

文章编号 1004-924X(2013)06-1586-06

多尺度光点图像中心的高精度定位

刘震*, 尚砚娜

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要:提出了一种可快速、高精度提取不规则光点图像中心的多尺度光点图像中心定位方法。首先,结合图像形态学处理和阈值分割确定光点图像区域,初步确定光点图像大小;然后,计算不同尺度空间下各光点图像区域的 Hessian 矩阵,由 Hessian 矩阵特征值确定的判决系数确定最佳尺度,并确定光点图像中心像素级坐标;最后,根据光点区域周边图像二阶泰勒展开式求解光点图像中心亚像素坐标。仿真和实物实验表明,本文算法抗噪声能力强、可实现不同大小光点图像中心的快速高精度定位。在实物试验中,该方法提取光点图像中心的精度优于 0.1 pixel。目前,该方法已在多套视觉测量系统中得到应用。

关键词:计算机视觉;光点中心;Hessian 矩阵;形态学;亚像素;定位

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1586

High precision location for multi-scale light spot center

LIU Zhen*, SHANG Yan-na

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of the Ministry of Education,
Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: liuzhen008@buaa.edu.cn

Abstract: This paper presented a multi-scale light spot center location method to extract the center location for irregular light spots in an image fast and accurately. Firstly, the region of the light spot was segmented by morphology operation and thresholding to determine the size of the image with spots. Then, the Hessian matrix was computed in the multi-scale image space in the light spot region. The best scale was determined by a determination coefficient from the eigenvalue of Hessian matrix, and the pixel level center location was computed. Finally, the image intensity function around the spot center pixel location was approximated by second order Taylor expansion and the sub-pixel center location was computed by finding the maxima of the approximated intensity function. Both the synthetic and real experiments verify that the proposed method has higher location accuracy and stronger robust. In a real experiment, the error of the light spot center location is less than 0.1 pixel. The method proposed has been put into the practice of video measuring systems.

Key words: computer vision; light spot center; Hessian matrix; morphology; sub-pixel; location

1 引言

光学测量目前已经得到了越来越广泛的应用。在光学测量中,光点图像中心提取是一个常见且重要的问题,经常用于三维形貌测量、物体跟踪与定位、摄像机标定、激光准直仪、激光光斑分析仪等光学测量领域^[1-5]。目前,光点图像中心主要有两类提取方法。一类是光点图像边缘拟合定位方法^[6-9],该类方法首先提取光点边缘,再通过边缘拟合确定光点图像中心。比较常用的方法有矩方法^[7]、圆及椭圆拟合^[8-9]等。该类方法适合光点图像边缘较规则的光点图像中心定位,但由于光点图像一般尺寸较小且不规则,通过拟合光点图像边缘无法实现该类光点图像中心的高精度定位。另一类是曲面拟合方法。这类方法通过拟合光点周边图像灰度曲面定位光点图像中心^[10-12],比较常用的有灰度重心法^[10]、高斯曲面拟合法^[11]和 Hessian 矩阵法^[12]。灰度质心法的光斑图像中心提取精度容易受图像噪声影响,精度不高。高斯曲面拟合法需要光点的灰度曲面近似高斯曲面,但在实际应用中,受各种条件影响,光点的灰度曲面不一定近似高斯曲面,从而造成光点图像中心提取精度下降。由于在摄像机成像过程中,光点能量越强,相应的图像灰度值越大,而光点中心点光能量最强,因此光点中心在图像平面的成像中心也就是光点图像灰度曲面的顶点。以上分析表明,曲面拟合方法更适合光点图像中心定位。文献^[12]采用 Hessian 矩阵提取光点图像中心,该方法虽然可以得到较高精度的光点图像中心定位精度,但需要选择相应的光点图像大小才可以得到较高精度,自动性较差,无法在一幅图中同时完成不同大小光点图像中心的高精度定位。

本文介绍一种多尺度光点图像中心提取方法,该方法可以在一幅图中实现不同大小光点图像中心的高精度定位。首先确定光点区域,根据光点区域自动确定最佳尺度空间,再通过定义的判断系数确定光点图像中心像素级图像坐标,最后实现光点亚像素级中心快速定位。文中首先介绍算法原理,然后通过仿真和实物实验来分析和验证本文算法的有效性。

2 光点图像中心定位算法原理

2.1 光点图像区域定位

由于光点亮度要明显高于背景区域,采用阈值分割方法可以有效分割出光点图像区域。但由于测量现场存在光线不均匀等复杂测量现场环境,在靶标图像上呈现灰度明暗分布不均匀等现象,如图 1(a)。如果直接采用阈值分割,部分光点图像可能无法分割出来,出现漏检,如图 1(b)。为了克服光照不均匀等情况,本文采用如下步骤自动定位光点图像区域:

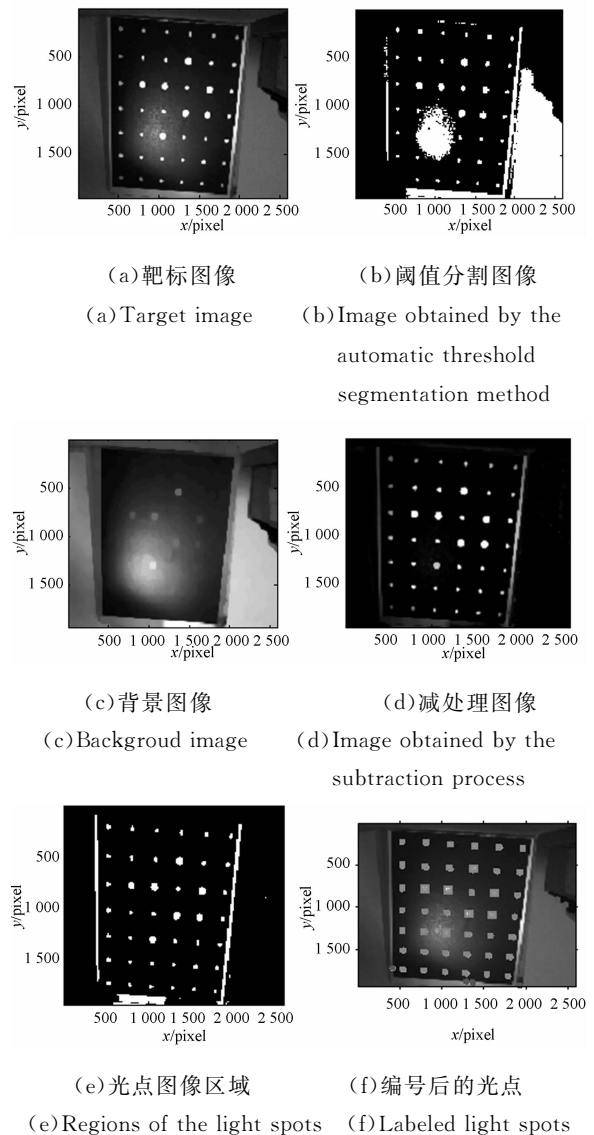


图1 光点图像区域定位结果示意图

Fig. 1 Results of light spot region location

步骤 1: 运用合适的结构元素(本文结构元素为正方形, 内部为 1 的元素形状为碟形, 半径为 15), 对图像进行开运算, 去除图像中光点等峰值区域, 得到图像背景图像, 如图 1(c);

步骤 2: 将源图像与背景图像进行减处理, 得到亮度比较均匀的图像, 如图 1(d);

步骤 3: 采用自动阈值分割方法-大津法提取光点图像区域, 如图 1(e);

步骤 4: 通过提取连通域并分析各区域形状的圆形度去除错误区域, 得到光点图像区域, 并进行编号, 如图 1(f)。

步骤 5: 根据光点图像分割区域的大小, 初步计算出光点半径 r 。

2.2 光点中心像素级定位

理想情况下, 光点图像灰度分布近似高斯曲面分布。设 $I(u, v)$ 是图像灰度分布函数, 计算图像中任意像素 $p=(u, v)^T$ 的 Hessian 矩阵, Hessian 矩阵的行列式可以反映该点图像局部的结构信息。理想光点图像中心点是灰度曲面顶点, 即 Hessian 矩阵行列式为局部最大值, 2 个特征值 λ_1 和 λ_2 相等, 且都小于 0。

$$\mathbf{H}(u, v) = \begin{bmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{uv} & r_{vv} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: r_{uu} , r_{uv} 和 r_{vv} 为图像二阶偏导数, 由 $I(u, v)$ 与高斯卷积核 g 的二阶导数卷积核 g_{uu} , g_{uv} , g_{vv} 卷积得到。

在文献[7]中, 需要人为根据光点图像大小确定式(1)中高斯卷积核的最佳 σ 值, 以保证光点图像中心定位精度。本文在使用高斯卷积核的二阶导数卷积核时, 对其进行 γ 坐标规范化^[12], 如式(2)。

$$\begin{cases} \bar{g}_{uu} = \sigma^2 g_{uu} \\ \bar{g}_{uv} = \sigma^2 g_{uv} \\ \bar{g}_{vv} = \sigma^2 g_{vv} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: \bar{g}_{uu} , \bar{g}_{uv} , \bar{g}_{vv} 为经过 γ 规范化的高斯卷积核的二阶导数卷积核。

由此得到 γ 规范化后的算子 C , 如式(3):

$$C(u, v) = \sigma^4 (r_{uu} r_{vv} - r_{uv}^2), \quad (3)$$

式(3)中 σ 为:

$$\sigma = r/\sqrt{2}, \quad (4)$$

r 为 2.1 节中计算得到的光点半径, 单位为像素。

图 2 为算子 C 的分布图。根据光点图像灰度曲面形状特征, 设定光点中心点的判别条件如

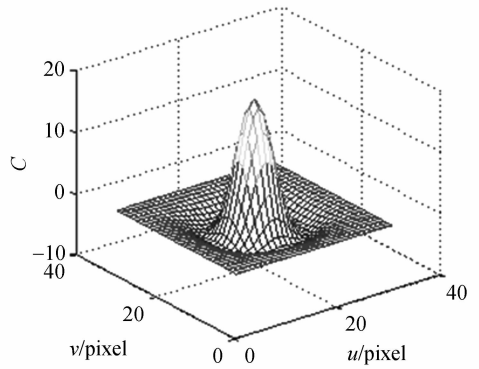


图 2 算子 C 分布图

Fig. 2 Distributing image of C

下: $C(u, v)$ 大于 0, 且为局部极大值。

由于图像噪声和光点边缘噪声的影响, 2.1 节中计算得到的光点图像的半径并不一定准确。在实际提取光点中心图像坐标时, 可根据光点图像的半径确定 σ_i , 在附近选取 σ_{i-1} 和 σ_{i+1} 。分别采用 σ_{i-1} , σ_i 和 σ_{i+1} 计算光点区域的 C 值图, 得到 C_{i-1} , C_i 和 C_{i+1} 。分别在 C_{i-1} , C_i 和 C_{i+1} 中根据判断条件选取最大的局部最大点为光点候选点, 再比较 C_{i-1} , C_i 和 C_{i+1} 中局部最大点的大小, 最大点的为光点图像中心像素位置, 对应的为光点图像中心最佳。

2.3 光点中心亚像素级定位

设 2.2 节中确定的光点图像中心像素位置为 $p_0(u_0, v_0)^T$, 则亚像素位置 $\tilde{p}_0 = (\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)^T = (u_0 + s, v_0 + t)^T$ 一定在 p_0 的邻域范围内, 其中 $(s, t) \in [-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$ 。在满足高斯分布的光点图像中, (u_0, v_0) 附近区域内亚像素位置点 $(u_0 + s, v_0 + t)$ 的灰度值可以用二阶泰勒展开式来表示:

$$r(u_0 + s, v_0 + t) = r + (s \ t) \begin{pmatrix} r_u \\ r_v \end{pmatrix} + \frac{1}{2} (s \ t) \begin{bmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{uv} & r_{vv} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: r_u , r_v 分别为图像灰度函数 $r(u, v)$ 在点 (u_0, v_0) 处的一阶偏导数。由曲面顶点性质可知, 该展开式在顶点处相对于 s, t 的一阶导数为 0, 由此可得:

$$\begin{cases} s = \frac{r_v r_{uv} - r_u r_{vv}}{r_{uu} r_{vv} - r_{uv}^2} \\ t = \frac{r_u r_{uv} - r_v r_{uu}}{r_{uu} r_{vv} - r_{uv}^2} \end{cases}. \quad (6)$$

根据式(6)即可以确定光点图像中心的亚像

素级坐标。

3 仿真结果

为了验证算法有效性,本文分别针对高斯卷积核的 σ 、图像噪声和光点边缘噪声对光点图像中心提取精度的影响进行仿真实验。最后将本文方法与典型的两种光点图像中心提取方法进行对比实验,分析验证本文算法的有效性。

3.1 高斯卷积核中 σ 对提取精度的影响

仿真实验中光点半径依次为 3、7 和 11 pixel。在图像每个像素的灰度值上加入均值为 0,方差为 10 的图像噪声。 σ 由 $1/\sqrt{2}$ 变化到 $21/\sqrt{2}$,间距为 $1/\sqrt{2}$ 。针对每个 σ ,重复 100 次仿真实验,通过比较光点图像中心的计算值和理论值,计算光点图像中心定位 RMS 误差(RMS 误差中文全称均方根误差,它是测量值与真实值偏差的平方和测量次数比值的平方根)。

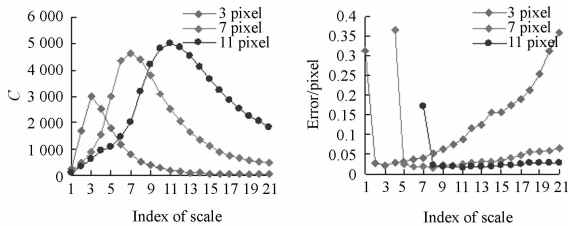


图 3 不同大小光点对应的 C 值和 RMS 误差

Fig. 3 C value and RMS error of the various light spot

图 3 显示不同大小光点随 σ 变化对应的 C 值和随 σ 变化对应的 RMS 误差。由图 3.4 可以看出,不同大小光点在计算 C 值时,对应 C 值最大的 σ 也是提取光点中心定位 RMS 误差最小的 σ ,它的大小与式(4)中所定义的相符合。这证明了通过确定光点半径来确定最优 σ 的有效性。

3.2 图像噪声和光点边缘噪声对定位精度的影响

在实际光点提取中,受图像噪声和光点衍射等影响,光点图像边缘并不规则。下面将研究图像噪声和光点边缘噪声对定位精度的影响。

在仿真实验中,光点半径为 7 pixel。为了研究光点边缘不规则对定位精度的影响,在光点边缘上加入均值为 0,方差为 0~2 pixel 的高斯噪声分别。同时,为了研究图像噪声对光点图像中心

定位精度的影响,均值为 0,方差为 0~20 灰度值的高斯噪声分别被加在光点图像上。高斯卷积核中 σ 为最佳值。对每组噪声,分别独立重复 100 次,计算光点定位 RMS 误差。

图 4 为不同图像噪声和不同光点边缘噪声下光点定位精度。由图 4 可以看出,光点边缘噪声和图像噪声的增加都会降低光点定位精度,光点边缘噪声对光点定位精度的影响要大于图像噪声对光点定位精度的影响。在实际测量系统中,图像噪声一般小于 20/256,在此情况下本文方法的光点图像中心定位精度优于 0.1 pixel。

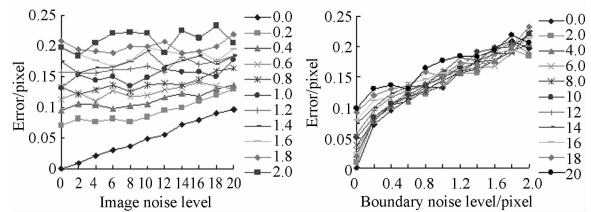


图 4 不同图像噪声和光点边缘噪声下光点定位精度

Fig. 4 Light spot location RMS errors v. s. image noises and edge noises

3.3 精度比较实验

为了比较分析本文算法相对已有算法的优越性,下面分别采用重心法和高斯拟合法提取光点图像中心。在比较实验中,光点图像被加入均值为 0,方差为 2~20 灰度值的高斯噪声。在每个图像噪声水平,首先根据 C 值分布图确定光斑图像中心的像素级坐标,再分别采用重心法、高斯曲面拟合法和本文算法定位光点图像中心亚像素级坐标,重复计算 100 次。图 5 为具体仿真试验结果,从图中可以看出,重心法的光点图像中心定位

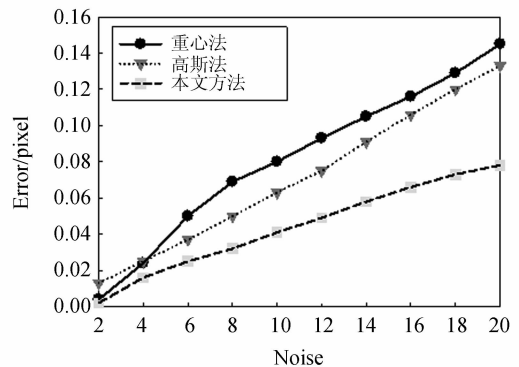


图 5 3 种方法精度比较结果

Fig. 5 Location errors of three methods

精度最差,高斯曲面拟合方法略好于重心法,本文算法明显好于以上两种算法。尤其是在大图像噪声的情况下,本文算法优势更明显。通过该仿真实验可以看出本方法相对已有算法的优越性。

4 实物试验

为了进一步验证本文算法的可行性,采用带有不同大小光点图案的平面靶标,根据文献[14-15]中介绍的标定方法完成摄像机内部标定。在

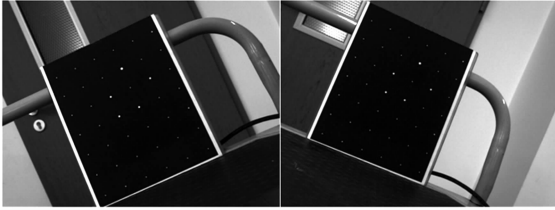


图 6 2 个摆放位置的图像

Fig. 6 Images of two target positions in camera calibration

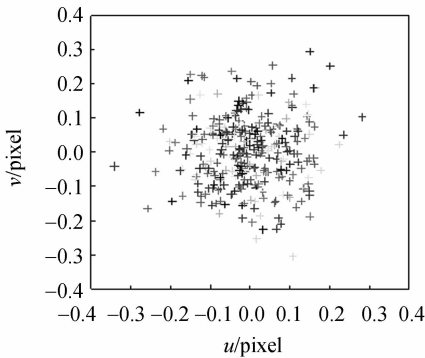


图 7 投影图像误差

Fig. 7 Projection image errors

靶标图案中,特征点分布为 6×7 , 中间分布有五个大光点,其余全部为小光点,特征点之间间距为 30 mm。将平面靶标在摄像机前摆放 8 次,图 6 为摄像机拍摄的其中 2 个摆放位置的靶标图像。采用本文介绍方法提取每个摆放位置的靶标光点图像中心标定摄像机内部参数。图 7 为摄像机标定中投影图像误差,在 u 方向为 0.09 pixel, v 方向为 0.10 pixel,这进一步证明了本文算法的有效性。实物试验中采用的是打印纸制成的平面靶标,如果采用更好的高精度靶标,本文算法可以得到更高的定位精度。

5 结 论

针对光点图像中心定位问题,本文提出一种多尺度光点图像中心快速自动定位方法。该方法首先通过图像形态学处理和阈值分割提取光点图像区域,根据光点图像区域大小初步判断光点图像最优尺度范围,然后通过计算多尺度空间下图像 Hessian 矩阵确定光点图像中心点坐标。通过多尺度图像处理,该方法可实现不同大小,不规则光点图像中心自动定位。结合图像形态学和阈值分割方法提取光点图像区域,进而优化尺度空间,提高了图像处理速度。实物试验和仿真实验证明,本文算法优于传统的高斯拟合和重心法,在实际使用中可以达到优于 0.1 pixel 的图像中心定位精度。

参考文献:

- [1] 何博侠,何勇,卜雄洙,等. 机器视觉多视场协同测量方法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2821-2829.
HE B X, HE Y, BU X Z, et al.. Cooperative measurement method of multi-FOV for machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2821-2829. (in Chinese)
- [2] 李磊刚,梁晋,唐正忠,等. 飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9):1929-1938.
LI L G, LIANG J, TANG Z Z, et al.. Optical and dynamic measuring system for movement data of

aircraft structural parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):1929-1938. (in Chinese)

- [3] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1636-1644.
HU H, LIANG J, TANG Z Z, et al.. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1636-1644. (in Chinese)
- [4] 胡文川,袁祖荣,张国雄. 大尺寸空间异面直线夹角的检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1427-1433.
HU W C, QIU Z R, ZHANG G X. Measurement of large-scale space angle formed by non-uniplanar

- lines [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(7):1427-1433. (in Chinese)
- [5] 薛婷,曹兆峰,金俞鑫. 基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2012,20(7):124-130.
XUE T, CAO Z F, JIN Y X. Calibration of three-dimensional measurement system for gas-liquid two phase flow based on virtual stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 124-130. (in Chinese)
- [6] THOMAS S M. A simple approach for the estimation of circular ARC centre and its radius [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1989,45(3):362-370.
- [7] LYVERS E P, MITCHELL O R, AKEY M L. Sub-pixel measurements using a moment-based edge operator [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 11(12):1293-1309.
- [8] 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.
KONG B, WANG ZH, TANG Y S. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese)
- [9] 秦义,付小宁,黄峰. 激光光斑定位的多圆拟合算法的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006,26(4): 518-523.
QING Y, FU X N, HUANG F. Multi-circle fitting algorithms for laser spot location [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2006,26(4):518-523. (in Chinese)
- [10] 尚鸿雁. 激光光子准直三自由度动态角度测量技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2006:89-91.
SHANG H Y. 3-DOF dynamic angle measurement based on laser auto-collimation [D]. Beijing: Beihang University, 2006:89-91. (in Chinese)
- [11] 李为民. 大尺度范围内视觉测量技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2006:34-37.
LI W M. *Research on large-scale vision measurement technology* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 34-37. (in Chinese)
- [12] 魏振忠,高明,张广军,等. 一种光斑图像中心的亚像素提取方法[J]. *光电工程*, 2009,36(4):7-12.
WEI Z Z, GAO M, ZHANG G J, et al.. Sub-pixel Extraction Method for the Center of Light-spot Image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4):7-12. (in Chinese)
- [13] LINDEBERG T. Feature detection with automatic scale selection [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998,30(2):77-116.
- [14] ZHANG Z. Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000,22(11): 1330-1334.
- [15] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for Matlab[EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

作者简介:



刘震(1975—),男,辽宁沈阳人,博士,讲师,2010年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电检测及计算机视觉方面的研究。E-mail: liuzhen008@buaa.edu.cn



尚砚娜(1986—),女,河北廊坊人,硕士研究生,2009年于燕山大学获得学士学位,主要从事视觉测量算法研究。E-mail: shyn0258@163.com