

光路自动准直系统研究

叶成樑¹, 尚建华¹, 贺 岩²

¹ 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800

摘要 为了实现光路的快速自动准直,降低手动调整光路的误差,有效提高人机交互界面操作的实时性和友好性,设计了一套可视化的光路自动准直系统。借助 VC++ 编程技术,对凝视 MV-U2000 图像采集模块进行了二次开发,实现了激光光斑图像信息的采集、实时显示和保存。计算机与下位机 STM32 进行串口通讯,通过控制步进电机自动调节步长实现了光路的快速调整,并使其达到准直。实验表明,该光路自动准直系统能够满足准直的应用需求,单次操作只需 2 min,精度可达到 $4.17 \mu\text{rad}$,并具有集成度高、操作友好、可移植性强等特点。

关键词 测量; 自动准直; 光斑采集

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.051201

Study of Laser Beam Autocollimation System

Ye Chengliang¹, Shang Jianhua¹, He Yan²

¹ College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

² Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In order to realize rapid autocollimation of laser beam, decrease the error during manual adjustment of laser beam, and increase real-time performance and friendliness of man-machine interface operation, a visual autocollimation system for laser beam is designed. Secondary development of MV-U2000 image collecting module is carried out with the help of the VC++. The acquisition, real-time display and storage of the image of the laser spot are realized. Through the serial communication between the PC and the STM32, rapid adjustment of laser beam is realized by auto-adjusting the step size of stepper motor. Then, the laser beam collimation is achieved. The experiment results show that the autocollimation system satisfies the application requirement of collimation. The single operation lasts for 2 min and the measurement precision is up to $4.17 \mu\text{rad}$. The system has the characteristics of high-integration, user-friendliness and high-transportability.

Key words measurement; autocollimation; spot collection

OCIS codes 120.1680; 120.1880; 120.3620

1 引言

激光技术及其相关应用系统的研制和推广,已对激光束的准直调节和指向稳定性提出了日趋严格的要求。中山大学光电材料与技术重点实验室研制的高精度激光光路准直系统,采用四象限硅光电二极管代替传统的电荷耦合器件(CCD)探测光线方法,并运用数字信号处理(DSP)技术处理信号控制惯性压电陶瓷电动调节架调节准直,精度可达 $1 \mu\text{rad}$ 。中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室针对中小型高重复频率激光系统所设计的准直系统由 CCD、图像采集卡和个人电脑构成,上位机采用

收稿日期: 2016-11-01; **收到修改稿日期:** 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51403034)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343)

作者简介: 叶成樑(1993—),男,硕士研究生,主要从事自动控制技术方面的研究。E-mail: ycl09030408@163.com

导师简介: 尚建华(1983—),女,博士,副教授,主要从事激光遥感探测技术方面的研究。

E-mail: jhshang@dhu.edu.cn(通信联系人)

LabVIEW 编程控制,且准直装置中的压电陶瓷电动镜架是由美国新焦点公司生产的,在标准微调情况下其单步精度为 30 nm,准直精度可达 $0.5 \mu\text{rad}$ 。相对于上述两种光路准直系统而言,本文设计的系统主要解决实验室环境下光纤耦合输出激光的快速准直,本系统调节方便、成本低,并具有良好的系统可扩展性^[1-5]。

目前,光学自动准直装置的价格普遍比较昂贵,而且装置结构复杂、操控困难,因此,很多场合下,研究人员仍然依赖经验调节、对准光路。为此,本文利用 VC++ 对维视图像采集模块进行了二次编程开发,设计了一套结构紧凑、调节方便、响应迅速的光路自动准直系统。该系统可以对激光光斑进行实时采集、监测和存储,利用图像处理算法计算目标位置偏差,并借助 VC 的 MSComm 工具与下位机 STM32 进行通信,最后,控制步进电机移动相应的步长,实现光路的自动准直。针对工作环境的温度、振动等因素可能引起的细微变化,系统还提供了手动微调的功能。

2 光路自动准直系统设计

2.1 系统结构设计

光路自动准直系统的结构如图 1 所示,包括光斑采集及图像信息处理、准直控制两部分。为了适应 CCD 的探测面积,激光束经透镜 A 和透镜 B 作用后,在 CCD 上成像,再经图像采集装置 MV-U2000 传送至计算机进行图像信息检测,光斑的尺寸和抖动情况等均可得到实时反映。准直控制部分,计算机与下位机 STM32 控制器进行通讯,进而驱动加装有透镜 A 的步进电机调整相应的步长,实现透镜 A 和激光束之间光路的调节,最终获得准直的激光束。

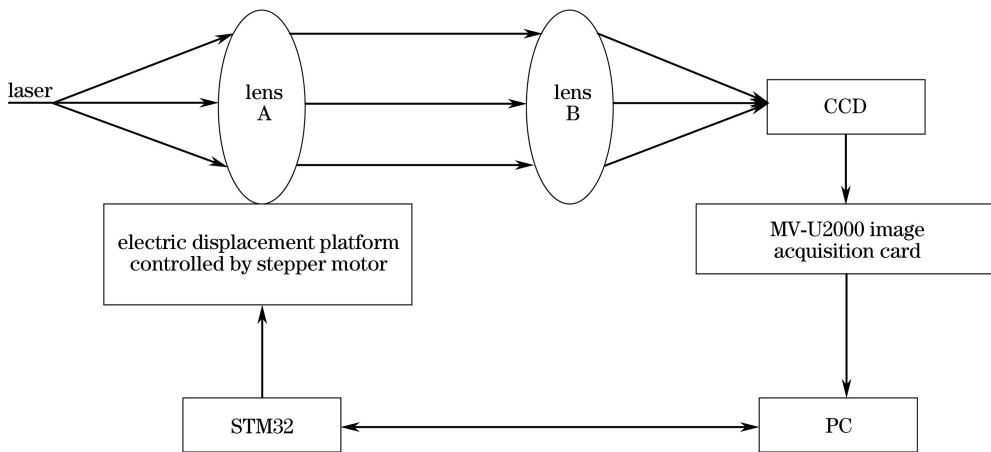


图 1 光路自动准直系统结构

Fig. 1 Structure of laser beam autocollimation system

工作波长为 1550 nm 的光纤激光器通过数值孔径为 0.13 的单模光纤输出激光,经透镜 A 和透镜 B 作用,CCD 上的光斑直径约为 $700 \mu\text{m}$,且光斑的均匀性和对称性较好。透镜 A 为准直透镜且焦距为 20 mm;透镜 B 采用双胶合透镜且焦距为 2 m,焦平面中心弥散斑的均方根半径小于 $10 \mu\text{m}$,成像质量较好,保证了光路的调节精度。图像采集装置的像素、响应速度和处理速度均会影响光路自动准直系统的工作稳定性。因此,图像采集装置选用维视数字图像技术有限公司的 MV-U2000。MV-U2000 的采样分辨率达到 720×576 ,模数采样芯片为 10 bit,USB 2.0 接口可以保证 25 frame/s 的速度存储数据,光路自动准直系统的实时性得到了保证,且 CCD 采集的信号能够进行更高质量的还原。

准直控制部分中使用的下位机是 ST 公司的 32 位低功耗单片机 STM32,其处理速度和定时器功能较 8 位单片机有显著提高,且主频可提升至 72 MHz。在 I/O 口的驱动能力方面,STM32 的性能比传统单片机高出一个数量级。因此,借助 STM32 可以控制并驱动步进电机调整透镜 A 在光路中的位置,有效实现闭环反馈控制^[6-7]。

2.2 光斑采集及图像信息处理的程序设计

光斑采集和图像处理的程序编写采用 VC++ 编程语言实现,且这两部分的程序均基于对话框的方式

进行。对话框方式较单文档方式而言,交互感更强,光斑图像信息的提取及显示更加清晰明了^[8-10]。

2.2.1 光斑采集

光斑采集是通过调用应用程序编程接口(API)函数生成特定的应用界面,进而控制图像采集模块 MV-U2000 的硬件,完成激光光斑的图像采集。图 2 所示为图像采集模块的工作流程。通过准确调用以动态链接库形式提供的 API 驱动函数,可以实现 MV-U2000 的控制,依次设置图像采集窗口、缓冲区大小、图像制式以及数据格式等初始化参数,然后采集图像到内存并进行读取和存储,即可获取当前激光光斑的图像信息。

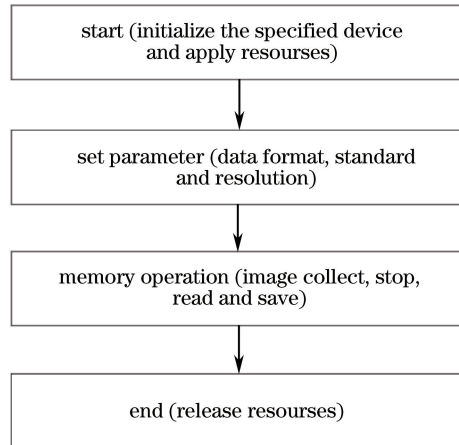


图 2 图像采集模块 MV-U2000 的工作流程

Fig. 2 Work process of MV-U2000 image acquisition module

图像采集模块控制功能涉及的核心 API 函数和对应的消息响应函数如表 1 所示。

表 1 图像采集模块控制函数

Table 1 Image acquisition module control functions

Function description	API function	Message response function
Snap shot	MV_SnapShot (HANDLE, LPBYTE, long)	OnBtSnap()
Continuous shot	MV_SetCallBack (HANDLE, void*, PVOID);	OnBtStart()
Save image	MV_SaveBMPFile (char*, BITMAPINFO*, BYTE*);	OnBtPz()
	MV_SaveJPEGFile (char*, BYTE*, long, long, BOOL, long);	
StartCap/StopCap	MV_StartCap (HANDLE, HWND);	OnBtStop()
	MV_StopCap (HANDLE);	

2.2.2 光斑图像的处理

对实时采集到的光斑图像进行快速有效的分析,是光路自动准直的基础。在准确提取出图像信息之后,计算机才能对下位机主控芯片 STM32 发送命令进而控制步进电机调整步长。图像信息处理流程如图 3 所示,包括设定强度阈值、提取边缘信息、计算光斑圆心及半径等。为了使光束准直控制更为准确快速,图像处理时设定两个判据,一个是光斑的半径,一个是光斑边缘的锐度。

在图像处理程序中,首先对光斑图像进行预处理,即对内存中的图像进行二值化阈值处理,并将处理后的结果存入一个新分配的内存空间中。二值化阈值的设定,是在 CCD 图像饱和灰度的 $1/e$ 基础上,根据手动准直调整达到最佳状态时 CCD 光斑边缘的斜率变化情况而设定的,以保证重复调整时光斑发散角的一致性。在对激光发射功率和 CCD 响应度参数多次调整测试之后,将二值化阈值设定为 80,这样可以有效去除 CCD 光斑边缘低灰度值的杂散光,进而使光斑的形状得到保证。执行二值化阈值处理算法之后,再采取边缘提取算法得到激光光斑的边缘信息。此处边缘特征的提取算法是一阶微分算子边缘检测方法,其中,算子采用 Roberts 矢量算子,并用静态整型数组表示。因此,Roberts 算子的大小为 $\sqrt{f_x^2 + f_y^2}$,方向为向量 (f_x, f_y) 的指向,其中, f_x 和 f_y 表达如下:

$$\begin{cases} f_x = f(x+1, y) - f(x, y) \\ f_y = f(x, y+1) - f(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

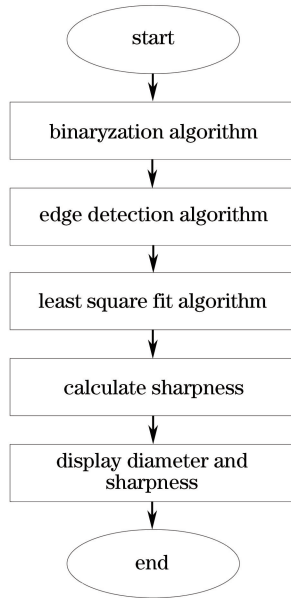


图 3 图像信息处理流程图

Fig. 3 Flowchart of image information processing

最后,提取光斑的半径和圆心信息,其中,光斑的圆心是根据边缘最小二乘法拟合得到的^[4-5]。设圆方程为 $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$, 则残差 ϵ_i 、残差平方和 Q 分别为 $\epsilon_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2$ 和 $Q = \sum_{i \in E} \epsilon_i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2$, 其中 E 是所有边界集合, (x_i, y_i) 是图像边界点的坐标。

根据最小二乘法 $\partial Q / \partial a = \partial Q / \partial b = \partial Q / \partial r = 0$, 可知光斑的圆心位置坐标 (a, b) 及其半径 r 。此外,为了增强光路自准直系统的可读性,还将光斑的半径值实时显示在界面交互对话框中,并且同步绘制出光斑在 X 轴和 Y 轴方向的灰度值变化曲线。

光斑的边缘锐度的提取采用的是求斜率的方法,即通过求 X 轴圆心的灰度值和 $1/2$ 灰度值的斜率来代替求梯度。

由于光斑图像的采集和处理必须是实时的,因此,结合图像采集模块 MV-U2000 的性能,光斑的显示及信息提取等处理均是以 25 frame/s 的速度进行的。综合考虑操作人员在观测时的实时性要求以及准直光路调节过程中的图像信息显示问题,在此,利用 VC++ 中的定时器功能将图像的相关信息(如 X/Y 轴半径、图像锐度和 X/Y 轴灰度显示等)的显示速度调整至人眼可接受的范围内(如 2 frame/s),而激光光斑图像的显示则严格按照 25 frame/s 的速度进行。

2.3 准直控制部分的程序实现

准直控制的目标是将光斑调整为尺寸最小且锐度最高的状态。在下位机的控制下,步进电机如何调节步长完全取决于计算机预处理光斑信号后发出的指令信息。为了提高自准直的速度和精度,准直控制分为两种工作模式,一是粗调模式,二是精确调节模式。粗调模式下,借助多次实验的经验,确定最优的准直光的光斑锐度,并依此设立一个[光斑锐度的 75%, 光斑锐度的 125%]的阈值区间作为粗调范围的判据,当光斑锐度达到上述范围时步进电机停止前进。精确调节模式则是基于逐次逼近算法编程,其流程图如图 4 所示,并发送指令给下位机以控制步进电机自动调节步长,实现光束的自动准直。

在精确调节模式下,由于首次进入精确调节时,无法预知光斑准直优化所需的步进电机运动方向,因此先任意设置电机的前进方向。当步进电机运动一次后,若此时的半径小于前一次的半径,则说明前进的方向正确,反之则前进方向有误并重新调整步进电机反方向运动。在确定了步进电机的运动方向之后,开始执行逐次逼近的控制算法,即步进电机每运动一次后均立刻判断此时的半径是否小于前一次的半径,如果小于就沿当前方向继续前行,反之则返回前次前进的步长,并在下次比较判断后以更小的步长调整步进电机以逼近最优点。

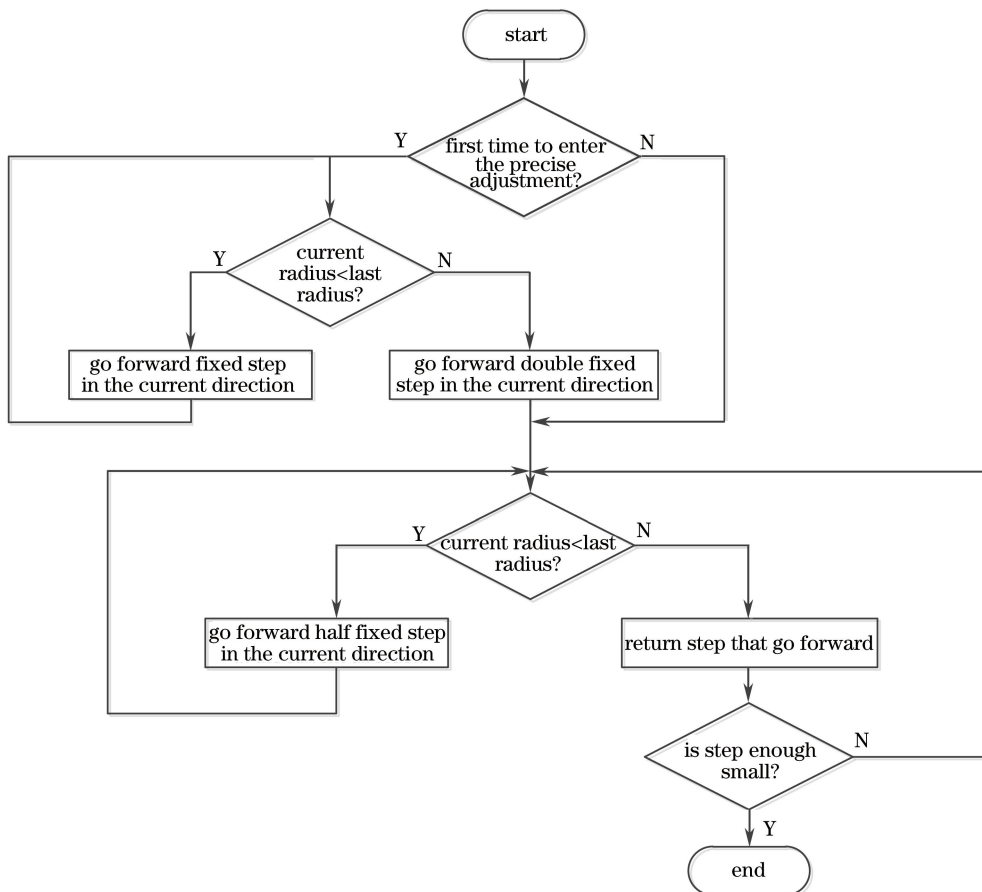


图4 逐次逼近算法流程图

Fig. 4 Flowchart of successive approximation algorithm

3 测试及实验结果

光路自动准直系统集成光斑实时采集和准直控制于一体,并以对话框的形式和用户进行交互。光路自动准直系统中的透镜 A 安装在一个小行程电动平移台上,控制该平移台移动的步进电机则是通过 STM32 芯片控制的。激光光斑采集装置由 CCD 和图像采集卡完成,图像采集卡将采到的图像送回计算机处理,计算机再与 STM32 进行串口通讯,最终形成了闭环反馈控制。

为验证该光路自动准直系统的性能,先后进行了一系列的实验。若只采用“半径”这一个判据调节准直光,则调节后的准直光的精度不理想,准直后的光斑边缘锐度不明显。实验结果如图 5 所示。

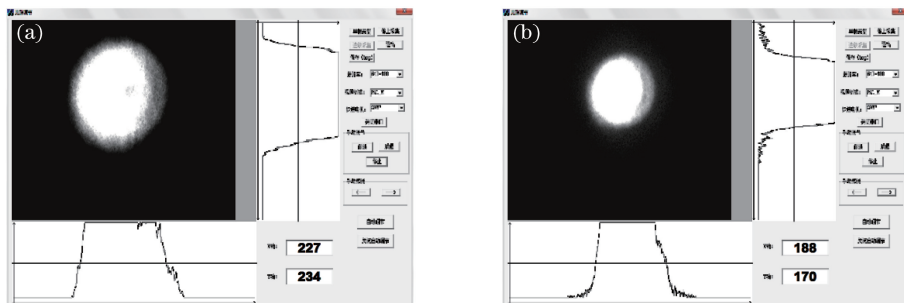


图5 单判据下(a)准直前及(b)准直后的界面光斑

Fig. 5 Laser spots (a) before collimating and (b) after collimating under single criterion on screen

因此,实验中采用了双判据方法,即先判断锐度(X 轴的圆心的灰度值和 1/2 的灰度值的斜率来代替梯度)是否是最优范围之内,然后按照光斑半径来调整准直光路。如图 6 所示,双判据下,准直调整后的光斑锐

度优于单判据下的光斑锐度,光斑半径也更小。实验证明,采用双判据可使所设计的自动准直光路系统有效实现光路的自准直,使得光斑的锐度和半径得到明显改善。

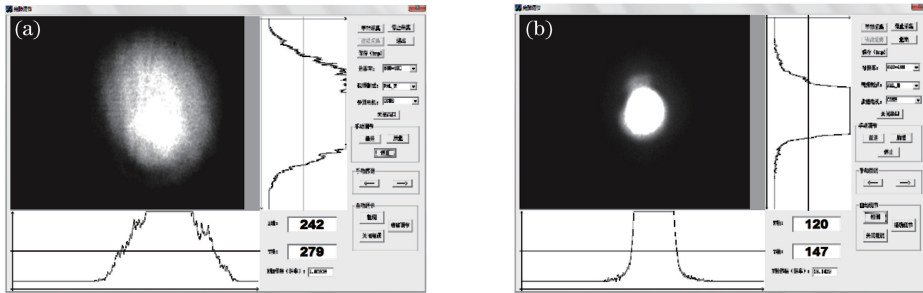


图 6 双判据下(a)准直前和(b)准直后的光斑图像

Fig. 6 Laser spots (a) before collimating and (b) after collimating under the double criterion on screen

本准直系统的理论精度是将 CCD 测量得到的光斑直径标准差除以透镜 B 的焦距。在实验测量中,系统的实际准直精度则是先用 CCD 测量所得的光斑直径除以透镜 B 的焦距以得到发散角,再求该发散角的标准差而获得的。经多次测量,该光路自动准直系统的实际精度为 $4.17 \mu\text{rad}$,其中的 7 组数据结果如表 2 所示。

表 2 实验测量数据

Table 2 Experimental measurement data

Group	Standard deviation of spot diameter / μm	Radian / μrad
1	5	2.5
2	10	5
3	15	7.5
4	20	10
5	25	12.5
6	30	15
7	40	20

另外,光斑分辨率可在 $720 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$ 分辨率以下自动调节,视频的制式也可以在逐行倒相(PAL)和国家电视标准委员会(NTSC)之间自动切换,光斑采集模式包括单帧采集和多帧采集两种,单帧采集的光斑图像可以保存至本地计算机以便进行后续分析。并且,在光路准直调节控制部分中,光斑的半径和边缘对比度等信息在图像采集的同时也将在操作界面上实时显示,实现了光斑质量的在线监测。在进行粗调模式和精确调节模式的同时,还允许进行手动粗调和微调,人性化的设计确保了准直结果可以进一步优化^[8-10]。因此,系统在人机交互方面更为友好和人性化。

4 结 论

基于 VC++ 编程技术设计实现了一套光路自动准直系统,该集成系统能够实时采集、监测、显示激光光斑,并能够实现光束的自动准直调节,且系统的采集方式、分辨率、调节模式等功能和配置参数均可调节。实验表明,该系统能够准确有效地获取激光光斑的图像信息(如光斑剖面的 X 轴方向直径、Y 轴方向直径和光斑边缘锐度等),经光路自准直调节后,激光光斑的半径和锐度远优于未准直前的情况。因此,本套系统对于激光技术的研究具有明确的应用价值,能够提供一种快速调节光路准直的方法和途径,可以提高光路的对准精度和速度,降低光路调节的难度。

参 考 文 献

- [1] He Shurong, Xu Zhenfeng. Pointer for pointing auto-matically definite orientation[J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 449-451.
何树荣, 许振丰. 自动确定方位的激光束指示器[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 449-451.
- [2] Rao Changhui, Zhang Xuejun, Jiang Wenhan, *et al.* Performance comparison of photon counting quadrant tracking

system and intensifier CCD tracking system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 67-73.

饶长辉, 张学军, 姜文汉, 等. 光子计数式光电倍增管四象限型和弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能比较[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 67-73.

[3] Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Design and performance of a video-based laser beam automatic alignment system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(2): 92-94.

[4] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279.

孔 兵, 王 昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(3): 275-279.

[5] Lü Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, *et al.* Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 335-337.

吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. *光学技术*, 2005, 31(3): 335-337.

[6] Peng Zhen. The advanced tour of 51 rookie to ARM (STM32) master[M]. Beijing: Beihang University Press, 2014.

彭 震. 51 菜鸟到 ARM(STM32)高手进阶之旅[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.

[7] Liu Enbo, Li Jiangquan, Zhang Youqiang. Typical industry application examples of programming[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

刘恩博, 李江全, 张有强. C++典型工控应用编程实例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[8] Chen Bing. Practical digital image processing and analysis[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008.

陈 兵. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.

[9] Sun Xin. Understanding VC++[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.

孙 鑫. VC++深入详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[10] Shen Yuan. Zero based learning Visual C++[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

申 远. 零基础学 Visual C++[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.