

使用 12 像素对称模板的棋盘格内角点检测

戴士杰^{1,2}, 邵 猛², 吴佳宁³, 葛圣强²

- (1. 中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300;
2. 河北工业大学机器人及自动化研究所, 天津 300130;
3. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 棋盘图像的内角点提取问题往往决定着三维测量中摄像机标定的精度。针对 SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) 算法无法区分棋盘标定板内角点与边缘点的缺陷, 提出一种 12 像素对称灰度模板检测算法。该算法首先根据棋盘格内角点周围像素的中心对称性分布, 设计一种 12 像素对称 USAN 模板, 可以迅速区分出内角点与边缘点, 同时将内角点与平坦区域作为候选点。再结合灰度均方差算子, 利用平坦区域灰度方差较小的特点将其剔除, 最终实现对棋盘格内角点的高效检测。同时, 该算法在检测过程中完全摒除易受外界因素影响的外圈角点, 以保证角点提取时的精度。实验结果表明: 新算法对 9 阶棋盘格的检测时间为 1.244577 s; 用于张正友标定方法之后, 得到的检测重投影误差仅为 [0.3, 0.3] 像素。这两项指标, 均优于传统 SUSAN 算法。

关键词: 棋盘格内角点检测; 摄像机标定; 对称 USAN 模板; 灰度均方差算子

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1306-06

Internal corner detection of chessboard image for camera calibration based on 12 pixels symmetrical template

Dai Shijie^{1,2}, Shao Meng², Wu Jianing³, Ge Shengqiang²

- (1. Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Research Institute of Robotics and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
3. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The problem of chessboard image corner extraction always determined the three-dimensional measurement's accuracy of the camera calibration. By analyzing the defect for SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) algorithm that could not effectively distinguish the chessboard internal corners and edge points, the authors made use of the symmetry of the pixels around the internal corners, and proposed a symmetrical 12 pixels gray template detection algorithm. Firstly, a symmetrical 12 pixels USAN template was designed for fast distinguishing the internal corners and edge points. Meanwhile, both of the chessboard internal corners and smooth region would be treated as the candidates. Then the less gray variance of smooth region could be used to abandon them. At the same time, the proposed algorithm abandoned the external corners of the chessboard, which were very sensitive to the

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-25

基金项目: 河北省自然科学基金(F2012202041); 中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室开放基金

作者简介: 邵猛(1988-), 男, 硕士生, 主要从事三维测量方面的研究。Email: shaomeng217@163.com

导师简介: 戴士杰(1970-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事机器人学和视觉等方面的研究。Email: dshj70@163.com

external factors, ensuring the precision of the corner extraction process. Experimental results show that the new method detects the nine order chessboard image by 1.244 577s, and its reprojection error was just [0.3, 0.3] pixels in Zhang's camera calibration. Both of these two indicators are better than the traditional SUSAN algorithm.

Key words: chessboard image internal corners detection; camera calibration; symmetrical USAN template; gray variance algorithm

0 引言

从机器视觉领域方面来说,现实三维物体的各种信息主要是从摄像机获取的二维图像中提取。因此,精确地标定摄像机是准确得到三维空间点和相应图像像素点之间对应关系的关键^[1]。棋盘格模板由于简单、经济而被广泛应用于基于传统平面模板的摄像机标定方法中^[2-5],而它的角点检测精度更直接影响着摄像机标定的精度。

目前,角点检测主要分为基于边缘的角点检测方法、基于模板的角点检测方法及基于亮度变化的角点检测方法三大类^[6]。前两类方法由于存在计算边缘曲率的耗时性^[7]和角点匹配模型的多样性^[8]问题,逐渐被第三类方法取代。SUSAN算法是其中最常用的方法^[9],其优点在于角点检测时不需插值,不需计算梯度且不依赖前期图像分割的结果,直接对像素的邻域灰度值进行比较即可检测出角点,因而在棋盘格角点检测中得到广泛的应用。

SUSAN算法相比于其他算法而言优点突出,但由于其只考虑USAN区域面积而未考虑USAN区域形状特性,造成该算法无法正确区分棋盘格标定的内角点与边缘点^[10]。目前,针对SUSAN算法的改进研究工作已有很多成果。林鹏岳等^[11]研究得出SUSAN算法引入噪声的原因,并在此基础上简化模板,最终成功提高了检测速度,但遗憾的是,简化模板无法进行内角点与边缘的区分。杨幸芳等^[12]采取在原有SUSAN模板的基础上另附两个半径不相同的类圆形模板的方法,虽然可以有效区分内角点和边缘点,但势必会导致计算量增加,无法满足快速检测的要求。王瑞等^[13]提出两次使用SUSAN算法来区分边缘点与角点,该算法比较巧妙,但同样会造成检测周期延长的问题。参考文献[4]提出了用两个相互正交的旋转模板来区分内角点和边缘点,需要进行两次循环,同样会带来检测时间过长的问

题。从以上研究成果中可以看出,在棋盘格角点检测的过程中,或未考虑到区分棋盘格内角点与边缘的问题,或存在检测周期过长的问

1 棋盘格图像与SUSAN算法

棋盘格图像因其对比度高的特点,从而成为传统摄像机标定方法中最常用的图像。它由黑白相间的正方形组成,并以角点作为特征点。典型的棋盘格图像如图1所示。

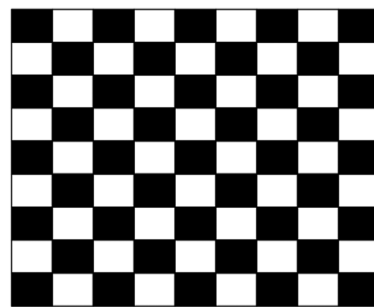


图1 棋盘格图像

Fig.1 Chessboard image

牛津大学的Smith和Brady等^[9]于1997年提出一种关于角点检测的新方法:用一个圆形像素模板检测整幅图像,若模板内其他像素与其中心像素的灰度差小于设定阈值,则认为该点与中心像素核心点是同值的,由满足这种条件的像素组成的区域命名为吸收核同值区(Univalued Segment Assimilating Nucleus, USAN)。SUSAN算法的核心思想(如图2所示)是:当模板处于平坦区域 a 时,USAN最大;当模

板处于角点 b 时,USAN 最小;当模板处于边缘 c 时,USAN 为模板总面积一半;当模板处于 d 时,USAN 大于总面积的一半,由此可根据 USAN 面积大小来判断角点位置。

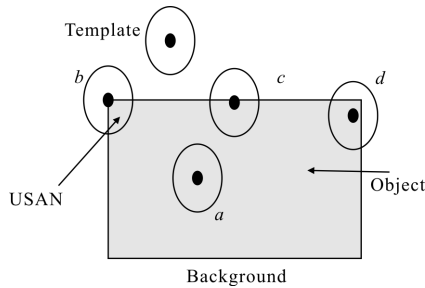


图 2 传统 SUSAN 算法原理图

Fig.2 SUSAN algorithm

SUSAN 算法虽然能检测大多数角点,但由于这种算法在检测时只考虑了 USAN 区域的面积大小,却没有考虑 USAN 区域的形状,因此它在检测棋盘格内角点时显得无能为力。传统 SUSAN 算法运用的模板是 37 邻域圆模板(见图 3)。图 4(a)所示的核心点是角点,图 4(b)所示的核心点是边缘点,可两者的 USAN 面积均为 18 像素,正好是圆形模板面积

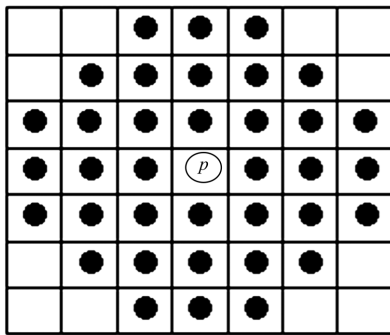
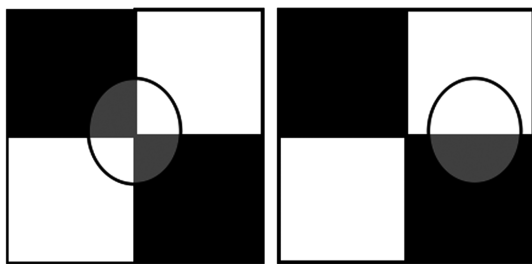


图 3 37 像素模板

Fig.3 Template of 37 pixels



(a) 核为角点 (b) 核为边缘点
 (a) Nucleus is a corner (b) Nucleus is on edge

图 4 SUSAN 算法无法区分的角点和边缘点

Fig.4 Defect of SUSAN algorithm

(除圆心外)的一半,此时若采用原始的 SUSAN 算法,两者势必均会被当作边缘点处理,这就造成如图 4(a)所示棋盘内角点的漏检。

2 改进的 SUSAN 检测算法

2.1 简化的 SUSAN 模板区分内角点和边缘点

由上文可以得出,SUSAN 算法不能有效地检测区分棋盘格内角点和边缘点,于是得用棋盘格内角点的特有结构特征加以区分。仔细研究得出,棋盘格内角点周围的像素点灰度值都是中心对称的,而边缘点周围的像素点却不存在这种情况。另外,SUSAN 角点检测算法对图像中的每个像素都要进行 36 次查表和比较的运算,浪费了大量的时间,因此速度缓慢。综合以上两点,提出 12 像素对称检测模板,如图 5 所示。

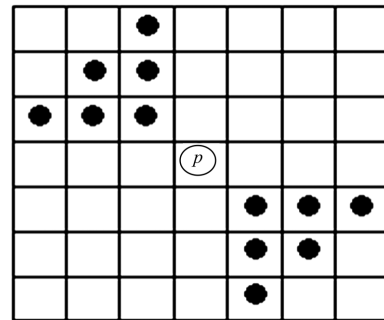


图 5 12 像素模板

Fig.5 Template of 12 pixels

由图可知,该模板的形状和棋盘格内角点周围像素的分布情况类似,这也是文中的创新之处。它充分运用了棋盘格内角点周围像素的中心对称性分布的特点,以达到有效区别内角点和边缘点的目的。此时设定 n 为新 USAN 模板中的像素数,则图 2 中各类型点区分如下:

- (1) $n=0$ 或 12 时,核为内角点或平坦区域。
- (2) 当 $n=6$ 时,核为边缘点。
- (3) 当 $0 < n < 6$ 或 $6 < n < 12$ 时,核为平坦区域。

2.2 灰度方差算子剔除平坦区域

在上述的检测算法中,虽然有效区分了棋盘格内角点与边缘点,可同时又带来了无法区分内角点与平坦区域的问题。因为新算法中,内角点与平坦区域的 USAN 区域都等于 0 或 12,如图 6(a)~(b)所示。

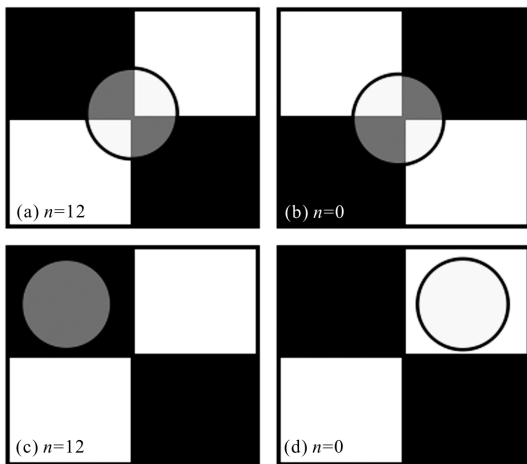


图 6 四种 n 等于 0 或 12 的情况
Fig.6 Four situations of $n=0$ or $n=12$

为此,引出均方差算子。对于每个像素 $I(i,j)$,将以该像素为中心的窗口记为 W 。由于平坦区域的像素点所在的窗口内像素灰度的均方差比较小,故可以设计均方差算子的响应值为反映周围像素灰度值变化剧烈程度的灰度方差,以此来剔除平坦区域,其公式表达式为:

$$V = \sum_{(i,j) \in W} (I(i,j) - \bar{I})^2 / (n-1) \quad (1)$$

式中: \bar{I} 为窗口 W 中像素的灰度平均值; n 为窗口 W 中像素的数目。对于平坦区域的像素,其均方差算子的响应值 V 较小,而棋盘格内角点的均方差算子响应值 V 则较大。这样,综合新模板和均方差算子,就可完整并快速地检测出所有棋盘格内角点。

2.3 新算法的具体步骤

新算法的具体步骤如下:

步骤 1 对所给的彩色图像进行灰度及去噪处理,得到灰度图像。进行这一步处理,完全是因为灰度图像的对比度更强。同时,去除比较明显的大颗粒噪声。

步骤 2 用新模板遍历得到的灰度图像,取 n 等于 0 或 12 的像素点为候选角点。此步遵循了原 SUSAN 算法的原理,但是新模板由于简化了像素分布,所以检测周期更短。

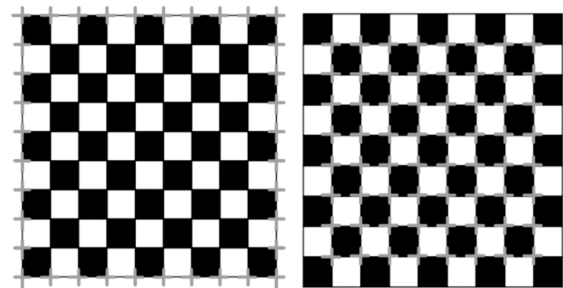
步骤 3 运用均方差算子(见公式 1)剔除平坦区域的像素点。方差算子响应值较小的像素点为平坦区域,较大的为角点。这一步充分利用平坦区域和棋盘格内角点的特性,最终达到去除平坦区域、只留下

内角点的目标。

3 实验与分析

为了验证所提出算法的有效性,分别用原始 SUSAN 算法和新算法对 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 棋盘格图像进行角点检测试验。摄像机型号为德国 SVCam-ECO267,相机镜头型号为 M3Z1228C-MP,支持三倍变焦和光圈调节,最大分辨率为 1360×1024 。试验用 PC 型号为 acer4743G,其处理器为酷睿 i3M380 双核配置,内存 2 GB,足够保证摄像机正常工作使用。

从图 7(a)、(b)的检测结果可以看出,所有棋盘格内角点均被准确提取,不存在漏检和误检情况。



(a) 传统 SUSAN 算法检测结果 (b) 新算法检测结果
(a) SUSAN algorithm (b) Proposed algorithm

图 7 两种模板棋盘格角点检测结果比较

Fig.7 Comparison of two algorithms

应用提出的改进算法对 10 幅棋盘格图像(如图 8 所示)进行完整的角点提取工作后,采用参考文献[3]中的摄像机标定方法对检测所得的所有角点进行摄像机标定。

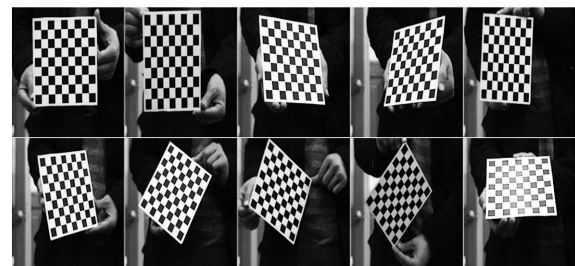


图 8 摄像机所拍摄 10 幅棋盘格图像

Fig.8 Ten chessboard images that camera captured

通过实验结果发现,前 6 幅图基本可以保证准确运算,但后 4 幅图因为旋转角度过大并且受到镜头畸变因素影响,导致运算结果不太理想。以第 3 幅图和第 7 幅图的角点提取结果为例,如图 9 所示。

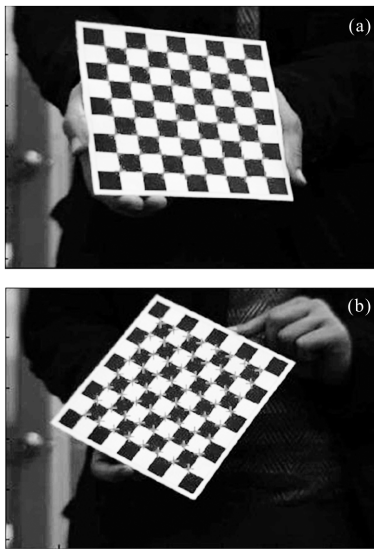


图 9 两幅图提取效果对比
Fig.9 Comparison of two images

图 9(b)的效果表明摄像机镜头畸变对算法结果的影响还是比较大的。但是,张正友的标定方法中本身就考虑到了镜头畸变的快速补偿函数,并且该函数对于所提出的算法也适用。图 10 即为进行快速畸变补偿后的第 7 幅图角点提取效果图。



图 10 畸变补偿后的第 7 幅图角点提取效果
Fig.10 Corner extraction result with distortion compensation

比较发现,畸变补偿后第 7 幅图角点提取准确无误。在另外几幅图像也进行该畸变补偿之后,最终得出所提出算法的角点提取重投影平均误差如图 11(b)所示。由此清晰地看出,所提出的棋盘格内角点检测算法具有较高的精度,角点重投影平均误差仅为[0.3,0.3]像素,高于传统 SUSAN 算法的[0.5,0.5]像素。由此可以说明文中采用的角点检测算法完全可以提高摄像机标定的精度。

另外,通过软件指令获得的算法运行时间见表 1。显然,相较于传统 SUSAN 算法而言,新算法将检测时间缩短为 2/3,实现了棋盘格内角点快速且有效的检测。

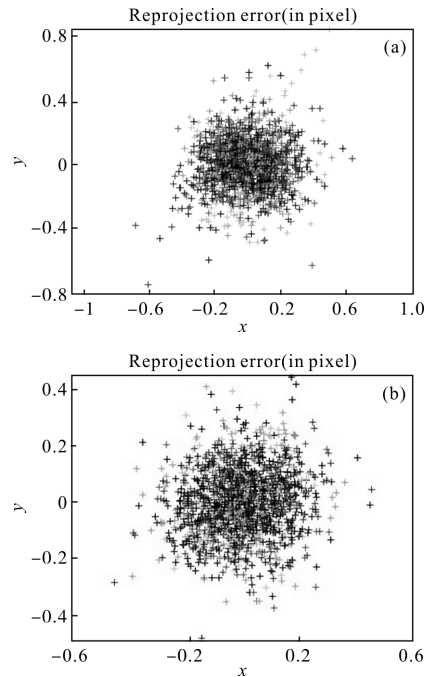


图 11 两种方法中棋盘格角点检测重投影误差图

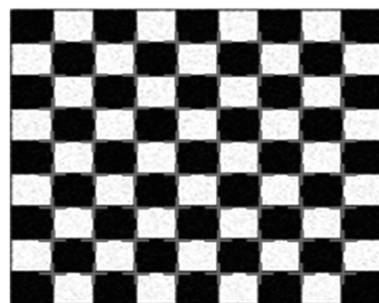
Fig.11 Reprojection errors of two methods

表 1 算法运行时间对照表

Tab.1 Run time of two algorithms

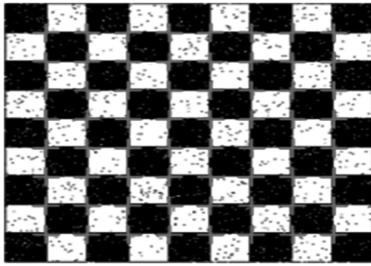
Algorithm names	Running time/s
Traditional SUSAN algorithm	3.626 271
Proposed algorithm	1.244 577

鉴于所提算法是在 SUSAN 算法的基础上所做的改进,所以原则上该算法也保留了对噪声和图像旋转具有鲁棒性的优势。为验证这一性质,笔者又对两幅加噪图像进行了角点提取实验,结果见图 12。由检测结果可以看出,该算法对高斯噪声及盐椒噪声有很好的鲁棒性,保留了传统 SUSAN 算法的优越性。



(a) 5%高斯噪声检测图像

(a) Detection of 5% Gaussian noise



(b) 5% 盐椒噪声检测图像

(b) Detection of 5% salt & pepper noise

图 12 噪声图像内角点检测结果

Fig.12 Detection of noise images

另外,通过研究还发现,SUSAN 算法不仅无法检测出棋盘格的内角点,同时对图 13 所示的偶分内角点类型也束手无策,图 13(a)为六等分角点类型,图(b)为八等分角点类型。

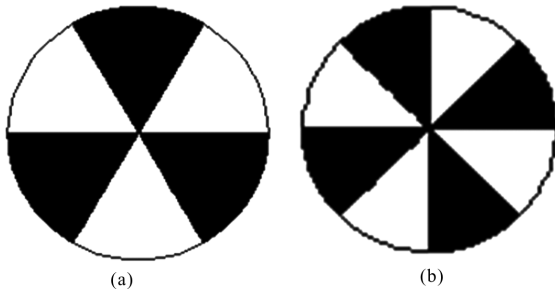


图 13 两类偶分 USAN 模板角点类型

Fig.13 Two types of even-split USAN templates

由此可以得出,偶次平分 USAN 模板类型的内角点都会被传统 SUSAN 角点检测方法漏检。而所提出的算法,将来进行相关扩展之后,从原理上来说可以有效地实现此类角点的检测。

4 结论

针对 SUSAN 算法无法区分棋盘格内角点与边缘点的天然缺陷,提出一种基于 SUSAN 算法的 12 像素对称灰度模板棋盘格内角点检测算法。实验结果证明,新算法可以准确提取棋盘格内角点,其对 9 阶棋盘格角点检测的平均时间降至 1.244577s,同时将张正友摄像机标定法中的角点提取重投影误差降至 [0.3,0.3]像素,可以达到快速有效地检测棋盘格内角点的目标。另外,文中算法在未来经过拓展之后,将为对称类角点的检测算法研究奠定基础。

参考文献:

[1] Zhang Guangjun. Machine Vision [M]. Beijing: Science

Press, 2008: 84-85. (in Chinese)

- [2] Zhu Haitao, Zhao Xunjie. New method of camera calibration based on checkerboard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 133-137. (in Chinese)
- [3] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, 22(11): 1330 - 1334.
- [4] Huo Ju, Yang Ning, Yang Ming, et al. Calibration of camera with wide field-of-view based on spliced small targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (6): 1474-1479. (in Chinese)
- [5] Xu Peng, Wang Jianye, Wang Yanru. Calculation exact center coordinate of a target circle in camera calibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (7): 1342-1346. (in Chinese)
- [6] Guo Haijiao. A survey of corner detection algorithms [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2011, 7 (32): 7979-7982. (in Chinese)
- [7] Harris C, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C]//Proceedings Fourth Alvey Vision Conference, 1988: 147-151.
- [8] Kitchen L, Rosenfeld A. Analysis of gray level corner detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1999, 20(2): 149-162.
- [9] Smith S M, Brady J M. SUSAN-New approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 1: 45-78.
- [10] Shen F, Wang H. Real time gray level corner detector [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Control, 2000, 2: 1-6.
- [11] Lin Pengyue, Li Lingling, Li Cuihua, et al. Improved algorithm based on SUSAN corner detection [J]. *Computer and Modernization*, 2010, 2(2): 66-72. (in Chinese)
- [12] Yang Xingfang, Huang Yumei, Gao Feng, et al. New corner detection algorithm of chessboard image for camera calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1109-1113. (in Chinese)
- [13] Wang Rui, Yang Runze, Yin Xiaochun, et al. Sub-pixel corner detection algorithm of chessboard image based on improved SUSAN operator[J]. *Computer and Modernization*, 2012, 1: 64-66. (in Chinese)
- [14] Wang Z S, Wu W, Xu X H. Recognition and location of the internal corners of planar checkerboard calibration pattern image [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 185: 894-906.