第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0300-06

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
© 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:宋文爱, 马彦珍. 基于虚拟棋盘的校准精度分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 300—305
Song Wenai, Ma Yanzhen. Analysis on calibration accuracy based on virtual checkerboard[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 300—305

基于虚拟棋盘的校准精度分析

宋文爱 马彦珍*
(中北大学软件学院,太原 030051)

摘 要 标定目标板是相机标定中必备的材料。针对摄像头与目标标定物之间的距离对标定精度的影响,进行棋盘图分别约占整个屏幕的 1/3,1/2,2/3 等情况下的相机标定实验。实验结果证明当棋盘图的图像约占整个屏幕的 1/3 时,标定精度最高,误差最小。针对虚拟标定板对标定精度的影响,设计 9 ×7 和 13 ×9 两种规格的虚拟标定板;并且对虚拟标定板在约占整个屏幕的 1/3 的情况下进行标定。结果证明虚拟标定板的标定结果优于同规格的物理标定板。

关键词 标定 虚拟棋盘 精度
中图法分类号 TP391.41; **文献标志码** A

在基于图像的光学测量系统中,相机是最重要的功能模块之一。相机的数学模型是相机的测量空间和图像平面之间的投影关系。相机校准用于获取相机数学模型中的所有参数。光学测量系统对于获得高精度的相机校准很重要。无论系统配置如何,相机校准的过程对于应用视觉系统至关重要,因此目标棋盘的选择以及位置的获取是精度分析中不可或缺的关键步骤。

流行的校准方法通常使用不同形式的目标。相机校准的一般原理在于找到足够大数量的已知 3D 点与其在图像中的投影之间的对应关系。目前,使用 2D 平面目标的最典型的方法是 Zhang 提出的方法(称为张氏法)。张氏法具有灵活的校准过程和高校准精度的优点。Zhang 提出的基于平面目标的校准方法由于其实用性和简便性而被广泛使用。张氏方法的校准误差主要来自于标定物目标的数量、目标中特征点的数量以及提取精确度、目标的规格、单位网格的尺寸、镜头畸变等。尹洪涛等[1]进行了关于标定目标图像数量和特征点检测精度对标定精度影响的研究;陈晓燕等[2]分别进行了目标图像数量、目标制作特征点数目、目标网格大小对精度的影响实验。凡芳等[3]进行了光照条件、标定板平面性和世界坐标精度、图片数量对测量精度的影响。吴渊凯等[4]进行了不同的标定方法对精度的影响,比如基于 opencV、基于 MATLAB Camera Calibreator、基于 MATLAB 标定工具箱等。

本文通过使用 Zhang 提出的方法针对相机标定的关键设备[5]标定目标,分别进行标定目标距离相机的距离、虚拟标定目标对标定精度的影响仿真实验。实验中会制定不同尺寸的目标板[6],对标定的精度用重投影误差作为参考并予以评价。

1 相机的数学模型

像素在图像坐标系中的 Q 的未失真均匀坐标和以 mm 为单位的图像坐标系分别为 $\boldsymbol{p} = [u,v,1]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{p}_n = [x_n,y_n,1]^{\mathrm{T}}$。$\boldsymbol{q} = [x,y,z,1]^{\mathrm{T}}$ 是世界坐标系中的三维均匀坐标[7]。从相机的针孔成像模型[8],$\boldsymbol{q}$ 和 $\boldsymbol{p}$ 之间的关系为

$$\rho\boldsymbol{p} = \boldsymbol{k}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{t}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\boldsymbol{q} \tag{1}$$

式(1)中,$\boldsymbol{k} = \begin{bmatrix}f_x & \gamma & u_0\\ 0 & f_y & v_0\\ 1 & 1 & 0\end{bmatrix}$是内参矩阵;$\rho$ 是任意非零比例因子;u_0、v_0 是主点坐标;f_x、f_y 分别是 u、v 轴有效焦距长度;γ 是 u、v 轴不垂直因子;$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$ 分别是旋转矩阵和平移向量。

式(1)是相机的线性模型,考虑镜头畸变,失真图像均匀坐标 $\tilde{\boldsymbol{p}} = [\tilde{u},\tilde{v},1]^{\mathrm{T}}$ 和无失真图像均匀坐标 $\boldsymbol{p} = [u,v,1]^{\mathrm{T}}$ 之间的对应关系表示如下:

$$\begin{cases}\tilde{u} = u + (u - u_0)(k_1r^2 + k_2r^4)\\ \tilde{v} = v + (v - v_0)(k_1r^2 + k_2r^4)\end{cases} \tag{2}$$

式(2)中,$r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$;k_1 和 k_2 是径向畸变系数。

2017 年 6 月 19 日收到 山西省自然科学基金(2015011041)资助
第一作者简介:宋文爱,博士。研究方向:计算机图形图像处理。
* 通信作者简介:马彦珍,硕士研究生。研究方向:图像处理。E-mail:822866624@ qq. com。

2　实验

2.1　实验材料

2.1.1　标定板

（1）物理标定板。将 9×7、13×9 的黑白相间的棋盘目标图,分别打印在 A3、A4、B5 图纸上,制作 6 块物理平面标定板,其中 9×7 的目标模板图在 A3、A4、B5 上的尺寸分别为 30 mm×30 mm、29 mm×29 mm、25 mm×25 mm。13×9 的目标模板图在 A3、A4、B5 上的尺寸分别为 26 mm×26 mm、19 mm×19 mm、17 mm×17 mm。6 块标定板实物见图 1。

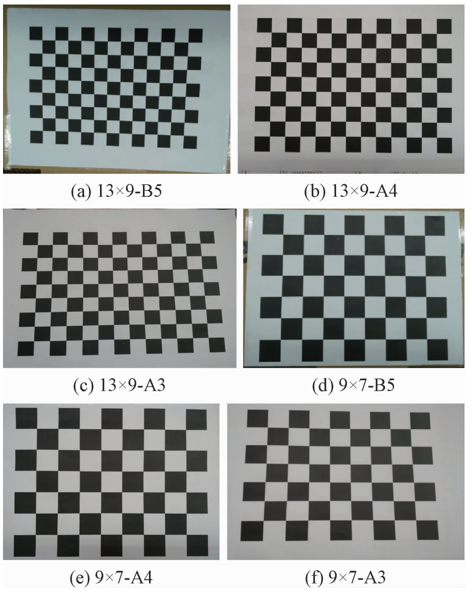

图 1　物理标定板

Fig. 1　Real calibration model plate

（2）制作虚拟的目标板。将 9×7、13×9 的目标板图显示在平板平面上。生成 2 块虚拟标定目标模板,其中虚拟模板图的尺寸分别为 21 mm×21 mm,13 mm×13 mm。虚拟标定板见图 2。

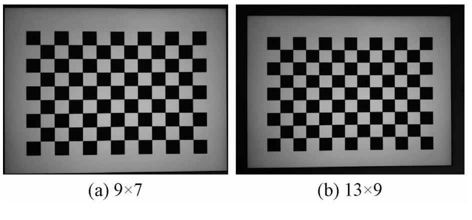

图 2　虚拟标定板

Fig. 2　Virtual calibration model plate

2.1.2　整体的设备图

图 3 中的相机采用的是体感相机 kinect for windows,而且摄像机的分辨率为 640×480 像素,三角架用来固定相机位置,软尺用来测量标定目标距离相机的物理距离,图中为本次实验中的某一块标定目标板且其格式为 9×7。

计算机中需安装好 MATLAB,而且下载好所要用的标定工具箱即 TOOLBOX_calib。

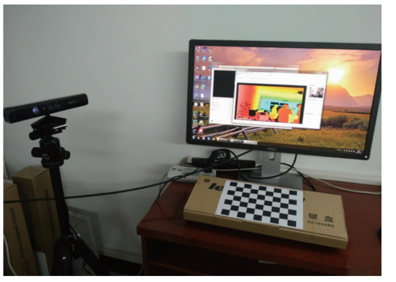

图 3　整体设备图

Fig. 3　Whole device picture

2.2　目标的采集

通过如下捕获图像系统依次获取目标棋盘不用位姿的图像各 20 张。将标定目标板应出现在屏幕的四个角落[9],图像分别约占整个屏幕的 1/2、2/3、1/3(即确定标定目标和摄像机之间的距离),而且获取到的图像文件的扩展名皆为.jpg。

图 4 为抓获图像系统界面。

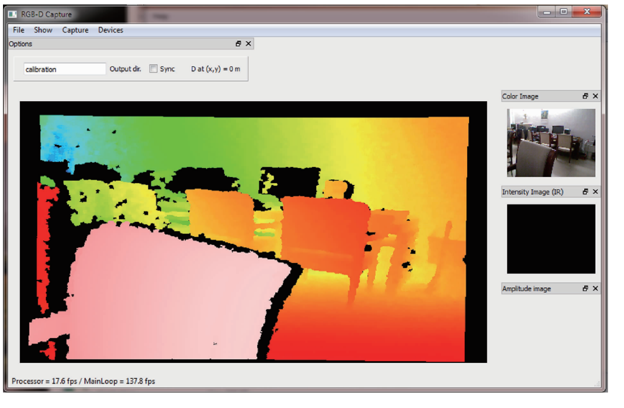

图 4　捕获图像系统界面

Fig. 4　The Interface of the system of image captures

2.3　标定目标物和摄像机之间的距离对标定精度的影响

2.3.1　目标物占有整个屏幕的 1/3

当目标物约占整个屏幕的 1/3 时,分别对目标物打印在 A3、A4、B5 纸上的规格分别为 9×7 和 13×9,使用 MATLAB 标定箱进行 6 次标定实验。标定结果见表 1。

2.3.2　目标物占有整个屏幕的 1/2

当目标物约占整个屏幕的 1/2 时,分别对目标物打印在 A3、A4、B5 纸上的规格分别为 9×7 和 13×9,进行 6 次标定实验。标定结果见表 2。

2.3.3　目标物占有整个屏幕的 2/3

当目标物约占整个屏幕的 2/3 时,分别对目标物打印在 A3、A4、B5 纸上的规格分别为 9×7 和 13×9,进行 6 次标定实验。标定结果见表 3。

表 1　目标物约占整个屏幕的 1/3 时各个标定板的标定结果

Table 1　The calibration results when the checkerboard is about 1/3 of the whole screen

标定板	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
9 ×7-B5	532. 959 58	530. 059 30	326. 186 85	252. 845 05	0. 187 96	−0. 631 18
9 ×7-A4	538. 157 46	535. 176 00	323. 950 36	269. 311 15	0. 217 55	−0. 500 37
9 ×7-A3	512. 952 07	516. 469 86	321. 907 79	249. 743 42	0. 211 03	−0. 468 76
13 ×9-B5	531. 296 57	526. 462 23	328. 597 84	249. 456 72	0. 152 61	−0. 270 05
13 ×9-A4	473. 953 79	472. 051 24	325. 856 47	246. 914 93	0. 207 85	−0. 309 47
13 ×9-A3	591. 940 52	603. 541 34	335. 754 04	290. 296 94	0. 391 17	−0. 622 52

表 2　目标物约占整个屏幕的 1/2 时各个标定板的标定结果

Table 2　The calibration results when the checkerboard is about 1/2 of the whole screen

标定板	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
9 ×7-B5	553. 930 94	550. 637 49	328. 549 26	256. 253 74	0. 208 83	−0. 509 83
9 ×7-A4	527. 431 95	525. 830 03	327. 227 72	253. 480 29	0. 180 91	−0. 399 00
9 ×7-A3	496. 707 09	497. 820 66	314. 097 78	247. 700 93	0. 228 86	−0. 580 33
13 ×9-B5	530. 767 60	528. 025 48	333. 251 27	252. 182 27	0. 140 96	−0. 276 42
13 ×9-A4	533. 338 43	530. 610 76	325. 782 82	265. 428 73	0. 179 45	−0. 343 17
13 ×9-A3	568. 154 72	562. 905 47	316. 172 97	280. 145 08	0. 191 43	−0. 419 18

表 3　目标物约占整个屏幕的 2/3 时各个标定板的标定结果

Table 3　The calibration results when the checkerboard is about 2/3 of the whole scree

标定板	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
9 ×7-B5	531. 019 79	528. 487 56	329. 666 84	255. 987 91	0. 211 13	−0. 510 16
9 ×7-A4	512. 684 40	508. 922 36	332. 641 02	254. 020 80	0. 158 24	−0. 316 52
9 ×7-A3	525. 102 81	528. 487 85	317. 992 55	251. 114 46	0. 202 27	−0. 389 63
13 ×9-B5	538. 893 01	535. 199 37	321. 330 49	248. 155 88	0. 212 37	−0. 437 25
13 ×9-A4	503. 016 88	499. 409 58	326. 874 96	256. 129 69	0. 195 93	−0. 341 07
13 ×9-A3	533. 787 27	536. 270 83	310. 424 59	263. 332 86	0. 222 99	−0. 419 47

2. 4　物理目标模板与虚拟模板对标定精度的影响

制作物理目标标定板时,往往是将其旁图中的每个小格子都视为等长的小方格。而普通的物理模板的制作只需要将此图打印出来即可。因此物理模板世界坐标坐标的测量精度将会受到打印机的精确度一句分辨率的影响。但是虚拟模板的产生可以有效避免这种情况的出现。

由上面实验可知,当目标物占有整个屏幕的 1/3,棋盘规格为 9 ×7,A3 纸上的物理模板的标定结果最好。因此,本次实验决定采用目标物占有整个屏幕的 1/3,然后对两种规格的虚拟棋盘进行两次实验。结果如表 4。

3　结果分析

摄像机校准精度的典型测量是重投射误差[10],其中给定内参 f_x、f_y、u_0、v_0、k_1、k_2 以及每一幅图像的已知外参, 已知的物体点投影到屏幕上。然后,在真实像素坐标 (u_i,v_i) 和投影像素坐标 (u_i^{proj},v_i^{proj}) 之间计算均方根(RMS)投影误差。

$$E_{\text{reprojection}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{features}}}\sum_{i=1}^{n_{\text{features}}}\left[(u_i - u_i^{\text{proj}})^2 + (v_i - v_i^{\text{proj}})^2\right]} \tag{3}$$

张氏法也采用 RMS 重投影误差优化内在参数。

3. 1　标定目标物和摄像机之间的距离对标定精度的影响

当标定目标板约占 1/3 时,6 块标定板的重投影误差比较图见图 5,当标定目标板约占 1/2 时,6 块标定板的重投影误差比较图见图 6。当标定目标板约占 2/3 时,6 块标定板的重投影误差比较图见图 7。从图 5 ~ 图 7 中可以看出在 6 块模板中,在规格为 9 ×7 以及 13 ×9 的模板中基本是上打印在 A3 纸上的模板的标定结果中的重投影误差最小。

表 4　虚拟标定板的标定结果

Table 4　The calibration results of the virtual checkerboard

标定板	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
13 ×9	527. 185 97	526. 933 28	327. 145 25	252. 992 86	0. 223 34	−0. 570 61
9 ×7	502. 158 74	505. 309 10	302. 125 47	250. 124 58	0. 111 04	−0. 558 74

当标定目标板约占屏幕的 1/3 时,规格为 9 ×7 比 13 ×9 并且均打印在 A3 纸上的棋盘误差小了[0.013 04　0.004 62];当选用 9 ×7 规格并且打印在 A3 纸上的棋盘时,1/3 位置的比 1/2 的误差小了[0.031 04　0.184 4],2/3 位置的比 1/2 的误差小[0.017 4　0.0182 4]。

纵观图 5 ~ 图 7 可以看出,当选用 9 ×7 规格的棋盘并且占有整个屏幕的 1/3 时,效果 A3 > B5 > A4 的;当选用 9 ×7 规格并且打印在 A3 纸上的棋盘时,效果是 1/3 > 1/2 > 2/3。即标定目标板约占屏幕的1/3 为最理想的标定目标物与摄像头之间的距离,选用 9 ×7 并且打印在 A3 纸上的模板用来完成相机标定,效果最好。

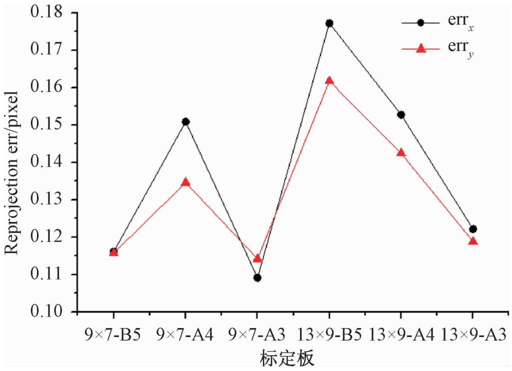

图 5　1/3 时的重投影误差比较图

Fig. 5　1/3 reprojection error comparison chart

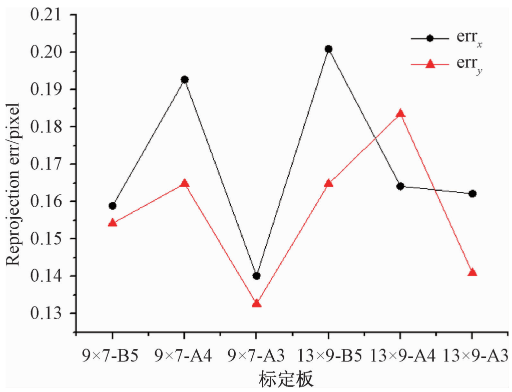

图 6　1/2 的重投影误差比较图

Fig. 6　1/2 reprojection error comparison chart

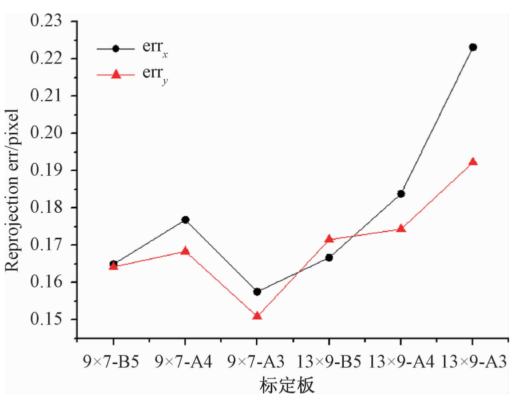

图 7　2/3 的重投影误差比较图

Fig. 7　2/3 reprojection error comparison chart

3.2　物理目标模板与虚拟模板对标定精度的影响

虚拟标定模板的标定的重投影误差见图 8 ~ 图 11。从图 8 ~ 图 11 中可以看出,虚拟棋盘的引入使得可以用来衡量标定精度的重投影误差有效降低。比如,此次实验的 13 ×9 的虚拟棋盘的重投影误差由[0.122 14 0.118 80]降为[0.113 57 0.104 46]。

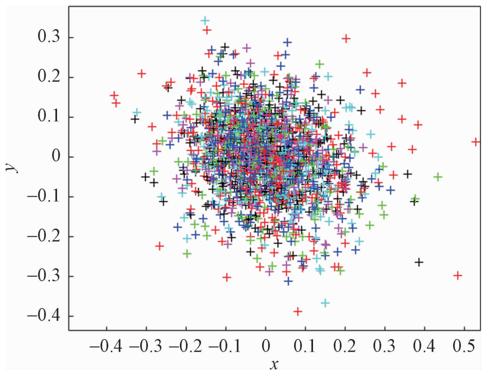

图 8　虚拟 13 ×9 棋盘的重投影误差

Fig. 8　The reprojection error picture of virtual board(13 ×9)

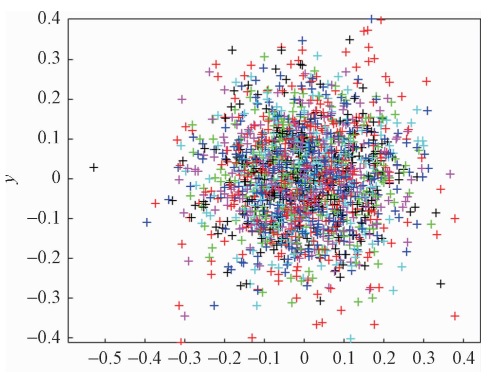

图 9　13 ×9 物理棋盘的重投影误差

Fig. 9　The reprojection error picture of real board(13 ×9)

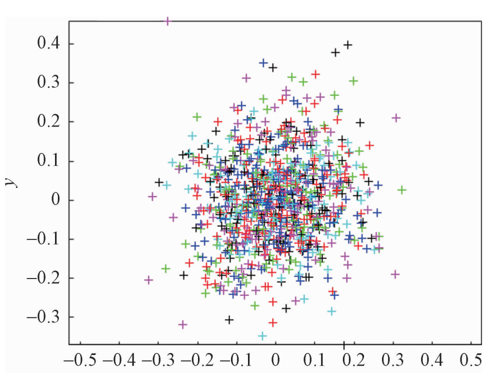

图 10　虚拟 9 ×7 棋盘的重投影误差

Fig. 10　The reprojection error picture of virtual board(9 ×7)

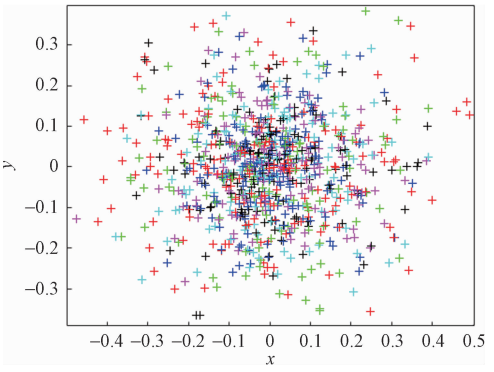

图 11 9 ×7 物理棋盘的重投影误差

Fig. 11 The reprojection error picture of real board(9 ×7)

4 结束语

为了验证标定目标物和摄像机之间的距离对标定精度的影响,本文做了以下两项工作。

(1)设计了 9 ×7 和 13 ×9 两种规格的物理棋盘,并且分别打印在 B5、A3、A4 纸上,即 6 块物理标定板。

(2)对上面制作的 6 块标定板分别在目标模板占有整个屏幕的 1/3、1/2、2/3 进行 18 次标定实验,并且得出选用 9 ×7 规格的打印在 A3 纸上的物理棋盘,并且占有整个屏幕的 1/3 时的重投影误差最小。

为了验证虚拟棋盘对标定精度的影响,本文用了设计的 9 ×7、13 ×9 两种规格的虚拟棋盘,在目标模板占有整个屏幕的 1/3 时进行 2 次标定试验,实验结果确实比同条件的物理棋盘的重投影误差小了(0. 005 57,0. 024 34)。

结果表明,标定时不是标定目标模板距离摄像头越近越好,标定板的规格也不是越大越好,当标定的相机是 kinect 时,建议选择 9 ×7 规格的模板并且打印在 A3 纸上,在获取图像的时候建议距离相机 70 cm 左右,即占屏幕的 1/3 左右。

参 考 文 献

1 尹洪涛, 刘 成, 李一兵,等. 相机标定误差因素分析. 信息通信, 2012;(1):28—30
Yin Hongtao, Liu Cheng, Li Yibing, *et al*. Analysis of camera calibration error factors. Information and Communication, 2012; (1): 28—30

2 陈晓燕, 董志国, 轧 刚,等. 相机标定精度外界影响因素仿真及实验研究. 太原理工大学学报, 2016; 47(1):16—20
Chen Xiaoyan, Dong Zhiguo, Kuang Gang, *et al*. Experiment and experimental study on factors influencing accuracy of camera calibration. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016; 47 (1): 16—20

3 凡 芳, 王振伟, 刘双印,等. 面向视觉测量的相机标定误差分析. 实验科学与技术, 2016; 14(6):14—16
Fan Fang, Wang Zhenwei, Liu Shuangyin, *et al*. Analysis of camera calibration error for visual measurement. Journal of Experimental Science and Technology, 2016; 14 (6): 14—16

4 吴渊凯, 卞新高. 计算机视觉中摄像机标定的实验分析. 电子测量技术, 2016; 39(11):95—99
Wu Yuankai, Bian Xingao. Computer vision in the camera calibration experimental analysis. Electronic Measurement Technology, 2016; 39 (11): 95—99

5 郑冬梅, 宋文爱. 相机标定关键设备对标定精度的影响分析. 图学学报,2017; 38(2):85—88
Zheng Dongmei, Song Wenai. Effects of camera calibration key equipment on calibration accuracy. Journal of Graphics, 2017; 38 (2): 85—88

6 肖志涛, 张文寅, 耿 磊,等. 双目视觉系统测量精度分析. 光电工程, 2014; 41(2):6—11
Xiao Zhitao, Zhang Wenyin, Geng Lei, *et al*. Measurement accuracy of binocular vision system. Photoelectric Engineering, 2014; 41 (2): 6—11

7 张 峰, 蒋理兴, 王 刃,等. 几种经典相机标定方法的精度分析. 测绘科学与工程, 2016;(4):44—48
Zhang Feng, Jiang Lixing, Wang Ren, *et al*. Accuracy analysis of several classical camera calibration methods. Surveying Science and Engineering, 2016; (4): 44—48

8 王向东, 董琦奇. 基于平面棋盘格标定板的三维空间标定新方法. 图学学报, 2016; 37(6):778—782
Wang Xiangdong, Dong Qiqi. New method for three-dimensional spatial calibration based on plane checkerboard lattice plate. Journal of Graphics, 2016; 37 (6): 778—782

9 Semeniuta O. Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy. Procedia Cirp, 2016; 41:765—770

10 Liu Z, Wu Q, Chen X, *et al*. High-accuracy calibration of low-cost camera using image disturbance factor. Optics Express, 2016; 24 (21):24321—24336

Analysis on Calibration Accuracy Based on Virtual Checkerboard

SONG Wen-ai, MA Yan-zhen *
(Software Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

[**Abstract**] The calibration target board is the necessary material in the camera calibration. For the influence of the distance between the camera and the target calibration object on the calibration accuracy, the image of the checkerboard is about 1/3, 1/2, 2/3 of the whole screen. The experiment illustrate that the calibration accuracy is highest when the chessboard chat is about 1/3 of the screen. To quantify the influence of the accuracy made by the virtual calibration plate, the virtual calibration plate with size of 9 × 7 or 13 × 9 was designed, and executed the calibration under the condition which the virtual calibration plate is about 1/3 of the screen. The results prove that virtual calibration is superior to the real calibration board with the same specification.

[**Key words**] calibration virtual checkerboard accuracy