

基于 CCD 的透镜焦距测量实验系统的设计

郭振宇, 谢娜, 何鹏举, 王西玲, 谌静, 徐荣青

(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:针对传统测量焦距读数所引起误差较大的问题,实验系统在传统放大率法测焦距的基础上用 CCD 代替人眼实现数字化测量,并用电控平移台控制步进精度,显著提高了其测量精度和自动化程度。图像清晰度评价是焦距测量的一个关键步骤,在对 CCD 工业相机获取的图像的清晰度评价中,提出了一种改进的灰度差分评价函数,提高了图片清晰度评价精度和速度,从而提高了系统的测量速度。实验进行了光学成像系统的搭建,以 Matlab 为开发平台进行软件开发,实验系统搭建方便,操作简单,测量精度和自动化程度高。实验结果表明,该系统能够对透镜焦距(以正透镜为例)进行准确测量,改进的清晰度评价函数聚焦速度比传统的清晰度评价函数快 3 倍,测量焦距重复精度高于 1%。

关键词:CCD;清晰度评价;焦距;实验系统

中图分类号:TN06

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)05-0174-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.05.036

Design of Experiment System for Focal Length Measurement of Lens Based on CCD

GUO Zhen-yu, XIE Na, HE Peng-ju, WANG Xi-ling, CHEN Jing, XU Rong-qing

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract:The CCD-based experiment system is based on the traditional magnification method to measure the focal length and it uses CCD instead of the human eyes to achieve digital measurement. Meanwhile, the motor control console is used for stepper precision which significantly improves the accuracy and automation. The key to focal length measuring system is whether it can meet the real-time and focus accuracy in image clarity evaluation function. An improved definition evaluation algorithm called improved gray-difference evaluation has been proposed to improve the speed and accuracy of evaluation algorithm. And the quality of system has also been improved. Optical imaging system has been built in experiment and Matlab is used as a software development platform. It is convenient to set up the experiment system with high degree of automation and easy operation. Experimental results show that the system is accurate to measure the focal length of positive lens and the requirements of experiments have been met which the focus time of improved evaluation function is 3 times faster than traditional definition evaluation and that repeatability of measurement accuracy is better than 1%.

Key words:CCD; definition evaluation; focal length; experiment system

0 引言

机器视觉作为人工智能发展的一个分支,应用广泛,用机器代替人眼来做测量无疑是一项提高精度的好方法。机器视觉系统是通过图像摄取装置(CMOS 和 CCD)将被摄取目标转换成图像信号,传送给专用的图像处理系统以获得需要的结果。该技术扩大了光学测量的范围,提高了测量精度,大大增强了光学测量的手段。CCD(Charge Couple Devices)能够把光信号

转换成电荷信号,经外部采样放大及模数转换电路转换成数字图像信号。其具有高解析度、低杂讯、动态范围广、良好的线性特性曲线、大面积感光、低影像失真等特点。

CCD 作为一种提高精度的测量技术正被广泛地应用在光学测量中^[1-6]。文献[1]中传统的测量透镜焦距的方法是用像屏获取图像,再对图像进行人工处理。这种做法不仅测量的精度不高,而且操作难度大。

收稿日期:2016-05-25

修回日期:2016-08-31

网络出版时间:2017-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11304159);教育部博士点基金项目(20133223120006)

作者简介:郭振宇(1991-),男,硕士研究生,研究方向为数字图像处理和光通信技术;谢娜,讲师,研究方向为光信息处理;徐荣青,教授,通讯作者,研究方向为光传感技术、光通信技术和光信息处理。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170313.1545.020.html>

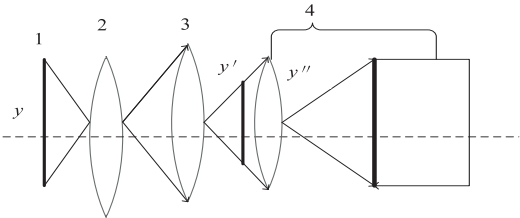
文献[7]中采用了 VC++编写程序来完成对图像的处理,不仅开发效率低,而且还要求编程人员具有较高的代码水平。为了能获得较高精度的焦距测量值,采用 CCD 工业相机作为图像获取的工具;同时又为了能对图像进行高效处理,采用了 Matlab 进行图像的处理和分析,提高了开发效率。设计的光学系统具有搭建方便,结构简单,以及测量精度高等优点。

根据最常用的放大率测焦距法的原理设计了切实可行的光学系统。在算法设计中,针对传统的灰度差分算法聚焦精度低、运算速度慢的缺点,提出了一种改进的灰度差分算法,提高了聚焦速度,判别清晰度只需 400 ms,比传统的清晰度判别方法快了 3 倍;在图像提取和测量中,采用 Canny 算法对图像进行边缘检测,对图像采集的多条光条相邻两条的间隔取平均求得相邻光条像素间隔,同时进行多次像素间隔测量,用多次测量的结果进行像素标定,再进行焦距测量,提高了透镜焦距的测量精度,测量重复精度高于 1%。

1 光学系统的设计

1.1 实验系统原理

放大率法是测量焦距最基本和最常用的方式,图 1 为放大率法测焦距的原理图。



1. 分划板;2. 平行光管;3. 待测透镜;4. 测量系统 CCD 相机

图 1 放大率法测焦距原理图

平行光管物镜焦平面上的分划板经过待测透镜后成像在待测透镜的焦平面上,测量系统获取待测透镜焦平面的像进行处理。设平行光管的焦距为 f ,待测透镜的焦距为 f' ,分划板一对刻线的原像为 y ,经过待测透镜后变成 y' ,则待测透镜焦距与平行光管焦距以及刻线原像和经过透镜成像的关系如式(1):

$$\frac{y'}{y} = \frac{f'}{f} \tag{1}$$

当在测量系统前加一个放大 K 倍的镜头时,得到 y'' 。则可以得到:

$$y'' = Ky' \tag{2}$$

由式(1)、(2)可得:

$$f' = \frac{fy''}{ky} \tag{3}$$

1.2 实验系统搭建

文献[1]中采用像屏来获取图像,该方案是比较

传统的实验系统,读数误差会较大。系统采用 CCD,有效降低了读数误差。

系统的搭建方案如图 2 所示,主要由平行光管、固定装置(用来固定平行光管和透镜)、CCD 工业相机和电控平移台组成。

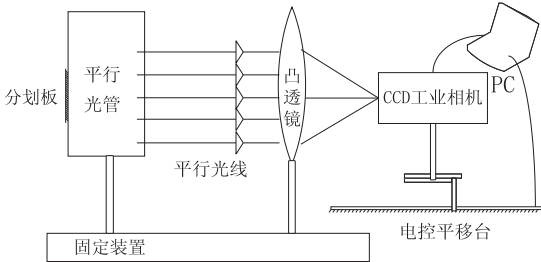


图 2 光学系统搭建方案

平行光管型号采用 F550,焦距 550 mm,口径 55 mm,相对孔径 1:10。电控平移台台面尺寸 150×150,行程 1 000 mm,单脉冲行程 0.001 25,最大速度 10 mm/s,步进电机 1.8°。CCD 工业相机采用 2.0 接口数字摄像机,1/3 Sony ICX445 CCD 传感器芯片,体积为 29 mm×29 mm×29 mm,单个像素尺寸为 3.75 μm×3.75 μm,分辨率为 1 292×964。

所有的器材按图 2 所示搭建,搭建完毕后要先进行平行光管的校调,采用自准直法^[8]。平行光管校调完成后,再调节待测镜和 CCD 工业相机,最终让平行光管、待测透镜和 CCD 工业相机共轴。系统测量的正透镜焦距范围为 30~225 mm,经过计算选用放大倍数为 10 倍的 CCD 工业相机镜头能符合测量范围要求。

2 算法设计

2.1 图像清晰度评价函数

图像清晰度评价函数对 CCD 自动调焦技术起着至关重要的作用。自动调焦是建立在搜索算法上的调焦方法,通过编程对不同对焦位置所获取的图像进行清晰度的判别。聚焦速度和聚焦精度是判断一个调焦方法好坏的重要标准。通过对传统灰度差分算法的改进,提出了一种聚焦精度较传统精度高的灰度差分算法。此外,将图像中心截取 1/4 面积进行清晰度判别,这样减少了图像运算的像素点个数,减少了算法的运行时间,提高了聚焦的速度。

理想的图像清晰度评价函数具有单峰性、无偏性等特点。常用的调焦评价函数^[9-11]有灰度差分绝对值之和(SMD)、Vollath 函数、梯度平方、TenenGrad 函数、熵函数、Brenner 函数等。假设图像 $f(x,y)$ 中某点的灰度值为 $I(x,y)$ 。

(1) Brenner 函数。

$$F_k = \sum_x \sum_y [I(x+1,y) - I(x,y)]^2 \tag{4}$$

(2) Tenengrad 函数。

$$F_k = \sum \sum [S(x,y)]^2 \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases} S(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \\ G_x(x,y) = I(x,y) - I(x+1,y) \\ G_y(x,y) = I(x,y) - I(x,y+1) \end{cases} \tag{6}$$

且 $S(x,y) > T$, T 为阈值。

(3) 梯度向量平方函数。

$$F_k = \sum_x \sum_y \{ G(x,y) + H(x,y) \} \tag{7}$$

其中

$$G(x,y) = [I(x+1,y) - I(x,y)]^2 \tag{8}$$

$$H(x,y) = [I(x,y+1) - I(x,y)]^2$$

(4) Vollath 函数。

$$F = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^N G(x,y) - \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^N H(x,y) \tag{9}$$

(5) 熵函数。

$$F = - \sum p_i \log p_i \tag{10}$$

其中, $p_i = N_i/N$, N 为图像总的像素元素, p_i 为灰度值 i 出现的概率。当 F 值最大的时候图像最清晰。

(6) 灰度差分函数(SMD)。

$$F = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{ G_1(x,y) + G_2(x,y) \} \tag{11}$$

其中

$$G_1(x,y) = |I(x,y) - I(x+1,y)| \tag{12}$$

$$G_2(x,y) = |I(x,y) - I(x,y-1)|$$

式(12)是传统的灰度差分评价函数,只对灰度值水平和垂直方向做差。改进的灰度差分函数对像素 $I(x,y)$ 的八邻域做差值,八邻域的位置如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} I(x-1,y+1) & I(x,y+1) & I(x+1,y+1) \\ I(x-1,y) & I(x,y) & I(x+1,y) \\ I(x-1,y-1) & I(x,y-1) & I(x+1,y-1) \end{bmatrix} \tag{13}$$

灰度差分绝对值只涉及加减法,便于实现,但是抗干扰能力不足,精准度不高。考虑到 CCD 对亮度信号的敏感性,以及选择亮线黑底分划板的情况,当图像比较清晰时,图片中亮度分量值较大;当图像模糊时,图片中的亮度分量值较小。所以,选择八邻域的灰度差分算法,增加了对周围点的判断,提高了聚焦精度。此外,为了提高清晰度判别速度,从图片中心截取 100×100 像素矩阵做差分,减少了运算的点数。所以改进的函数如下所示。

$$F = \sum_{x=50}^{M/2+50} \sum_{y=50}^{N/2+50} (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) \tag{14}$$

其中 $\frac{M}{2}+50$ 为数据

$$\begin{aligned} G_1 &= |I(x,y) - I(x+1,y)| + \\ &\quad |I(x,y) - I(x,y-1)| \\ G_2 &= |I(x,y) - I(x,y-1)| + \\ &\quad |I(x,y) - I(x-1,y)| \\ G_3 &= |I(x,y) - I(x-1,y-1)| + \\ &\quad |I(x,y) - I(x-1,y+1)| \\ G_4 &= |I(x,y) - I(x+1,y-1)| + \\ &\quad |I(x,y) - I(x+1,y+1)| \end{aligned} \tag{15}$$

由图3可以看出,ImproveSMD 比 SMD 有着更好的聚焦精度,对图像清晰度的评价更有优势。此外,ImproveSMD 虽然和 Vollath 函数具有相近的聚焦精度,但是改进的 SMD 的聚焦速度要好于 Vollath 函数。在选取 100 张图片进行测试时,改进的 SMD 只要 400 ms 就能出结果,而 Vollath 要 1.24 s 才能出结果。所以综合考虑聚焦精度和聚焦速度,选取改进的 SMD 作为实验系统的图像清晰度评价函数。

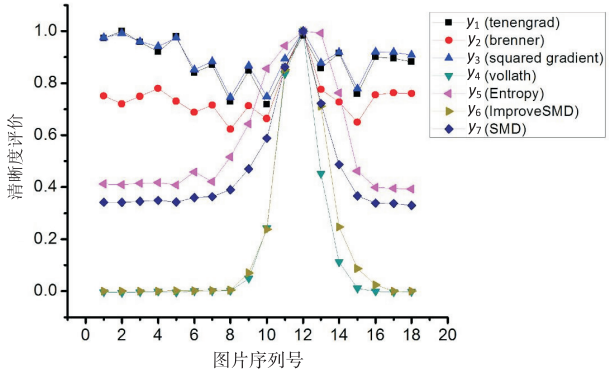


图 3 多种函数清晰度评价曲线图

2.2 图像特征的提取和测量

图4是文中对图像进行提取和测量的处理步骤。

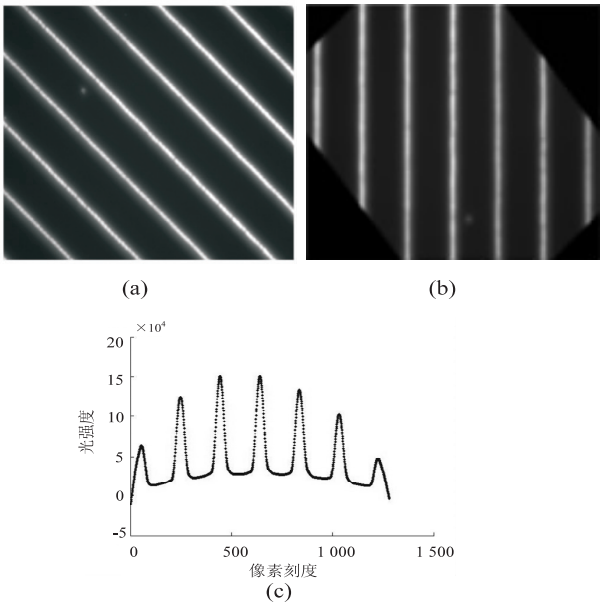


图 4 图像处理过程

在采集的多张图像中用改进的清晰度评价函数找

出一张最清晰的图片,如图 4(a)所示。由于系统采集到的图片相对理想,所以利用简单的非线性滤波器中值滤波完成去噪。然后进行图像校正,步骤为:

(1)采用 Canny 算子进行边缘检测^[12-13],该方法使用两个阈值检测强的和弱的边缘,如果它们被连接到边缘,那么输出只包含弱边缘。由于系统中成像清晰度较理想,边缘轮廓简单,所以采用 Canny 算子进行边缘检测。经过系统多次验证,Canny 算子能精确提取边缘,效果能达到实验系统要求。

(2)边缘检测后,需要进行直线的提取,把图像边缘的直线找出来。

(3)根据直线方程求出直线斜率,并计算出直线与垂直线间的夹角即为倾斜角,再根据这个夹角对图像进行旋转校正。校正后的图像如图 4(b)所示。

考虑到分刻板做的比较精密,分刻板刻线的误差很小,可以认为每条亮线的中心线就是灰度值最大的。对校正后的灰度图像进行各列求和,这样灰度图像的行就是像素刻度值,列就是各列像素灰度值的累和。如图 4(c)所示,七个极值点对应着七条中心线的灰度和,横轴表示像素刻度。相邻极值点对应的横轴坐标两两相减再求和,最后对多个间隔求平均,就可以计算出相邻刻度线的间隔,然后根据式(3)就可以计算出透镜焦距。多条线取平均值是一种减小误差的好方法,对于提高系统的精度很有帮助。

2.3 像素标定

实验系统中,图像处理以像素为单位。所以,需要对像素进行标定,这样才能求出测量焦距和像素之间的标定系数。

由式(3)可以得出,焦距与像素 D 之间满足线性关系: $f = AD + b$ 。其中 b 为系统误差。为了消除系统误差,采用 80 mm 和 200 mm 的标准透镜来确定 A 和 b 的值。

以焦距 $f_1 = 80$ mm 和 $f_2 = 200$ mm 在图像最清晰处的每两条刻线的像素间隔进行 10 次测量,对测得的结果求平均值,得出 80 mm 的像素平均值 $D_1 = 77.711 4$, 200 mm 的像素平均值 $D_2 = 198.433 3$ 。由 $f = AD + b$ 可得:

$$A = \frac{f_2 - f_1}{D_2 - D_1} \quad (16)$$

$$b = f_1 - A D_1$$

测试过程中多次测量像素间隔取平均值是为了减少误差。计算出 $A = 0.994 0$ (mm/pix), $b = 2.754 9$ 。

3 软件设计

该实验系统是用 Matlab 软件开发的,系统主要由电控平移台控制模块、图像采集和存储模块、图像处理

模块和测量模块组成。

软件流程图如图 5 所示。

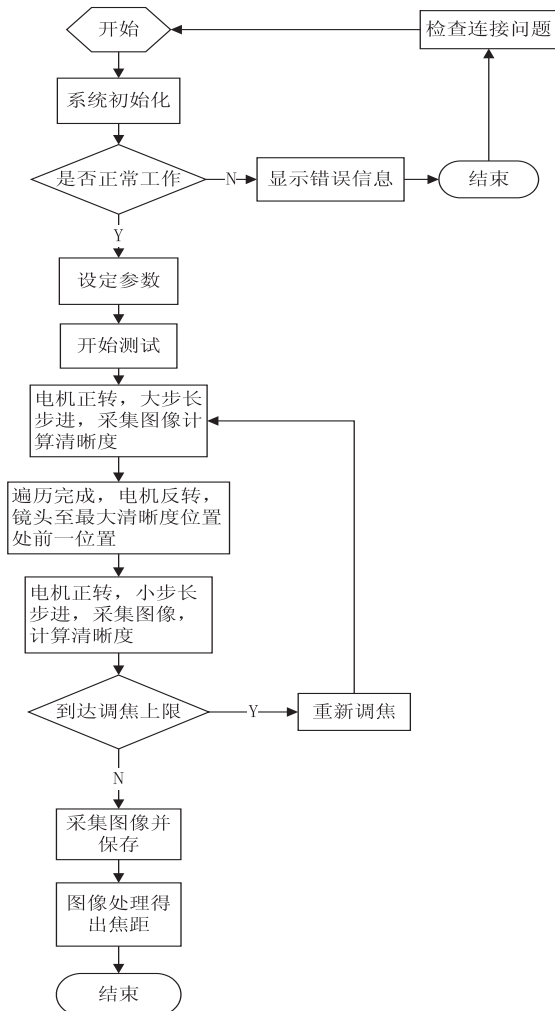


图 5 软件系统流程图

首先对 CCD 工业相机和电控平移台进行初始化, 然后开始测试。一开始电控平移台从初始位置大步长朝远离平行光管方向步进, 用改进 SMD 计算最清晰像的位置; 然后反方向步进回到最清晰位置前一个位置; 再沿远离平行光管方向进行小步进扫描, 并用改进的 SMD 找出最清晰的像, 提取图像。图像提取之后, 经过图像模块的滤波、边缘提取和图像校正之后, 通过测量直接算出焦距。

系统将 CCD 工业相机和电控平移台通过 USB 接口连接笔记本, 通过 Matlab 软件控制电控平移台的步进速度和精度, 同时控制 CCD 拍照的张数, 这就大大提高了自动化程度, 并能快速测得焦距。

4 实验结果

系统硬件和软件设计完成后, 开始进行实际测量。选取了透镜焦距标准值为 30 mm, 80 mm, 200 mm 和 225 mm 进行测量, 每组测 4 次。测量结果如表 1 所示。

表 1 测量结果

测量次数	标准值/mm	像素间隔/pix	测量值/mm	精度/%
1	30	27.600 0	30.189 3	0.63
2	30	27.512 5	30.102 3	0.34
3	30	27.600 0	30.189 3	0.63
4	30	27.532 5	30.122 2	0.41
5	80	77.750 0	80.038 4	0.05
6	80	77.636 4	79.925 5	0.09
7	80	77.727 3	80.015 8	0.01
8	80	77.636 4	79.925 4	0.09
9	200	198.666 7	200.229 6	0.11
10	200	198.647 5	200.210 5	0.11
11	200	198.633 3	200.196 4	0.10
12	200	198.333 3	199.898 2	0.05
13	225	221.363 8	222.790 5	0.98
14	225	221.686 3	223.111 1	0.84
15	225	221.213 8	222.641 4	1.00
16	225	221.363 8	222.790 5	0.98

从表中可以看出,在经过像素标定后,系统在测量范围为 30 ~ 225 mm 间的相对误差低于 1%,表上只列出了 4 组测量结果。实际上,随着测量次数不断增加,在对每个透镜经过 20 次测量后取平均值,得出了重复精度 30 mm 在 0.46%,80 mm 在 0.05%,200 mm 在 0.10%,225 mm 在 0.92%。结果表明,系统利用较简单的硬件搭建再配合软件的处理,实现了符合实验要求的对透镜焦距较高精度的测量和低难度的操作,为后续焦距测量研究奠定了基础。

5 结束语

为提高系统运行速度和焦距的测量精度,设计了用于实验研究的基于 CCD 的透镜焦距测量系统。该系统设计合理,搭建方便,测量速度快,测量精度高。系统加入了软件控制,提高了自动化水平,方便操作。测量结果表明,实验系统在范围为 30 ~ 225 mm 的透镜焦距的测量中相对误差控制在 0.01% ~ 1%,重复精度高于 1%,聚焦速度是 400 ms,相较于传统的聚焦算法快了 3 倍。

虽然实验系统能实现较高精度的焦距测量,但是仍有两个问题:一是在图像采集过程中,容易受外界光

照的影响,这就需要在后续硬件结构上进行改进,可以给硬件系统加工一个避光罩子,以保证系统图像采集可以在一个稳定的环境中进行;二是相应的图像测量算法还需进一步研究,以尽可能地降低像素误差,提高测量精度。在后续软硬件进一步改进之后,相对焦距误差预计能达到 0.10%。

参考文献:

[1] 饶世贤,刘仁明.一种简单测量凸透镜焦距的方法[J].大众科技,2011(1):24-25.

[2] 尹真,谢良星,黄明亮,等.用 CCD 测量凸透镜焦距实验的研究[J].宜春学院学报,2008,30(4):39-40.

[3] 王建伟,安志勇,段杰,等.基于 CCD 的光学系统焦距自动测量技术[J].红外与激光工程,2006,35(S):255-260.

[4] 林盛鑫,赵晓芳,杨雷,等.基于红外 CCD 的掺钎液体闪烁体液位测量方法[J].半导体光电,2016,37(2):294-297.

[5] 王凤娇,景文博,刘学,等.一种基于图像的光学系统测角精度检测方法[J].长春理工大学学报:自然科学版,2016,39(1):71-76.

[6] 袁婷,张峰,陶小平,等.基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J].光学学报,2016(2):101-107.

[7] 毕美华,刘文文.基于 VC++6.0 的 IEEE1394CCD 应用程序开发[J].现代显示,2009(3):38-42.

[8] 吴小平,周起勃.大口径长焦距平行光管系统及其装校[J].光学仪器,1993,15(5):26-28.

[9] Jiang Xueping, Cheng Qian, Xu Zheng, et al. Quantitative measurement of acoustic pressure in the focal zone of acoustic lens—line focusing using the Schlieren method[J]. Applied Optics,2016,55(10):2478-2483.

[10] Benoit A, Callet P L, Campisi P, et al. Quality assessment of stereoscopic images[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing,2009(1):1-13.

[11] 尤玉虎,刘通,刘佳文.基于图像处理的自动对焦技术综述[J].激光与红外,2013,43(2):132-136.

[12] Miao C, Chai Z H, Sun X L, et al. Retinal vessel center line tracking using bilateral filter and canny edge detector[J]. Information Recording Materials,2010,11(4):26-30.

[13] Akinlar C, Chome E. CannySR;using smart routing of edge drawing to convert Canny binary edge maps to edge segments[C]//International symposium on innovations in intelligent systems and applications. [s.l.]:IEEE,2015:1-6.