

摄像机标定中的特征点提取算法研究与改进

李璐璐^{1,2,3} 赵文川¹ 伍凡¹ 刘永²

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
² 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ³ 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为提高摄像机的标定精度, 必须研究高精度的特征点提取方法。针对三种比较典型的标定图样: 棋盘格, 二维正弦条纹和高斯点阵, 分析比较了相应的提取特征点算法和用于摄像机内参数标定的精度, 得出基于傅里叶相位分析法的二维正弦条纹的特征点提取精度最高。并针对傅里叶方法处理二维正弦条纹不能准确提取边缘特征点的缺陷, 提出了使用相移法提取正交相位以代替傅里叶方法得出正交相位的新方法。这种方法可以消除傅里叶变换滤波对点阵边缘的模糊作用, 扩大了二维正弦条纹在摄像机标定中的适用范围。摄像机外参数标定实验表明该方法在处理包含边缘点的点阵时, 重投影误差保持在原有水平, 证明了其有效性。

关键词 机器视觉; 特征点提取; 相位提取; 二维正弦条纹; 棋盘格; 高斯点阵

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0515002

Analysis and Improvement of Characteristic Points Extraction Algorithms in Camera Calibration

Li Lulu^{1,2,3} Zhao Wenchuan¹ Wu Fan¹ Liu Yong²

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

² School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the camera calibration accuracy, characteristic points extraction method with high accuracy is needed. Three typical calibration patterns including checkerboard pattern, crossed sine fringe pattern, and Gaussian point matrix pattern are chosen. Corresponding characteristic points extraction algorithms are analyzed and compared, adding the comparison of accuracy in camera intrinsic parameters calibration, the best one is crossed sine fringe pattern based on Fourier phase analysis. To avoid the drawback that the Fourier method used in the crossed sine fringe pattern cannot handle with characteristic points located in the edge of the point matrix, a novel method that using phase-shift method instead of Fourier method is proposed to obtain the crossed phase. The new method can eliminate the indistinct affect in the edge of the point matrix caused by Fourier translation filtering, so to amplify the scope of application of crossed sine fringe pattern in camera calibration. The extrinsic parameters calibration experiment show that the new method is effective in handling point matrix including edge points, for the reprojection error keeps in original level.

Key words machine vision; characteristic points extraction; phase extraction; crossed sine fringe pattern; checkerboard pattern; Gaussian point matrix pattern

OCIS codes 100.3008; 120.5240; 150.1488

收稿日期: 2013-09-10; 收到修改稿日期: 2014-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61205007)、四川省科技创新研究团队项目(2011JTD0001)

作者简介: 李璐璐(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事机器视觉与光学测量方面的研究。E-mail: white_lu@tom.com

导师简介: 伍凡(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造和测试技术方面的研究。

E-mail: wufan@ioe.ac.cn

1 引 言

摄像机标定是机器视觉和摄影测量学中的关键问题之一,摄像机标定的精度在很多情况下决定了整个视觉测量系统的性能^[1-3]。标定参数包括摄像机的内部参数和外部参数^[4],其中内部参数包括摄像机的焦距、光心、畸变等,外部参数是摄像机坐标系相对于某一世界坐标系的三维位置和方向关系。

大部分的标定方法都必须提取标定特征点,摄像机标定精度通常与摄像机模型以及标定特征点的精度有关。当摄像机模型一定时,标定结果的精度主要取决于标定特征点的提取精度。标定特征点是指图像平面坐标和局部世界坐标已知的特殊点,各个特征点在空间中的相互关系可以确定世界坐标。用于摄像机标定的参照物可以分为三维立体参照物和二维共面参照物^[5]。其中二维共面参照物由于制作难度和成本均较低,因而得到广泛的应用。标定特征点一般选用在图像中对缩放、平移、旋转等变换保持一致性的点,例如圆域的中心、直线交叉点、方块顶点以及棋盘格方块的角点、灰度的局部最大值点、区域的形心或灰度重心、圆与直线的交点^[6-10]等。针对不同的特征点,相应的提取算法有形心法、

灰度重心法、边缘定位法、拟合法、相位分析法、局域模型法、模板相关匹配法等^[11-13]。

本文使用平板显示器显示图样作为二维共面参照物,针对目前普遍使用的三种比较典型的图样:棋盘格^[1],二维正弦条纹^[9]和高斯点^[12],比较了它们的特征点提取算法和用于摄像机内参数标定的精度。其中基于傅里叶相位分析法的二维正弦条纹在受噪声和离焦的影响时,其表现优于棋盘格和高斯点阵方法,在内参数标定中的重投影误差最小,特征点提取精度最高;但是由于使用了傅里叶滤波变换提取正交相位,对于包含边缘点的点阵计算效果不理想。本文提出了使用相移法代替傅里叶方法提取相位,可以避免边缘点模糊效应,正确计算包含边缘点的点阵,从而弥补了这一缺陷。

2 三种图样介绍

2.1 棋盘格

棋盘格图样[图 1(a)]是由黑白相间的小方块构成的,标定特征点为棋盘格方块的角点。提取棋盘格角点时用 Harris 角点探测法^[1],直接利用图像的灰度信息来探测角点。

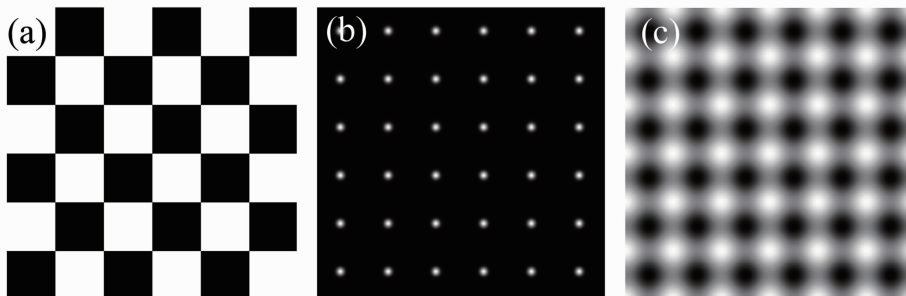


图 1 三种标定图样。(a)棋盘格;(b)高斯点阵;(c)二维正弦条纹

Fig. 1 Three patterns for calibration. (a) Checkerboard pattern; (b) Gaussian point matrix pattern; (c) crossed sine fringe pattern

一幅图像的角点与自相关函数的曲率特性有关。自相关函数可以表示图像局部灰度的变化程度,如下式所示:

$$E(x, y) = \sum_{u, v} \omega_{u, v} |I_{x+u, y+v} - I_{u, v}|^2, \quad (1)$$

式中 $E(x, y)$ 为由于两个图像窗口偏移 (x, y) 而造成的图像灰度的平均变化, ω 为图像窗口, I 为图像灰度, (u, v) 为像素点的图像坐标。在角点处,图像窗口的偏移将造成自相关函数 $E(x, y)$ 的显著变化。

Harris 角点探测器的形式为

$$R(x, y) = \det[\mathbf{M}(x, y)] - k \cdot \text{trace}^2[\mathbf{M}(x, y)], \quad (2)$$

式中矩阵 \mathbf{M} 是自相关函数 $E(x, y)$ 的近似 Hessian 矩阵, $\det[\mathbf{M}]$ 与 $\text{trace}[\mathbf{M}]$ 分别为矩阵 \mathbf{M} 的行列式的值和 \mathbf{M} 的迹。如果某一点的 $R(x, y)$ 超过了预先设定的阈值,则认为该点是角点。

通常的 Harris 角点探测法的特征点提取精度在像素级。在处理的过程中,经常对角点子域的像素灰度进行拟合内插,从而使探测精度达到亚像素级。

2.2 高斯点阵

单个高斯点的强度分布为^[14]

$$I(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

将其与周期性冲击函数进行卷积,便可得到高

斯点阵[如图 1(b)所示]。根据透视投影变换的固有特性,圆在摄像机平面上一般成椭圆的像^[1]。标

定特征点选取为高斯点的重心。

使用带阈值的重心法来提取特征点,计算公式为

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x,y) - T]x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x,y)}, \quad y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x,y) - T]y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x,y)}, \quad (4)$$

式中 $F(x,y)$ 为图像灰度, T 为背景阈值。该方法相当于将原图像与二值化阈值相减,然后对相减后的图像求重心。

2.3 二维正弦条纹

二维正弦条纹图标定靶[如图 1(c)所示]的强度函数为

$$I(x,y) = a + b_1 \cos[2\pi x/p_x + \varphi_{x0}(x,y)] + b_2 \cos[2\pi y/p_y + \varphi_{y0}(x,y)], \quad (5)$$

一般设系数 $a = 1/2, b_1 = b_2 = 1/4, \varphi_{x0}(x,y)$ 和 $\varphi_{y0}(x,y)$ 分别为初始相位, p_x 和 p_y 为条纹周期。考虑光照背景因素,摄像机拍摄到标定靶图像的强度函数为

$$I(u,v) = a(u,v) + b_1(u,v) \cos[\varphi_u(u,v)] + b_2(u,v) \cos[\varphi_v(u,v)], \quad (6)$$

式中 $a(u,v)$ 为背景光强, $b_1(u,v), b_2(u,v)$ 为条纹对比度, $\varphi_u(u,v), \varphi_v(u,v)$ 分别为 u 和 v 方向的相位分布。

标定特征点为局部最亮点,特征点提取的步骤如下:

1) 根据傅里叶条纹分析方法^[15],通过傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换,从摄像机拍摄的二维正弦条纹标定靶中提取出 u 和 v 方向的截断相位分布;

图 2(a)是 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$ 的二维正弦条纹图,条纹周期为 40 pixel。将其进行傅里叶变换至频域[图 2(b)为频谱图局部放大图],可以分离出两个正交方向上的频谱分量。图 2(c)、(d)分别为对两个方向上的分量进行逆傅里叶变换提取出的截断相位分布。图中坐标轴的物理单位均为像素;

2) 由于二维正弦条纹图中的最亮点对应着截断相位值为零的点,估计最亮点的像素坐标,对亮点

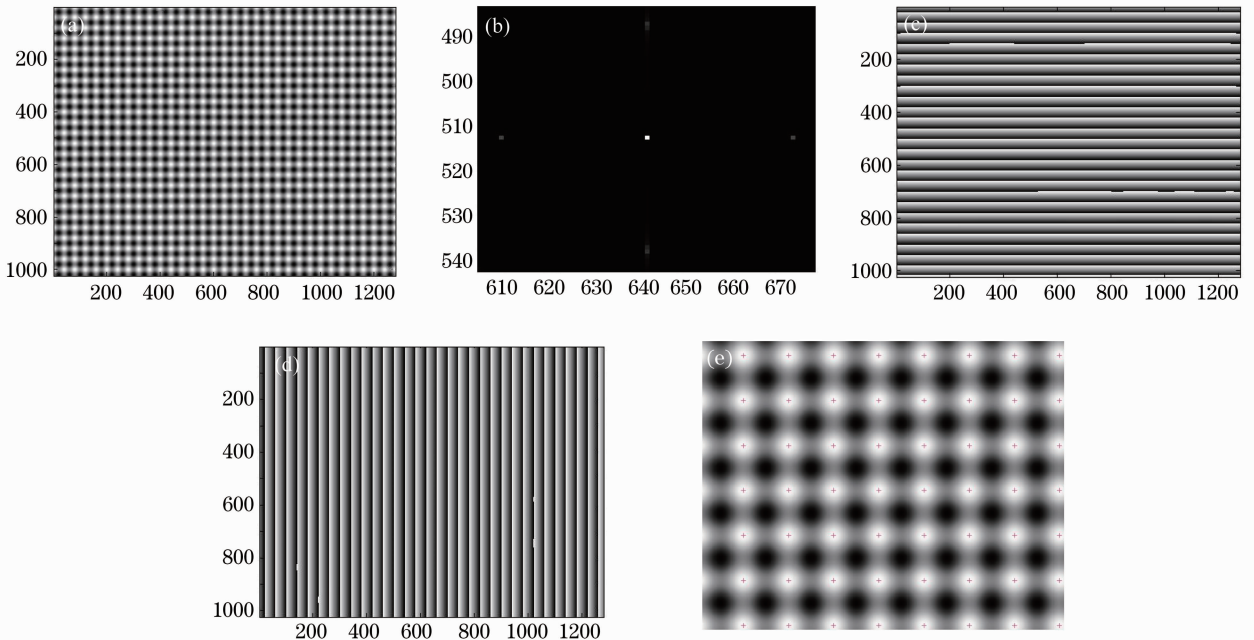


图 2 二维正弦条纹处理过程。(a)二维正弦条纹图;(b)频谱图(局部放大);(c)水平截断相位;(d)竖直截断相位;(e)提取出的特征点(局部放大)

Fig. 2 Processing of crossed sine fringe. (a) Crossed sine fringe pattern; (b) spectrum picture (partly amplified); (c) horizontal wrapped phase; (d) vertical wrapped phase; (e) extracted characteristic points (partly amplified)

在一定宽度的窗口内进行相位展开,得到这个小区域的 u 和 v 方向的展开相位分布。然后进行二维线性拟合:

$$\begin{cases} u = g_0 + g_1 \varphi_{mu}(u, v) + g_2 \varphi_{mv}(u, v) \\ v = q_0 + q_1 \varphi_{mu}(u, v) + q_2 \varphi_{mv}(u, v) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $g_0, g_1, g_2, q_0, q_1, q_2$ 为拟合系数。当 $\varphi_{mu}(u, v)$ 和 $\varphi_{mv}(u, v)$ 同时为零时,可以得到局部最亮点的亚像素坐标[图 2(e)中的红色十字]。

3 三种典型特征点提取方法比较

上述三种标定靶标中:棋盘格法的本质是求棋盘格方块的角点;二维正弦条纹是利用相位信息求光强最大点;高斯点阵是求高斯点的重心。三者均为亚像素精度提取方法。

模拟图样大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$, 三种图样的周期均为 40 pixel 。通过模拟仿真,分别比较了三种图样在计算效率、抗噪性和抗离焦方面的表现。并通过标定摄像机内参数,分别采用三种图样时的摄像机标定精度。

3.1 计算效率分析

这三种方法中,二维正弦条纹法在点提取初始估计之前需要对条纹进行预处理,将条纹信息变为两个正交的相位信息。其他两种方法不需要预处理。

三种提取方法在计算时间上的差异如图 3 所示。在相同的计算机硬件环境下,提取 $20 \sim 600$ 个点时的计算时间比较得出,高斯图样费时较多。结合预处理的情况来看,棋盘格图样的综合效率最高。

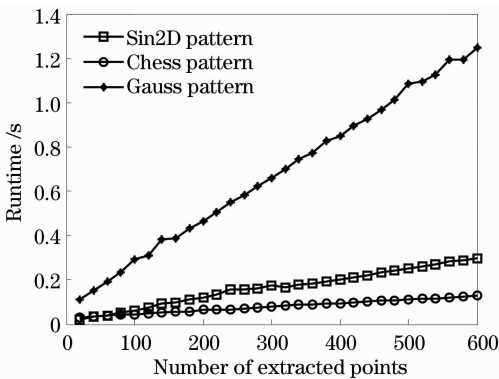


图 3 三种提取方法计算效率比较

Fig. 3 Efficiency comparison of three point extraction methods

在实际的提取过程中,使用人工交互提取特征点方法,即操作人员先用鼠标定位四个初始位置,然后由程序在初始位置划定的领域内自动寻找特征点。这种操作流程的优点是简单易行、结果稳定,所

以已在标准的标定工具包^[16]中得到应用。由于操作过程需要人工交互,该流程的效率本身较低。相比之下,三种图样的计算效率不会对整个提取过程的效率产生较大影响。

3.2 抗噪性模拟

随机噪声是在图像的采集、传输等过程中引入的噪声,为不可消除的因素。在模拟图样中,加入强度为最大光强 $n\%$ 的随机白噪声,与不加入噪声时提取特征点的坐标进行对比,取全部特征点的标准差作为误差。

图 4 比较了三种特征点提取方法的抗噪性:特征点提取精度受噪声影响最小的靶标图样为二维正弦条纹;高斯点阵提取精度受噪声影响最大,并且在噪声上升到 12% 时即无法正常提取重心点坐标;棋盘格的抗噪性能介于二维正弦条纹和高斯点阵之间,其最大特点是在噪声很大时(高斯点阵和二维正弦条纹都已无法使用时)也能提取到角点,但此时精度已较低。

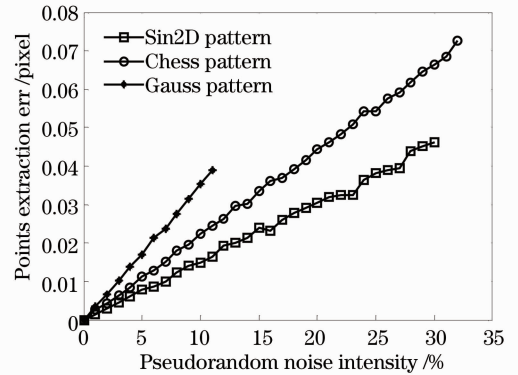


图 4 三种提取方法抗噪性比较

Fig. 4 Anti-noise comparison of three point extraction methods

3.3 离焦的影响

摄像机本身就是一个有一定平滑作用的光学系统。标定过程中,由于标定靶与相机之间相对位置的变化,经常会造成离焦。

高斯滤波器可以近似离焦的效果^[17]。模拟图样中均加入强度为最大光强 10% 的随机白噪声,用 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 高斯滤波仿真镜头离焦,设置不同的 σ 值代表不同的离焦程度,取所有点的标准差作为误差。

根据图 5,随着离焦程度的增大,三种标定图样的误差都有变大的趋势,点提取误差上升速度最快的是棋盘格,在 $\sigma=3.5$ 左右时超过高斯点阵并保持最大,二维正弦条纹的误差上升速度与高斯点阵相当,保持误差最小。

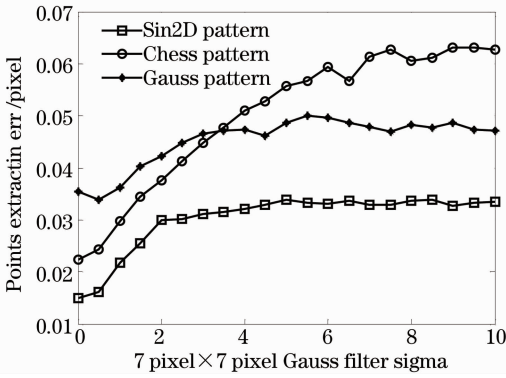


图 5 三种提取方法抗离焦性比较

Fig. 5 Anti-defocusing comparison of three point extraction methods

表 1 摄像机内参数标定结果/pixel

Table 1 Camera intrinsic parameters results /pixel

	Checkerboard		Gaussian points				Crossed sine fringe	
f_x	3472.265	f_y 3472.253	f_x 3474.212	f_y 3474.378	f_x 3473.442	f_y 3473.711		
u_0	710.420	v_0 539.208	u_0 707.500	v_0 538.792	u_0 708.993	v_0 541.539		
Err_x	0.084	Err_y 0.058	Err_x 0.069	Err_y 0.047	Err_x 0.039	Err_y 0.035		

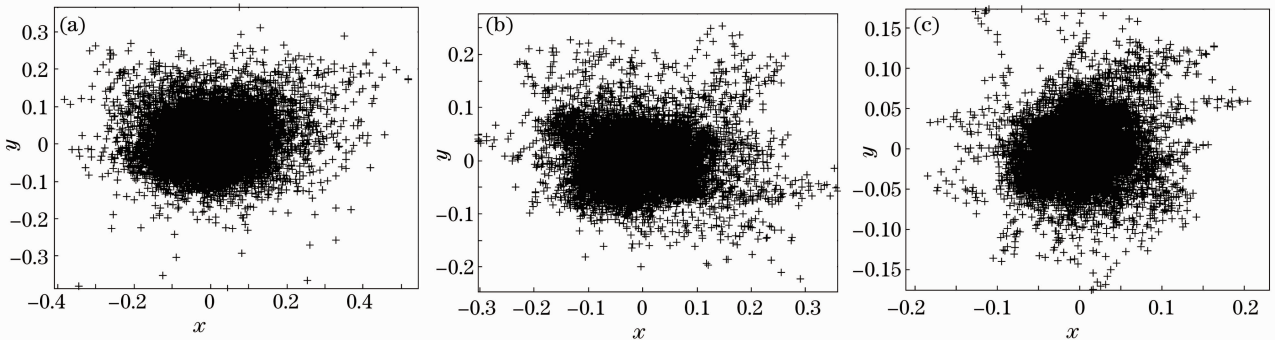


图 6 三种图样的内参数标定重投影误差。(a)棋盘格；(b)高斯点阵；(c)二维正弦条纹

Fig. 6 Intrinsic parameters calibration reprojection error of three patterns. (a) Checkerboard pattern; (b) Gaussian point matrix pattern; (c) crossed sine fringe pattern

3.5 比较评价

1) 棋盘格,使用 Harris 角点探测法,计算每个像素的灰度平均平方梯度矩阵,定位精度可以达到亚像素级别。但是棋盘格本身的边缘线易受噪声和离焦的影响变得模糊,造成提取精度的下降。

2) 高斯点阵,使用带阈值的重心法,提取过程非常简单,且提取精度为亚像素水平。但由于高斯点的光点较小,易受到噪声影响,图像对比度的要求

3.4 摄像机内参数标定实验

三种图样用于摄像机内参数标定的实验采用分辨率为 1440 pixel x 900 pixel 的 SAMSUNG E1920NW 显示器显示不同的图样作为平面标定靶,该显示器的像素间距为 0.24 mm。用来拍摄的 CCD 相机是 Baumer TXG14,分辨率为 1040 pixel x 1392 pixel。三种图样的周期均为 40 pixel。标定的摄像机参数与标定精度如表 1 所示,各参数的单位均为 pixel。图 6 为三种图样标定内参数的重投影误差图示,它是以前标定靶的世界坐标和投影矩阵计算标定靶上特征点在图像上的理论坐标与实际坐标的差,其单位为 pixel。三种图样的特征点提取精度是二维正弦条纹最高,高斯点阵次之,棋盘格最低。

也较高。

3) 二维正弦条纹,引入了相位分析,使得提取过程简便灵活,局部最亮点的提取精度在亚像素级别。在预处理阶段,由于进行了傅里叶变换滤波,该方法具有一定的抑制噪声特性;但同时图像边缘的特征点提取会引入较大的误差^[18]。

三种图样的表现可以归纳为表 2 所示。如前所

表 2 三种图样性能比较

Table 2 Performance comparison of three patterns

	Anti-noise	Anti-defocusing	Experimental accuracy
Checkerboard	Mid	Low	Low
Gaussian points	Low	Mid	Mid
Crossed sine fringe	High	High	High

述,计算效率对整个处理流程的影响很小,可不作考虑。综合来看,二维正弦条纹无论是在抗噪还是抗离焦方面都有很大优势,实验精度也最高。当只存在随机噪声时,棋盘格的提取精度要高于高斯点阵;如果离焦和噪声同时存在,高斯点的提取精度在离焦达到一定程度时会优于棋盘格,内参数标定实验的结果也验证了这一点。

4 二维正弦条纹法的改进

通过模拟实验和内参数标定实验得出,二维正弦条纹方法在三种图样中点提取精度最高。但是由于傅里叶变换依赖于图样的周期性,在显示器与背景分界边缘部分是周期性中断的部分,预处理中的傅里叶低频滤波会将该部分的高频信息滤除,从而使逆滤波后边缘部分的相位产生较大误差。因而选取的特征点不能太靠近点阵的边缘,使一部分点和相应的可标定区域被浪费[如图7(a)所示]。在某些情况下(如可提取的点数较多或边缘点相对很少,或需标定的范围较小时),这个问题影响不大,可以忽略,但是在以下情况中:1)可提取的点数较少或边缘点相对较多,2)需要大范围全场标定,3)显示器屏幕大小有限,换大屏幕显示器所需成本较高。这时必须有效的利用边缘点,这时傅里叶方法就存在一定的缺陷。

4.1 相移法提取相位

使用相移法来代替傅里叶滤波变换提取相位。相移法的基本原理是通过有一定相位差的多幅正弦条纹图($n \geq 3$)来计算相位^[19]。文中采用四步相移法,显示并拍摄四幅相位差为 $\pi/2$ 的条纹图:

$$I_n = A + B \cos \left[\varphi + \frac{(n-1)\pi}{2} \right], (n = 1, 2, 3, 4), \quad (8)$$

式中 A 为背景光强, B/A 为条纹的对比度, φ 为相位函数,使用下式可解得

$$\varphi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}. \quad (9)$$

分别投影水平条纹和竖直条纹解出截断相位以代替傅里叶滤波变换得出的水平相位和竖直相位,其他保持不变。二维正弦条纹图作为点提取的参照图样,用来定位点阵的初始位置和检验提取点是否与亮点大致重合。实际提取到的特征点是相移法得出的水平零相位和竖直零相位的交点。

4.2 摄像机外参数标定实验

拍摄一幅正弦二维条纹图,和两组正交的一维正弦移相条纹,分别使用傅里叶滤波变换和四步相移法得到正交的截断相位,并选取条纹图上不同部分的点阵进行摄像机外参数标定。

图7(a)的点阵中不存在边缘点,图7(b)~(d)

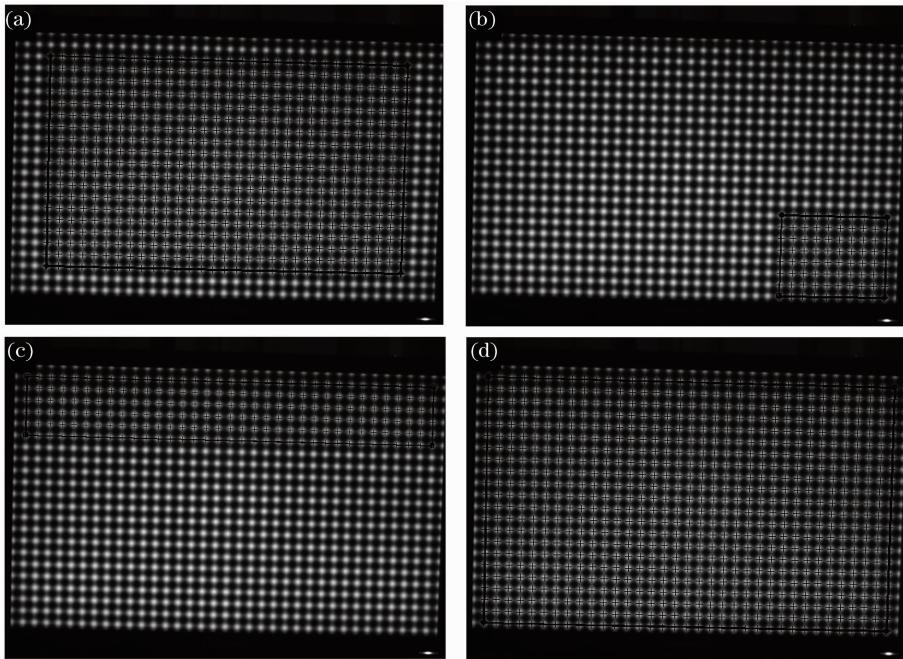


图7 摄像机外参数标定提取点阵示意图。(a)点数589;(b)点数80;(c)点数210;(d)点数770

Fig. 7 Point matrixes in the extrinsic parameters calibration. (a) 589 points; (b) 80 points; (c) 210 points; (d) 770 points

则分别取了图片不同部分含有边缘点的点阵。表3为两种方法重投影误差的对比,单位为 pixel。可以看出,在不存在边缘点时,傅里叶方法的重投影误差比相移方法略微小一点;当点阵中存在边缘点时,傅

里叶方法的重投影误差显著增大,而相移方法的误差仍然保持在原有的水平,变化的幅度远小于傅里叶方法。

表3 摄像机外参数标定重投影误差对比/pixel

Table 3 Extrinsic parameters calibration reprojection error comparison /pixel

Point matrix groups		(a)	(b)	(c)	(d)
Fourier	Err _x	0.03124	0.08297	0.09523	0.12142
Method	Err _y	0.03435	0.24947	0.10110	0.20626
Phase-shifting method	Err _x	0.03992	0.03067	0.03818	0.04759
Method	Err _y	0.03978	0.02146	0.04405	0.05353

使用相移法提取相位的方法在标定中需拍摄的图片数为 $1+2n(n \geq 3)$, 相比只拍摄一幅的傅里叶方法, 相位提取的时间效率有所降低。但是一般来说, 标定参数精度的重要性高于标定效率, 并且在人工交互的标定中, 效率对整个流程产生的影响较小, 可以忽略。

5 结 论

针对三种比较典型的标定图样: 棋盘格, 二维正弦条纹和高斯点阵, 通过模拟仿真和实际实验比较了三种图案相应的特征点提取算法的计算效率、抗噪性、抗离焦性和用于摄像机内参数标定的精度。并提出了使用相移法代替傅里叶分析法提取相位的二维正弦条纹特征点提取改进方法, 分别投影水平条纹和垂直条纹解出截断相位以代替傅里叶滤波变换得到的正交相位。实际提取到的特征点是相移法得出的水平零相位和垂直零相位的交点。二维正弦条纹图作为点提取的参照图样, 用来定位点阵的初始位置和检验提取点是否与亮点大致重合。该方法扩大了二维正弦条纹的适用范围, 摄像机外参数标定实验验证了它的有效性。

参 考 文 献

- Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2005. 33-97.
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 33-97.
- Guo Tao, Da Feipeng, Fang Xu. Camera calibration under small field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 39(8): 0808001.
郭涛, 达飞鹏, 方旭. 小视场环境下的摄像机标定[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808001.
- Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu, et al.. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715002.
苑云, 朱肇昆, 张小虎, 等. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715002.
- Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions, 2000, 22(11): 1330-1334.

- Remondino, C Fraser. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, 36(5): 266-272.
- X Meng, Z Hu. A new easy camera calibration technique based on circular points [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(5): 1155-1164.
- Q Chen, H Wu, T Wada. Camera Calibration with Two Arbitrary Coplanar Circles [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2004. 521-532
- Y Liu, X Su. Camera calibration with planar crossed fringe patterns [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(2): 171-175.
- Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 32(1): 0115001.
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. 光学学报, 2011, 32(1): 0115001.
- Sun Nan, Zhang Liyan, Ye Nan, et al.. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412001.
孙楠, 张丽艳, 叶南, 等. 基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412001.
- Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches [M]. Beijing: Science Press, 2009. 81-117.
于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 81-117.
- Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315003.
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003.
- Huang, Q Zhao, W Wang, et al.. A calibration method of multi-camera pose based on monocular vision [C]. The 1st International Conference on Industrial Application Engineering 2013 (ICIAE2013), 2013.
- Yu Chengbo. Digital Image Processing and Matlab Implementation [M]. Chongqing: Chongqing University press, 1993.
余成波. 数字图像处理及 Matlab 实现[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- Liu Yuankun, Su Xianyu. A new camera calibration technique using FTP method [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(6): 149-153.
刘元坤, 苏显渝. 基于傅里叶条纹分析的摄像机标定[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(6): 149-153.
- J Y Bouguet. Camera calibration toolbox for matlab. 2004. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc.
- M Shimizu, M Okutomi. Precise sub-pixel estimation on area-

- based matching [J]. Systems and Computers in Japan, 2002, 33 (7): 1-10.
- 18 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Xue Junpeng, *et al.*. Pose estimation based on convex-relaxation global optimization algorithm in videogrammetry [J]. J Optoelectronics • Laser, 2011, 22(9): 1384-1389.
- 19 X Su. Phase unwrapping techniques for 3D shape measurement [C]. International Conference on Holography and Optical Information Processing, International Society for Optics and Photonics, 1996; 460-465.

栏目编辑: 李志兰