

文章编号 1004-924X(2011)06-1360-07

基于灰度差异的棋盘格角点自动检测

屠大维*, 张翼成

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:提出一种基于灰度差异的棋盘格角点自动检测方法,该方法利用一种圆形角点检测器,在不对棋盘格图像做预处理情况下,能够准确检测有一定噪声或者较模糊的图像上的棋盘格角点。首先,根据角点及领域附近点的灰度差异,采用角点检测器初步检测角点;其次,根据棋盘格角点张角近似为直角和角点灰度对称性,对初步检测的角点进一步筛选获得棋盘格目标检测角点;最后,采用灰度平方重心法将像素级棋盘格目标检测角点亚像素级化,精确确定角点位置。实验结果表明,该方法在图像较模糊的情况下能够较精确检测出角点,角点重投影精度达到0.1像素级,并能获得形成角点的张角角度值;该方法可以应用于具有特殊角度的角点检测,且由于运算速度快,误差小,能够应用于机器视觉摄像机的在线标定。

关键词:摄像机标定;灰度差;棋盘格角点;自适应检测

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1360

Auto-detection of checkerboard corners based on grey-level difference

TU Da-wei*, ZHANG Yi-cheng

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: tdwshu@staff.shu.edu.cn

Abstract: A checkerboard pattern corners auto-detection method so-called circle corner detector for camera calibration is presented based on the grey-level difference, and it can detect the checkerboard corners from the noise-image or blurred image without any image preprocessing. Firstly, a circle corner detector is designed for checkerboard corners detection, getting a preliminary result by the grey-level difference between the corner and its neighboring points. Secondly, the pixel level corners can be obtained through sifting the preliminary results according to the feature of the checkerboard pattern corners whose angle are nearly right-angle and grey value nearby is symmetry. Finally, a sub-pixel level corner can be achieved by grey-level squared weight-center method and therefore correct position of the checkerboard corner can be determined. The experiment results show that a high accuracy of checkerboard pattern corner detection has been achieved, and the corner reprojection error is less than 0.1 pixel level even though the image is blurred. For the circle-corner-detector based checkerboard pattern corners auto-detection method can obtain the splayed angle value of the corner, it can also be applied for various corner detection with special angles, and also for its high calculating speed and high accuracy, it can be appropriate for on-line camera calibration in machine vision.

Key words: camera calibration; grey difference; checkerboard pattern corner; auto-detection

收稿日期:2010-07-01;修订日期:2010-10-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60774102, No. 51075252);上海大学研究生创新基金资助项目(No. SHUCX102206)

1 引言

角点是二维图像灰度变化最剧烈或图像边缘曲线上曲率值最大的强特征点。它具有旋转不变性和不随光照条件变化而改变的优点,因而能够在图像匹配、摄像机标定、三维重建、运动物体的跟踪及模式识别等机器视觉诸多领域有着重要应用^[1-4]。棋盘格角点作为一种特殊的角点,也被广泛的应用于摄像机标定中。通常棋盘格角点检测算法大致可以分为两类。一类是基于边缘的角点检测算法,如文献[5]利用棋盘格模版图像内部角点的局部灰度特征和栅格线构成的结构特征实现了棋盘格内部角点的自动识别与定位;而文献[6]通过先用 Sobel 算子求取棋盘格图像边缘,进而求取边缘和角点,再运用 Susan 算子来进行优化。另一类是基于灰度的角点检测算法,如文献[7]对 Harris 算子的棋盘格检测算法进行了改进,实现了对摄像机畸变较大的图像的角点自动提取;文献[8]利用棋盘格图像对称和灰度值对比明显的独特性质,提出了 SV 算子检测方法。上述文献提出的方法各有所长,但如果需要获得较好的检测结果,大部分都需要对标定的图像做一些前期的预处理(如平滑和边缘检测等)。本文提出的基于灰度差异的棋盘格角点自适应检测算法可以很好地避免上述问题,能够比较精确地检测角点,而且相对于文献[8],本文可以计算出形成角点的张角,从而稍加改进可以检测如文献[7]中的三角形标定模版图像和其他类型的模版图像。

2 灰度差异角点检测

2.1 角点检测原理

角点存在于图像中边缘走向发生明显变化或多个灰度区域相交的部位。角点相对于边缘有如下特点:以某一像素为圆心作两个半径不同的同心圆,若同心圆与角点领域内边缘有两个以上的角点,则圆心像素点与不同半径同心圆和边缘的两个角点会形成两个圆心角。如果圆心角相等或其差小于固定阈值,可初步认为这个像素点为角点^[9]。如图1所示,同心圆与角点领域内的两条

边缘上相交于 A_1, P_1, A_2, P_2 , 若中心像素 O 与 A_1, P_1, A_2, P_2 存在下述关系

$$|\angle A_1OP_1 - \angle A_2OP_2| \leq \theta, \quad (1)$$

式(1)中 θ 为设定的角度判定阈值,满足式(1)则可初步认为中心像素为 O 角点。

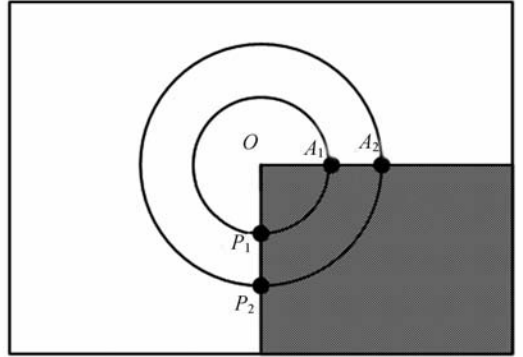


图1 角点检测原理示意图

Fig. 1 Image of corner detection principle

2.2 灰度差异角点检测器

假定拍摄的角点图像大小为 $M \times N$, 在角点检测前先初始化一个元素为 0 的 $M \times N$ 矩阵 C , 图像中每一像素对应矩阵 C 中一个元素。令图像中的每一个像素的灰度值为 $f(i, j)$, 以该像素为中心定义一个圆形检测窗口 W , W 的半径为 r_1 像素, 则窗口中所有像素点的位置集合可以如下表示

$$E = \{(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_k, j_k)\}, \quad (2)$$

其中 $i - r_1 \leq i_k \leq i + r_1, j - r_1 \leq j_k \leq j + r_1$, 且一定存在 $i_k - i_{k-1} = 1$ 或者 $j_k - j_{k-1} = 1$ 。

在图像 $f(i, j)$ 点中心, 计算窗口 W 内像素灰度的平均值

$$m(i, j) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f(i_k, j_k), \quad (3)$$

式(3)中 k 为窗口 W 内像素的个数。则在窗口 W 中, 每个像素 $f(i, j)$ 与均值 $m(i, j)$ 的差值为 $s(i, j) = f(i, j) - m(i, j)$, 形成的集合为:

$$S(i, j) = \{f(i_1, j_1) - m(i, j), \dots, f(i_k, j_k) - m(i, j)\}, \quad (4)$$

将集合 $S(i, j)$ 中不为 0 的元素分为正值和负值两类, 为防止噪声干扰, 对式(4)进行中值滤波, 并计算 $S(i, j)$ 中过零点的像素个数 N 。过零点的

像素分为两种,按照逆时针方向,一种为从正值向负值的过零点像素,一种为从负值向正值的过零点像素,这两种过零点像素的个数分别为 N_1 和 N_2 。如果 N_1 和 N_2 都存在,则分别确定致使符号发生变化的像素点坐标。寻找过零点像素相邻两像素差值(横向从左向右)为正值最大值 C_{pm} 时致使符号发生变化的像素点坐标 $P(i_{p_1}, j_{p_1})$ 和负值最大值 C_{am} 时致使符号发生变化的像素点坐标 $A(i_{a_1}, j_{a_1})$ 。不难得知 A_1 和 P_1 不相邻。分别记录这些像素点对于中心点的方向 D_{1pm} 和 D_{1am} ,以及它们与中心点之间的夹角 A_{1pa} 。若中心像素点为角点,则 D_{1pm} 和 D_{1am} 为可能形成该角点的两条边缘线方向。此时有:

$$A_{1pa} = \arccos \frac{OP_1 \cdot OA_1}{|OP_1| \cdot |OA_1|}$$

$$\varphi_1 < A_{1pa} < \varphi_2, \quad (5)$$

其中 O 为像素坐标零点, φ_1 和 φ_2 为根据形成角点的张角而设定的角度阈值,满足式(5)认为 A_{1pa} 为有效值。确定一个 A_{1pa} 之后,调整圆形检测器的半径为 r_2 且 $r_2 \leq r_1$, 在 $r_1 < r < r_2$ 所在环形区域与边缘线方向成 $\pm 45^\circ$ 区域(由于数字图像离散型)的交集区域按照上述步骤再寻找 A_{2pa} 。如果 $|A_{2pa} - A_{1pa}| \leq \theta$ (θ 为角点判定阈值),则可以初步认为中心像素点为角点。由于圆形检测器上两点之间不平滑过渡或边缘平滑和 θ 不可能为 0,会导致角点周围部分像素也符合检测条件,从而形成伪角点。去除伪角点采用局部灰度最大权值原理^[9]。即:

$$W(i, j) = \sum_1^k (f(i_k, j_k) - m(i, j))^2, \quad (6)$$

当满足式(6)时,判定中心像素点为角点,此时在矩阵 C 中中心像素坐标对应的元素为 1。确定圆形角点检测器之后,对整幅图像按照先横向后纵向的遍历原则进行遍历即可确定角点的位置。

2.3 棋盘格角点检测

摄像机标定中,棋盘格模版是最常用的标定模版,棋盘格图像模版如图 3 所示,其由黑白相间的正方形组成,并以角点为特征点。

图 4 为抽取的方格放大图,从图 4 可以得知黑白相间的方格具有如下两个特征:其一为形成角点 O 的张角 φ 近似是直角(综合考虑光轴垂直



图 3 棋盘格模版标定图

Fig. 3 Image of checkerboard pattern

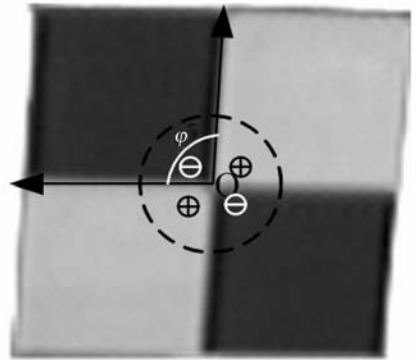


图 4 方格对称检测图

Fig. 4 Corner detection image of symmetry check feature

和不垂直两种情况);其二是以角点 O 为圆心的圆形检测器内图像关于 O 中心对称。根据特征一可以设定式(5)中的 φ_1 和 φ_2 ,从而可以检测张角近似为直角的角点,但是张角近似为直角的不一定为棋盘格角点,需根据特征二来进一步筛选。

根据特征二可知关于圆心中心对称的点灰度值近似相等。根据 2.2 部分的圆形检测器相关知识并结合式(4)可知集合 $S(i, j)$ 中正值和负值的像素个数近似相等且近似为 $S(i, j)$ 集合中元素个数总数的一半,因而可以统计集合 $S(i, j)$ 中元素正值和负值的个数为 sum_p 和 sum_a ,存在 $|sum_a - sum_p| \leq n$ (n 为较小值);同时存在关于中心元素对称的两像素点灰度值近似相等,故在集合 $S(i, j)$ 中存在 $|f(i_k, j_k) - f(i+j-j_k, i+j-i_k)| \leq T$ (其中 T 为设置的灰度阈值,应该取较小值)。当通过圆形检测器检测出角点后,再通过两个强特征的筛选,即可获得棋盘格角点。

3 角点检测位置的亚像素级化

通过文中第二部分棋盘格角点检测,可以准确检测出像素级棋盘格角点。但是,进行摄像机精确标定时,必须将像素级角点坐标更加精确化(即亚像素级化)。对棋盘格图像分析可知,棋盘格角点图像属于灰度对称分布,而且黑白方格对比度比较明显,因而可以选取灰度平方重心法^[10]来进行角点坐标精确化。

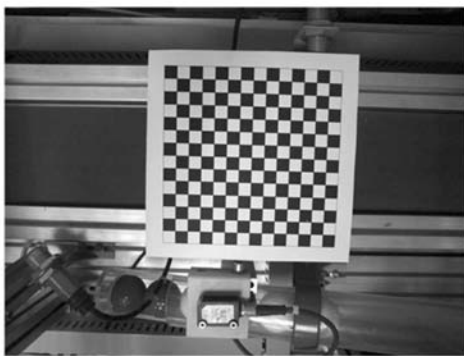
设角点的灰度中心坐标为 (u_0, v_0) ,则有:

$$u_0 = \frac{\sum_1^n i \times f^2(i, j)}{\sum_1^n f^2(i, j)}; v_0 = \frac{\sum_1^n j \times f^2(i, j)}{\sum_1^n f^2(i, j)}, \quad (7)$$

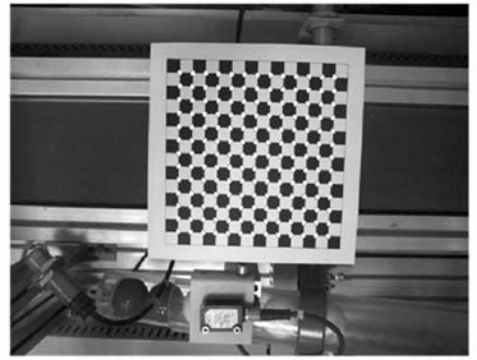
其中 n 为圆形检测器包含的像素总数, i 和 j 为圆形检测器中任意一点坐标, $f(i, j)$ 为坐标为 (i, j) 点的灰度值。通过式(7)可以精确设置角点像素坐标。

4 实验结果

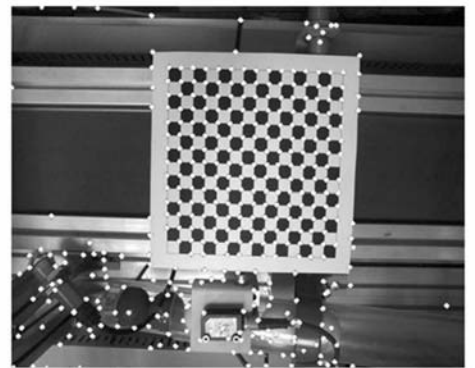
为了验证方法的有效性和正确性,采用 Casio-EX-Z100 相机拍摄 15 幅 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 大小的棋盘格标定图,棋盘格模版图由 13×13 的方格组成。按照本文棋盘格角点检测的顺序分别对这 15 幅图像进行角点检测。抽取其中一幅图像如图 5(a),角点检测效果如图 5(b);对这幅图像再采用 Harris 角点检测算法进行角点检测,其效果如图 5(c)所示。



(a) 拍摄原图
(a) Checkerboard image



(b) 本文方法角点检测图
(b) Result image by proposed method



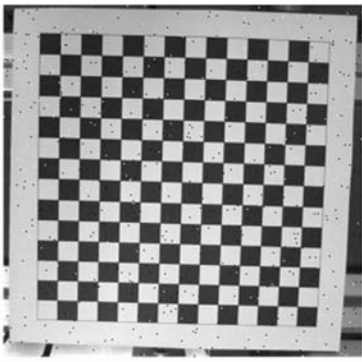
(c) Harris 角点检测图
(c) Result image by Harris method

图 5 本文方法与 Harris 方法角点检测效果(无噪声)对比图

Fig. 5 Detected results (no salt and pepper noise) by proposed method and Harris method

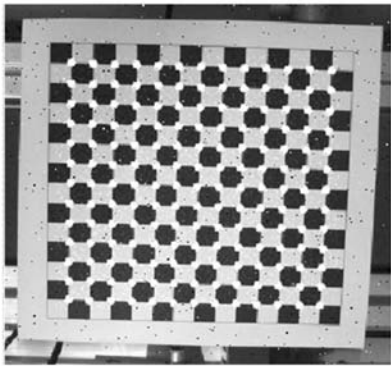
由图 5(b)可知,通过本文提出的灰度差异角点检测方法能够全部检测出符合棋盘格角点特性的角点,不存在漏检情况和误检情况;而从图 5(c)可以看出 Harris 角点检测方法也能够比较完整地检测到整幅图像的角点,但同图 5(b)中相同核心区域棋盘格角点检测相比,存在极少量(小于 3 个)漏检或误检情况。

然后对所抽取的图像进行模糊化处理并添加 0.03 的椒盐噪声,处理后的图像如图 6(a)所示,再分别采用本文角点检测方法和 Harris 角点检测方法进行棋盘格角点检测,检测的效果图如图 6(b)和图 6(c)所示。



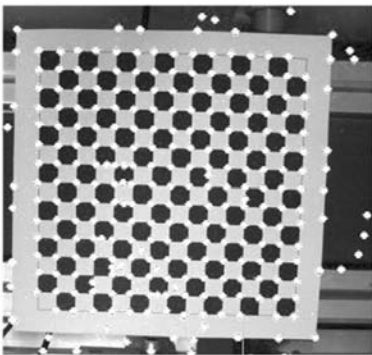
(a) 加椒盐噪声图像

(a) Checkerboard image



(b) 本文方法角点检测图

(b) Result image by proposed method



(c) Harris 角点检测图

(c) Result image by Harris method

图 6 本文方法与 Harris 方法角点检测效果(加噪声)对比图

Fig. 6 Detected results (adding salt and pepper noise) by proposed method and Harris method

由图 6(b)可见,尽管对原图进行了加噪和模糊处理,但是本文采用的棋盘格角点检测方法依

然能够完整准确地检测出所有角点。而 Harris 角点检测方法对棋盘格核心区域检测则存在比较明显的漏检和误检情况,且相对于清晰原图检测角点的情况,漏检和误检的角点增多(大于 10 个)。

图 7 为加噪和不加噪两种情况下,将检测到的角点按从大到小顺序排列后各角点的张角分布情况。

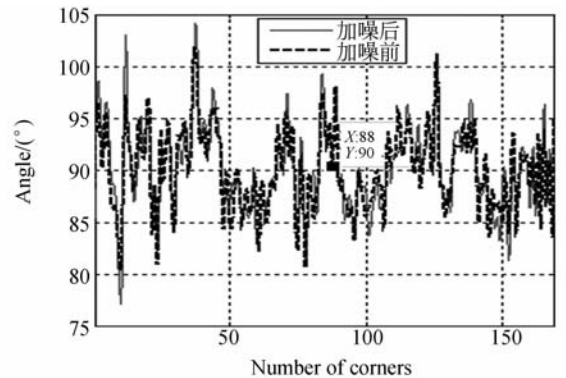


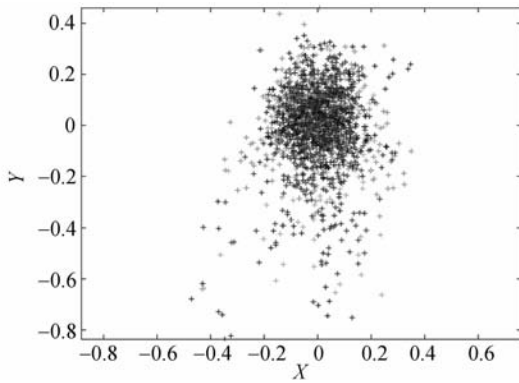
图 7 角点张角分布

Fig. 7 Angle of every corner

图 7 中,粗虚线为加噪前检测出的 169 个角点的张角分布情况,细实线为对应加噪后检测出的角点张角分布情况。从中可以看出无论是加噪前还是加噪后,检测获得棋盘格角点的张角与实际张角相比,偏差绝大部分控制在 $\pm 10^\circ$ 以内,且加噪后角点的张角与加噪前比较相近。由此可见,用本文方法检测出的角点对噪声具有很好的鲁棒性,进一步说明了本文采用的角点检测方法是有效的。

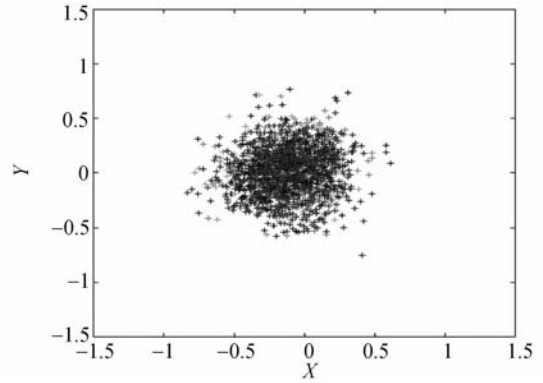
应用本文角点检测方法对 15 幅棋盘格图像完成角点采集后,运用文献[11]中的张正友摄像机标定方法对 15 幅棋盘格图像检测所得的所有角点进行摄像机标定,得到的重投影误差如图 8 所示。

从图 8 可以得出,本文采用的角点检测算法具有较高的精度,角点重投影平均误差为(0.2, 0.3)像素。由此可以说明本文采用的角点检测算法是正确的。



(a) 本文方法检测角点重投影误差图

(a) Reprojection errors by proposed method



(b) Harris角点检测算子检测角点重投影误差图

(b) Reprojection errors by Harris method

图8 两种方法下棋盘格角点检测重投影误差分布图

Fig. 8 Reprojection errors of checkerboard corners by proposed method and Harris method

5 结 论

本文提出了基于灰度差异的棋盘格角点检测方法,实验表明该方法具有较好的鲁棒性和稳定性,对有一定噪声和模糊的原始图像在不经预处理

理的情况下仍然具有较好的角点检测结果和标定结果。圆形检测器能够获得形成角点的张角角度值,因而能够很好地应用于具有特殊角度的角点检测,且圆形检测器中间步骤采用的都是初级的四则运算,运算速度快,误差小,因而能够较好地应用于摄像机在线标定。

参考文献:

[1] 陆宏伟,于起峰.最小核值相似区低层次图像处理算法的改进及应用[J].应用光学,2002,21(1):75-87.

LU H W, YU Q F. The Improvement of susan low level image proceeding and its application[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002,21(1):75-87. (in Chinese)

[2] ZHOU D X, LIU Y H, CAI X P. An efficient and robust corner detection algorithm [C]. *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, HangZhou*, 2004:4020-4023.

[3] 潘淑杰,董守平,王红丽.应用灭点标定的立体视觉自由曲面三维重建[J].光学精密工程,2009,17(5):1127-1131.

PAN S J, DONG S P, WANG H L. Three dimensional reconstruction of stereo vision free-form surface based on vanishing-point calibration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1127-1131. (in Chinese)

[4] 杨晓敏,吴炜,卿鄰波,等.图像特征点提取及匹配

技术[J].光学精密工程,2009,17(9):2276-2282.

YANG X M, WU W, QING L B. Image feature extraction and matching technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2276-2282. (in Chinese)

[5] 王忠石,徐心和.棋盘格模版角点的自动识别与定位[J].中国图像图形学报,2007,12(4):618-622.

WANG Z SH, XU X H. Auto-recognition and auto-location of the checkerboard pattern corners [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(4): 618-622. (in Chinese)

[6] 罗钧,王莲,侯艳.摄像机标定的棋盘格亚像素角点检测[J].重庆大学学报,2008,31(6):615-619.

LUO J, WANG L, HOU Y. Sub-pixel corner detection of tessellated picture based on camera calibration[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(6): 615-619. (in Chinese)

[7] 侯建辉,林意.自适应的Harris棋盘格角点检测算法[J].计算机工程与设计,2009,30(20):4741-4801.

HOU J L, LIN Y. Adaptive Harris X-corner detection algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(20): 4741-4801. (in Chinese)

- [8] 刘阳成,朱枫.一种新的棋盘格角点检测算法[J].中国图像图形学报,2006,11(5):606-611.
LIU Y CH,ZHU F. A new algorithm for X-corner detection [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006,11(5):606-611. (in Chinese)
- [9] 温江涛,王伯雄.基于灰度几何特征的角点检测[J].光学技术,2009,35(5):668-671.
WEN J T,WANG B X. Corner point detection based on geometrical features with grey-level difference [J]. *Optical Technique*, 2009, 35 (5): 668-671. (in Chinese)
- [10] 罗钧,王莲,侯艳.摄像机标定的棋盘格亚像素角点检测[J].重庆大学学报,2008,31(6):615-619.
LUO J,WANG L,HOU Y. Sub-pixel corner detection of tessellated picture based on camera calibration [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008,31(6):615-619. (in Chinese)
- [11] 刘智,柴华,李娜娜.CMOS图像传感器中卷帘式快门特性及应用[J].光学精密工程,2009,17(8):2017-2025.
LIU Z,CHAI H,LI N N. Shutter mode of CMOS image sensor and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):2017-2025. (in Chinese)

作者简介:



屠大维(1965—),男,浙江诸暨人,教授,博士生导师,1987年、1989年、1993年在浙江大学分别获学士、硕士、博士学位,现为上海大学机电工程与自动化学院执行院长,主要研究方向为机器视觉及伺服控制、光机电一体化智能机械及仪器、人机智能系统等。E-mail: tdwshu@staff.shu.edu.cn



张翼成(1986—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事数字图像处理,视觉伺服反馈控制方面的研究。E-mail: yiczhang@shu.edu.cn

●下期预告

紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统设计

马庆军,宋克非,曲 艺,王淑荣

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

紫外临边成像光谱仪的噪声水平和动态范围都取决于 CCD 电路系统的设计。提出了一种模数分离的成像电路系统设计方案,避免了 CCD 模拟输出信号的板间传输和数字信号对模拟信号的干扰,而 CCD 信号处理电路的噪声水平也实现了模拟前端数据手册中给出的 2 LSB 的性能指标。由于 CCD57-10 BI AIMO 没有抗溢出结构,在饱和之前就会发生电荷溢出现象,提出了临界溢出电子数的概念以取代饱和电子数,并通过增加转移时钟电压以加深势阱深度的方法,将临界溢出电子数从 3.0×10^4 提高到了 6.0×10^4 ,保证了正确地探测设计范围内的强光信号。按传统的 CCD 驱动时序设计方法,CCD57-10 的最短曝光时间为 163 ms。为了实现更短的曝光时间以增加动态范围,在时序设计中引入了多次电荷倾倒的思想,在不降低探测器动态范围的前提下,将最短曝光时间降到了 19 ms,最终确保了 10^5 系统动态范围设计指标的实现。