移台朝远离测量头的方向,以 0.1 mm 的步距移动样板表面 1001 步。在平移台每步移动的间歇,分别采集像斑强度分布信号,处理并记录测量头中左、右三角光路的像斑重心位置。为保证位移精度,实验时还采用千分表(精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ )对平移台的移动步距进行了测量和修正。这样,即可得到 100 mm 范围内,物面位置与左、右三角光路的像斑重心位置的

实验映射关系。

根据双三角测量实验映射关系制作的曲线(见图 5 中小图的实线)可发现,曲线不平滑,存在明显的波动特征。这种现象主要是由投影光束的摆动造成<sup>[11]</sup>。为克服这种现象对三角测量精度的影响,可根据三角测量理论公式构造拟合函数,以实验映射曲线的拟合曲线作为三角测量的映射关系。拟合效果如图 5 所示。左、右三角光路实验映射曲线与各自拟合曲线的标准偏差分别为  $\sigma_l = 0.082 \text{ mm}$ ,  $\sigma_r = 0.098 \text{ mm}$ 。这两个标准偏差主要反映了实验映射曲线的波动特征。

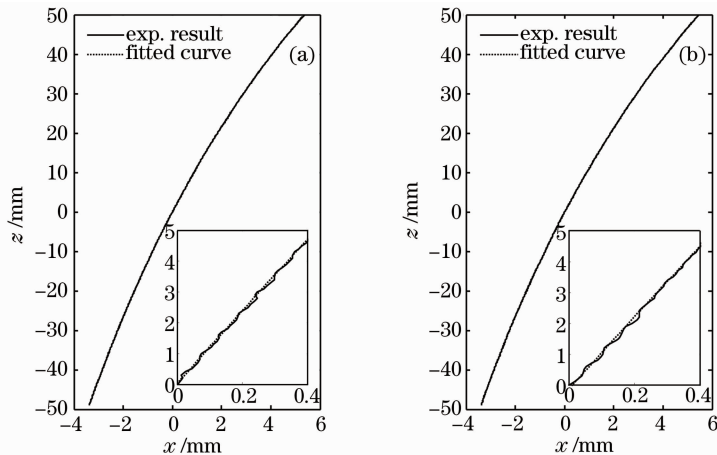


图 5 双三角测量实验映射曲线的拟合

Fig. 5 Fitting of experimental mapping curve of dual-triangulation

## 5 轮胎胎面轮廓受压变形测量

随着汽车技术的发展,发动机噪声被极大地降低,轮胎噪声成为重要的噪声源。轮胎噪声包括胎面花纹噪声、弹性振动噪声和空气乱流噪声<sup>[12,13]</sup>。而胎面花纹噪声与轮胎花纹结构以及轮胎滚动时胎面轮廓的受压变形有关。为研究胎面花纹噪声的产生机理,用激光双三角测量系统对几款轿车轮胎胎面轮廓的静态受压变形进行了测量。

图 6 为实验采用的测量装置。被测轮胎安装在一个加载装置上,胎面由一块带多条平行狭缝的钢板支撑。二维电动平移台上安装有激光双三角测量头。由测量头发出的点状投影光束通过钢板狭缝射到轮胎表面。胎面的漫反射光再通过钢板狭缝被测量头的 CCD 接收。CCD 的输出电信号经过放大、滤波、模/数转换后,输入计算机进行数据处理,最后得到胎面被测点的深度。通过计算机控制电动平移台带动测量头沿钢板狭缝方向移动,扫描测量轮胎胎面轮廓。

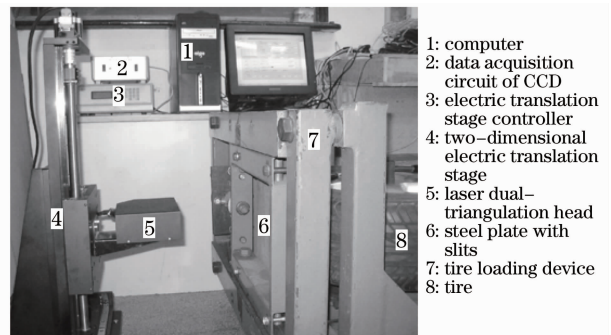


图 6 轮胎胎面轮廓静态受压变形测量装置

Fig. 6 Measuring setup for static compressive deformation of tire tread profile

轮胎胎面轮廓受压变形的测量步骤为:1) 根据拟定的轮廓测量方向,安装带缝钢板,再安装被测轮胎;2) 对被测轮胎分别加胎压到其标准最大胎压值( $M_P, M_P$ )的 80%、70%、60%;3) 在每个胎压值下分别加载标准最大负荷力( $M_L, M_L$ )60%、80%、100%、120%的垂直压力;4) 在每一个胎压每一个负载压力下,步进移动激光双三角测量头对支撑钢板同一条狭

缝下的轮胎胎面轮廓进行扫描测量,扫描步距为 0.5 mm,扫描长度为 200 mm 左右。图 7 给出了胎压为 MP 的 80% 的 Michelin 轮胎(195/65R15 91H)在

不同负荷力  $F$  下的纵向(沿轴向)胎面轮廓。从图中可以看出,在不同负荷力下胎面轮廓的变形十分明显,并且随着位置的不同变形程度亦不同。

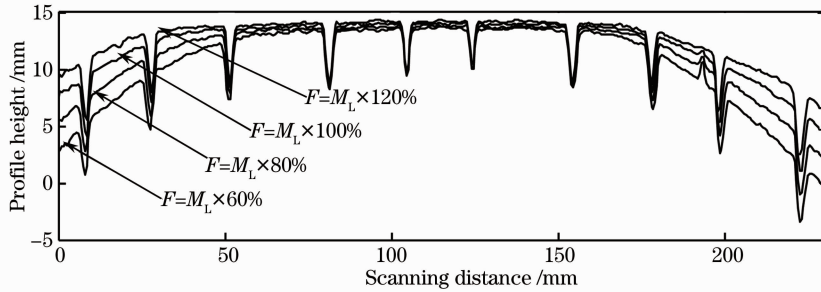


图 7 Michelin 轮胎在不同负荷力下的胎面轮廓

Fig. 7 Michelin tire tread profile under different loads

## 6 结 论

对于具有一定深度比的沟槽轮廓,采用激光双三角法进行扫描测量能有效避免测量死角。在设计激光双三角测量头时,通过光路折叠由一个光电探测器实现对两路成像光斑的探测。通过 CCD 积分时间自动调节,保证在扫描测量过程中像斑灰度值控制在合适的范围。为克服探测系统噪声对像斑中心提取精度的影响,可采用均值滤波方法对采集的像斑强度分布数据进行数字滤波。为提高像斑中心测量的稳定性,采取对同一表面测量点多次采集像斑强度分布数据计算平均分布,在像斑强度平均分布基础上提取像斑中心位置,多次重复,并计算平均像斑中心位置的措施。根据像斑强度的大小,可以判定形成像斑的成像光束是否被凹槽边缘遮蔽,再予以剔除。为保证三角测量精度,加工、装调好的测量头必须进行实验标定,以确定三角测量映射关系。

## 参 考 文 献

- 1 R. A. Jarvis. A laser time-of-flight range scanner for robotic vision[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, PAMI-5: 505~512
- 2 Chen Qiansong, Yang Chengwei, Pan Zhiwen *et al.*. A brief introduction on the development of laser time-of-flight distance measurement technology[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(1): 7~10  
陈千颂, 杨成伟, 潘志文 等. 激光飞行时间测距关键技术进展[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(1): 7~10
- 3 X. Y. Su, L. K. Su. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7): 1153~1158
- 4 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Application of modulation measurement profilometry in complex object shape measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (12): 1623~1628  
邵双运, 苏显渝, 张启灿 等. 调制度测量轮廓术在复杂面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1623~1628

- 5 K. Carlsson, P. E. Danielsson, R. Lenz *et al.*. Three-dimensional microscopy using a confocal laser scanning microscope [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 53~55
- 6 Yang Lisong, Wang Guiying, Wang Jiangang *et al.*. Research on reflection-mode fiber-optical confocal scanning imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 962~967  
杨莉松, 王桂英, 王建岗 等. 反射式光纤共焦扫描成像的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 962~967
- 7 Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2004, **25** (4): 601~604  
王晓嘉, 高 隽, 王 磊. 激光三角法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(4): 601~604
- 8 G. J. Wang, C. C. Wang, S. H. Frank Chuang. Reverse engineering of sculptured surfaces by four-axis non-contacting scanning[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 1999, **15** (11): 800~809
- 9 Su Xianyu, Zhang Guanshen, Chen Zexian *et al.*. An automatic measurement system for 3D shape of shoe last [J]. *Optic Engineering*, 1989, **6**: 1~5  
苏显渝, 张冠申, 陈泽先 等. 鞋楦三维面形光电自动测量系统[J]. *光学工程*, 1989, **6**: 1~5
- 10 Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe [J]. *J. Sichuan University*, 2007, **39**(4): 151~155  
吴庆阳, 苏显渝, 李景镇 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. *四川大学学报*, 2007, **39**(4): 151~155
- 11 Ding Xiaokun, Liu Tiegen, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208006  
丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208006
- 12 Ge Jianmin, Fan Junyan, Wang Shengfa *et al.*. Design and application of low-noise tire [J]. *Tire Industry*, 2006, **26** (2): 79~84  
葛剑敏, 范俊岩, 王胜发 等. 低噪声轮胎设计方法与应用[J]. *轮胎工业*, 2006, **26**(2): 79~84
- 13 Chen Lijun, Sun Bobo, Xiao Wangxin *et al.*. Review of road/tire noise research [J]. *Tire Industry*, 2011, **31**(9): 519~524  
陈理君, 孙波波, 肖旺新 等. 道路/轮胎噪声研究的现状与发展[J]. *轮胎工业*, 2011, **31**(9): 519~524