

基于相位标靶的相机标定

于瑾, 陈超, 高楠*, 张宗华

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要 针对传统相机标定方法精度和灵活性不高的缺点,提出了一种基于相位标靶的相机标定方法。该方法首先将液晶显示屏作为相位标靶(LCD)产生红、蓝正交的正弦条纹图案,通过傅里叶变换和空间相位展开算法从一幅条纹图中得到水平和垂直两个方向上的展开相位图;然后将相位标靶任意摆放在相机景深范围内的几个不同的位置,建立世界坐标与像素坐标之间的精确的映射关系;最后标定相机的内部参数,并利用重投影误差评价标定结果的精度。实验结果表明:所提方法在每个标靶位置只需采集一幅条纹图即可得到两个方向的展开相位图,与现有方法相比简化了标定步骤,并且重投影误差仅为 0.042 pixel。

关键词 测量; 三维测量技术; 相机标定; 相位标靶; 相位计算; 条纹投影

中图分类号 TH741 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111203

Camera Calibration Based on Phase Target

Yu Jin, Chen Chao, Gao Nan*, Zhang Zonghua

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

Abstract To overcome the drawbacks of low accuracy and flexibility of the traditional camera calibration methods, a camera calibration method based on the phase target is proposed. First, the liquid crystal display (LCD) is used as the phase target to generate the orthogonal sinusoidal fringe patterns in red and blue channels. Only one fringe pattern is used to obtain the unwrapped phase map in both the horizontal and vertical directions via the Fourier transform and the spatial phase unwrapping algorithm. Then, the phase target is arbitrarily placed at several different positions within the depth field of this camera to establish an accurate mapping relationship between the world coordinate and the pixel coordinate. Finally, the intrinsic parameters of this camera are calibrated and the accuracy of calibration results is evaluated by means of the re-projection errors. The experimental results show that we can obtain the unwrapping phase map of two directions at each phase target position by collecting only one fringe pattern with the proposed method. Compared with those in the existing methods, not only the calibration steps in the proposed method are simpler, but also the re-projection error is only 0.042 pixel.

Key words measurement; three-dimensional measurement technology; camera calibration; phase target; phase calculation; fringe projection

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.5050; 120.5060

1 引言

三维测量系统中最关键的一步是相机标定^[1-4]。在三维匹配以及三维重建中,若要得到被测物体的坐标,离不开标定这一重要步骤。此外,相机标定的精度直接影响甚至决定了测量系统的准确度。近年来,为了以更高的精度来标定相机,国内外许多研究

人员将相位标靶^[5-13]引入到相机标定领域。薛俊鹏等^[5]提出了一种基于同心圆光栅和楔形光栅的摄像机自标定方法;Huang等^[6]提出了一种主动相位标靶和平差约束方法的精确特征点检测方法。以上两种方法分别使用四步和八步相移来计算折叠相位,虽然标定精度得到了一定保证,但需要采集多张条纹图,从而使得标定速度有所降低。Ma等^[7]提出

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106404)、国家自然科学基金(51675160)、河北省应用基础研究计划重点基础研究资助项目(15961701D)、河北省高层次人才资助项目(GCC2014049)、河北省人才工程培养经费资助项目(A201500503)

* E-mail: ngao@hebut.edu.cn

了将条纹图案组作为相位标靶的特征点提取方法, 每组条纹图案包含 6 幅正弦曲线, 其中的 3 幅用于计算垂直相位, 另外的 3 幅用于计算水平相位。该方法采用三步相移算法计算折叠相位, 具有较高的标定准确性和较强的稳健性, 但是同样存在标定效率较低和计算量较大的问题。Sagawa 等^[8]将相机标定与相位标靶、经典平面标靶进行比较, 结果显示, 相位标靶具有一定优势, 即基于相位标靶提取特征点时, 图像边缘的离焦对提取效果影响较小^[14-15]。

为了克服相机传统标定方法精度和效率不高的问题, 本文提出了一种基于相位标靶的相机标定方法。该方法仅需一幅红、蓝正交条纹图案即可通过傅里叶变换^[16]和空间相位展开完成相位计算^[17]。所提方法具有以下优点: 1) 与单一水平或垂直条纹图案相比, 红、蓝正交条纹图在标定过程中需要采集的条纹图像数量减少一半; 2) 利用傅里叶变换法和空间相位展开法进行相位计算时只需在每个标靶位置上采集一幅条纹图, 简化了标定步骤; 3) 采用红、蓝正交的正弦条纹可以有效减小通道间串扰的影响; 4) 与传统的棋盘格相比, 采用相位标靶的相机标定方法可以提高标定精度。实验结果表明, 所提方法可以实现快速、高精度标定。

2 基本原理

2.1 相机模型

小孔成像模型是相机成像采用得最多的模型^[18], 即物点、像点和光心三点共线。该模型规定了 4 个常用的坐标系: 世界坐标系 ($O_w; X_w, Y_w, Z_w$)、相机坐标系 ($O_c; X_c, Y_c, Z_c$)、图像坐标系 ($O; X, Y$) 和像素坐标系 ($o; U, V$)。图 1 为相机拍摄过程中物点 P 和像点 P_d 之间的相对位置关系, $P_d(x_d, y_d)$ 表示物点 P 在图像平面上的实际投影坐标, $P_u(x_u, y_u)$ 是理想针孔模型下的物点在图像坐标系中的坐标。假设三维场景中的任意一点 P 在世界坐标系中的坐标为 (x_w, y_w, z_w) , 在相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系中的坐标分别为 (x_c, y_c, z_c) 、 (x, y) 和 (u, v) 。世界坐标系和相机坐标系之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{R} 为相机坐标系和世界坐标系间 3×3 的旋转矩阵; \mathbf{T} 为两坐标系间 3×1 的平移向量。

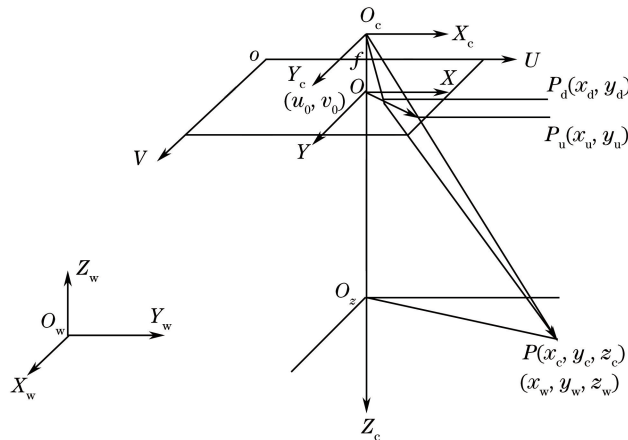


图 1 坐标系关系示意图

Fig. 1 Schematic of relationship among coordinate systems

相机坐标系与图像坐标系之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: f 为相机的焦距。

图像坐标系与其对应的像素坐标系之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: d_x 、 d_y 分别为单个像素在 x 轴方向和 y 轴方向上的物理尺寸; (u_0, v_0) 为相机主点坐标。

综合(1)~(3)式可知, 在理想的针孔模型下, 空

间点的世界坐标与其像点的像素坐标存在如下关系:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \\ \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \\ s\mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中引入了参数 s , s 为缩放因子。 \mathbf{M} 称为内部参数,它可以表示为

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: (f_x, f_y) 为相机的焦距坐标。考虑到一般性,需要简化空间坐标。定义一个物体平面,使得 $z_w = 0$ 。这样做的原因是,如果把旋转矩阵 \mathbf{R} 分解为 3 个 3×1 的向量,用 \mathbf{r}_i 表示 \mathbf{R} 的第 i 列,那么其中的一个列向量就不需要了。用 \mathbf{t} 表示 3×1 的平移向量,则由(4)式可得到

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= s\mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ s\mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 分别为 3×1 的旋转矢量。

2.2 相位计算

相位计算的主要目的在于得到被测物体表面上的绝对相位分布情况,单一方向的正弦条纹的相位只能提供一个约束条件,而正交条纹图中包含水平与垂直方向的正弦条纹,由相位提供的两个正交约束条件可以作为相位标靶上的唯一性约束。这里采用傅里叶变换法提取相位,其主要特点是在每个标靶位置上只需拍摄一幅条纹图,不仅比相移法的测

量效率更高,而且对平面物体的测量具有良好的效果。此外,该方法亦可适用于动态物体的测量。

将显示红、蓝正交条纹的液晶显示屏(LCD)作为相位标靶(包括蓝色水平条纹和红色垂直条纹),如图 2 所示。使用正交红、蓝正弦条纹可以有效降低通道间串扰的影响。当投影仪投射正弦条纹图到被测物体表面时,条纹因受到物体表面高度调制而产生变形,相机拍摄变形的条纹图。其中,水平与垂直条纹图的结构光场相似,得到的变形结构光场都可以表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \Delta\varphi(x, y)], \quad (7)$$

式中: $a(x, y)$ 为背景光强; $b(x, y)$ 为条纹的幅值; f_0 为正弦条纹像的基频,这里 f_0 取 36; $\Delta\varphi(x, y)$ 为待求相位; $b(x, y)/a(x, y)$ 即条纹对比度。定义 $c(x, y)$ 为

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp [i\Delta\varphi(x, y)], \quad (8)$$

将(8)式代入到(7)式可以得到

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(i2\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-i2\pi f_0 x). \quad (9)$$

对(9)式进行傅里叶变换可以得到

$$G(f_x, f_y) = \tilde{A}(f_x, f_y) + \tilde{C}(f_x - f_0, f_y) + \tilde{C}^*(f_x + f_0, f_y), \quad (10)$$

式中: f_x 和 f_y 分别为频域中 x, y 方向的空间频域坐标。由(10)式可知频谱分布由零级频谱 $\tilde{A}(f_x, f_y)$ 、谐波 $\tilde{C}(f_x - f_0, f_y)$ 以及谐波 $\tilde{C}^*(f_x + f_0, f_y)$ 构成。 $\tilde{C}(f_x - f_0, f_y)$ 、 $\tilde{C}^*(f_x + f_0, f_y)$ 对应 +1、-1 级频谱,包含着相位 $\Delta\varphi(x, y)$, 通过任何一个谐波都可以计算得到相位。

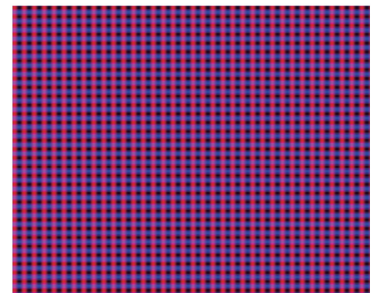


图 2 LCD 显示的相位标靶图样

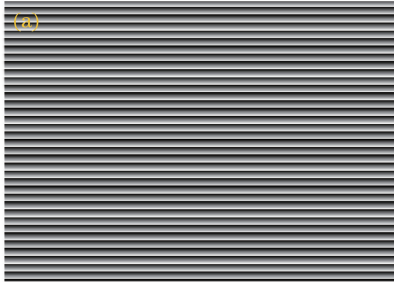
Fig. 2 Phase target pattern displayed on LCD

由(10)式可知,零频和 $\pm f_0$ 附近是频率分量最集中的地方。选择适当的滤波窗口滤出基频 f_0 附近的部分移回零频,得到 $\tilde{C}(f_x, f_y)$, 再对其进行傅里叶逆变换就可以得到 $c(x, y)$ 。相位 $\Delta\phi(x, y)$ 可

表示为

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]}, \quad (11)$$

式中: $\text{Re}()$ 为复数的实部; $\text{Im}()$ 为复数的虚部。通过(10)式可以获得折叠相位 $\Delta\phi(x, y)$, 如图 3 所示。因为计算相位的过程中用到了反正切函数, 该函数的取值范围为 $(-\pi, \pi)$, 所以计算得到的折叠



相位呈不连续的锯齿状分布。要想得到全场的相位, 还需要对折叠相位进行相位展开^[19]。

由于 LCD 的轮廓简单且表面具有连续性, 所以可以采用单幅折叠相位图进行空间相位展开, 即在相机标定过程中只需要对一幅红、蓝正交条纹图的相位进行计算, 就可以同时得到水平和垂直方向上的相位展开图, 如图 4 所示。

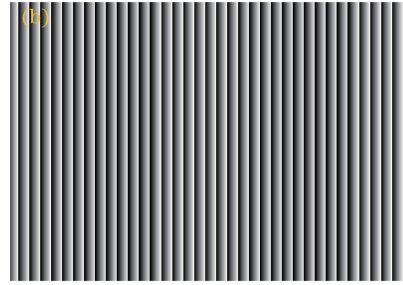


图 3 折叠相位图。(a)水平折叠相位图;(b)垂直折叠相位图

Fig. 3 Wrapped phase maps. (a) Horizontally wrapped phase map; (b) vertically wrapped phase map

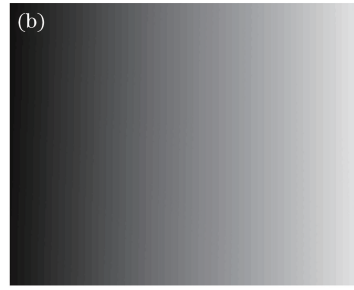


图 4 相位展开图。(a)水平相位展开图;(b)垂直相位展开图

Fig. 4 Unwrapped phase maps. (a) Horizontally unwrapped phase map; (b) vertically unwrapped phase map

2.3 从红、蓝正交条纹图案中获得特征点

红、蓝正交条纹图案由计算机产生并将条纹图案显示在 LCD 上。之所以选择 LCD 作为相位标靶, 是因为其能够在计算机的控制下方便地显示出不同的图案。

条纹上所包含的相位信息在建立以及识别相机图像坐标和标定标靶上点的空间关系方面都起到了关键作用。通过对红、蓝正交条纹图进行傅里叶变换和空间相位展开获得绝对相位之后, 就可以建立相位标靶上相位点与绝对相位图之间点到线的映射关系, 如图 5 所示。

根据相位匹配原则, 即相位标靶上每一点的相位都与相位展开图上某一点的相位保持一致。假设 ϕ_u 和 ϕ_v 分别为相位标靶上 P 点的水平和垂直相位, 如果应用水平条纹图案, 则对应于 ϕ_u 的线是水平线, 故而可以在水平条纹相位展开图中找到一行与 P 点的水平相位相等的点; 如果应用垂直条纹图案, 则对应于 ϕ_v 的线是垂直线, 也可以在垂直条纹

相位展开图中找到一系列与 P 点的垂直相位相等的点; 如果两者都被应用, 则可以找到相位标靶上每个相位点在绝对相位图中对应的位置 $p'(u, v)$, 由(12)~(13)式即可建立相位标靶与相机像素坐标系的关系

$$u = \frac{P_u L}{2\pi} \times \phi_u, \quad (12)$$

$$v = \frac{P_v L}{2\pi} \times \phi_v, \quad (13)$$

式中: L 为 LCD 每个像素的物理尺寸; P_u 为产生水平条纹时每个条纹所占的像素数; P_v 为产生垂直条纹时每个条纹所占的像素数; u 为某一点在相机像素坐标系中的横坐标; ϕ_u 为该点对应的相位; v 为某一点在相机像素坐标系中的纵坐标; ϕ_v 为该点对应的相位。

每个具有有效相位值的像素点在相位标靶上都具有相应的世界坐标。因此, 可以建立相机像素坐标和相位标靶上世界坐标之间的对应关系, 找到相

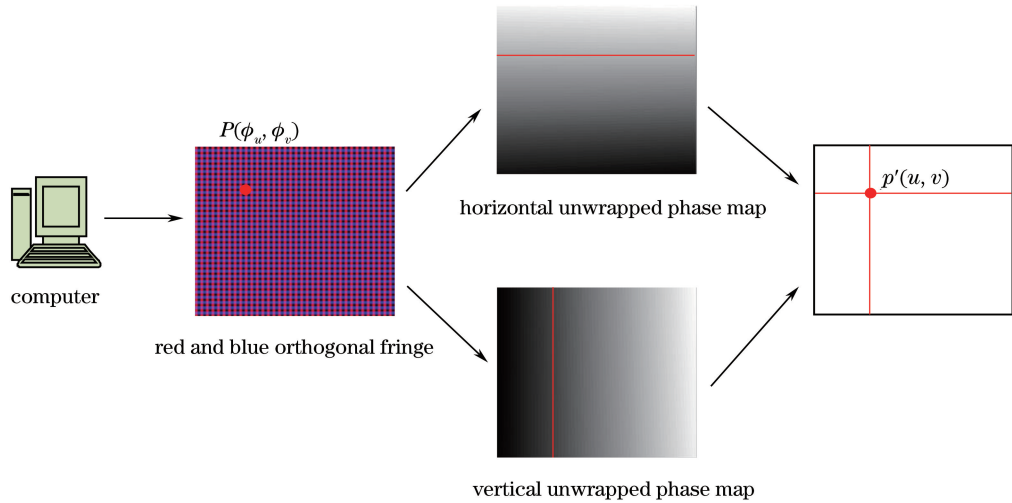


图5 相位点的世界坐标与相机像素坐标之间的映射关系

Fig. 5 Mapping relationship between world coordinate of phase points and coordinate of camera pixel

位标靶上所有具有有效相位值的相位点在相机像素坐标系下的对应点,即相位值相等的点,即可提取出所有特征点。通过相位标靶上相位点的世界坐标与相机像素坐标的对应关系,即可标定相机。

3 基于相位标靶的相机标定

3.1 相机标定步骤

相机的标定步骤为:1) 在相机景深范围内将相位标靶任意摆放在12个不同的位置上,拍摄相位标靶上的红、蓝正交条纹图,用以提取特征点的绝对相位分布;2) 采用傅里叶变换和空间相位展开法,计算得到蓝色水平条纹和红色垂直条纹的相位展开图;3) 建立相位标靶上相位点的世界坐标与相机像素坐标之间的映射关系;4) 采用张正友提出的相机标定方法^[20],最终完成标定相机。

3.2 相机标定结果的优化

为了使相机标定的结果更好,需要优化各个参数,最终实现标定结果的重投影误差最小。目标函数 F 为重投影误差,可以表示为

$$F = \min \sum_{i=0}^{12} \|p_i - \bar{p}_i(f_x, f_y, u_0, v_0)\|^2, \quad (14)$$

式中: p_i 为提取的像素坐标; \bar{p}_i 为相对应的预测像素坐标。通过 Levenberg Marquardt 优化算法对目标函数进行优化,得到高精度的标定结果。

4 实验

4.1 精度分析

对于条纹投影技术来说, Gamma 畸变是其主要误差源。由于 LCD 本身存在非线性,所以在投射

条纹前,需要先对 LCD 的 Gamma 畸变进行校正^[21],以降低显示屏灰度非线性失真的影响。基于实验的简便性、高效性以及畸变校正的有效性,本研究选择在产生正弦条纹图时直接引入合适 Gamma 值的方法来降低 LCD 输入、输出光强的非线性误差。当 LCD 产生校正后的正弦条纹时,需要确定 Gamma 的取值,预编码 Gamma 值的范围为 1~3.5,步进值为 0.1。用相机采集条纹图像,以计算绝对相位,对应的相位误差图如图 6 所示。从图中可以看出,当 Gamma 的取值为 2.6 时,相位误差最小。

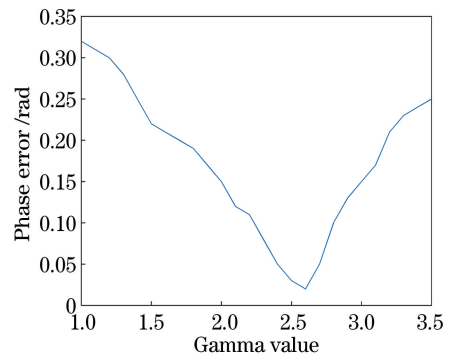


图6 不同的 Gamma 值对应的相位误差

Fig. 6 Phase error versus Gamma value

4.2 实验结果

实验系统中用到的主要硬件设备有两部分:一个是用来拍摄图像的相机,另一个是包含相位信息的 LCD。相机的物理分辨率为 2050 pixel × 2448 pixel,其型号为 ECO655CVGE。另外选择 Computar 公司生产的变焦镜头,其调焦范围为 12~36 mm。LCD 的物理分辨率为 2048 pixel × 1536 pixel,其型号为

LP097QX2,大小为 9.7 inch(24.638 cm),像素间距为 0.096 mm \times 0.096 mm。

分别采用传统的棋盘格标定法、Ma 等^[7]提出的方法和本研究所提方法对同一相机进行标定实验,比较三种标定方法得到的相机内部参数以及重投影误差,标定结果如表 1 所示。由表 1 可知,使用本研究所提方法进行标定后,重投影误差为 0.042 pixel,所提标定方法的标定精度是传统棋盘格标定精度的 5.143 倍,亦比 Ma 等所提方法的标定精度高。与 Ma 等^[7]提出的方法相比,本研究所提标定方法简化了标定步骤。

图 7 为三种标定方法对应的重投影误差,利用重投影误差评价标定结果的精度。由图 7 可知,

表 1 相机内部参数的标定结果

Table 1 Intrinsic parameter calibration results of camera

Calibration pattern	f_x /pixel	f_y /pixel	u_0 /pixel	v_0 /pixel	Re-projection error /pixel	Required number of patterns
Checkerboard	6224.566	6225.212	1242.659	1046.085	0.216	12
Ma's method	6224.872	6227.336	1235.836	1045.243	0.069	(3+3) \times 12=72
Proposed method	6225.351	6227.618	1232.317	1041.424	0.042	12

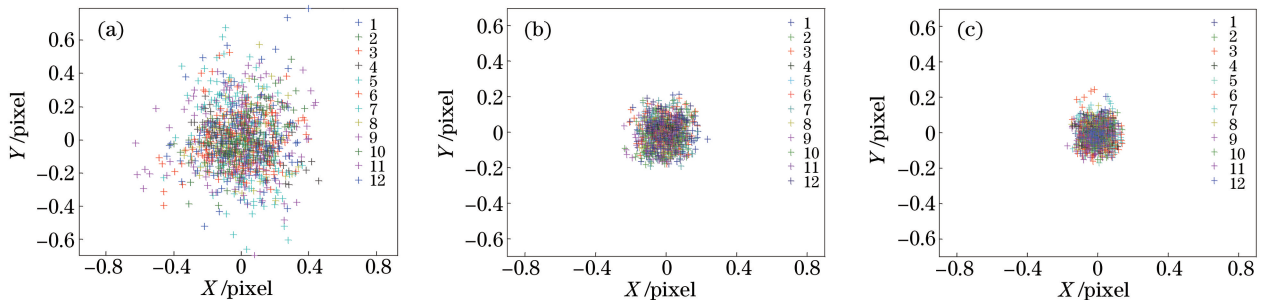


图 7 三种方法的内参数标定重投影误差。(a)棋盘格法;(b)Ma 的方法;(c)本研究所提方法

Fig. 7 Intrinsic parameter calibration re-projection errors of three methods. (a) Checkerboard method; (b) Ma's method; (c) proposed method here

5 结 论

介绍了一种采用相位标靶显示红、蓝正交条纹图案来标定相机的方法。所提方法不是从图像中提取特征点,而是从连续相位分布中获得二维世界坐标。以相位作为平面标靶有如下优点:颜色以及光照的变化不会改变标靶上所包含的相位信息,具有一定的稳定性;相位分布的连续性使得标靶上所包含的相位信息也是连续的,自然分辨率也可以保持在较高的水平。利用傅里叶变换法仅需一幅图像就可以得到绝对相位,之后再利用空间相位展开法就可以得到展开相位,整个标定过程只需在每个标靶位置采集一幅条纹图案即可完成。本研究所提方法与 Ma 等提出的方法相比简化了标定步骤,重投影

本研究所提方法的重投影误差较小。对传统棋盘格标定法中使用的棋盘格图案以及本研究所提方法中使用的红、蓝正交正弦条纹图案进行比较后认为:

1) 对于棋盘格图案,标定过程的第一步需要提取角点,但由于噪声、图像离焦和光照强度的影响,棋盘格的黑白边缘处容易变得模糊,导致标定精度有所下降。

2) 对于正弦条纹图案,由于该图案使用相位分析,故而标定过程简单,并且图像散焦的影响使得可以将正弦条纹作为标定图案来进行弥补,其标定精度可达到亚像素级。此外,在相位计算中使用傅里叶变换算法,对噪声的抑制也有一定作用。

误差为 0.042 pixel,其标定精度是传统棋盘格标定方法的 5.143 倍。实验结果证明了采用所提方法可以使相机实现快速、精确标定。接下来,本课题组计划研究如何降低标定实验中的相位匹配误差。

参 考 文 献

- [1] Minh V, Wang Z Y, Pan B, *et al.* Hyper-accurate flexible calibration technique for fringe-projection-based three-dimensional imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16926-16941.
- [2] Schmalz C, Forster F, Angelopoulou E. Camera calibration: active versus passive targets[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 113601.
- [3] Wei Z Z, Zhao K. Structural parameters calibration for binocular stereo vision sensors using a double-

- sphere target[J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1074.
- [4] Sun J Y, Sun J, Xu C L, *et al.* A calibration method of focused light field cameras based on light field images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (5): 0515002.
孙俊阳, 孙俊, 许传龙, 等. 一种基于光场图像的聚焦光场相机标定方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0515002.
- [5] Xue J P, Su X Y, Dou Y F. Camera self-calibration method based on concentric grating and deformable grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0308002.
薛俊鹏, 苏显渝, 窦蕴甫. 基于同心圆光栅和契形光栅的摄像机自标定方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0308002.
- [6] Huang L, Zhang Q C, Asundi A. Camera calibration with active phase target: improvement on feature detection and optimization[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1446-1448.
- [7] Ma M C, Chen X C, Wang K Y. Camera calibration by using fringe patterns and 2D phase-difference pulse detection[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(2): 671-674.
- [8] Sagawa R, Takatsuji M, Echigo T, *et al.* Calibration of lens distortion by structured-light scanning [C]. *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, 8734713.
- [9] Liu Y K, Su X Y. Camera calibration with planar crossed fringe patterns [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(2): 171-175.
- [10] Grosse M, Schaffer M, Harendt B, *et al.* Camera calibration using time-coded planar patterns [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 083604.
- [11] Xue J P, Su X Y, Xiang L Q, *et al.* Using concentric circles and wedge grating for camera calibration[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3811-3816.
- [12] Xu Y J, Gao F, Ren H Y, *et al.* An iterative distortion compensation algorithm for camera calibration based on phase target[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(6): 1188.
- [13] Zhou L L, Dong H B, Du Y X. Method of roadheader position detection based on image recognition of double laser targets [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041205.
周玲玲, 董海波, 杜雨馨. 基于双激光靶标图像识别的掘进机位姿检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041205.
- [14] Bell T, Xu J, Zhang S. Method for out-of-focus camera calibration[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2346-2352.
- [15] Wang Y W, Chen X C, Tao J Y, *et al.* Accurate feature detection for out-of-focus camera calibration [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7964-7971.
- [16] Lu M T, Su X Y, Cao Y P, *et al.* 3D shape reconstruction algorithms for modulation measuring profilometry with synchronous scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0308006.
卢明腾, 苏显渝, 曹益平, 等. 同步扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0308006.
- [17] Lin J X, Ma X, Li S P, *et al.* Four-step spatial quasi-phase-shifting technique for phase demodulation from a single carrier fringe pattern [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011203.
林锦新, 马骁, 李仕萍, 等. 四步空域准相移单帧载频条纹相位解调技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011203.
- [18] Meng S S. Research on simple and fast calibration method of the 3D imaging system based on phase measurement [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
孟莎莎. 基于相位测量三维成像系统的简易快速标定方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
- [19] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.
- [20] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *Journal IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] Wang Z Y, Nguyen D A, Bames J C. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 218-225.