

基于以太网的自动准直系统研究

曾沛颖 刘代中 彭增云 汤晓云 纪彤 朱宝强 刘德安 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 自动准直系统是确保高功率激光驱动器高效、安全、可靠运行的重要子系统之一,同时也是保证光束质量的主要手段。通过构建以太局域网并使用高性能的数字网络 CCD 来完成图像的获取和传输,直接将光束图像转换成数字信号并通过以太网输出,实现了光束近远场图像的网络化处理;引入高斯平滑滤波算法来提高光束近远场图像处理的误差计算精度,同时将模糊算法运用到步进电机调整过程中,使得系统准直时间大幅缩短。通过在神光 II 第九路装置上进行实验验证,表明系统能在 5 min 之内顺利完成全部调整工作,其近远场图像获取和处理精度均可达 1 pixel。

关键词 图像处理; 高功率激光驱动器; 自动准直; 以太网; 模糊控制

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0302009

Research of Auto-Alignment System Based on Ethernet

Zeng Peiying Liu Daizhong Peng Zengyun Tang Xiaoyun Ji Tong
Zhu Baoqiang Liu Dean Zhu Jianqiang

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Auto alignment system, which is used for beam adjustment in high power laser driver system, is not only the key subsystem ensuring the routine operation effectually and safely, but also the main method to ensure the beam quality. An Ethernet local area network (LAN) is built and digital CCD is used for beam image acquisition and transmission, so that image data can be directly converted into digital signals and output via Ethernet to computer. Gaussian smoothing filter algorithm is used to improve the accuracy of image processing, while fuzzy algorithm is applied to the motor control process which can shorten the alignment time. The experiment is completed on No. 9 system of SG-II laser facility. Experimental results show that all adjustments of alignment are finished within 5 min and the accuracy of image acquisition and processing can be up to 1 pixel.

Key words image processing; high power laser driver; automatic alignment; Ethernet; fuzzy control

OCIS codes 140.3580; 220.1140

1 引 言

随着惯性约束聚变(ICF)物理理论的不断发展和精密物理实验要求的不断提高,新一代激光驱动器如美国 OMEAG-EP 装置、美国国家点火装置、法国兆焦耳装置都在向模块化、智能化、网络化的方向发展^[1],其光束口径和路数急剧增多,光路长度和

元器件数目成倍增长,从而导致影响装置稳定性的因素不断增加,同时光束控制精度也越来越高。这就要求自动准直系统也要向模块化、网络化的方向发展才能适应变化。

我国从 20 世纪 90 年代起在自动准直的方法上进行了大量研究,成功应用于神光系列装置上^[2-6],

收稿日期: 2013-09-06; **收到修改稿日期**: 2013-10-29

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究项目(2010DFB70490)

作者简介: 曾沛颖(1982—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事高功率激光器集中控制方面的研究。

E-mail: zeng_peiying@126.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光总体技术方面的研究。E-mail: jqzhu@siom.ac.cn

在单束小规模激光装置应用中积累了一定基础。上述研究工作都是从光学原理的角度出发,研究适用于小规模激光装置的准直方法,并未从装置的整体层面上考虑模块化、网络化等工程应用问题。而且随着激光驱动器光束路数的增加,准直硬件设备的数量也在增加,如何有效管理准直硬件设备也成为新一代准直系统需要解决的问题。为了适应未来大型激光装置的发展需求,本文提出了一套基于以太网的自动准直系统设计方案,并以神光 II 第九路装置为对象进行应用,经过实际运行验证,达到设计要求并投入实际应用。

2 系统设计基本原则

新一代激光驱动器在结构上的日益复杂化,使得准直系统的硬件分布趋于分散,在这种趋势下网络化控制比现场总线方式更适合用作通讯方式,其优势不仅仅体现在便于资源共享、交互性好的特点上,还能减少系统内部的连线并使系统物理结构相对简单便于集成^[7],因此选取以太网作为准直系统的通讯网络,并要求所有硬件设备具备以太网功能。

新一代激光驱动器虽然在光束数量上急剧增多,但每束光路的光学结构和所用光学元件基本相同,因此只要构造一个功能完整、硬件结构模块化的准直硬件单元,并编写该硬件单元的控制软件,就可通过单元模块的扩展叠加来实现对多路激光驱动器的准直工作,大大提高了本准直系统的应用性。

3 自动准直系统设计

3.1 传统准直系统分析

目前常见的单束小规模激光装置准直系统通常采用面阵摄像机成像后经同轴电缆传输至专用采集卡,采集卡模/数(A/D)转换后发送数据至控制计算机,计算中心误差并换算成电机调整量进行反馈控制,为提高调整效率还配有监视器用于人工观察是否调整到位。该系统不但受光斑图像质量限制和图像卡转换精度限制,无法进行高精度的图像处理,而且受到同轴电缆点到点连接方式的限制,造成实验现场大量线缆摆放和电磁干扰的产生。

3.2 以太网准直系统设计

本方案首先构建千兆以太局域网作为准直系统的传输网络,选用数字化的网络 CCD 完成对光束图像的获取和传输,它可以将光束图像直接转换成数字信号,通过以太网接口输出至局域网并最终传输

至控制台计算机,选择具备以太网接口的步进电机控制器作为反射镜的控制机构。以太网的使用解决了硬件设备摆放的限制,使硬件排布更加灵活,在计算机终端通过网络地址就可实现对全部 CCD 和马达控制器的管理。为提高准直系统的工作效率,在自动准直程序内添加改进型图像处理算法,并运用模糊算法来完成步进电机的调整。

准直硬件要求选用的数字 CCD、马达控制器均具备以太网接口,由马达控制器与步进马达组成运动控制单元,负责完成各类镜片和挡板的运动控制;数字 CCD 及相应的光学元件组成图像处理单元,负责完成光斑图像的直接数字信号输出功能;在实验大厅敷设千兆以太局域网作为数据传输通道,负责所有通讯数据的传输。在这一系列的基础上构建自动准直系统的图像采集和驱动控制均通过控制网络完成,从而使得整个系统具备实现远程控制的能力。

3.3 新准直系统实现

神光 II 第九路装置采用主振荡功率放大(MOPA)的方式构建光路,是在高功率激光驱动器设计中较为常用的结构,因此以第九路装置为应用对象进行具体实现具有一定的代表意义。根据第九路的近场和远场成像特性,选用分辨率为 782 pixel × 582 pixel 的数字网络 CCD 作为图像采集设备,采集到的光束图像经过内部 12 bit 的 A/D 转换后由网口输出至现场千兆交换机,最终上传至服务器进行图像处理。图像处理计算出实时图像中心和光轴基准点的误差后,换算成相应的步进马达前进步数并通过局域网发送到运动控制模块,使光束恢复到指定位置(如图 1 所示)。

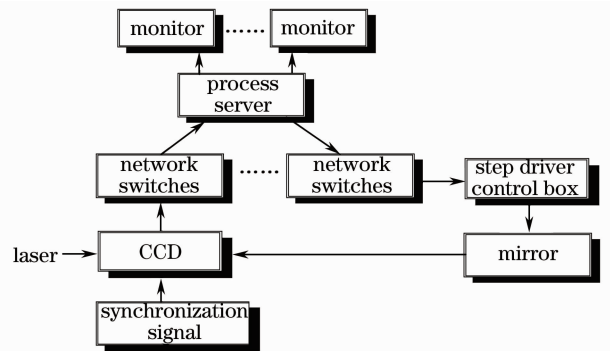


图 1 新准直系统结构图

Fig. 1 Structure of new alignment system

整个自动准直系统单元共设置 6 个近场监测点, 6 个远场监测点,通过控制 12 块伺服反射镜来调整光路(如图 2 所示)。种子/模拟光源经过近场反射镜 M6 后到达远场反射镜 M7,一部分光通过取样镜经

透镜成像到 CCD5 上；一部分光经反射镜 M8 透射后经透镜聚焦再经显微物镜对焦斑放大后成像到远场 CCD6 上。通过调整反射镜 M5、M6 就可以实现远近场的调整。所有的设备均通过网络交换机进行数据的交互，设备全部就近敷设在工作点附近。

该系统内部由运动控制单元和图像处理单元组

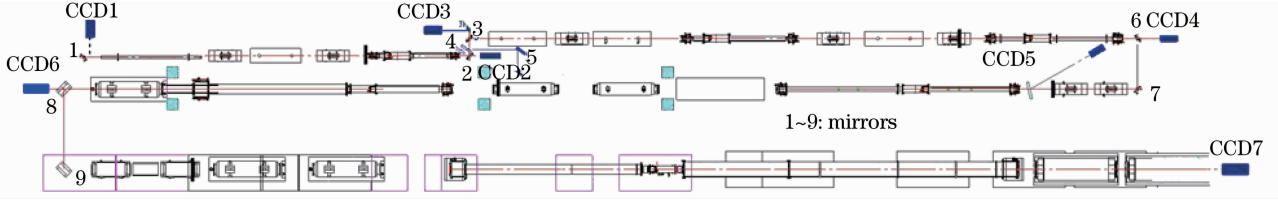


图 2 实验装置图

Fig. 2 Figure of experimental apparatus

3.4 图像处理及反馈控制

在数字 CCD 将光束图像数据传输到处理服务器后，其服务器内部对图像的处理是整个反馈控制中唯一的误差计算和反馈处理环节。由于多路激光装置通常采用并行准直的工作方式来确保在最短的时间内完成准直工作，因此单路激光的图像处理快速与否直接决定了整个系统的准直效率。目前比较常用的处理方案是先计算出图像中心与光轴基准点误差，然后计算出步进马达前进的步数并驱动马达转动调整光路，在这一过程中图像中心的计算与马达的驱动步数换算是直接影响反射镜调整效果的两个决定因素。

3.4.1 图像处理

目前装置普遍使用的图像中心计算方法是阈值重心法^[7-8]。重心法首先用阈值化提取图像中的有效像素值，假设某一监测点的光斑图像尺寸为 $A \times B$ ， $f(i, j)$ 为其中某点的灰度值，灰度阈值为 T ，阈值化的过程表述如下：

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases}, \quad (1)$$

则利用重心法求中心 (x_0, y_0) 实际上就是计算二值化一阶矩，即

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B F(x, y)x}{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B F(x, y)}, y_0 = \frac{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B F(x, y)y}{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B F(x, y)}. \quad (2)$$

由于光路图像中噪声对定位精度有很大的影响，特别是在远场图像光斑尺寸较小的情况，而重心法没有任何去噪声能力，故阈值法适用于目标与背

成，所有设备均具备网络硬件接口，因此可将该系统定义成一个基本模块，将准直管理软件定义成共享模块，通过将一定数量的基本模块和一个共享模块按照装置的具体需求进行组合使用，即可实现对多条光路的自动准直。

景灰度有较强对比的情况，背景或物体的灰度比较单一，而且总可以得到封闭且连通区域的边界。而实验获得的光斑图像总是存在各种噪声图像的影响，如图 3(a) 的左下角、图 3(c) 的右上角，这些噪声的存在不仅使普通的阈值法无法得到封闭连续的边界，而且无法将具有同等灰度值的噪声剔除。对重心法进行改进，主要是引进高斯加权的重心定位，利用高斯滤波的平滑性对原有图像数据灰度值进行二次处理^[9-10]，将不连续的、不符合平滑要求的像素点剔除，从而得到连续可封闭的边界：

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B I(x, y)x}{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B I(x, y)}, y_0 = \frac{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B I(x, y)y}{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B I(x, y)}, \quad (3)$$

其中

$$I(x, y) = \sum_{i=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} \sum_{j=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} F(x+i, y+j)g(i, j), \quad (4)$$

$F(x, y)$ 表示输出的图像数据灰度值， $g(x, y)$ 表示高斯滤波系数，在这里选用二维均值离散高斯函数做平滑滤波器， $I(x, y)$ 表示经过高斯滤波后的图像数据，利用高斯函数作为平滑滤波器可有效地消除光斑图像中噪声对图像中心点定位的干扰，大大提高了图像处理的精度和稳定性。图 3 中的 (a)、(c) 分别为近场、远场原始采集图像，从图中可以看到明显的衍射现象，在图像处理的过程中这些衍射光斑实际上成为了噪声光斑。由于衍射光斑中有一部分像素的亮度与主光斑亮度接近，单纯使用阈值法将无法有效处理，而利用二维均值离散高斯函数作为

平滑器进行滤波并进行阈值处理后的效果如图 3 (b)、(d)所示,成功地将衍射噪声进行了过滤清除。目前使用的 CCD 的 A/D 转换精度为 12 bit,换算为

灰度精度为 0~4096,较之传统 0~256 处理精度已经大幅度提升,再配合以高斯滤波之后,能够实现 1 pixel 的中心光轴偏差的处理。

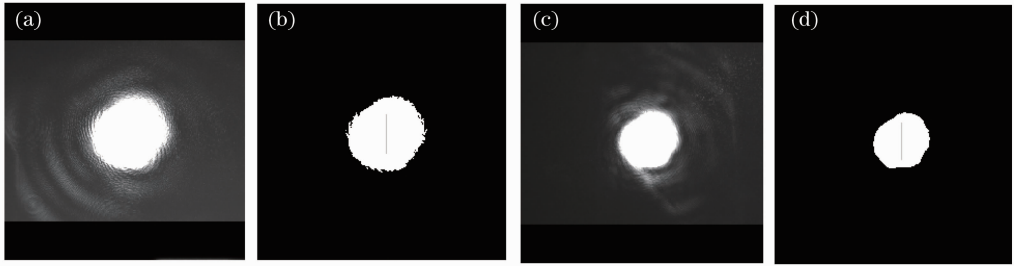


图 3 近远场调整效果图。(a) 近场原始光斑;(b) 处理后的近场光斑;(c) 远场原始光斑;(d) 处理后的远场光斑
Fig. 3 Adjustment effect of near and far fields. (a) Original near-field spot; (b) near-field spot after treatment; (c) original far-field spot; (d) far-field spot after treatment

3.4.2 反馈控制

自动准直的反馈控制通常是计算出图像误差后,再转换成步进马达转动的步数来进行调整,每个像素对应的调整值在理论情况下为固定值,但是在实际情况中像素与马达步数的对应关系为非线性值,因此调整过程的迭代次数是该非线性值的随机函数,在调整时间上有着很大的波动性。为了适应像素与马达步数的非线性关系,引进模糊控制算法来保证光束快速调整至中心,将该非线性值设置为一个变量值,即根据实际误差距离进行实时自适应步长控制,根据模糊规则通过模糊判决确定步长,保证系统能够快速准确地自动准直,增强系统的稳健性^[11-13]。

将装置以往的运行经验通过语言规则表示出来,使得控制方法不依赖于被控对象的精确数学模型,从而克服非线性因素影响。当误差较大时能够进行大范围调整,接近光束中心时步距自适应减小,到光束中心点附近时精密定位,步长的具体大小由评价函数值模糊量化后,通过模糊控制规则进行模糊推理决策确定。

采用二维模糊控制器,误差 e 和误差变化量 e_c 经过模糊化分别为 E 和 E_c 作为模糊控制器的输入量,输出变量为电机的控制量 u ,上述模糊集定义如下。

E_c 和 u 的模糊集为: $E_c = u = \{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$, 其对应含义为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。

E 的模糊集为: $E = \{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$, 其对应含义为负大、负中、负小、负零、正零、正小、正中和正大。

其控制策略为:当图像处理计算出 X 轴或 Y 轴误差值大于 ± 100 pixel 时,认为光斑重心已经严重偏移,应采用最大步长进行调整使光斑恢复到 CCD 视野中;当误差小于 ± 100 pixel 大于 ± 40 pixel 时,认为中心位置偏移量较大,需采用较大的步长进行调整恢复;当误差小于 ± 40 pixel 大于 ± 10 pixel 时,认为中心位置偏移量较小,采用较小的步长进行调整恢复;当误差小于 ± 10 pixel 时,认为中心位置偏移量非常小,通过精细调整即可恢复。

模糊控制规则的条件语句形式为

$$\text{if } E = A_i \text{ and if } E_c = B_j \text{ then } U = C_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, 7), \quad (5)$$

其中 A_i, B_j, C_{ij} 是定义在偏差、偏差变化和控制量上的模糊集,根据偏差与偏差变化的模糊值 E, E_c 和模糊控制规则进行合成推理可以得到相应的输出控制量模糊值,如表 1 所示。

在光路调整过程中,首先利用 CCD 获取的图像

计算出光束中心与基准的误差值,求出偏差 E 和偏差的变化 E_c , 然后进行模糊量化处理,按照模糊规则进行模糊推理,解模糊化处理后对应于模糊控制查询表,计算出下次电机运动的步长,重复上面的操作过程,直至光束中心恢复到指定位置。

表1 模糊规则控制
Table 1 Fuzzy control rule

	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	O	O
NM	PB	PB	PB	PB	PM	O	O
NS	PM	PM	PM	PM	O	NS	NS
NO	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PO	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PS	PS	O	NM	NM	NM	NM
PM	O	O	NM	NB	NB	NB	NB
PB	O	O	NM	NB	NB	NB	NB

3.4.3 实验结果

为了验证提出的图像处理和模糊控制的有效性,用如下实验进行验证:按照神光 II 第九路装置的结构构建一个小型的模拟平台,平台由电机作为驱动源带动 12 块反射镜进行移动,由 CCD、光学镜头构成 6 套光学成像系统充当监测点。实验过程中,首先让 6 段光路中的一段反射镜随机移动一定步数使得光束中心发生偏转,然后通过 CCD 获取图像后进行光路调整工作使光束中心回复到基准位置,整个实验重复进行 100 次,分别记录准直所用的时间并绘制成曲线图,如图 4 和图 5 所示。

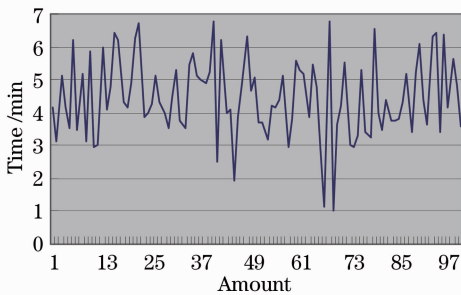


图 4 未滤波的迭代方法

Fig. 4 Iterative method without filtering

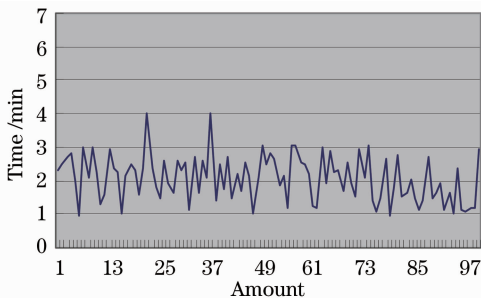


图 5 高斯滤波的模糊控制

Fig. 5 Fuzzy control with Gaussian filter

图 4 为原有方案所用时间曲线,首先进行重心法计算中心误差,然后通过多次迭代后调整至光路中心;图 5 为新设计的方案所用时间曲线,首先采用

改进型高斯滤波重心法计算中心误差,然后用模糊控制方法变步长进行光路调整。由图可知,改进后的方案在用时和稳定性上有较为明显的改进,反射镜调整处理时间基本控制在 3 min 以内完成,系统整体工作时间在 5 min 之内完成。

4 结 论

针对新一代激光装置对自动准直系统提出的新需求,设计了基于以太网的光路自动准直系统并进行了实验验证。结果表明相对于单束小规模激光装置的准直系统,新方案在空间排布和扩展应用上能够更好地适应装置发展的需求,同时使用阈值与高斯滤波相结合的方法减少了噪声干扰;用模糊控制实现自适应变步长调整控制,保证了系统快速准确的自动准直且使系统具备了稳健性。所设计的自动准直系统已于 2012 年 5 月实际投入运行。

参 考 文 献

- Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Study of cavity mirror alignment in multi-pass amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(9): 1161-1165.
- 刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 多程放大腔镜准直研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1161-1165.
- Liu Daizhong, Zhu Jianqiang, Xu Renfang, et al.. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 582-586.
- 刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4 程放大光路自动准直系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 582-586.
- Liu Daizhong, Ding Li, Gao Yanqi, et al.. Far-field detection system of laser beams alignment based on gratings sampling and on-axial illumination[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1101-1104.
- 刘代中, 丁莉, 高妍琦, 等. 基于同轴照明和光栅取样的激光束准直远场检测系统[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1101-1104.
- Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, et al.. Study of mathematical model for auto-alignment in four-pass amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 6992-6997.
- 高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 四程放大自动准直系统数学模型研究[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6992-6997.
- Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, et al.. Far field auto-alignment system used in SG-II-UP system[J]. Acta Physica

- Sinica, 2011, 60(6): 065204.
- 高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 神光 II 升级装置远场准直系统研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 065204.
- 6 Wei Pengfei, Liu Jun, Li Xiaofang, *et al.*. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1590–1595.
- 尉鹏飞, 刘 军, 李晓芳, 等. 激光束实时监测与自动准直系统设计[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1590–1595.
- 7 Chen Youping, Chen Bing, Xie Jingming, *et al.*. Scientific problems and application prospects of the network control systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(9): 961–966.
- 陈幼平, 陈 冰, 谢经明, 等. 网络化控制系统的科学问题与应用展望[J]. 控制与决策, 2004, 19(9): 961–966.
- 8 You Fucheng. Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 8–73.
- 游福成. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 8–73.
- 9 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.
- 10 Liu Li, Kuang Gangyao. Overview of image textural feature extraction methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 622–635.
- 刘 丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 622–635.
- 11 Wang Dan. Image Edge Detection Method Based on Anisotropic Gaussian Filtering[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. 23–31.
- 王 丹. 基于各向异性高斯滤波的图像边缘检测方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. 23–31.
- 12 Zdenko Kovacic, Stjepan Bogdan. Fuzzy Controller Design Theory and Applications[M]. Hu Yuling Transl. Beijing: China Machine Press, 2010. 7–35.
- 科瓦稀奇, 波格丹. 模糊控制器设计理论与应用[M]. 胡玉玲译. 北京: 机械工业出版社, 2010. 7–35.
- 13 Wang Yongfu, Chai Tianyou. Present status and future developments of adaptive fuzzy control[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(3): 193–198.
- 王永富, 柴天佑. 自适应模糊控制理论的研究综述[J]. 控制工程, 2006, 13(3): 193–198.

栏目编辑: 韩 峰