

基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现

朱铮涛, 裴炜冬*, 李渊, 萧达安

广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 为了准确测量待检测物体厚度,提出了基于远心镜头的主动式激光三角测距的方法。而远心镜头采用平行投影的方式,使得像点位移与物体高度变化之间呈现线性关系,在此基础上建立了基于远心镜头的主动式激光三角测距模型,探讨了光学系统误差、机器装置误差、图像处理误差等影响精度的因素。实验结果表明,利用基于远心镜头的主动式激光三角测距的方法和补偿插值法得到的厚度测量平均误差能够达到 $5\ \mu\text{m}$ 以内。

关键词 图像处理; 远心镜头; 激光测距; 透视投影; 平行投影

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031002

Research and Implementation of Laser Triangulation System Based on Telecentric Lens

Zhu Zhengtao, Pei Weidong, Li Yuan, Xiao Daan

School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract An active laser triangulation method based on the telecentric lens is proposed to accurately measure the thickness of the object. The parallel projection method applies to the telecentric lens, and thus the relationship between the image point displacement and the object height change is linear. We establish a model of active laser triangulation based on the telecentric lens, and discusses the factors that influence the accuracy, including optical system error, machine error, and image processing error. In the experiment, we get the mean error less than $5\ \mu\text{m}$ for thickness measurement when combing the active laser triangulation based on the telecentric lens and the compensation interpolation method.

Key words image processing; telecentric lens; laser ranging; perspective projection; parallel projection

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 150.0155

1 引言

随着自动化技术与机械精密仪器加工技术的发展,人们对材料制造精度的要求也越来越高。人工测量会产生非确定性误差,并且检测速度慢、测量精度低,因此无法实现大批量工艺产品的检测。比较常用的测量方法有超声波测量、激光测量、红外线测量等。由于激光三角测量具有精度高、量程大、可靠性强和速度快的优点,使得现今工业检测越来越多地使用激光三角测量方法。近几年来,由于数字图像技术与理论的日臻完善,大规模高效的自动化分析体系使得机器视觉技术运用于工业检测领域,因而工业镜头在物

体尺寸测量、质量鉴定等方面得到了广泛的推广。在传统的激光测距系统中用于 CCD 成像的光学镜头是普通的光学镜头,建模得出的像点位移与检测物体高度差之间为非线性关系,给系统标定和计算带来了不便。本文采用远心镜头代替传统的光学镜头,推导了数学模型,研究表明,该系统可以解决原有系统存在的非线性问题,结合主动式视觉,可以获取较大的检测范围和较高的检测精度。

2 激光三角测距的原理及数学模型

2.1 原理

由于激光三角测量方法是一种既有图像输出又

收稿日期: 2017-08-28; 收到修改稿日期: 2017-09-13

作者简介: 朱铮涛(1969—),男,博士,副教授,主要从事图像处理、机器视觉方面的研究。E-mail: 511972136@qq.com

* 通信联系人。E-mail: 1733326544@qq.com

有光源可控的测量方法,对于一些表面光滑且无明显条纹的物体表面,利用普通工业相机无法得到物体表面足够多的信息。然而结构光能够在光滑的物体表面产生明显的条纹,使得激光三角法变得意义重大^[1]。在激光三角测量体系中,激光照射在云台上的物体表面,产生一条光斑,该光斑经过漫反射通过另一端的接收透镜对光线的会聚在面阵 CCD 光敏元件上成像。当被测物体的表面凹凸不平时,物体表面光斑的漫反射角发生变化,从而使得光斑在 CCD 上成像的中心位置也会发生相应的变化。在光路结构中,投射在物体表面的入射激光和反射光的光路形成了一个三角形,其输入和输出之间的关系可以通过三角形相似原理来确定,因此待求的距离能够通过光斑在 CCD 上成像的中心位置的几何

关系计算出来^[2]。按照激光入射角的差异,可分为直射式激光三角测量和斜射式激光三角测量^[3]。

2.2 直射式激光三角测量数学模型

所谓直射式激光三角测量就是激光发出的光束垂直于检测平台,入射光线经过会聚透镜聚光后垂直照射于被测物的参考平面,入射光在接触面发生漫反射后,经过透镜后成像在 CCD 上;被测物体厚度的不同会影响光斑漫反射角,所以 CCD 光敏面上光斑的成像也会随之变化。如图 1 所示,入射光与反射光的夹角为 θ 。从图 1 可以看出,待检测物体的高度有差异时,在 CCD 上所成的像点位置也是有差异的,即一一对应^[4-5]。根据这一特性,通过测量光斑在 CCD 上的位置就能够计算出距离信息。

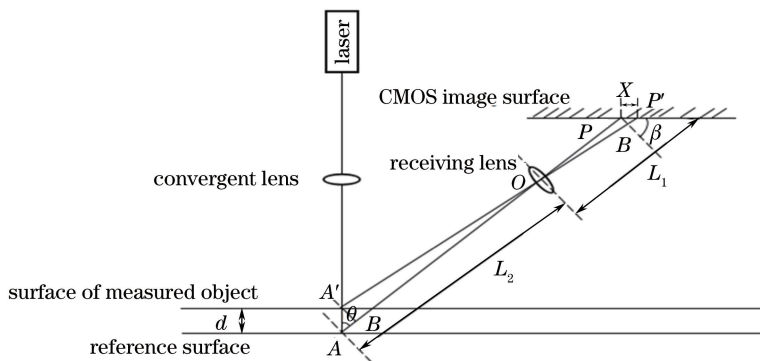


图 1 直射斜收式激光三角测距原理示意图

Fig. 1 Schematic of direct laser triangulation system

2.3 斜射式激光三角测量数学模型

斜射式激光三角测量时激光器发出的光束与检测平台成一个小于 90° 的夹角,入射光线经会聚透镜聚焦后,与被测表面的法线成一定角度入射到被测物体表面上^[6]。如图 2 所示,激光光束的部分漫反射光经过接收透镜的聚焦在 CCD 光敏面上成像。

图 2 中激光光束与竖直参考线的夹角为 θ_1 ,待检测物体高度发生起伏时,会影响到光斑的漫反射角,从而影响到激光光斑在 CCD 光敏面上成像的位置。由于物点与像点的位置呈一一对应的关系,因此可以通过测量光斑在 CCD 上的位置就能够计算出距离信息。

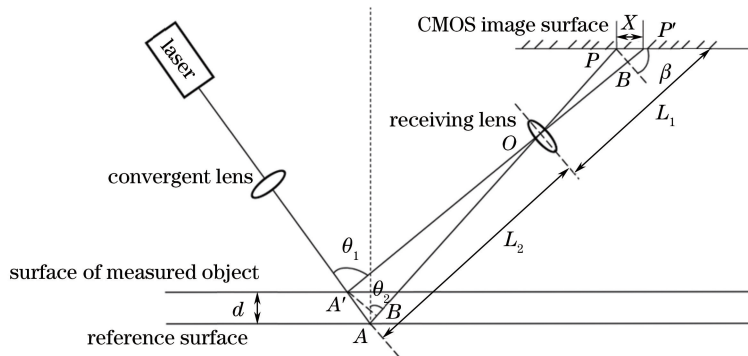


图 2 斜射斜收式激光三角测距原理示意图

Fig. 2 Schematic of oblique triangulation system

2.4 基于远心镜头的测量模型

由于普通镜头成像原理是透视投影方式,成像的大小会随着物距的不同而变化,使得物体高度与点位移呈非线性变化,而远心镜头的成像原理是平行投影

方式,在镜头的景深范围内,物距发生变化,成像的大小保持不变,这样可以使得物体的高度与点位移呈线性变化。基于这一原理,提出基于远心镜头的主动式激光三角测距方法。模型如图 3 所示。

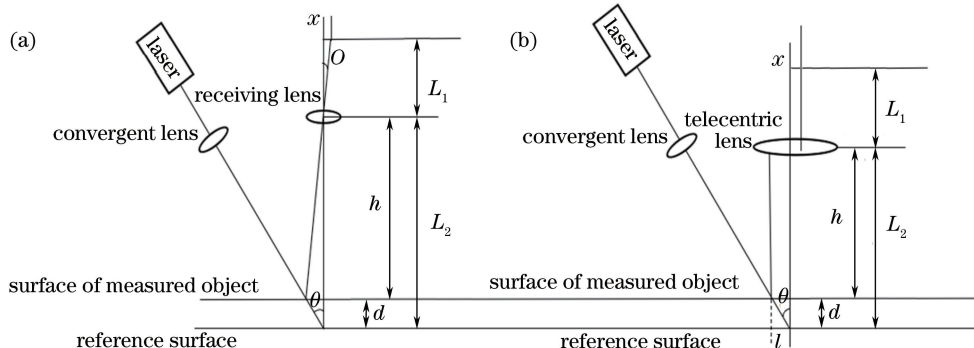


图 3 基于普通光学镜头(a)和远心镜头(b)的斜射直收式激光三角测距原理示意图

Fig. 3 Schematic of laser triangulation system based on ordinary optical lens (a) and telecentric lens (b)

图 3(a)中, L_1 和 L_2 分别为像距和物距, θ 为入射激光与被测表面法线之间的夹角, d 为被检测物体表面与检测平台的距离, x 为光斑在检测平台和待检测物体表面的入射点在 CCD 光敏面上的像差。根据相似三角形边的原理,有:

$$\frac{x}{L_1} = \frac{d \tan \theta}{L_2 - d}, \tag{1}$$

则:

$$d = \frac{L_2 x}{x + L_1 \tan \theta}. \tag{2}$$

图 3(b)中, l 是光斑在检测平台入射点到 CCD 光轴的距离,因为远心镜头成像原理为平行投影,所以像点偏移量 x 与 l 呈线性关系,而与物距 h 无关,可表示为 $x = kl$, 则有:

$$d = \frac{l}{\tan \theta} = \frac{1}{k \tan \theta} x = k' x, \tag{3}$$

式中比例系数 k 为常数,激光入射角 θ 不变。(3)式表明被测物体表面的高度变化量 d 与像点偏移量 x

呈线性关系,如果标定过程中确定了 k' , 则已知像点位置变化数量,可以求出被测物体在景深范围内的高度变化量。

3 标定及测量

由(3)式可知,当整套系统装置安装完成后(图 4), θ 角保持不变,通过多次重复测量,即可标定出(3)式中 k' 的值,从而可以根据(3)式计算出距离。首先建立世界坐标系 $OXYZ$, Z 轴方向与光轴平行,相平面与透镜中, Δz 为相机在 Z 方向滑台带动下移动的距离, h 是待测物体表面到参考物表面的高度^[7]。

图 4 左边用于标定,右边用于实际测量。以参考物表面为基准面,在世界坐标系 $OXYZ$ 平面内调节相机,使激光以某一角度入射到基准面参考点上,且反射光斑清晰并成像在图像的正中心(行的中间位置),标记此时的相机中心 P_1 坐标为

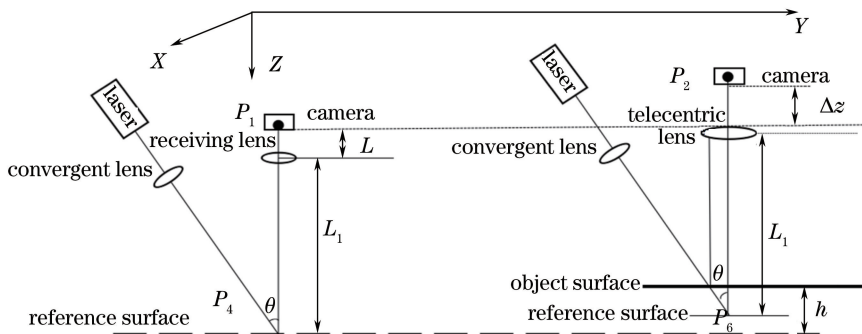


图 4 激光三角测距原理示意图

Fig. 4 Schematic of laser triangulation system

(x_0, y_0, z_0) , 激光入射角 $\theta^{[8-9]}$ 。激光器通过机械装置与相机连接固定后, 基准面与相机成像面之间的距离 $L + L_1$ 保持不变, 基准面上被测点的 Z 方向坐标为

$$z_1 = z_0 + L + L_1. \quad (4)$$

在 P_1 位置放置几个已知厚度的标定块, 则被测点在世界坐标系下对应的 Z 方向坐标为^[10]

$$\begin{aligned} z_{1i} &= z_0 + L + L_1 - d_{1i} = \\ &= z_0 + L + L_1 - k'x_{1i}. \end{aligned} \quad (5)$$

高度差为

$$h_{1i} = z_1 - z_{1i} = d_{1i} = k'x_{1i}. \quad (6)$$

由高度差及像点位置变化量, 可以求出比例系数 k' , 将景深范围内多个高度差得到的比例系数求平均值, 作为相机在该状态下的比例系数标定值。

实际测量时, 原理见图 4 右侧, 移动相机至点 $P_2(x, y, z)$ 处, 检测点 P_6 所在平面高度, 假设相机在精密滑台带动下在 z 轴方向移动了 Δz , 即基准面也随之移动了 Δz , 移位后的基准面与待测物体表面之间的距离在景深范围内。调节激光发生器, 使线性激光条纹在图像中平行于图像 ν 轴, 且中心位于像平面中心, 即激光条纹中心坐标 $(\mu, \nu) = (\mu, 768/2)$, 被测物体高度变化对应的像素变化为检测点 P_6 的像点 $(\mu, \nu) = (\mu, 768/2)$ 与 $(1080/2, 768/2)$ 的距离。

$$h_6 = z_0 - \Delta z + L + L_1 - d_6, \quad (7)$$

$$d_6 = \frac{l}{\tan \theta} = \frac{1}{k \tan \theta} x = k'x_{1i}. \quad (8)$$

待检测物体表面相对于基准面的高度为

$$\Delta z + d = \Delta z + k'(\mu - 768/2). \quad (9)$$

根据标定得到的比例系数 k' 和条纹中心像素坐标, 就可以求出被测平面相对于参考平面的高度。

4 激光条纹图像处理

在实际应用中, 所采集到的光斑图像中包含各种

不同的噪声, 导致图像质量变差, 给光斑中心的准确定位带来困扰。为了在尽可能保持原图的前提下抑制噪声, 选取几种空间滤波方法, 如均值滤波、高斯滤波、中值滤波等方法, 对所获取的激光条纹图像进行滤波。由于激光面具有一定的厚度, 因此与被测物体相交后成为具有一定宽度的激光条纹, 带有激光条纹的图像中含有被测物体表面的高度信息。提取激光条纹的中心, 可以精确计算出被测物体表面的高度信息。目前常用的激光光斑条纹中心定位方法有: 二值化法、灰度质心法、多项式拟合质心法、平方加权质心法等。

二值化法首先利用阈值对光斑图进行分割, 再通过线性插值计算光心坐标, 该方法在光斑图像存在亮暗突变的情况下, 会出现很大偏移; 灰度质心法是在二值化法的基础上, 对阈值上限部分采取高频采样, 先假设光斑图像中有 m 个像素呈白色, 然后根据平面几何中求质心的原理求取光斑图像的中心^[11]:

$$X = (n-1) + \frac{X_1U_1 + X_2U_2 + \dots + X_mU_m}{U_1 + U_2 + \dots + U_m}, \quad (10)$$

式中 X_i 是第 $n-1+i$ 个像素, U_i 是第 $n-1+i$ 个像素处光斑的灰度值, $1 \leq i \leq m$ 。

平方加权质心法是在灰度质心法的基础上将像素 X_i 处的灰度值 U_i 用 U_i^2 代替, 该方法极大地提高的抗噪声的能力^[12]。使用平方加权质心方法计算光斑图像的中心:

$$X = \frac{X_1U_1^2 + X_2U_2^2 + \dots + X_mU_m^2}{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_m^2}. \quad (11)$$

图 5 所示为某个实际应用中为检测高度差采集得到的激光条纹图像。由图 5 可知, 线性结构光在表面形成的激光光带区域亮度不均匀。

采用补偿插值法来提高质心检测精度。其主要步骤如下: 1) 对某一光斑条纹图像遍历求取平均灰度值并记录图像的宽度 w 和高度 h ; 2) 将原图分为



图 5 激光光带条纹及其处理结果图

Fig. 5 Laser stripe and its processing results

$m \times n$ 个均匀的小图并求出每个小图的平均灰度值,根据这 $m \times n$ 个平均灰度值构造一个矩阵 \mathbf{A} ,称为亮度矩阵;3) 用 \mathbf{A} 矩阵的每个元素与原图的平均灰度值的差值构造出一个灰度插值矩阵 \mathbf{B} ;4) 利用三次立方插值法将矩阵插值成 $w \times h$ 的新矩阵 \mathbf{C} ;5) 对原图进行矫正,得到矫正后的图像;6) 利用中值滤波去除光斑椒盐噪声干扰,再采用均值滤波平滑图像,最后通过上面的质心提取算法计算光带中心坐标以确保准确地提取出条纹的中心。

5 精度分析及实验测量数据

5.1 误差分析

影响激光三角测距精度的因素包括光学系统误差、图像处理误差、图像处理误差和机械装置误差。

光学系统误差主要是激光光源和 CCD 光敏面所造成的误差,因为激光和 CCD 相机的优劣直接影响着后续图像处理中对光斑中心的提取精度,所以要合理选择适当的激光发生器和 CCD 相机。激光发生器可能带来的误差有:1) 激光直线度误差;2) 激光光源不稳定带来的误差。CCD 相机可能带来的误差有:1) 成像畸变所带来的误差^[13];2) 相机的分辨率误差。

图像处理引起的误差:1) 在对相机进行标定时,尽可能取多次求平均以减少系统偶然误差;2) 对光斑图像进行滤波去噪处理,噪声对后续中心

提取精度的误差;3) 光斑中心提取算法的优劣所引起的误差。

机械装置误差:视觉检测系统工作时,要求相机光轴与检测平台严格垂直,移动滑台要在 Z 方向移动时与光轴平行,但由于在安装机械时无法做到严格垂直,加上整个系统在运行时电机会产生轻微震动,因而会导致激光光斑的偏移使得光斑在 CCD 光敏面上的成像也会有偏移,进而影响检测的精度。选用具有更高精度和刚度的实验支架搭建平台减少安装误差,选用稳定且定位准确的移动滑台减少机械装置误差^[14-16]。

5.2 实验数据

实验条件:以 Visual Studio 2013 作为软件开发平台,采用高性价比工业相机(Guppy PRO F-503, Allied Vision Technologies 公司,德国,分辨率为 $2588 \text{ pixel} \times 1940 \text{ pixel}$),以 Halcon13 作为图像函数库。

实验方法:首先,从生产出的产品中随机选取数个零件并排序编号,然后利用三坐标测量机人工重复测量 10 次,取平均值,保存数据作为真实值;再使用本文方法按照编号依次测量并保存结果,即为测量值;最后计算真实值与测量值的差值的绝对值并保存,即为误差值。

实验结果:表 1 为三种不同的产品的真实值和测量值,表 2 为误差分析结果。根据表 1、2 的数据分析可知,厚度测量误差均值在 $5 \mu\text{m}$ 以内。

表 1 测量结果

Table 1 Measurement result

mm

No.	Product 1		Product 2		Product 3	
	Actual values	Measured values	Actual values	Measured values	Actual values	Measured values
1	9.736	9.735	15.612	15.625	35.426	35.412
2	9.735	9.739	15.538	15.540	35.510	35.532
3	9.687	9.692	15.555	15.547	35.473	34.452
4	9.680	9.682	15.605	15.615	35.471	34.470
5	9.718	9.716	15.586	15.589	35.446	35.414
6	9.668	9.701	15.602	15.597	35.449	35.452

表 2 定量分析

Table 2 Quantitative analysis

mm

Error	Product 1	Product 2	Product 3
Maximum error	0.0050	0.0130	0.0320
Average error	0.0025	0.0068	0.0155

6 结论

以 Visual Studio 2013 作为软件开发平台,开发了图像处理软件并实现了基于远心镜头的激光三角测距算法,通过工业相机采集图像,提取激光光斑的

中心并记录位置,根据光斑中心的偏移计算出物体的厚度。高度测量误差均值在 $5 \mu\text{m}$ 以内,因此本文的系统设计和算法能够达到测量的精度要求。

参 考 文 献

- [1] Zhang X Y. Measurement of surface roughness based on laser triangulation[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2016.
张小艳. 基于激光三角法的表面粗糙度测量[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.

- [2] Li J. Detection of tire surface topography based on laser triangulation [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
李杰. 基于激光三角法检测轮胎表面形貌[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [3] Yang L F, Han J W, Li Y Z. Application of high precision measurement technology of Area Array CCD [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001(05): 455-458.
杨丽凤, 韩冀皖, 李元宗. 面阵 CCD 高精度测量技术的应用[J]. 太原理工大学学报, 2001(05): 455-458.
- [4] Chen S. Mechanism of influence of system parameters on accuracy of electronic vision [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
陈莎. 远心光电视觉测量中系统参数对精度的影响机理[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [5] Ju B. Telecentric lens high precision vision measurement instrument [J]. Ordnance Industry Automation, 2014(8): 82-86.
鞠波. 基于远心镜头的高精度视觉测量仪[J]. 兵工自动化, 2014(8): 82-86.
- [6] Chang C, Zhang Z F. Study on the error of laser triangulation measurement [J]. China Science and Technology Information, 2006(23): 61-62.
常城, 张志峰. 激光三角法测量的误差研究[J]. 中国科技信息, 2006(23): 61-62.
- [7] Chu X L. Laser triangulation measurement system integrated with CMM [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
出晓岚. 集成于三坐标测量机的激光三角法测量系统[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [8] Zhang J M. System of 3D object profile measurement based on laser triangulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
章金敏. 基于激光三角法的物体三维轮廓测量系统[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [9] Zhang X, Zhang J. Overview of line structured light calibration methods[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-17. (2017-08-17). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20170817.1355.024.html>.
- 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-17. (2017-08-17). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20170817.1355.024.html>.
- [10] Lu R S, Li Y F, Yu Q. On-line measurement of the straightness of seamless steel pipes using machine vision technique [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2001, 94(1/2): 95-101.
- [11] Derganc J, Likar B, Bernard R, *et al.* Real-time automated visual inspection of color tablets in pharmaceutical blisters [J]. Real-Time Imaging, 2003, 9(2): 113-124.
- [12] Kosmopoulos D, Varvarigou T. Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection [J]. Computers in Industry, 2001, 46(1): 49-63.
- [13] Cheng M J, Shen X J, Xiao J J, *et al.* Three dimensional calibration method of fish eye camera based on laser scanning [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0315001.
程梦娇, 申夏晶, 肖江剑, 等. 基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0315001.
- [14] Wu J F, Wang W, Chen Z C. Study on error analysis and accuracy improvement of laser triangulation method [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2003(4): 89-91.
吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. 机电工程, 2003(4): 89-91.
- [15] Cui F K, Song Z B, Wang X Q, *et al.* Study on principle of laser triangulation used for measurement of 3D surface roughness [J]. Mining Machinery, 2010, 38(14): 30-33.
崔凤奎, 宋战波, 王晓强, 等. 三维表面粗糙度激光三角法测量原理研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(14): 30-33.
- [16] Luo Z F, Zhang K, Wang Z G, *et al.* Position calibration of laser ranging sensors in autonomous navigation vehicle [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 062802.
罗志锋, 张轲, 王志刚, 等. 激光测距传感器在自主导航小车中的位置标定[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 062802.