

doi:10.3788/gzxb20184707.0715002

基于正弦相位编码的相机离焦标定

杨浩¹, 蔡宁¹, 林斌^{1,2}, 曹向群¹

(1 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

(2 浙江大学台州研究院, 浙江 台州 318000)

摘 要:分析了光学系统离焦状态对基于正弦光栅的结构光相位的影响.基于正弦结构光相位与相机对离焦状态无关的性质,提出了一种利用相移法正弦结构光编码显示面板对离焦相机进行标定的方法.使用 Floyd-Steinberg Dithering 算法消除了显示面板 gamma 变换带来的结构光相位计算误差.实现了相机在离焦状态下对标定物特征点的准确提取.标定结果重投影误差为 0.17 pixels,相机焦距的标定误差在 0.39% 以内.与传统方法相比提高了标定精度,为具有特殊成像范围的相机的标定提供了一种解决方案.

关键词:相机标定;离焦;相位匹配;相移法;摄影设备

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)07-0715002-9

Defocus Camera Calibration Based on Sinusoidal Phase Coding

YANG Hao¹, CAI Ning¹, LIN Bin^{1,2}, CAO Xiang-qun¹

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 Research Institute of Zhejiang University-Taizhou, Taizhou, Zhejiang 318000, China)

Abstract: The influence of the defocus state of the optical system on the phase of structured light based on sine grating, abbreviated as sinusoidal structured light, was analyzed. Based on the property that the sinusoidal structured light phase is independent of the camera's focusing state, a method of calibrating the camera in the defocus state using a phase-shifted sinusoidal-structured-light-encoded display panel is proposed. The Floyd-Steinberg Dithering algorithm is used to eliminate the structured light phase calculation errors caused by the gamma conversion of the display panel. This method makes the accurate extraction of the feature points of the calibration object under the defocus state come true. The calibration result has a reprojection error of 0.17 pixels. The calibration error of the camera focal length is within 0.39%. The calibration accuracy was improved compared to traditional methods. A solution for the calibration of cameras with a special imaging range was provided.

Key words: Camera calibration; Defocusing; Phase matching; Phase shift; Photographic equipment

OCIS Codes: 150.1488; 120.0120; 120.2650; 100.5070

0 引言

对于三维重建,即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)等应用,准确的相机参数是得到良好结果的基础.因此,如何更加准确方便地获得相机参数一直是光学领域和计算机视觉领域的研究热点.经过多年的发展,目前相机标定方法主要分为传统相机标定方法、主动视觉相机标定方法以及相机自标定方法^[1-2].传统相机的标定方法需要高精度的已知结构信息的标定目标^[3-4],由于其使用复杂,标定物造价高昂,目前已很少使用.主动视觉标定方法利用标定物的已知移动信息来进行标定.Tsai 提出的

基金项目:江苏省科技计划项目(工业支撑)(No.BE2014082),昆山市机器人及智能装备科技专项(No.KSJ1517)和浙江省公益技术应用研究(No.2016C01G2011454)资助

第一作者:杨浩(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、相机标定和图像处理. Email:21530012@zju.edu.cn

导师(通讯作者):林斌(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为图像传感及处理、光电测量技术和仪器. Email:wjlin@zju.edu.cn

收稿日期:2018-03-11; **录用日期:**2018-04-11

<http://www.photon.ac.cn>

一种利用二维平面标定物的相机标定方法^[5].这类方法一般精确度较高,但需要三坐标测量仪等精密移动平台记录标定物位置变化,使用过程复杂.相机的自标定方法由于其兼顾了标定精度和使用的简便性得到了最广泛的使用.其中目前使用最广泛的是2000年ZHANG提出的一种新型的利用二维平面标定板的相机标定方法^[6],该方法在使用中可任意放置相机以及标定板.在标定过程中,待标定相机从不同位置 and 不同角度拍摄标定板上图案(一般为棋盘格),提取特征点后经过运算即可求得相机参数.

目前,相机标定算法都需要得知标定物经待标定相机拍摄后的精确像素坐标.像素坐标的精度很大程度上影响了标定结果的精度.但是对于某些成像范围特殊的相机来说,一般标定物的适用范围在这些相机的成像范围之外.这些特殊相机只能得到一般标定物的离焦模糊照片.如拍摄近距离小物体的微距相机,一般视场与景深较小.在应用ZHANG方法时,要求标定板多次改变位姿,不同位姿之间尽可能不平行且尽量充满整个视场.因此标定板常会位于微距相机的清晰成像范围之外.目前对于小景深小视场情况下标定方法的研究很少,其中郭涛^[7]针对小视场条件提出了一种利用二次曲线与直线的混合标定方法,但在应用此方法时对二次曲线的精确拟合是一个难点.LEI H论证了相位编码作为标定物的合理性且提出了一种虚离焦的特征检测增强方法^[8].之后,WANG Y提出了一种在相机离焦状态下仍可检测的标定图案^[9],但其绘制方式较为繁琐.

为解决特殊成像范围相机标定困难的问题,本文提出了一种利用正弦结构光编码的显示面板作为标定物的方法.该方法利用待标定相机在离焦状态下得到的显示面板的模糊图像,就可以得到显示面板上特征点的精确像素坐标.使相机在离焦状态下可以利用ZHANG方法等通用方法进行标定.为微距相机等特殊成像范围相机的标定提供了一种有效的解决方案.

1 标定原理

1.1 相机模型

本文使用相机针孔模型.空间中一点 M ,世界坐标为 $M = [X, Y, Z]^T$. M 投影在相机CCD中像素坐标为 $m = [x, y]^T$,齐次坐标形式表示为 $\bar{m} = [x, y, 1]^T$. M 和 \bar{m} 坐标转换关系为^[10]

$$\lambda \bar{m} = K(RM + t) \quad (1)$$

式中, λ 为尺度因子, K 为相机的内参数矩阵, R 和 t 表示从世界坐标到相机坐标的旋转矩阵和平移向量.内参数矩阵的各元素如式(2)所示.

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

α, β 分别为焦距与 x 方向和 y 方向上像素大小的比值, γ 描述两图像坐标轴的偏移, (u_0, v_0) 为相机光心的像素坐标.

相机光学系统成像一般都会存在畸变.本文中相机的畸变模型由以下几个参数描述.

$$D = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad k_3] \quad (3)$$

式中, k_1, k_2 和 k_3 描述相机的径向畸变.无畸变点 (u', v') 与实际成像点 (x, y) 之间的关系分别为

$$u' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4)$$

$$v' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (5)$$

式中, $r = \sqrt{(x - u_0)^2 + (y - v_0)^2}$,表示像点与相机光心之间的距离.

与径向畸变相似, p_1 和 p_2 描述相机的切向畸变.切向畸变下的无畸变点 (u', v') 与实际成像点 (x, y) 之间的关系为

$$u' = x + [2 p_1 xy + p_2 (r^2 + 2 x^2)] \quad (6)$$

$$v' = y + [p_1 (r^2 + 2 y^2) + 2 p_2 xy] \quad (7)$$

1.2 正弦结构光编码和相移法解码

相移法是一种具有较高准确度的结构光编码方法. N 步相移法第 k 步投影正弦结构光到目标上后得到的图像可描述为

$$I_k(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2k\pi}{N} \right] \quad (8)$$

式中, $I'(x, y)$ 为背景光强, $I''(x, y)$ 为结构光的调制光强, $\varphi(x, y)$ 为待求解的 (x, y) 点的相位, 计算公式为^[11]

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{k=1}^N I_k \sin \left(\frac{2k\pi}{N} \right)}{\sum_{k=1}^N I_k \cos \left(\frac{2k\pi}{N} \right)} \right] \quad (9)$$

1.3 离焦光学系统对结构光的影响

光学系统的成像效果相当于二维高斯函数空间域滤波器对理想图像进行滤波^[12], 该空间域滤波函数为

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[-\frac{(x-u_0)^2 + (y-v_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (10)$$

式中, σ 是高斯函数的标准差, 与相机光学系统的状态相关。

正弦结构光图案及其与背景光叠加后频谱如图 1, 其在频域下仅有零频项和基频项. 正弦结构光经过高斯滤波器滤波, 仍然可以保持仅有零频项和基频项存在的状态. 由于高斯滤波器对高频的抑制更强, 基频项与零频项的振幅比将下降, 但并没有改变基频项的频率大小. 这一特性在空间域表现为, 随着相机离焦程度的增加, 拍摄得到的结构光图案对比度逐渐下降. 但是只要得到的结构光图片不是完全模糊, 条纹消失, 离焦情况下相机拍摄得到的仍为正弦图案, 离焦获得的结构光图片解得的相位与清晰成像时获得的结构光图片解得的相位相同. 因此, 对标定板上的特征点进行相位编码, 利用相位的信息求得该特征点在离焦光学系统中的精确成像位置, 使其与特征点一一对应。

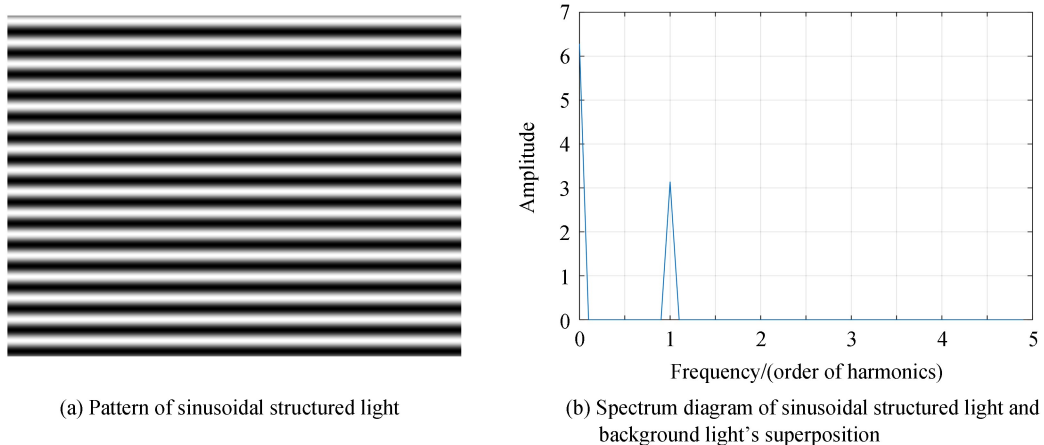


图 1 正弦结构光图案及正弦结构光与背景光叠加后频谱

Fig.1 Sinusoidal structured light, the sepectrum diagram after sinusoidal structured light and background light superimposed

1.4 标定系统及标定物的编解码方法

标定系统的结构如图 2. 系统由计算机、显示面板和待标定的离焦相机组成. 计算机控制显示面板显示特定的正弦结构光条纹图案, 对显示面板上的每一个点进行相位编码. 离焦相机拍摄显示面板图片. 待标定相机处于离焦状态, 只能拍得模糊图像. 以横向结构光和显示面板上一点 M_0 为例, 介绍显示面板上点的结构光编解码方法和像素坐标计算方法.

设显示面板上一点的世界坐标为 $M_0 = (X, Y, Z)$, 其经过离焦相机成像得到的像素坐标为 $m_0 =$

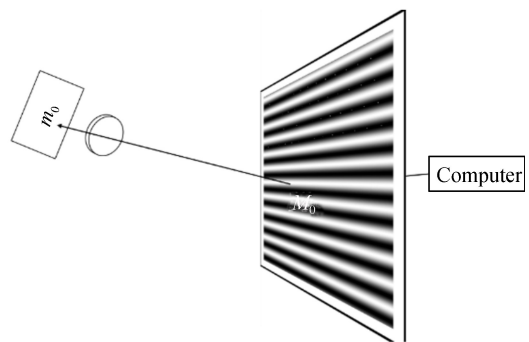


图 2 标定系统组成

Fig.2 Composition of calibration system

(x_0, y_0) . M_0 的坐标为人为规定, 即 $M_0 = (X, Y, Z)$ 为已知量, $m_0 = (x_0, y_0)$ 为待求未知量.

显示面板显示横向结构光图案, 对显示面板上的点进行纵向相位编码. 设点 M_0 的纵向相位编码值为 φ_v^M . 结构光图案由计算机控制产生, 显示面板上的每一点的相位都为已知量, 即 φ_v^M 已知. 根据前文讨论, 光学成像系统对正弦结构光相位无影响. 令 m_0 的纵向相位为 φ_{v0} , 此时有

$$\varphi_{v0} = \varphi_v^M \quad (11)$$

根据式(11)可得到 φ_{v0} 的值. 下一步利用插值法计算离焦相机所得模糊图像的每一个纵向相位为 φ_{v0} 的点的亚像素坐标, 得到线 line1. 由式(11)可知, line1 应穿过点 m_0 .

与之前步骤类似, 显示面板显示纵向结构光条纹. 对离焦模糊图像中所有水平相位值为 φ_{h0} 的像素得出线 line2, line2 也应穿过点 m_0 . m_0 的亚像素级别准确坐标即为 line1 和 line2 的交点坐标.

1.5 标定方法和标定步骤

结合 1.4 节显示面板上点的编解码方法. 整体的离焦相机标定步骤总结如下. 如图 3 所示.

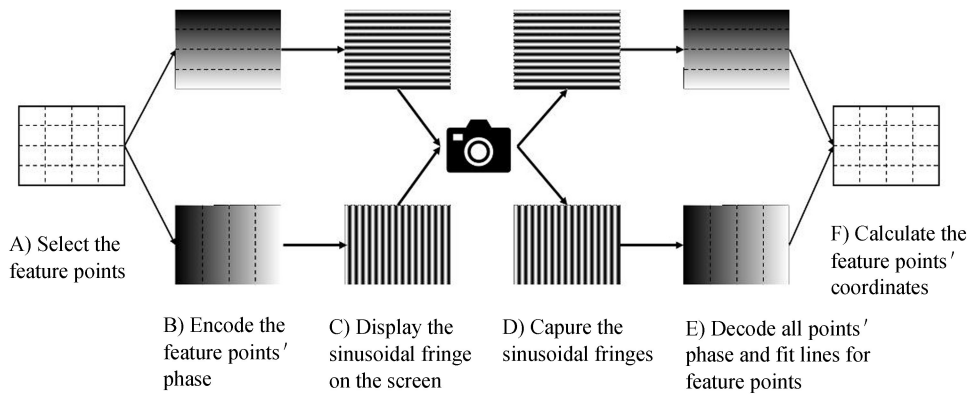


图 3 标定步骤

Fig.3 Calibration Process

1) 选取显示面板上的一部分点作为特征点, 记录这些特征点的世界坐标. 如图 3 中 A) 中所示, 虚线交叉点即为选择的特征点.

2) 对所有特征点进行横向相位编码和纵向相位编码, 记录这些编码值. 如图 3 中 B) 部分所示.

3) 在显示面板中依次显示纵向和横向正弦结构光图案. 待标定相机依次拍摄显示面板, 得到离焦模糊的结构光图像, 如图 3 中 C)D) 部分所示.

4) 分别计算结构光图像每一个像素点的横向和纵向相位. 利用 1.4 节方法, 找到每一个特征点对应的准确像素坐标如图 3 中 E)、F) 部分所示.

5) 多次改变待标定相机的位置, 尽量使显示面板图像充满整个视场. 重复 1 至 4 过程, 计算相机在每个位置拍摄得到的特征点像素坐标.

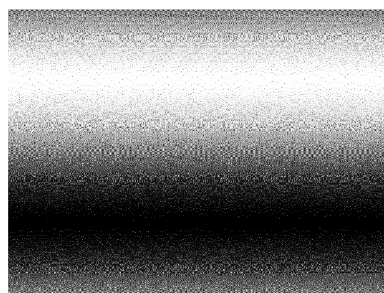
6) 使用特征点的空间坐标和像素坐标, 利用通用相机标定方法^[6]进行相机参数的计算.

2 模拟分析

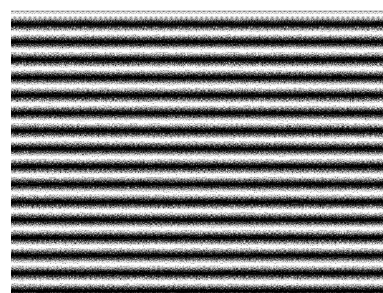
2.1 液晶面板 γ 变换带来的影响

为迎合消费者的使用体验, 大部分厂商都会根据人眼睛的观感利用 γ 变换 (常用 $\gamma = 2.2$) 对显示面板的显示效果进行一定的调校, 使图像的实际像素值与显示亮度成非线性的关系^[13-15]. 这种调校会给结构光的相位计算带来较大的误差. 以横向相位为例, 选取 50 个连续像素的相位进行实验. 如图 4 所示, 实线为原始结构光图片计算得到的相位, 虚线为 γ 变换后结构光图片计算得到的相位. 经过 $\gamma = 2.2$ 的变换, 根据结构光图像求得的绝对相位与像素坐标不再是线性关系.

γ 变换不会影响值为 0 和 255 的像素的亮度. 为解决以上问题,利用 Floyd-Steinberg Dithering 算法^[16]对正弦结构光进行二值化,二值化结果如图 5(b).图 5(a)为将一个周期的正弦条纹二值化的效果示意图,可见二值化后的结构光图案仅有黑白两种颜色,根据疏密程度的不同模拟图像的灰度分布.根据已有的研究结果,Floyd-Steinberg Dithering 算法处理后的二值化图像与离焦光学系统结合可以得到高质量的正弦条纹,且经此方法处理后,结构光图案的频谱特性几乎不变,仅存在零频项和基频项^[12,17-20].



(a) Dithering algorithm's effect



(b) Sinusoidal structured light after dithering

图 5 Floyd-Steinberg Dithering 算法效果
Fig.5 Floyd-Steinberg Dithering algorithm's result

为验证二值化图像对矫正 γ 变换带来的非线性影响的效果进行模拟实验.从原始正弦结构光图像中选择 50 个点,记录其坐标和相位.将 γ 从 1.2 逐步增加到 3,分别作用于原始的正弦结构光图像与二值化后的正弦结构光图像,将 γ 变换后得到的原始结构光图像称为图像 A.对 γ 变换后二值化图像使用大小为 9×9 的高斯滤波器模拟相机的离焦成像效果,得到图像 B.根据 50 个点的相位,分别利用图像 A 和图像 B 和计算坐标.得到坐标计算平均误差如图 6.可以看出,随着 γ 值的增大,原始图像的坐标计算误差逐渐增大,而二值化后的图像不受 γ 变换影响,且误差远低于 γ 变换后的原始图像的计算误差,处于可以接受的范围之内.

2.2 离焦状态对坐标精度影响

二值化后的正弦结构光图案在对焦准确的状态下并非理想的正弦结构光图案.因此,相机的离焦状态可能对特征点的坐标计算带来一定的影响.利用 2.1 节记录的 50 个点,分别使用大小为 $9 \times 9, 17 \times 17, 33 \times 33, 55 \times 55$ 的四个高斯滤波器模拟相机的不同离焦状态.随着高斯滤波器的尺寸增大,相机离焦程度不断加大.得到坐标计算误差如图 7.

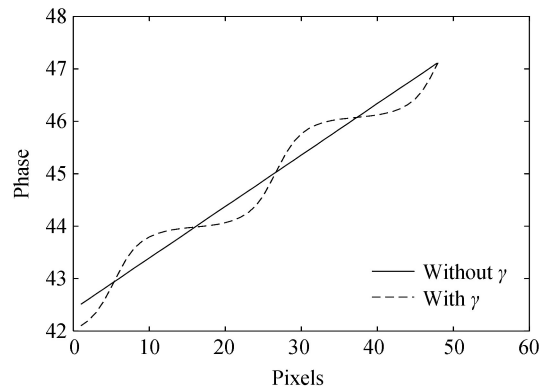


图 4 γ 变换带来的非线性
Fig.4 Non-linear brought by γ correction

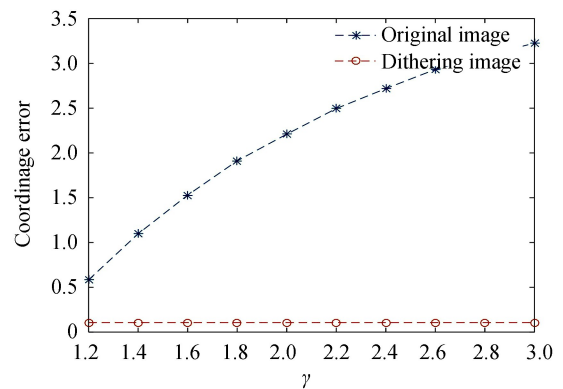


图 6 γ 变换后的坐标计算误差
Fig.6 Coordinates error after γ correction

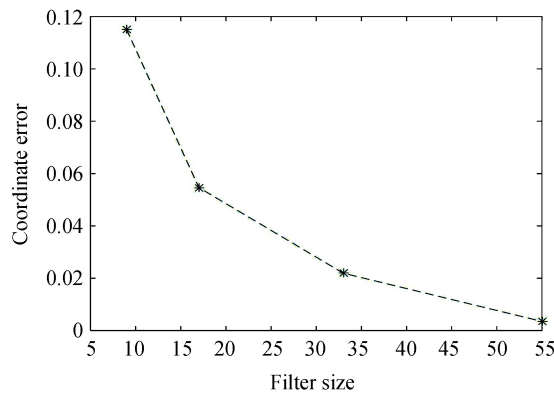


图7 坐标计算误差随离焦程度变化

Fig.7 Coordinate error changes with the degree of defocus

由图7可以看出,随着相机的离焦程度增加,坐标计算误差快速减小.与图6相比,在厂商常用的 $\gamma=2.2$ 的情况下,相机离焦程度所带来的误差远小于 γ 变换非线性带来的误差,证明了使用 Floyd-Steinberg Dithering 算法对正弦结构光进行二值化的合理性.

3 实验装置及实验结果分析

3.1 方法可行性实验

实验装置如图8所示.

待标定离焦相机采用大恒 MER-130-30UM 工业相机.实验测得镜头焦距 16.087 mm.分辨率 1280×1024 .像素为正方形,边长 $5.2 \mu\text{m}$.

在显示面板中心选择了 6×7 共 42 个规则排列的点作为特征点.计算并记录每个点的横向和纵向相位.

显示面板依次显示横向和纵向的二值结构光条纹图像,使用离焦相机依次拍摄编码后的显示面板.得到一部分正弦结构光模糊图像如图9所示.

Out-of-focus camera Sinusoidal fringe pattern on the screen

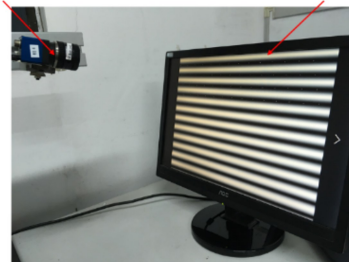


图8 标定实验装置

Fig.8 Device of calibration experiment



(a) Horizontal structured light image obtained by defocus camera



(b) Vertical structured light image obtained by defocus camera

图9 离焦相机得到的结构光条纹模糊图像

Fig.9 Cstructured light fringe images' obtained by defocus camera

利用 1.2 节的方法解得离焦图像每一个像素的相位示意图如图 10 所示.颜色越浅代表该像素点的相位值越大.

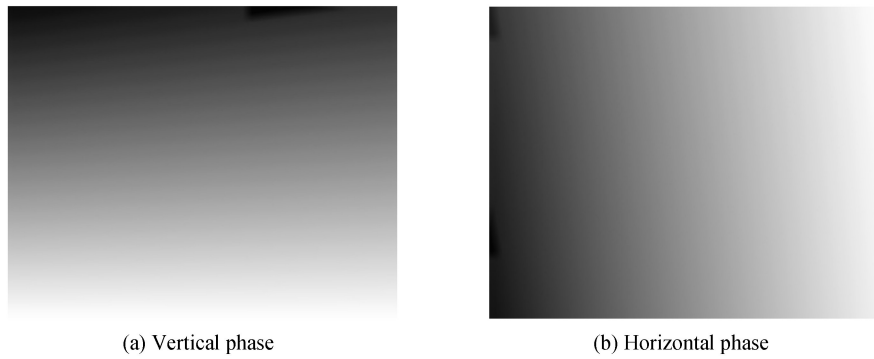


图 10 模糊图像所有像素相位分布
Fig.10 All pixels' phase distribution of the blur images

求得特征点的像素坐标位置如图 11 所示.为论文展示效果,事先用黑底白色圆点图案在显示面板中标出了选择的特征点在显示面板上的位置.图 11(a)为相机在拍摄得到的特征点图片.该图像为离焦模糊图像,难以准确提取圆点的圆心像素坐标.在实际标定过程中不需拍摄此图像.图 11(b)为本文方法提取得到的特征点像素坐标.

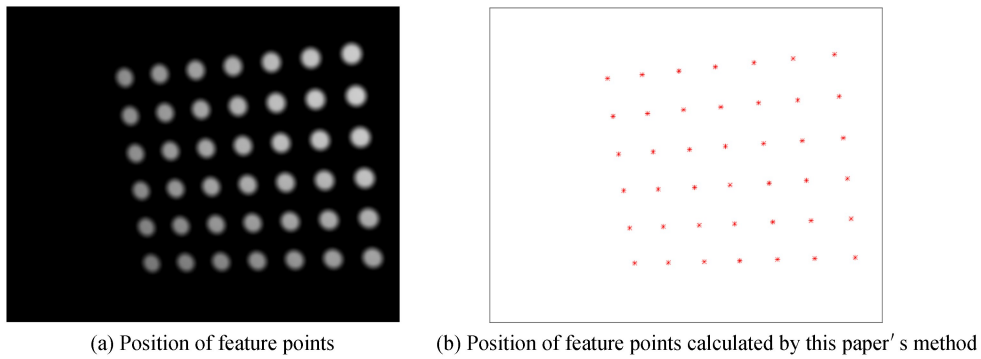


图 11 特征点像素坐标
Fig.11 Pixel coordinates of feature points

标定得到相机内矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 3090.82 & 0.61 & 635.92 \\ 0 & 3097.66 & 567.19 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

畸变参数如表 1 所示.

表 1 相机畸变参数
Table 1 Camera distortion parameters

k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
-0.146 2	3.395 0	-65.715 2	0.003 9	-0.003 6

标定后平均重投影误差为 0.05 个像素,焦距长度与实际值最大偏差在 0.09%.由 γ 计算得到的相机 CCD 两轴夹角为 $89.999\ 7^\circ$,与理想值的 90° 接近.由此可见本文方法是可行的,且具有较高的精度.

使用传统方法对该相机进行离焦条件下标定.本文将已得到广泛应用的 MATLAB 相机标定工具箱作为传统方法的代表.该工具箱使用的是传统的棋盘格标定板,不改变成像条件,将棋盘格图案投影在相同的液晶显示屏上,使用离焦相机进行拍摄.由于得到的是模糊图像,拍摄得到的 28 张图片中,有 11 张图片无法识别出标定板.其中典型的一张无法识别的标定板图像举例如图 12.由图 12(b)可以看出,图 12(a)的棋盘格角点因离焦而变得模糊,传统算法无法准确识别.

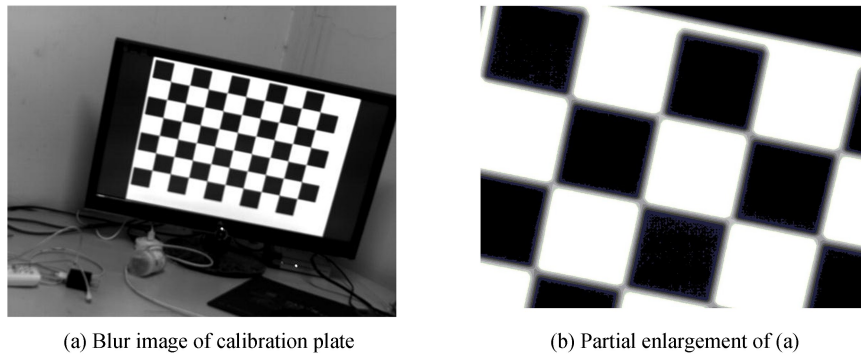


图 12 无法识别标定板的图片
Fig.12 Pictures that cannot find calibration plate

利用剩余 17 张图片标定得到的相机内矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 3126.82 & 7.57 & 598.38 \\ 0 & 3118.92 & 513.69 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

畸变参数如表 2 所示.

表 2 传统算法相机畸变参数

Table 2 Camera distortion parameters calibrated by traditional method

k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
-0.345 7	12.920 4	-266.175 4	-0.002 1	-0.000 4

标定得到的焦距与实际长度相差 0.91%, 得到的 γ 远大于 0, 由 γ 计算得到的相机 CCD 两轴夹角为 89.861° , 标定精度明显低于本文方法.

3.2 离焦量鲁棒性实验

实验中显示面板与待标定相机的距离约为 0.5 m 左右. 本文实验相机焦距固定, 所以通过改变显示面板在标定时距离待标定相机的平均距离改变相机离焦量. 通用方法一般要求标定板图像尽量充满相机的视场, 因此分别使用尺寸为 7.9 英寸和 50 英寸的液晶面板, 在距离相机 0.2 m 和 2 m 左右的距离进行标定实验. 随着相机距离标定板的距离增大, 相机的离焦程度逐渐减小, 得到的标定结果见表 3, 4.

表 3 不同标定距离下的相机内参数

Table 3 Intrinsic camera parameters at different calibration distances

Distance/m	α	β	γ	u_0	v_0	Reprojection error/pixel
0.2	3 106.98	3 107.46	-0.60	635.82	547.18	0.17
2	3 094.63	3 095.76	-0.83	630.35	552.51	0.15

表 4 不同距离下的相机畸变参数

Table 4 Distortion parameters at different calibration distances

Distance/m	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
0.2	-0.185 2	4.719 7	-92.716 6	0.001 3	-0.001 7
2	-0.161 8	3.703 2	-72.966 8	0.002 1	-0.001 9

由 3 和表 4 可见, 不同距离下得到的标定结果差距很小. 焦距长度的差距在 0.39% 之内. 重投影误差最大为 0.17 个像素. 可见本文方法在相机的不同离焦状态下得到准确的标定结果, 标定结果十分稳定, 对相机的离焦状态具有较好的鲁棒性. 另外, 此实验结果也验证了 1.3 节和 2.2 节理论的正确性.

综上所述, 本文方法解决了在只能得到相机离焦拍摄的模糊图像的情况下, 相机参数的准确标定的问题. 不需为成像范围特殊大小的相机制作特殊标定物, 有效地降低了标定成本.

4 结论

为解决具有特殊成像范围的相机的参数标定问题, 本文提出了一种利用正弦结构光编码显示面板作为

标定物的方法.使用该方法,实现了相机在离焦条件下标定物特征点像素坐标的准确提取和相机参数的参数准确标定.经实验验证,标定后焦距长度与理想值偏差在 0.39% 以内.最大像素重投影误差为 0.17 像素,证明该方法切实可行,为特殊相机的标定提供了一种解决方案.

参考文献

- [1] SALVI J, ARMANGUE X, BATTLE J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation [J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(7): 1617-1635.
- [2] QIU Mao-lin, MA Song-de. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43-55.
邱茂林, 马颂德. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1): 43-55.
- [3] ABDEL-AZIZ Y I. Direct linear transformation from comparator coordinates in close-range photogrammetry[C]. ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry in Illinois, 1971: 103-107
- [4] FAIG W. Calibration of close-range photogrammetric systems: Mathematical formulation [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1975, **41**(12): 1479-1486.
- [5] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics & Automation*, 2003, **3**(4): 323-344.
- [6] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [7] GUO Tan, DA Fei-peng, FANG Xu. Camera calibration under small field of view[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(8): 164-168.
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): 164-168.
- [8] LEI Huang, ZHANG Qi-can, ANAND A. Camera calibration with active phase target: improvement on feature detection and optimization[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(9): 1446-1448.
- [9] WANG Y, CHEN X, TAO J, *et al.* Accurate feature detection for out-of-focus camera calibration[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(28): 7964.
- [10] SZELISKI R. Computer vision: algorithms and applications[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2010. p45-51
- [11] GHIGLIA, DENNIS C. Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software[M]. Hoboken: Wiley, 1998.
- [12] ZHANG W. structured-light three dimensional measurement method based on digital projector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
张万祯. 数字投影结构光三维测量方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [13] POYNTON C A. Gamma and its disguises; the nonlinear mappings of intensity in perception, CRTs, film, and video [J]. *SMPTE Journal* 1993, **102**(12): 1099-1108
- [14] LIU K, WANG Y, LAU D L, *et al.* Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2010, **27**(3): 553-562.
- [15] PAN B, KEMAO Q, HUANG L, *et al.* Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry.[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(4): 416-418.
- [16] FLOYD R W, Steinberg L. Adaptive algorithm for spatial greyscale[C]. SID. 1976; 75-77.
- [17] DAI J, LI B, ZHANG S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, **52**(1): 195-200.
- [18] FAN Z. Error diffusion with a more symmetric error distribution[C]. SPIE, 1994, **2179**: 150-158.
- [19] LOHRY W, ZHANG S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation.[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(4): 540-542.
- [20] WANG Y, ZHANG S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns.[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(27): 6631-6636.

Foundation item: Jiangsu Science and Technology Project (Industry Support) (No. BE2014082), Kunshan Robotics and Intelligent Equipment Technology Project(No. KSJ1517) and Zhejiang Research on Application of Commonweal Technology(No. 2016C01G2011454) 引用格式: YANG Hao, CAI Ning, LIN Bin, *et al.* Defocus Camera Calibration Based on Sinusoidal Phase Coding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0715002

杨浩, 蔡宁, 林斌, 等. 基于正弦相位编码的相机离焦标定[J]. *光子学报*, 2018, **47**(7): 0715002