

# 基于 Harris-张正友平面标定法的摄像机标定算法

卢 英<sup>1, 2</sup>, 王慧琴<sup>2</sup>, 佟 威<sup>2</sup>, 李俊杰<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学信控学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了提高双目摄像机标定参数的精确性, 以张氏标定方法为基础, 首先采用 Harris 算法对黑白棋盘表格进行内角点提取, 其次将内角点像素点坐标精确到亚像素精度, 最后利用投影线性关系求出双目摄像机的内外等参数, 并与 cvFindChessboardCorners() 函数提取内角点标定方法进行对比, 证明了该方法准确、有效, 提高了黑白棋盘表格内角点检测的准确性和标定精度, 可以应用于双目视觉系统中。

**关键词:** 摄像机标定; Harris; 棋盘表格; 角点提取

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2014)06-0860-05

摄像机标定是建立摄像机的几何成像模型, 描述图像像素位置与空间坐标系中场景点位置之间的相互关系, 最终确定摄像机内外参数等信息的过程<sup>[1]</sup>。摄像机标定技术是计算机视觉领域里从二维图像信息中提取出三维空间信息必不可少的步骤, 早已被广泛应用于导航、视觉监控和三维重建等领域中且该步骤是一个至关重要和最为复杂的步骤<sup>[2]</sup>。摄像机标定的精度直接影响导航、视觉监控和三维重建的效果, 同时也是系统误差的主要来源。当今最具典型代表的摄像机标定方法主要有张正友平面标定法 (以下简称“张氏法”) 和 Tsai 两步标定法。文献[3]中标定通过 cvCalibrateCamera2() 函数来完成, 棋盘表格内角点检测和储存通过 cvFindChessboardCorners() 函数来完成, 内角点检测比较准确, 但是该函数返回的角点仅仅是近似值, 返回的角点位置并不是真实的角点位置, 则导致标定的实际误差存在。目前对角点检测的方法主要分为两类: 基于图像边缘和图像灰度的检测方法。代表性算法主要有 Harris 算子、Susan 算子和 Moravec 算子等。Harris 算子是 C.Harris 和 J.Stephens<sup>[4-5]</sup> 等人在 1988 年提出的一种基于信号的点特征提取算子。文献[6]采用 SUSAN 算子对棋盘表格角点进行检测, 为摄像机标定提供亚像素精度的角点信息, 但内角点检测精度不高。曾经 C.Schmid 报道, Harris 角点检测算法是目前角点检测效果最好的算法<sup>[7]</sup>。文献[8]运用 C# 语言实现了 Harris 算法对样本图例进行角点检测, 通过设定阈值大小取得了很好地检测效果。本文针对张氏法标定过程中内角点检测 cvFindChessboardCorners() 函数的不足, 利用 Harris 算子具有很好地角点检测效果等优点, 提出了基于 Harris-张正友平面标定法的摄像机标定算法, 进一步提高了黑白棋盘表格内角点检测的准确性和摄像机参数的标定精度。

## 1 Harris 角点检测算法简介

### 1.1 Harris 角点检测基本原理

Harris 角点检测算法是一种基于灰度图像的角点检测算法, 是一种非常有效地角点检测算法。优点如下<sup>[4]</sup>:

- (1) 只涉及到灰度值的一阶差分 and 滤波理论知识, 计算简单;
- (2) 对图像中的所有点都计算其兴趣值, 然后在邻域内选择最优点, 提取的角点稳定可靠、均匀而且合理, 并能够反映图像的结构;
- (3) 在图像旋转、灰度变化、噪声干扰和视点变换等情况下该算法仍然能够准确地检测出角点信息, 稳定性和鲁棒性很高。

Harris 角点检测算法基本原理是将所处理的图像窗口  $w$  向任意方向移动微小位移  $(x, y)$ , 则灰度变量定义如下<sup>[9]</sup>:

收稿日期: 2014-03-11 修改稿日期: 2014-12-03

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20126120110008); 陕西省教育厅产业化项目(2011JG12); 教育厅专项科研项目(2013JK1144); 西安建筑科技大学青年基金 (QN1429)

作者简介: 卢英 (1980-), 女, 博士生, 工程师, 主要从事数字建筑, 图像处理与模式识别方向的研究, E-mail: applepeas@126.com

$$E(x, y) = \sum_{m,n} w_{m,n} [I_{x+m,y+n} - I_{m,n}]^2 = \sum_{m,n} w_{m,n} [xX + yY + O(x^2, y^2)]^2 \tag{1}$$

$$= Ax^2 + By^2 + 2Cxy = (x \ y) M (x \ y)^T$$

其中:  $X$  和  $Y$  是一阶灰度梯度, 定义如下:

$$X = I \otimes (-1, 0, 1)^T \approx \frac{\partial I}{\partial x} \tag{2}$$

$$Y = I \otimes (-1, 0, 1)^T \approx \frac{\partial I}{\partial y} \tag{3}$$

为了消除噪声影响, 提高抗噪能力, Harris 算子对  $w$  进行高斯平滑, 高斯窗口  $w$ :

$$w_{m,n} = \exp \left[ -\frac{1}{2} (m^2 + n^2) / \sigma^2 \right] \tag{4}$$

由于 Harris 算子受到信号处理中自相关函数的启发, 于是定义了与自相关函数相关联的  $M$  矩阵,  $M$  矩阵定义如下:

$$M = \begin{bmatrix} X^2 \otimes w & (XY) \otimes w \\ (XY) \otimes w & Y^2 \otimes w \end{bmatrix} \tag{5}$$

$M$  矩阵的特征值是自相关的一阶曲率, Harris 算子认为两个曲率值同时都大的情况下, 该点才是角点<sup>[10]</sup>. 设  $M$  的两个特征值分别为  $\mu_1$  和  $\mu_2$ , 则根据  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的曲率值大小来判断该点是属于平坦区、边缘还是角点. Harris 检测原理图如图 1 所示.

(1) 平坦区:  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的值都很小, 即局部自相关函数在水平和垂直方向的变化量都很小 (粉红色标记区域);

(2) 边缘:  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的值一大一小, 即局部自相关函数在水平或者垂直方向的变化量很大 (蓝色标记区域);

(3) 角点:  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的值都很大, 即局部自相关函数在水平和垂直方向的变化量都很大 (红色标记区域).

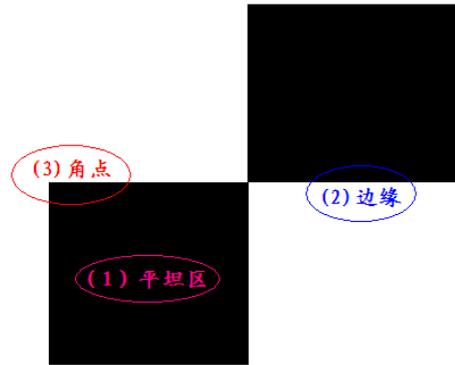


图1 Harris检测原理  
Fig.1 Detection principle in Harris

Harris 特征点定义如下的角点响应函数  $R(x, y)$ :

$$R(x, y) = Det(M) - kTr^2(M) = \mu_1\mu_2 - k(\mu_1 + \mu_2)^2 = AB - C^2 - k(A + B)^2 \tag{6}$$

设定一个合理的阈值  $F$ , 若角点响应函数  $R(x, y) > F$ , 则认为该点就是角点. 上式中,  $Tr(M)$  表示矩阵  $M$  的迹,  $Det(M)$  表示矩阵  $M$  的行列式值, 据 Harris 经验建议  $k = 0.04$ .

### 1.2 算法流程

从 Harris 角点检测基本原理中可以得出采用 Harris 算法提取图像中角点的过程可以归纳为以下五步:

第一步: 分别计算图像像素点在水平和垂直方向上的梯度  $I_x$ 、 $I_y$  以及  $I_x I_y$ , 则  $M$  表示如下:

$$M = \begin{bmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{bmatrix} \tag{7}$$

第二步: 对图像进行高斯平滑, 得到  $M'$ , 离散二维零均值高斯函数为:

$$w = \exp \left( -\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2} \right) \tag{8}$$

第三步: 计算原图像上对应的每个像素点的兴趣值  $R$ :

$$R = \left[ I_x^2 \times I_y^2 - (I_x I_y)^2 \right] - k(I_x^2 + I_y^2)^2 \tag{9}$$

第四步：选取局部极值点。

第五步：设定合理的阈值  $F$ ，检测得到具有一定数量和质量角点信息。

### 2 Harris-张正友平面标定法思想

1998年，张正友提出一种简单、灵活、使用的摄像机标定方法，主要用平面模板两步法来完成摄像机标定的工作，该方法介于传统标定方法和自标定方法之间的一种传统的标定方法。它既避免了传统方法设备需求高、操作繁琐等缺点，又较自标定方法精度高，鲁棒性更好等优点<sup>[11-12]</sup>，因此得到广泛应用。在现有的标定工具中，张氏法中标定工作主要是通过 `cvCalibrateCamera2()`函数来完成，棋盘表格内角点通过 `cvFindChessboardCorners()`函数进行检测和储存。

函数 `cvCalibrateCamera2()`进行相机标定的精度差、不稳定的因素主要有以下3点：

- (1) 棋盘表格标定板所在的平面与成像平面之间的夹角太小；
- (2) 平面标定板不是很平，可能会有凸凹点且拍摄棋盘表格图像太少；
- (3) 图像上角点提取的不准确，假如拍到的图像不是完整的棋盘格的时候用 `cvFindChessboardCorners()`函数找角点不是很好或者提取不出角点。

因此 `cvFindChessboardCorners()`函数对棋盘表格内角点的检测效果不稳定，进而会导致摄像机标定得出的内外参数等信息的精度变差，同时系统误差会累积越来越大，直接导致后续效果不理想。

选取 Harris 角点检测算法与张氏法标定理论，来完成黑白棋盘表格的角点检测以及摄像机标定工作。其中 Harris 角点检测算法主要来完成棋盘表格的内角点信息检测与提取，首先在内角点检测之前对黑白棋盘表格图像进行自适应二值化操作并获得亚像素级的 Harris 内角点信息，以保证标定的精度性，其次当内角点信息被检测提取之后，再次通过张氏法来标定双目摄像机，最后求出摄像机的内外参数。按照以上的思想流程进行相关的程序设计，利用 Matlab 7.0 软件实现该算法的仿真，最后给出了标定结果并与 Matlab 7.0 调用 `cvFindChessboardCorners()`函数标定方法进行比较和分析。其中本文摄像机标定算法流程图如图 2 所示。

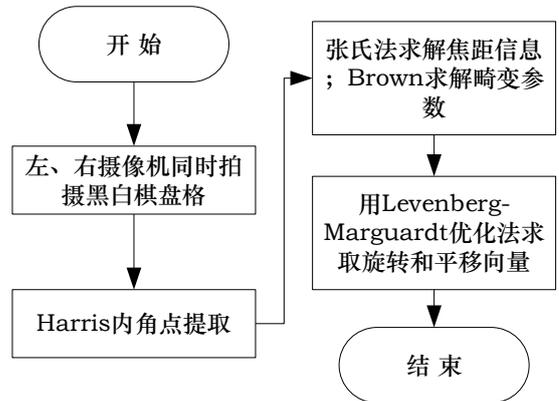


图2 摄像机标定流程图  
Fig.2 The flow chat of camera calibration

### 3 实验仿真结果与分析

实验采用的是两个规格相同的高清网络摄像头，基线距离为 34 cm，棋盘表格中每一个黑方格规格为 27×27 mm，内角点个数为 6×8 个。实验一共拍摄了 12×2=24 副图片。分别用 `cvFindChessboardCorners()`函数提取方法和本文算法对每一副棋盘表格进行了角点检测。其中对第一幅图片进行了内角点检测和投影变换，结果分别如图 3 和图 4 所示。

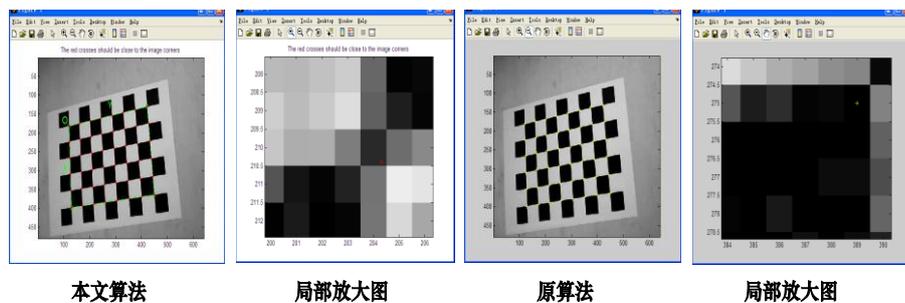


图3 内角点检测结果  
Fig.3 The detection result of inner corner detection

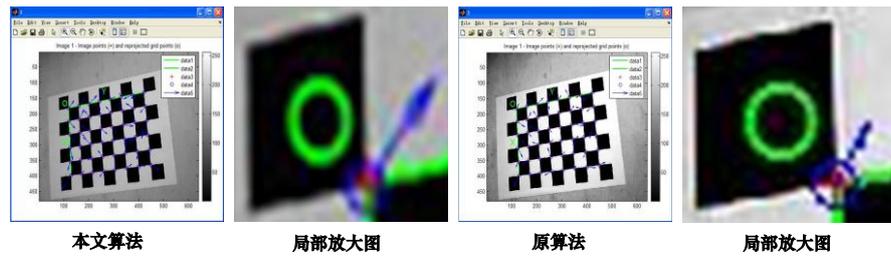


图4 投影变化结果

Fig.4 The result of projection change

通过图 4 投影变化局部放大图对比可以发现黑白棋盘表格中同一内角点在不同算法仿真下的投影矢量模值大小,可以得出本文算法对内角点地检测更加精确. 当对棋盘表格内角点进行检测与提取之后,再分别用 cvFindChessboardCorners()函数角点提取算法和本文算法的内角点提取结果对双目摄像机进行参数标定(“左摄像机”简称“左”,“右摄像机”简称“右”). 完成双目摄像机参数标定工作后,利用双目摄像机标定的结果对黑白棋盘表格中内角点的世界坐标进行计算,得到所对应的图像坐标系中的角点坐标,并与图像中内角点的结果进行对比,得到了黑白棋盘表格中内角点的重投影误差. 如图 5 所示.

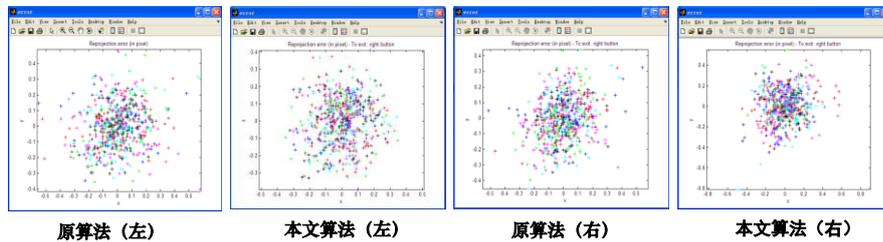


图5 角点重投影误差

Fig.5 The error of corner re-projection

在相同的硬件条件下,摄像机标定过程中黑白棋盘表格相对于左右摄像机的位置关系以及左右摄像机位置关系的整体仿真效果图如图 6 所示,从该仿真效果图中可以看出标定全过程中左右摄像机捕获的黑白棋盘表格图像的位置关系,进而验证了双目摄像机标定的全过程. 图中显示的是摄像机拍摄的 12 张黑白棋盘表格和双目摄像机整体姿态的效果图.

完成左右摄像机的参数标定工作后,分别对原算法和本文算法标定求出的内外参数等信息结果作了一定的对比.(注:“+”代表增加,“-”代表降低).

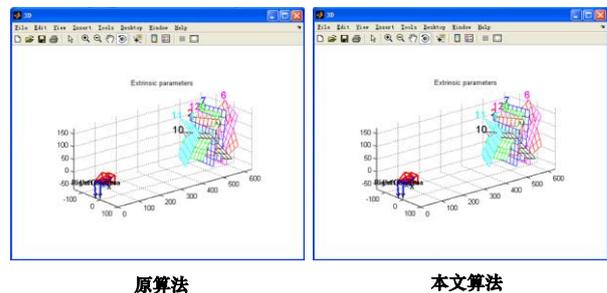


图6 3D效果  
Fig.6 The effect in 3D

表 1  $f_x$ 、 $f_y$  像素(±)误差结果的比较

Tab.1 The comparison result error of  $f_x, f_y$  pixel

	原算法 $f_x$	本文算法 $f_x$	误差/%	原算法 $f_y$	本文算法 $f_y$	误差/%
左	4.489 57	3.871 17	-13.77	4.908 79	4.181 62	-14.81
右	4.943 57	4.297 83	-13.06	5.833 54	4.609 45	-20.98

表 2 畸变参数误差结果的比较

Tab.2 The comparison of error result by distortion parameter

	原算法(左)	本文算法(左)	误差/%	原算法(右)	本文算法(右)	误差/%
$k_1$	0.027 55	3.871 17	-6.03	0.025 30	0.024 38	-3.64
$k_2$	0.244 04	4.297 83	-5.09	0.208 41	0.207 92	-0.24
$k_3$	0.000 00	0.000 00	无	0.000 00	0.000 00	无
$p_1$	0.001 89	0.001 72	-8.99	0.001 90	0.001 63	-14.21
$p_2$	0.001 94	0.001 80	-7.22	0.001 73	0.001 74	+0.85

其中  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  是径向畸变参数,  $p_1$  和  $p_2$  是切向畸变参数.

表3 像素误差结果的比较  
Tab.3 The comparison of error result in pixel

原算法(左)	本文算法(左)	误差/%	原算法(右)	本文算法(右)	误差/%
0.148 88	0.125 61	-15.63	0.158 29	0.119 21	-24.69
0.141 78	0.138 01	-2.66	0.161 09	0.141 51	-12.15

其中通过张氏法求出的旋转向量和平移向量分别为  $O_m = [-0.015\ 63\ -0.010\ 87\ 0.105\ 48]$ ,  $T = [34.497\ 78\ -5.363\ 17\ -1.413\ 68]$ , 本文算法求出的旋转向量和平移向量分别为  $O_m = [-0.012\ 48\ -0.009\ 80\ 0.100\ 81]$ ,  $T = [34.096\ 62\ -6.325\ 52\ -6.501\ 00]$ , 理论基线  $T_x = 34\text{ cm}$ .

表4 基线  $T_x$  结果的比较  
Tab.4 The comparison of result in  $T_x$

原算法	精确度	本文算法	精确度	误差
34.497 78	98.56 %	34.096 62	99.72 %	-1.16 %

通过表 1、2、3 和 4 可以得出: 本文算法不仅能够降低  $f_x$ 、 $f_y$  畸变参数和像素的误差, 同时本文算法还进一步提高了基线的精确度.

## 4 结束语

本文提出的基于 Harris-张正友平面标定法的双目摄像机标定算法, 有效地利用了 Harris 角点检测算法的准确性和稳定性及摄像机标定的功能特性, 克服了函数 `cvFindChessboardCorners()` 的近似不稳定情况. 实验结果表明: 本文提出的标定算法能够提高棋盘表格中内角点检测的准确性和双目摄像机标定的精度, 可以应用于双目视觉系统中.

## 参考文献 References

- [1] LUO Honggen, ZHU Limin, DING Han. Camera calibration with coplanar calibration board heal parallel to the imaging plane[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 132(2): 480-486.
- [2] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 110-124.  
MENG Xiaoqiao, HU Zhanyi. Recent progress in camera self-calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 110-124.
- [3] BRADSKI, KAEHLER. 学习 OpenCV[M]. 于仕琪, 刘瑞祯, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
BRADSKI, KAEHLER. Learning OpenCV [M]. YU Shiqi, LIU Ruizhen, Translation. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [4] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, United Kingdom: Plessey Research Roke Manor, 1988.
- [5] SCHMALZ C, FORSTER F, ANGELOPOULOU E. Camera calibration: active versus passive targets[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 1-10.
- [6] 王瑞, 杨润泽, 尹晓春, 等. 一种改进的 SUSAN 算子棋盘格角点亚像素检测算法[J]. 计算机与现代化, 2012, 197(1): 64-66.  
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, 197(1): 64-66.
- [7] HARTLEY R, KANG S B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2007, 29(8): 1309-1321.
- [8] 叶增炉. Harris 角点检测的 C# 实现及应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2010, 4(19): 11-13.  
YE Zenglu. Harris corner detection of the C # implementation and application[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2010, 4(19): 11-13.
- [9] 赵万金, 龚声蓉, 刘纯平, 等. 一种自适应的 Harris 角点检测算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 212-214.  
ZHAO Wanjin, GONG Shengrong, LIU Chunping, et al. Adaptive Harris Corner Detection Algorithm[J]. Computer Engineering, 2008, 34(10): 212-214.
- [10] 张裕, 方康玲, 刘永祥. 基于 Harris 算法的黑白棋盘角点检测[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(8): 251-254.  
ZHANG Yu, FANG Kangling, LIU Yongxiang. Harris Algorithm-Based Corner Detection on Black White Checkerboard[J]. Computer Applications and Software, 2010, 27(8): 251-254.
- [11] ZHANG Zhengyou. A flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] RUFLIM, SCARAMUZZA D, SIEGWART R. Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images in Intelligent Robots and Systems[J]. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2008, 18(16): 3121 - 3126.

(下转第 870 页)

- [3] 李亚亚. 夏热冬冷地区居住建筑冬季室内热舒适研究—以杭州、合肥为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
LI Yaya. The indoor thermal environment in winter of the residential for the hot summer and cold winter context—take Hangzhou, Hefei for example[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [4] 刘雪辉. 水源热泵技术集中供热在陕南居住建筑中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.  
LIU Xuehui. Study on water-source heat pump system heating of residential buildings in the southern of Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [5] SIMONEA A, KOLARIKA J, IWAMATSU T, et al. A relation between calculated human body energy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation[J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 1-9.
- [6] TIWARI R, PANDEY M, SHARMA A. An approach to human adaptability towards its built environment: A review[J]. Energy and Power Engineering, 2010, 2: 90-94.

## Study on selection of typical city residential heating mode in hot summer and cold winter zone

DONG Xujuan, YAN Zengfeng, WANG Zhiwei, RUAN Dan, ZHAO Xing

(1. School of Arch., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China  
2. School of Envi. & Muni. Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the status quo of hot summer and cold winter zone residential heating problems, through on-the-spot test, and by means of questionnaire survey, four typical cities in the area were tested and analyzed. Information on the using status of residential building heating mode has been obtained. This paper has analyzed the choice of building heating mode and mechanism from the regional climate conditions, the fender structure of housing building performance, residential behavior and the economic investment. The results show that hot summer and cold winter zone residential heating has become an inevitable trend. A heating mode selection method, with comfort and economy C-E heating mode selection method as dual goals was established. Based on this, the heating mode selection strategies suitable for both existing residential and new residential in hot summer and cold winter zone are presented.

**Key words:** hot summer and cold winter zone; residential; heating mode; C-E mode selection

(本文编辑 桂智刚)

(上接第 864 页)

## Based on Harris-Zhang Zhengyou plane calibration method of camera calibration algorithm

LU Ying<sup>1,2</sup>, WANG Huiqing<sup>2</sup>, TONG Wei<sup>2</sup>, LI Junjie<sup>2</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;  
2. School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of binocular camera parameter calibration, on the basis of the Zhang's calibration approach, Harris algorithm was adopted to extract angles point of the black and white chessboard. The internal angle points in pixel coordinates is made accurate to sub-pixel accuracy. Finally this paper uses the internal and external parameters of binocular camera by linear relationship. The experimental result compares with the Zhang's calibration approach in cvFindChessboardCorners(), which show that the method is accurate, effective which improves the precision of black and white chessboard form an internal angle detection and calibration precision. The result can be applied to the binocular vision system.

**Key words:** camera calibration; Harris; chessboard; angular point extraction

(本文编辑 沈波)