

基于条纹式激光传感器与机器人的扫描成像系统

张 铁, 李 波, 邹焱颺

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 提出了一种以条纹式激光传感器和工业机器人为平台对工件进行扫描检测并对其轮廓进行成像的系统方案。条纹式激光传感器移动式扫描工件获取工件轮廓的三维点云数据, 然后结合特定的算法对点云数据进行去噪、插值、插补处理, 使得点云数据能更加真实地反映工件的客观形貌, 最终根据点云数据的信息生成工件轮廓的二值化图像。在实验中成像精度能达到 0.1 mm 级, 从而在某些特殊的工业场合替代传统的 CCD 相机实现对工件的成像及检测定位, 解决了传统 CCD 的抗干扰能力不足的问题。

关键词: 激光; 扫描; 点云; 成像; 算法

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0053-06

Scanning imaging system based on stripe type laser sensor and robot

Zhang Tie, Li Bo, Zou Yanbiao

(Institute of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A system solutions was proposed that utilized the platform composed of stripe type laser sensor and industrial robot for scanning and detecting workpiece, imaging for its contour as well. Stripe type laser sensor obtained the three-dimensional point cloud data of the workpiece contour by scanning in movable way. Then combined with the specific algorithm, point cloud data was dealt with through denoising, interpolation processing, which made the point cloud data reflect the objective morphology of artifacts more truly. Finally according to the information of point cloud data, binary images of the workpiece contour was generated. In the experiment, the precision of imaging can reach to 0.1 mm. Thereby, imaging, detection and location for the workpiece are realized instead of traditional CCD camera in some special industrial occasions, solving the problem that traditional CCD is lack of anti-interference ability.

Key words: laser; scan; point cloud; imaging; algorithm

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-06-22

基金项目: 广东省战略性新兴产业项目(2011A091101001); 广东省科技计划项目(2012B090600028);
中山市科技计划项目(201207B001)

作者简介: 张铁(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工业机器人、服务机器人等的研究。Email: merobot@scut.edu.cn

0 引言

在工业机器人的实际工业作业中,只有通过一定检测设备和技术获得工件相对于机器人的位置和姿态,才能保证机器人能够准确地完成各种作业任务。由于视觉系统具有良好的非接触式检测和定位性能,所以机器人视觉系统开发已成为工业机器人研究领域的热点与重点^[1]。

在存在着光照波动大、粉尘、烟雾等诸多不良干扰因素的工业现场环境下,激光视觉传感器比传统 CCD 相机具有更好的抗干扰性。

激光主动成像技术是利用主动发射激光照射目标,探测目标反射的信号,对目标进行成像^[2]。从扫描方式上可分为扫描成像探测和非扫描成像探测^[3]。

激光扫描测距成像技术是由激光扫描获得目标物的距离信息。二维振镜是通过 X-Y 轴电机带动反射镜片偏转来实现平面扫描的,一般应用于较小的扫描面积,其扫描过程中存在两种缺陷:一是焦斑扫描轨迹构成的扫描场在空间成球面场,与工作平面不是重合的,称为系统的聚焦误差或 Z 轴误差;二是扫描图形将在 X 轴出现枕形误差,在 Y 轴出现桶形误差^[4]。

澳大利亚的 Abdul Nurunnabi 等人针对激光扫描所得的物体轮廓的三维点云数据的处理提出了通过处理噪声数据以获得更加精确、健壮的点云数据进而对被测物进行逆向工程领域的三维重建、轮廓成像等^[5]。

文中利用半导体激光发射源条纹式激光传感器对工件进行扫描式测量,对得到的物体轮廓的三维点云数据通过特定算法进行处理,从而得到工件轮廓的二值化图像。

1 条纹式激光传感器

实验所采用的德国 Leuze electronic 公司 LPS36HI 型条纹式激光传感器基于三角测量原理。通过线性激光束对物体截面轮廓进行测量。基于三角测量原理的距离测量技术具有较高的精度和速度,方向性好,能够以较高的频率提供分辨率高、准确性好的距离信息。常用的二维脉冲式激光传感器,测量到的有限长数据序列是一个关于环境的扫描平面^[6]。

该激光传感器具有集成度高,结构紧凑,响应时间短,抗干扰性能好等一系列优点,如图 1 所示,激光传感器主要由激光发射器(配备光学扩大设备)、光学接收装置(含滤光片)、CMOS 平面检测器、传感器内部电路硬件及芯片(图中未标出)等几部分组成,上述几个组成部分全部封装在传感器外壳内。将所述光学接收装置和 CMOS 平面检测器合称为相机。

采用与激光同等波长的光学滤光片滤掉所有的包括弧光在内的杂散光,而传感器内的相机只形成激光条纹的图像。

传感器通过千兆以太网口与上位机通信,每收到来自上位机的一次扫描触发指令时,激光发射器便发出一条线性激光束投射到被测物表面上,激光束会发生与被测物表面轮廓相一致的变形,在该束激光上分布一系列等间距的采样点。上述光学接收装置检测到由被测物反射回来的激光。根据被测物的距离,激光线被投射到上述 CMOS 平面检测器上不同的位置,通过这个位置便可以计算出被测物的距离(整个计算过程在传感器内部的处理芯片上进行),然后传感器返回该束激光中的采样点相对于传感器测量坐标系中的 Z 轴和 X 轴坐标值至上位机^[7]。传感器测量坐标系如图 1 所示。

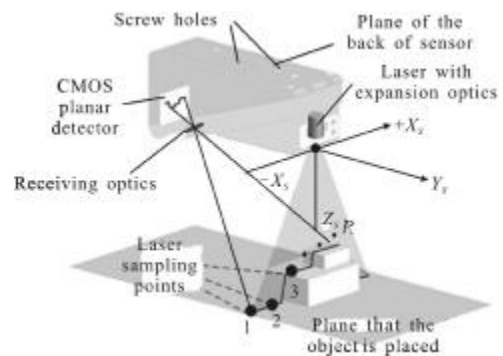


图 1 传感器测量坐标系

Fig.1 Measuring coordinate system of laser sensor

2 系统组成

如图 2 所示,该系统硬件部分主要由 6 自由度 ABB 工业机器人及控制器、德国 Leuze electronic 公司的 LPS36 型条纹式激光传感器和工业控制计算机(以下简称工控机)等组成。

条纹式激光传感器固定安装在机器人末端,且与上位工控机进行以太网通信,从而通过工控机来

控制传感器进行工作、接收传感器反馈回来的测量数据。工控机与机器人控制器进行以太网通信,用来实现通过工控机远程控制机器人动作、工控机与机器人控制器之间数据的读取和发送。系统工作时,机器人带动传感器对被测物进行移动式扫描测量。工控机中的软件用来实现上述设备之间的通信、数据的传输和测量点云数据的后续处理以及对被测物进行成像等。

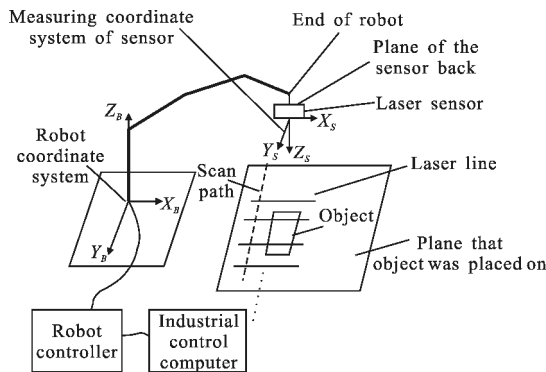


图 2 系统组成图
Fig.2 System diagram

3 关键技术

3.1 机器人末端扫描速度的确定

如图 2 所示,扫描过程中保证激光传感器背部平面与被测物体所在平面平行且间距不变,那么传感器发射的激光束在传感器坐标系 X 轴方向上的长度保持恒定, X 轴方向上相邻激光采样点的间距 d, mm 也就基本保持恒定。

$$d = (X_{max} - X_{min}) / (n - 1)$$

式中:n 为每条激光束中激光采样点的总个数;X_{max}和 X_{min}分别为传感器返回的激光采样点的最大和最小 X 轴坐标值;

设置传感器的扫描触发周期为 T, ms, 在此时间 T 内, 激光传感器的位移为 s=VT/1000, mm, 其中 V 为机器人末端在传感器坐标系 Y 轴方向上的扫描速度。为了使由处理点云数据而生成的工件二值化图像不产生畸变(即图像横向和纵向像素的尺度因子相等), 要使相邻两个采样点的距离 d 等于以一个扫描触发周期内传感器在 Y 轴方向的位移 s, 见图 3。

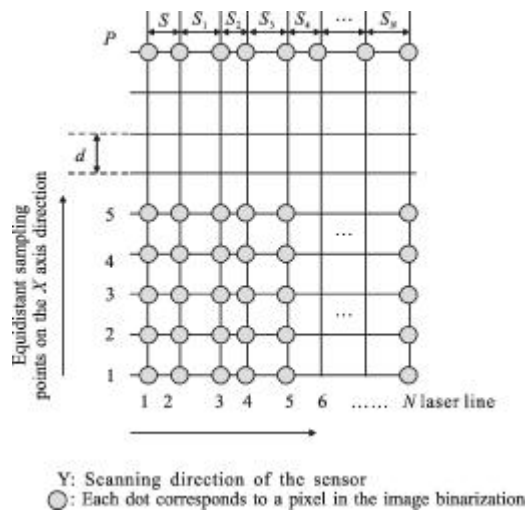


图 3 激光采样点与成像像素点的几何关系
Fig.3 Geometric relationship between laser sampling points and pixel

3.2 扫描工件获取初始测量数据

传感器每接收到一次扫描触发命令便发出一束激光照在被测物体表面上。在这束激光线上沿 X 方向均布着 P 个采样点(P 为常数,由传感器自身性能参数所决定)。然后传感器返回这 P 个激光采样点的 X 轴坐标值和 Z 轴坐标值。其中 X、Z 轴参见图 1。

设置传感器的扫描触发周期为 T, ms。机器人以上述的速度 V, mm/s 带动传感器在传感器坐标系 Y 轴方向上沿固定的扫描路径从头到尾完整扫描被测物,然后机器人停止运动,同时使传感器停止工作。那么在传感器扫描工件期间便会有一系列这样的测量数据返回到与传感器进行通信的上位工控机中。

传感器每执行一次扫描触发扫描命令并发射出一束激光时, 便从机器人控制器中读取当前时刻机器人末端在上述 Y 轴方向上的位置, 并把该值返回至工控机中。在整个扫描过程中, 机器人既是执行装置又是测量装置。

在扫描工件期间,传感器共发射了 N 次激光,那么就可以得到 N·P 个采样点对应的传感器测量坐标系 X、Y、Z 轴的坐标值。这些数据便是工件初始轮廓三维点云数据,这些数据分为 N 组,即每束激光对应一组测量数据。

3.3 初始测量数据的处理

3.3.1 对少数噪声点进行插补

理论上,被测物位于传感器有效量程之内时,只

要传感器激光发射器发出的激光点能被传感器内部的相机检测到,那么所测得的该激光点的 Z 轴坐标就不会是 0。实验证明,如果某个发出的激光点照到被测物上以后由于遮挡等缘故而未能被传感器内的相机检测到,如图 4 所示,若传感器发射的激光照射到工件的表面 A'-A 处,那么由于工件外形遮挡的缘故致使传感器内的相机在当前视场内无法检测到该处的激光采样点,A'-A 处的激光采样点返回到工控机的 Z 轴坐标值是 0。

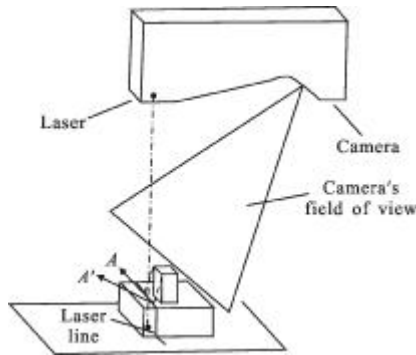


图 4 传感器采样点被遮挡

Fig.4 Laser sampling points are clouded

由于少数工件形状轮廓极其不规则、高度落差大,加之传感器的“发射-再检测”的测量工作原理已经确定,所以存在少数激光束的部分激光采样点反馈回来的 Z 轴坐标值为 0 的情况。这种采样点虽在少数,但是给客观真实反映被测物的三维轮廓信息带来负面影响。为此,设计了一种算法,对噪声点的 Z 轴坐标值进行插补,力求降低上述噪声点所带来的负面影响。

假设第 $i+3(i < N-3)$ 束激光中的第 $m(m < P)$ 个激光点为噪声点。利用拉格朗日二次插值^[8]方式得到该点的 Z 轴坐标值 $Z_{i+3}(Y_{i+3})$:

$$\begin{cases} l_0 = \frac{(Y - Y_{i+1})(Y - Y_{i+2})}{(Y_i - Y_{i+1})(Y_i - Y_{i+2})} \\ l_1 = \frac{(Y - Y_i)(Y - Y_{i+2})}{(Y_{i+1} - Y_i)(Y_{i+1} - Y_{i+2})} \\ l_2 = \frac{(Y - Y_i)(Y - Y_{i+1})}{(Y_{i+2} - Y_i)(Y_{i+2} - Y_{i+1})} \\ Z_{i+3}(Y_{i+3}) = l_0 Z_i + l_1 Z_{i+1} + l_2 Z_{i+2} \end{cases}$$

式中: Y_i, Y_{i+1}, Y_{i+2} 分别为第 $i, i+1, i+2$ 束激光中的第 m 个采样点的 Y 轴坐标值(由机器人控制器读出) Z_i, Z_{i+1}, Z_{i+2} 分别为第 $i, i+1, i+2$ 束激光中的第 m 个采样点的 Z 轴坐标值。

3.3.2 对于定时器不准确的插值处理

在程序中通过定时器设置条纹式激光传感器扫描触发的周期为 T, ms , 实际上 T 是小幅度浮动的。由于 T 难以严格准确保证, 因此也不能严格保证上文所述的 $s=d$, 进而难以严格保证生成的被测件图像不发生畸变。这也是实时从机器人控制器内读取机器人末端在 Y 轴方向位置坐标的必要性所在, 即机器人充当测量工具的原因。实际的 s 与 d 的关系见图 3 所示。

图 3 中每一个圆点代表一个激光采样点, 每个原点包含三个值信息: X 轴坐标值、Y 轴坐标值、Z 轴坐标值。图中的 s 表示当 T 没有误差时, 在时间 T 内激光传感器在沿 Y 轴方向上的移动距离。如前所述, 由于 Y 轴坐标值是实时读取的, 所以相邻两个周期 T 之间 Y 轴坐标值的变化量对应为实际的 s 值。

如图 5 所示为了保证后续过程中产生的像素点的几何畸变尽可能小, 必须对 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_N$, 按照理想的步长 s 对每一个 Y 轴坐标值对应着 P 个点的 Z 轴坐标值进行线性插值, 插值公式为:

$$Z'[i] = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S[i]}{VT_i} Z[i]$$

式中: $Z[i]$ 为一个包含 P 个元素的数组, 为第 i 束激光的 P 个采样点的 Z 轴坐标值的集合。 $Z'[i]$ 为一个数组, 为第 i 束激光的经过插补后的 P 个激光采样点的集合。

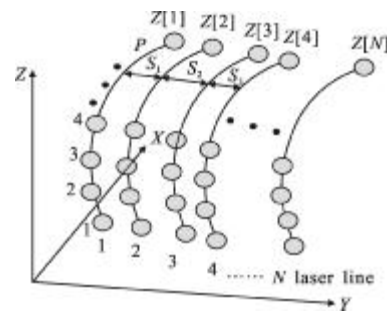


图 5 对定时器误差进行的插补

Fig.5 Interpolation for error of the timer

对于每一个 Y 坐标值对应的 P 个采样点的 Z 轴坐标值都进行了修正插补。这样就基本消除了定时器误差所产生的成像几何畸变。

3.3.3 对 X 轴方向激光采样点个数的插补

进行上述的两步插补以后得到的仍然是 $N \cdot P$ 个激光采样点的数据。由于该激光传感器在其测量

坐标系 X 轴方向上只有 P 个采样点, 该实验所用传感器 P=240, 这是由传感器自身的性能参数所决定的。显然, 采样数据的精确度与采样点的个数呈明显的正相关关系, 亦与工件轮廓成像的精度有直接关系。如图 6 所示, 为了提高 X 轴方向采样数据的精度, 对于每束激光在 X 轴方向上的 P 个采样点, 将每两个相邻采样点所对应的 Z 轴坐标值求算术平均值, 将该值作为一个新的 X 轴方向上的采样点的 Z 轴坐标值, 即

$$Z_i' = (Z_i + Z_{i+1}) / 2$$

式中: Z_i' 为插补得到的采样点的 Z 轴坐标值; Z_i 为第 i 个激光采样点的 Z 轴坐标值; Z_{i+1} 为第 i+1 个激光采样点的 Z 轴坐标值。

图 6 中圆点代表本来的 P 个采样点, 三角形代表插补后得到的新的采样点。这样一来, 在 X 轴上便有 2P-1 个采样点, 于是 X 轴方向的采样距离 $d(X_{max} - X_{min}) / (2P - 1)$, 即公式(1)中 $n = 2P - 1$ 。经过上述处理, 最终得到 $N(2P - 1)$ 个采样点的数据。

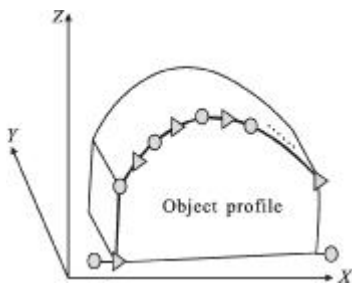


图 6 对 X 轴方向上的采样点进行插补

Fig.6 Interpolation for the sampling points in X axis direction

3.3.4 建立生成二值化图像矩阵的准则

传感器发射一束激光照到被测物物体截面轮廓上的情况可以用图 7 表示。

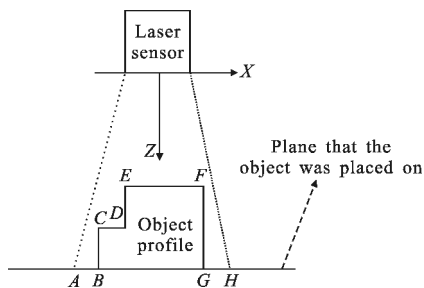


图 7 激光采样点的分类

Fig.7 Classification of the laser sampling points

如何根据这 N 束激光中的 $N \cdot (2P - 1)$ 个采样点

的数据来确定被测物轮廓的图像, 即如何确定工件沿传感器坐标系 Z 方向在被测物底面所在的平面上的投影, 处理步骤如下。

对于第 i 个激光束, 可以把这 $2P - 1$ 个采样点分为两类:

A 类点 位于被测物轮廓上的采样点, 即 BG 段的采样点;

B 类点 非位于工件轮廓上的采样点, 即 AB 和 GH 段的采样点。

以此类推, 可以把这 N 条激光束的 $N \cdot (2P - 1)$ 个采样点也分为两部分: A 类点、B 类点。

可经过以下 2 步完成将所有的采样点分为 A 类点、B 类点两部分:

(1) 找出所有 $N \cdot (2P - 1)$ 个采样点中 Z 轴坐标最大值 Z_{max} , 该点显然属于 B 类点

(2) 遍历所有的采样点的 Z 轴坐标值, 设被测物的最小厚度为 T, 若某个采样点的 Z 轴坐标值 $Z[i]$ 满足 $|Z_{max} - Z[i]| > aT$ ($0 < a < 1$, 一般取 0.9), 则认为该采样点属于 A 类点, 否则认为该采样点属于 B 类点。

可经过以下 2 步完成将所有的采样点分为 A 类点、B 类点两部分:

(1) 找出所有 $N \cdot (2P - 1)$ 个采样点中 Z 轴坐标最大值 Z_{max} , 显然该点属于 B 类点。

(2) 遍历所有的采样点的 Z 轴坐标值, 设工件的最薄处厚度为 T, 若某个采样点的 Z 轴坐标值 $Z[i]$ 满足 $|Z_{max} - Z[i]| > aT$ ($0 < a < 1$, 实验中取 0.9), 则认为该采样点属于 A 类点, 否则认为该采样点属于 B 类点。

每一个激光采样点都对应对应着工件二值化图像矩阵的一个元素, 所以该矩阵有 $N \cdot (2P - 1)$ 个初始元素。

对于每个激光采样点, 若判断它属于 A 类点则令工件图像二值化矩阵里的对应元素为 0; 反之, 为 255。

经过这种形式的处理就得到了一个被赋值的 Imagebinarizationmatrix $[2P - 1][P]$ 图像二值化矩阵。

在与美国国家仪器公司 National Instruments Vision Assistant 软件平台进行混合编程的程序中根据矩阵 Imagebinarizationmatrix $[2P - 1][N]$ 生成工件轮廓的二值化图像时, 令值为 255 的矩阵元素对应为一个白色像素点, 令值为 0 的元素对应为一个黑色像素点。也就是说位于被测物轮廓上的采样点在最后生成的二值化图形中均是黑点, 而非位于被测物轮廓上的采样点则是白点。如此一来, 被测物轮廓沿

图 1 或图 2 中 Z 轴方向在被测物底面所在平面上的投影均是黑点。

4 实验结果

图 8 为实验中所采用被测工件的普通光学镜头拍摄的实体图(图(a))和激光传感器扫描生成的二值化图像(图(b))。

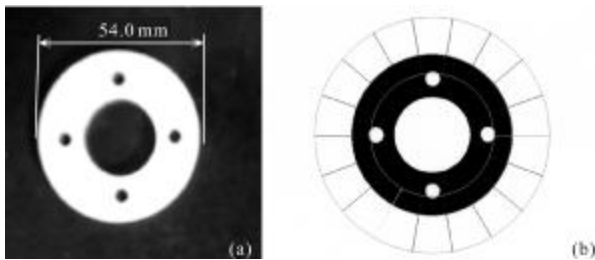


图 8 实验结果

Fig.8 Experimental results

实验所用的标准圆环形工件外径 54.0 mm。在所述 National Instruments Vision Assistant 软件里测得生成的工件二值化图像的圆度平均误差为 0.856 个像素,对应为现实世界中的偏差为 0.856 d。其中 d 表示图像中一个像素单位代表的实际世界坐标系中的距离,其值参见文中第一个公式,在该实验中测得 $d=0.125$,那么据此可得该二值化图像与真实的被测工件的轮廓误差大约为 $0.856d=0.107$ mm。

5 结论

文中实验实现了以条纹式激光传感器和 ABB 机器人为平台对工件进行扫描检测并对其轮廓进行成像,实现了在存在着光照波动大、粉尘、烟雾等诸多不良干扰因素的工业现场环境(如弧焊)下,以抗干扰性能良好激光视觉传感器替代传统 CCD 摄像机对工件进行非接触式检测和定位,然后获取工件相对于机器人坐标系的位姿,从而引导机器人对工件进行抓取、搬运、焊接等各种后续操作。

参考文献:

- [1] Pang Heqiang. Robot taught path correction based on the corner detection and image matching algorithm [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012: 1-5. (in Chinese)
庞贺强. 基于角点检测与图像匹配的机器人示教路径修正算法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012: 1-5.
- [2] Zang Junheng. Reaserch on data processing technology of streak tube laser imaging system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 10-15. (in Chinese)
臧俊恒. 条纹管激光成像系统数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 10-15.
- [3] Sun Zhihui, Deng Jiahao, Yan Xiaowei. Process and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques [J]. Science and Technology Review, 2008, 26(3): 74-76. (in Chinese)
孙志慧, 邓甲昊, 闫小伟. 国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2008, 26(3): 74-76.
- [4] Yu Chao. Two-dimensional vibration mirror scanning system in the application of the laser scanning imaging[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2011: 14-17. (in Chinese)
喻超. 二维振镜式扫描系统在激光扫描成像中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011: 14-17.
- [5] Nurunnabi A, Belton D, West G. Robust segm- Entation in laser scanning 3D point cloud data [C]//Digital Image Computing Techniques and Applications, 2012 International Conference on Digital Object Identifier, 2012: 1-8.
- [6] Zheng Fang, Li Ganhua, Cai Xuanping. Statistical characteristics detection and error analysis of LMS [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 1-2. (in Chinese)
郑芳, 李赣华, 蔡宣平. 基于激光传感器的统计特征提取和误差分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 1-2.
- [7] Leuze Electronic. Lps-line profile sensor technical description.
- [8] Zheng Xianyi, Tao Zhihui, Lei Xiuren, et al. The Application of Numerical Analysis [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 44-48. (in Chinese)
郑咸义, 陶志慧, 雷秀仁, 等. 应用数值分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 44-48.