

基于绝对相位标靶的线阵相机标定方法

黄淦, 邵双运*, 罗珏婷

北京交通大学物理科学与工程学院, 北京 100044

摘要 针对当前线阵相机几何标靶标定精度不足的问题,提出了一种基于绝对相位标靶的线阵相机标定方法。针对线阵相机成像特点,设计了结合相位与格雷码的绝对相位编码标靶。标定时首先由线阵相机获取标靶图像,计算标靶的绝对相位;然后在空间不同位置处摆放标靶,采用辅助面阵相机获取标靶间的相对位置关系,建立线阵相机图像与空间点的精确对应关系;最后采用两步法标定获取线阵相机内两相机间的坐标变换关系。仿真与实验结果表明:标定的最大重投影误差为 0.089 pixel,与现有方法相比降低了 79.78%,所提方法具有良好的抗噪、抗离焦性。

关键词 测量; 相机标定; 线阵相机; 相位标靶; 视觉测量

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230812

1 引言

在三维测量技术中,相机的标定精度直接决定了三维测量的准确度,关于相机标定技术的研究一直是三维测量技术的研究重点之一^[1]。各行各业对三维测量速度及分辨率的要求不断提高,由于线阵相机具有高速、高分辨率的优势,基于线阵相机的三维测量得到广泛应用。相机标定一般以二维或三维物体作为标靶,而线阵相机单次曝光只能获得一行图像,因此要引入其他设备辅助获取二维图像,标定流程复杂,如何对线阵相机进行高精度的标定还有待深入探索。

在机器视觉中,面阵相机的标定技术得到了充分研究,标定技术较为成熟。其中,基于相位标靶的标定方法的精度较高。刘元坤等^[2]采用液晶显示屏作为标靶,利用相移得到的相位分布构建标定特征点,实现了相机的高精度标定。Schmalz等^[3]利用主动相位标靶进行标定,并将标定结果与棋盘格标定结果进行对比,结果表明,相位标靶可以获得更高的标定精度。Bell等^[4]通过将特征点编码至条纹图案的相位中进行了相机标定,证明了离焦对相位标靶标定结果的影响较小。综上所述,基于相位的相机标定方法比基于几何图案的标定方法有着明显的优越性^[5]。

在线阵相机标定技术中,研究人员提出了动态标定法与静态标定法。在动态标定中,Draréni等^[6-7]利用匀速移动相机对标定板进行扫描,生成了高分辨率的二维图像,实现了线阵相机的标定,在实验室获得了较高的标定精度。这种方法需要高精度位移台,标定成本高,此外在一些工业应用中无法移动相机,应用场景

受限。静态标定不需要移动相机,利用线性成像模型中的交比不变性寻求物像点间的对应关系。Horaud等^[8]设计了平面平行线标靶,通过定位线阵相机“视线平面”与平行线交点在图像中的位置,建立了交点间的交比关系,进而计算出标靶上的交点坐标^[9-12]。但是利用平面标靶无法直接求解“空间视线平面”方程,因此需要使用位移台移动标靶以获取空间三维数据。为了摆脱位移台的限制,Luna等^[13]设计了阶梯形的三维立体标靶,并在标靶上绘制两组“Z”字形平行线,通过一行图像即可获得带有三维信息的特征点。Li等^[14]通过在平面标靶中添加角点图案,并使用已标定的面阵相机进行辅助,将不同位置的标靶转移到同一个坐标系下,从而实现线阵相机标定。

静态标定方法提升了线阵相机标定的灵活性,降低了标定的成本,但也存在不足。镜头畸变等因素引起的非线性,导致基于线性成像模型的像素坐标与世界坐标之间的映射误差较大。当标靶上平行线的间距较大时,特征线数量降低,相机获得的标定特征点数量不足;而减小特征线间距会导致边缘提取困难,增大特征点坐标误差,同时导致算法性能下降。标靶离焦导致图像模糊,导致在相机获得的图像中,平行线黑白过渡像素的数量增加,从而边缘提取算法的精度降低。这些问题限制了当前静态标定方法在高精度三维测量标定中的应用。

由于相位标靶具有高精度定位、特征点丰富和抗离焦能力强^[15]的特点,本文利用线阵相机成像特点,提出一种基于绝对相位标靶的线阵相机高精度标定方法。首先设计了一种绝对相位标靶,使线阵相机可准

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-05; 录用日期: 2023-06-19; 网络首发日期: 2023-06-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0805400)

通信作者: *Shao_sy@tom.com

确提取标靶特征点坐标;再借助辅助面阵相机,建立了线阵相机图像中的相位特征点与标靶空间点的精确对应关系,实现相机内外参数的初值估计;最后利用重投影误差函数对初值进行非线性优化,获得最终标定结果。本文通过理论分析和仿真实验验证了方法的可行性与稳定性。实际标定结果表明,与同样采用几何标靶和辅助相机的标定方案相比,本文方案的绝对误差和重投影误差均有所下降,有效提高了线阵相机标定的精度。

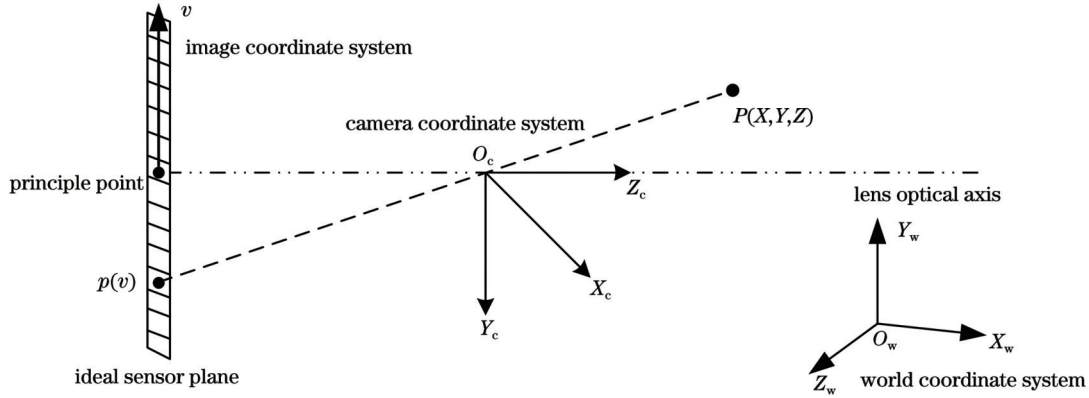


图1 线阵相机成像模型

Fig. 1 Imaging model of line-scan camera

线阵相机的模型描述为

$$s \begin{pmatrix} 0 \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: s 为非零尺度因子; f_y 为镜头纵向等效焦距; v_0 为主点坐标; $r_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ 为旋转矩阵参数; $t_i(i = 1, 2, 3)$ 为平移向量参数,构成相机的外部参数。

线阵相机镜头畸变模型为

$$v' = v \left[1 + k_1(v - v_0) + k_2(v - v_0)^3 \right] + p_1(v^4 + 2v^2), \quad (2)$$

式中: v' 为去畸变后的像素坐标; k_1 和 k_2 分别为一阶与三阶径向畸变系数; p_1 为切向畸变系数。

3 基于绝对相位标靶的线阵相机标定方法

3.1 相位标靶的设计与特征点提取

在相位标靶中,空间特征点的坐标被编码为相位值,线阵相机通过拍摄标靶获取相位信息,将标靶上的相位值与线阵相机像素坐标中的相位大小进行匹配,获取标定中的特征点。

在面阵相机的相位标靶标定中,为了确定各个特征点在标靶中的横坐标与纵坐标,通常采用正交条纹的设计。然而,线阵相机仅能对一行图像成像,当条纹方向与线阵相机像元阵列方向基本一致时,在线阵相机获得的条纹图像中,相邻像素间的灰度变化很小。

2 线阵相机成像模型

使用图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系描述基于小孔成像原理的相机成像模型,如图1所示,其中 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $p(v)$ 为空间物点 $P(X, Y, Z)$ 经过成像系统后在相机靶面上的成像像点, v 为世界坐标经成像系统后的像点坐标。由于线阵相机的图像坐标系为一维坐标系,图像坐标系通常与相机坐标系的 Y 轴平行。

加上实际标定中背景光强与图像噪声的影响,很容易出现相位计算与展开失效的现象,无法准确解码特征点在标靶中的坐标值。

因此,本文提出了一种非正交绝对相位标靶设计,相位条纹通过显示器显示。标靶中的两组四步相移图如图2所示,利用竖直条纹的绝对相位值计算线阵相机图像中的特征点在标靶中的横坐标;利用格雷码获取倾斜条纹的绝对相位值,结合条纹的倾斜角度,计算特征点在标靶中的纵坐标。

本文将世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 建立在标靶上,称为标靶坐标系。设标靶上任一特征点的 $Z_w = 0$ 。标靶中条纹光场函数为

$$I(x, y, \delta) = I_b(x, y) + I_a(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \delta], \quad (3)$$

式中: (x, y) 为标靶坐标; $I_b(x, y)$ 为背景光强; $I_a(x, y)$ 为条纹振幅; $\Phi(x, y)$ 为主相位; δ 为相移相位。垂直与倾斜条纹的主相位分别为

$$\Phi_{\text{vert}}(x, y) = \frac{2\pi x}{P_1}, \quad (4)$$

$$\Phi_{\text{tilt}}(x, y) = \frac{(2\pi \cos \theta)x + (2\pi \sin \theta)y}{P_2}, \quad (5)$$

式中: $\Phi_{\text{vert}}(x, y)$ 和 $\Phi_{\text{tilt}}(x, y)$ 分别为竖直条纹与倾斜条纹的主相位大小; P_1 为竖直正弦条纹周期; P_2 为倾斜正弦条纹周期; θ 为倾斜条纹的倾斜角度。条纹的倾斜角度由条纹周期和标靶的分辨率决定,以保证线阵相机可以获得灰度呈正弦变化的条纹图,防止相位解

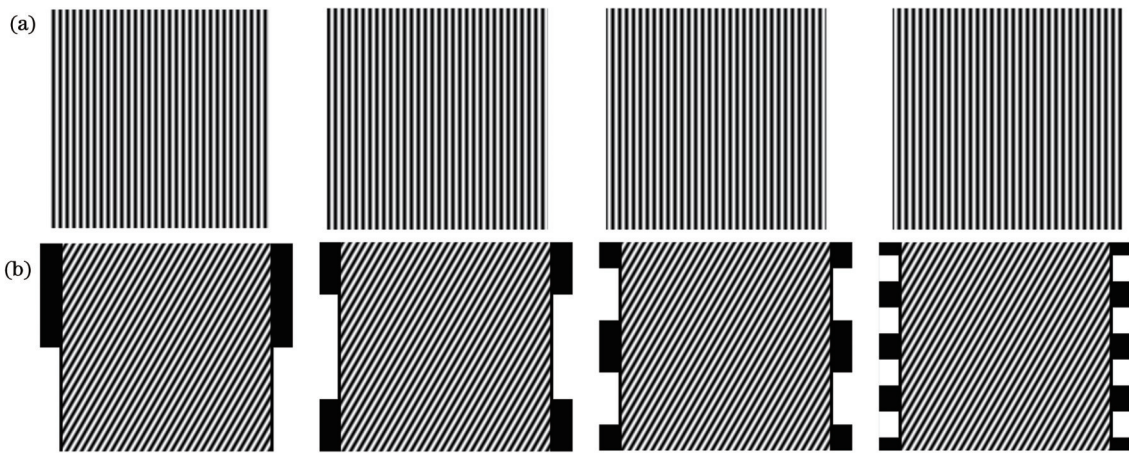


图 2 相位标靶四步相移条纹图像,从左到右每次进行 $\pi/4$ 相移。(a) 竖直条纹图; (b) 带格雷码的倾斜条纹图

Fig. 2 Four-step phase-shifting fringe images of phase target with $\pi/4$ phase shift performed from left to right at each step. (a) Vertical fringe patterns; (b) slanted fringe patterns with Gray code

算失败。本文采用分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1600 \text{ pixel}$ 的显示器, 倾斜角为 30° 。

3.2 相位标靶坐标系与像素坐标系对应关系的建立

图像像素坐标与标靶坐标间精确对应关系的建立依赖于线阵相机拍摄的图像的绝对相位值与对应坐标的解算。本文采用相移技术获得包裹相位, 由于线阵相机的成像特点, 对于竖直条纹和倾斜条纹, 采用不同的方法计算绝对相位。

假设线阵相机像元排列方向与竖直条纹方向一致, 对于竖直条纹来说, 线阵相机获得的条纹图像的相位值仅在水平方向上连续变化, 当以第一个点作为相位展开起点时, 展开后得到的相位值均相

同, 即为绝对相位。然而, 当线阵相机拍摄显示器上不同行的倾斜条纹图像时, 由于倾斜条纹每行和每列的相位值均连续变化, 不同行的倾斜条纹第一个点的相位分布在 $0 \sim 2\pi$ 之间, 若以第一个点作为相位展开起点, 展开后的相位将存在歧义。因此, 本文引入格雷码, 辅助线阵相机获得倾斜条纹的绝对相位值。

在条纹投影轮廓术中, 格雷码具有较强的抗噪能力与鲁棒性, 常用于辅助截断相位的展开^[16-18]。本文使用黑白色块对应的 0、1 码值对倾斜条纹图像第一列的相位级次进行格雷码编码, 图 3 中线阵相机拍摄的图像的格雷码值为 1101, 解码后十进制值为 9。

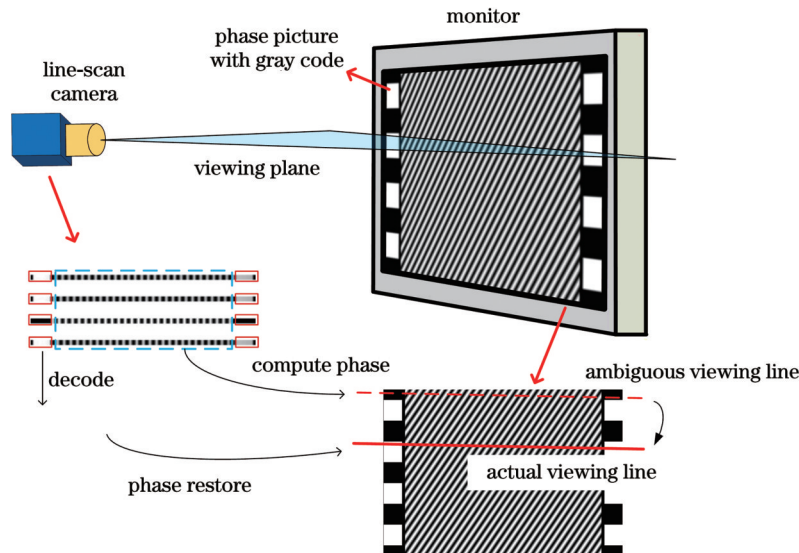


图 3 在相位标靶中使用格雷编码还原线阵相机视线

Fig. 3 Restoring line-scan camera line of viewing using Gray coding in phase target

倾斜条纹第一列条纹周期为 $P_2 / \sin \theta$, 格雷码值黑白色块的长度与之相同, 且 2^N 个条纹周期最少需要 N 幅格雷码图案进行标记。解码时, 对拍摄的图像中的条纹两侧的编码区域进行二值化处理, 将灰度分布

的格雷码图案转化为格雷码值, 则展开起始点的相位阶次 k 为

$$k = f(V) = f\left(\sum_{n=1}^N G_n \times 2^{n-N}\right), \quad (6)$$

式中: G_n 为第 n 幅图的格雷码值; V 为解码获得的十进制数; $f(\cdot)$ 为十进制数与相位阶次 k 之间已知的对应关系。将歧义相位值与 $2\pi k$ 相加, 相位值从歧义位置被还原到无歧义位置。

恢复垂直条纹与倾斜条纹的绝对相位值后, 根据相位匹配原则, 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, 由式(4)、(5)可建立起相位标靶坐标系与像素坐标系之间的对应关系。选取大小为 $2\pi/m$ 的整数倍的相位值, 对展开相位和图像像素进行插值, 可得到亚像素精度的特征点像素位置。通过控制 m 的大小, 即可控制特征点的个数。

3.3 相机标定

相机标定参数包括 5 个相机内部参数 (v_0, f_y, k_1, k_2, p_1) 和 6 个外部参数 ($t_1, t_2, t_3, \alpha, \beta, \gamma$), 一共 11 个未知量, 其中, α, β, γ 为相机外部参数中旋转矩阵的旋转角

参数。因此, 至少需要 6 对像素坐标与空间对应点才能完整估计相机标定参数。

对于平面相位标靶, 只需控制插值相位大小, 即可获得满足数量要求的空间点坐标 $P(X_w, Y_w, 0)$ 。然而平面标靶上空间点的 $Z_w = 0$, 无论有多少特征点, 都无法对式(4)进行求解。因此, 在空间中引入一个面阵相机作为辅助, 该面阵相机预先通过张氏标定法^[19]进行标定。

如图 4 所示, 面阵相机坐标系为 $O_f X_f Y_f Z_f$, 线阵相机坐标系为 $O_l X_l Y_l Z_l$, 靶标上空间点的世界坐标系为 $O_w X_w Y_w Z_w$, 在标定图像中增加一张棋盘格图像, 利用引入的辅助相机获取棋盘格图像, 通过 PnP 算法^[20]获得标靶上世界坐标系与面阵相机坐标系的旋转矩阵 (R_f) 与平移向量 (t_f), 标靶上的特征点即可变换到面阵相机坐标系 $O_f X_f Y_f Z_f$ 中。因此, 下一步估计的线阵相机外部参数为从面阵相机坐标系到线阵相机坐标系的三维刚体变换矩阵 Rt , 其中 R 为旋转矩阵, t 为平移向量。

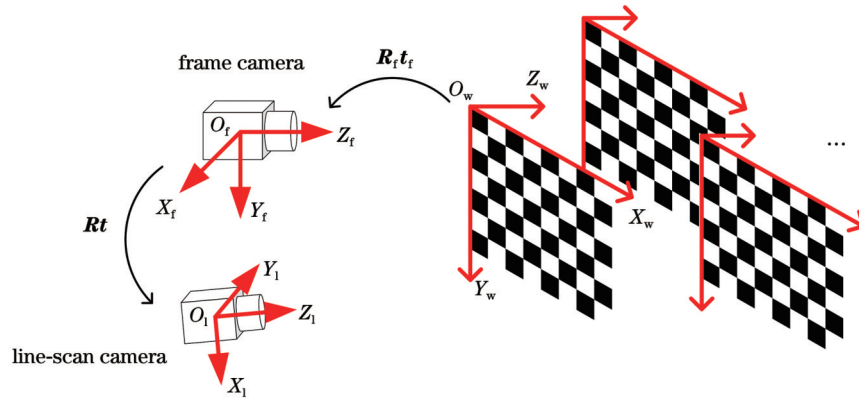


图 4 面阵相机辅助获取标靶刚性变换矩阵

Fig. 4 Obtaining rigid transformation matrix of target with aid of frame camera

成像模型参数估计分为两步: 首先使用直接线性变换 (DTL) 求解得到相机内外参数矩阵, 此时利用得到的内外参数矩阵仅可获得空间点到像点的线性变换。然后以第一步中的参数作为初值进行非线性优化, 得到最终的标定结果。

本文采用 Usamentiaga 等^[21]提出的鲁棒性方法求解直接线性变换中的内外参数初值。首先计算视线平面在世界坐标系中的方程, 然后, 对剩下的参数进行估计, 即可用解析的形式将线阵相机线性成像模型中的 8 个参数 $v_0, f_y, t_1, t_2, t_3, \alpha, \beta, \gamma$ 求出。

最后, 通过非线性优化将重投影误差最小化, 估计出相机镜头非线性畸变的径向畸变参数 k_1 和 k_2 与切向畸变参数 p_1 , 得到线阵相机 11 个参数的最优解。

4 实验与讨论

为了验证本文所提算法的精度与鲁棒性, 分别使用仿真数据与实际数据对算法进行测试。

4.1 数字仿真实验

本文通过数字仿真实验, 分别测试了图像噪声大

小、图像离焦程度及镜头畸变对标定结果的影响; 同时, 对比了不同畸变大小下相位标靶与几何标靶的标定精度。仿真实验使用的仿真线阵相机参数为 $f = 2857.14$ pixel, $v_0 = 512$ pixel, 面阵相机参数为镜头横向等效焦距 $f_x = f_y = 1041.66$ pixel, $v_0 = 270$ pixel, $u_0 = 360$ pixel, 刚性变换参数为 $\alpha = 0, \beta = 5^\circ, \gamma = 0, t_1 = 20$ mm, $t_2 = 5$ mm, $t_3 = 5$ mm, 相位标靶的垂直条纹及倾斜条纹的周期为 50 pixel。

4.1.1 图像噪声对标定的影响

在测试图像噪声对标定结果的影响时, 本文在仿真相机的图像点坐标中添加了均值为 0、标准差为 σ 的高斯噪声, 再将图像点投影到世界坐标系中, 生成含噪声的图像。噪声的标准差 σ 以 0.1 为步长从 0.1 递增到 1.0。对于同一噪声水平, 独立运行 1000 次标定程序后得到标定结果, 计算 f_y 、主点坐标 (v_0) 和平移向量的绝对误差及重投影点与图像点之间的均方根误差 (RMSE), 结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 相机内部参数与外部参数的残差及重投影误差都随着噪声大小的增加而增加。在相

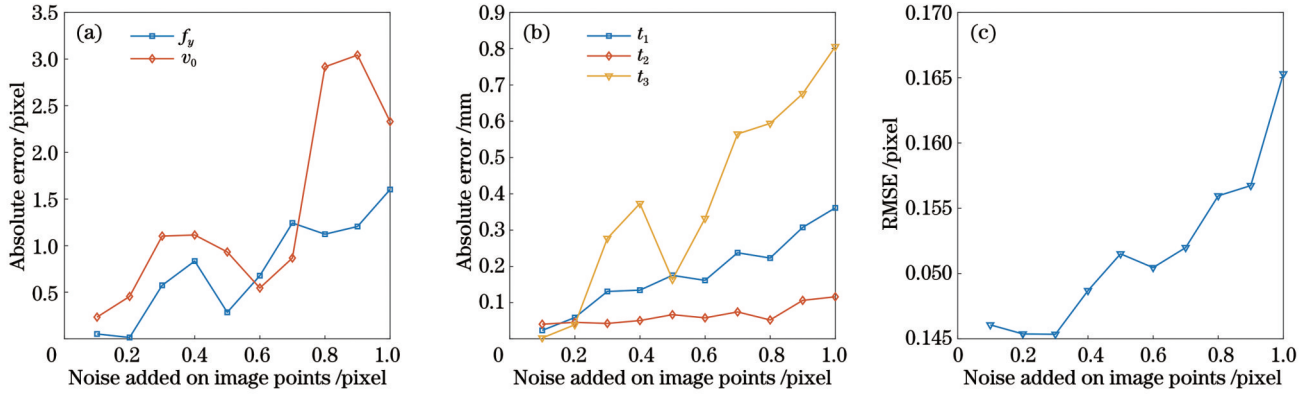


图 5 图像噪声对标定参数的影响。(a) v_0 和 f_y 的绝对误差; (b) 平移向量的绝对误差; (c) 重投影的均方根误差

Fig. 5 Impacts of image noise on calibration parameters. (a) Absolute errors of v_0 and f_y ; (b) absolute errors of translation vectors; (c) RMSE of reprojection

机内部参数中, v_0 相比于 f_y 对噪声大小更加敏感; 在相机外部参数中, t_3 相比于 t_2 和 t_1 对噪声大小更加敏感。这是由于 t_3 的估计受到了相机光心与标靶上的 $X_w O_w Y_w$ 平面之间距离的限制, 而两相机光心到 $X_w O_w Y_w$ 平面的距离之差相对于光心到该平面的距离非常小。

4.1.2 离焦对标定的影响

在测试离焦图像的性能时, 本文使用以 0.5 为步

长, 半径从 1 pixel 增加到 5 pixel 的离焦点扩散函数, 对噪声标准差为 0.5、均值为 0 的图像进行卷积操作, 以模拟不同离焦模糊程度的图像。点扩散函数的离焦光斑半径以 1 为步长从 1 递增至 5。对于具有相同离焦光斑半径的图像, 独立运行 1000 次标定程序后, 计算 f_y 、 v_0 和平移向量的绝对误差及重投影误差, 结果如图 6 所示。

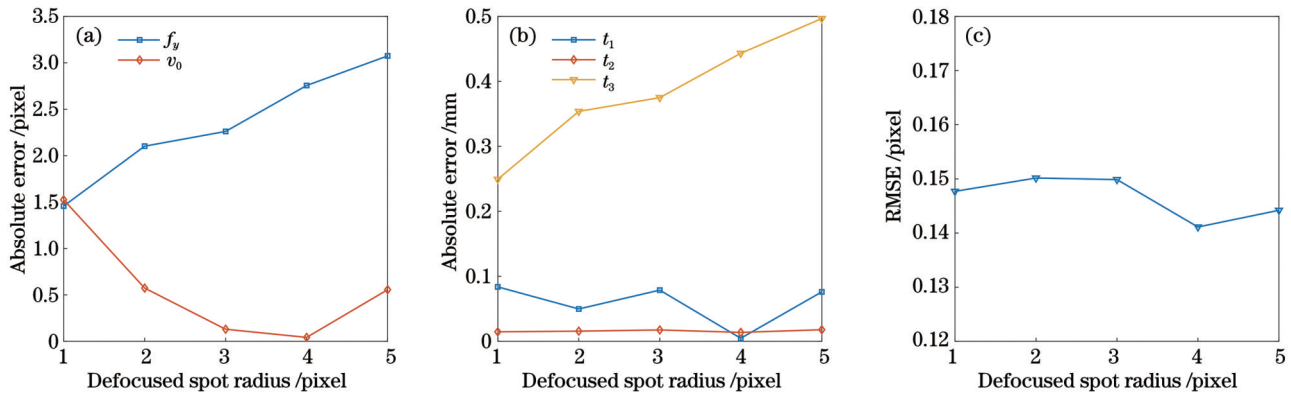


图 6 离焦对标定参数的影响。(a) v_0 和 f_y 的绝对误差; (b) 平移向量的绝对误差; (c) 重投影误差

Fig. 6 Effects of defocus on calibration parameters. (a) Absolute errors of v_0 and f_y ; (b) absolute errors of translation vectors; (c) reprojection error

从图 6 可以看出, 随着图像离焦程度的增加, 相机标定参数的残差不断增加, 但 f_y 、 v_0 的残差总体均小于 1.4 pixel, 外部参数平移向量的残差小于 0.5 mm, 重投影误差无明显变化。这说明相位标靶对离焦模糊图像不敏感, 对超出景深范围的标定图像有着较好的鲁棒性

4.1.3 图像畸变对标定的影响

在对含镜头畸变的图像进行标定测试时, 镜头畸变引起的图像失真主要由一阶径向畸变主导, 故在仿真中加入一阶径向畸变 k_1 , 其以 0.05 为步长从 0 增加到 0.5。同时, 在图像中添加了标准差为 0.5、均值为 0 的高斯噪声。本文分别生成了几何交比不变标靶与相位标靶的标定图像, 独立运行

1000 次标定程序后, 对比两种标靶标定得到的 f_y 、 v_0 的绝对误差与重投影误差平均值, 结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 随着一阶畸变参数的不断增加, 两种方法估计的相机参数的标定误差都在上升, 然而几何交比不变标靶的标定残差与均方根误差均大于相位标靶。这是由于当标定图像存在畸变与噪声时, 相位标靶相较于几何交比不变标靶, 在特征点对应精度上有更好的表现。

4.2 相机标定实验

实际标定中使用的相机参数如表 1 所示。面阵相机使用 Matlab 相机标定工具箱预先标定好。相位标靶图案采用 11 寸 (约 3.33 cm) iPad 显示, 分辨率为

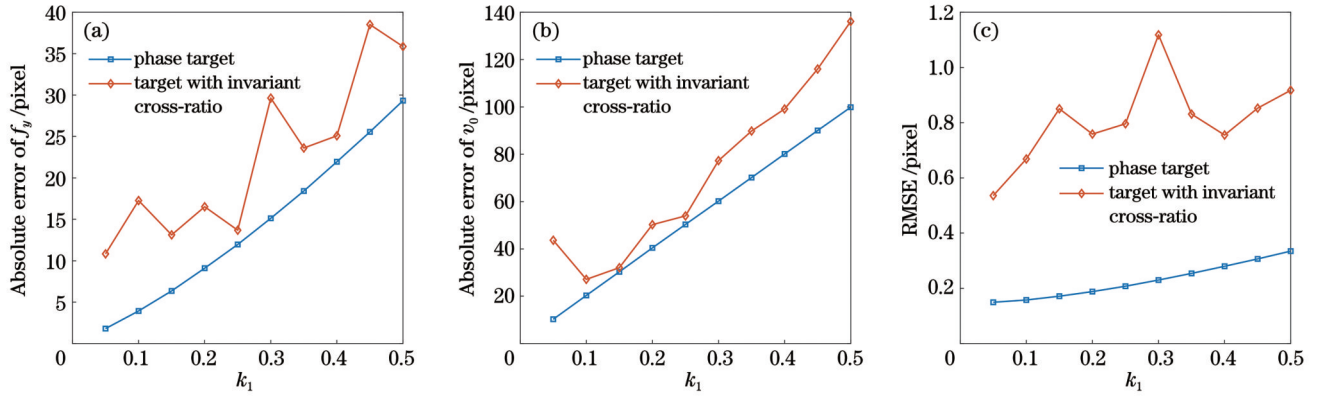


图 7 畸变对标定参数的影响。(a) f_y 的绝对误差; (b) v_0 的绝对误差; (c) 重投影误差

Fig. 7 Impacts of distortion on calibration parameters. (a) Absolute error of f_y ; (b) absolute error of v_0 ; (c) reprojection error

表 1 线阵相机与面阵相机参数

Table 1 Line-scan camera and frame camera parameters

Camera type	Line-scan camera	Frame camera
Sensor size	2048 pixel × 2 pixel	4096 pixel × 3000 pixel
Pixel size	10.56 μm × 10.56 μm	3.45 μm × 3.45 μm
Lens focus	35 mm	12 mm

1600 pixel × 1600 pixel, 条纹周期为 50 pixel, 竖直条纹

与倾斜条纹间的夹角为 30°。

在标定过程中,在线阵相机成像范围内任意摆放靶标,采集了 20 个不同位置处的线阵相机图像与面阵相机图像,并将所有图像用于标定。为了比较相位靶标和几何交比不变靶标的标定精度,同时使用 Li 等^[14]提出的方法对线阵相机参数进行标定。在图像采集过程中,部分图像超出了镜头的景深,实验装置与采集的部分图像如图 8 所示。

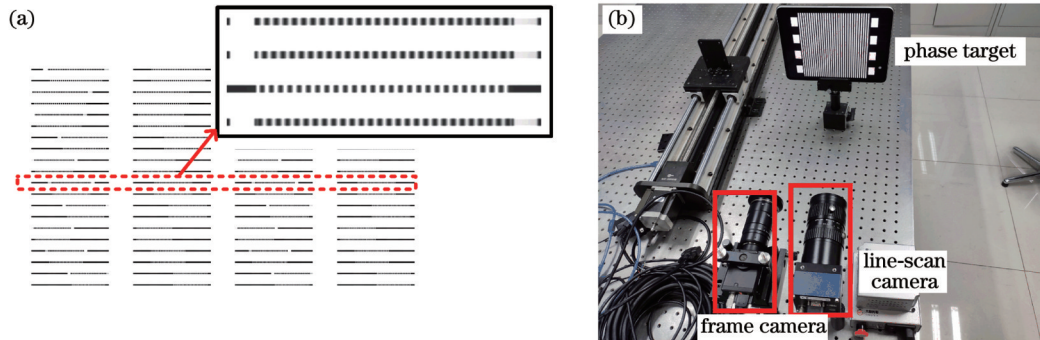


图 8 标定实验。(a) 用于标定的部分线阵相机图像; (b) 实验装置

Fig. 8 Calibration experiment. (a) Partial line-scan camera images used for calibration; (b) experimental setup

在三次标定实验中,计算获得的三组相机内部参数与外部参数如表 2 所示。图 9 展示了其中一次标定

中两种方法获得的空间特征点分布及根据该标定结果还原的线阵相机与面阵相机在空间中的位置。

表 2 三次标定获得的相机内部参数与外部参数

Table 2 Internal and external parameters of camera obtained by three calibrations

Parameter	First calibration result		Second calibration result		Third calibration result	
	Target with invariant cross-ratio	Phase target	Target with invariant cross-ratio	Phase target	Target with invariant cross-ratio	Phase target
f / pixel	3615.06	3614.35	3614.08	3614.41	3610.45	3614.33
v_0 / pixel	1031.30	1029.62	1030.66	1029.78	1031.42	1029.55
r_1 / (°)	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
r_2 / (°)	0.68	0.16	0.14	0.15	0	0.15
r_3 / (°)	-0.02	-0.90	-0.02	-0.90	-0.01	-0.91
t_1 / mm	6.18	5.53	5.53	5.63	4.64	5.69
t_2 / mm	-105.76	-105.76	-105.78	-105.75	-105.72	-105.75
t_3 / mm	11.77	11.72	11.62	11.72	10.82	11.71

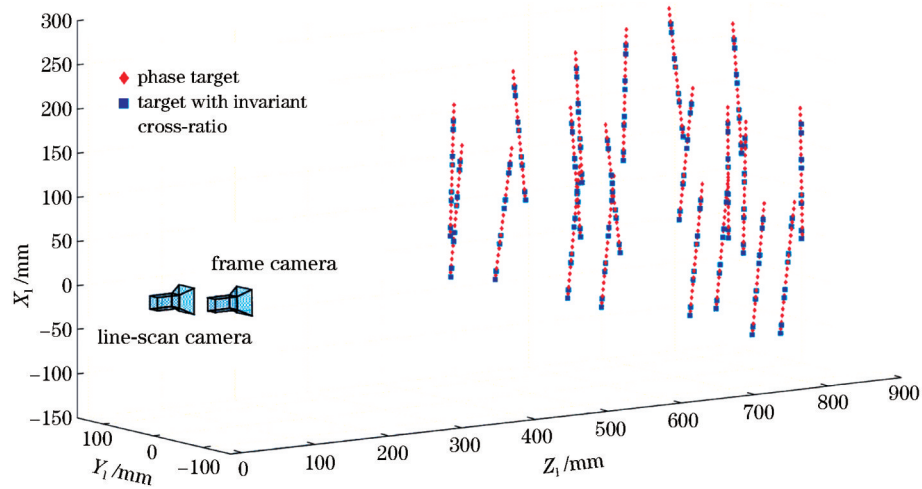


图 9 第一次标定获得的空间点分布及对应的两相机位置

Fig. 9 Spatial point distribution obtained by first calibration and corresponding positions of two cameras

为了对比算法的精度,本文使用表 2 所示的三组标定结果计算对应的所有重投影点的残差与均方根误差。两种标定方法对应的重投影点的最大残差与均方根误差

如表 3 所示。采用相位标靶标定的重投影点最大残差小于 0.5 pixel,均方根误差小于 0.1 pixel,比几何交比不变标靶有明显的下降,表明该算法有更好的标定精度。

表 3 相位标靶与几何交比不变标靶的重投影最大残差及均方根误差

Table 3 Maximum residual and RMSE of reprojection for phase target and target with invariant cross-ratio

Condition	Calibration method	Maximum residual error /pixel	RMSE /pixel
First calibration	Target with invariant cross-ratio	1.951	0.348
	Phase target	0.303	0.081
Second calibration	Target with invariant cross-ratio	1.891	0.465
	Phase target	0.297	0.094
Third calibration	Target with invariant cross-ratio	2.366	0.496
	Phase target	0.468	0.091
Mean	Target with invariant cross-ratio	2.069	0.436
	Phase target	0.356	0.089

5 结 论

为了提升线阵相机的标定精度,提出了一种基于绝对相位标靶的线阵相机标定方法。标定时使用线阵相机及辅助面阵相机获取设计的非正交条纹图像,通过解算绝对相位及标靶位置关系,获得特征点空间位置坐标与线阵相机图像坐标的高精度对应关系;然后通过直接线性变化获取初值并进行非线性优化,得到标定参数。实验结果表明,所提方法在实际标定中的重投影误差均值为 0.089 pixel,相较于现有的基于平行线的几何标靶下降了 70% 以上。所提方法虽然灵活性有待提高,但有效地提高了线阵相机的标定精度。另外,该方法在离焦情况下仍能高效地完成标定,可满足光学三维测量对线阵相机高精度标定的需求。

参 考 文 献

- [1] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304008.
- [2] 刘元坤, 苏显渝. 基于相位测量的摄像机标定方法[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 65-69.
- [3] Schmalz C, Forster F, Angelopoulou E. Camera calibration: active versus passive targets[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 113601.
- [4] Bell T, Xu J, Zhang S. Method for out-of-focus camera calibration [J]. Applied Optics, 2016, 55(9): 2346-2352.
- [5] 毛先富, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于相位标靶的光学坐标测量方法[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2452-2457.
- [6] Mao X F, Su X Y, Liu Y K, et al. Analysis on optical coordinate measurement based on phase target[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2452-2457.
- [7] Dráréni J, Roy S, Sturm P. Plane-based calibration for linear cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 91(2): 146-156.
- [8] Hui B W, Wen G J, Zhang P, et al. A novel line scan camera calibration technique with an auxiliary frame camera[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(9): 0204003-7.

- 2567-2575.
- [8] Horaud R, Mohr R, Lorecki B. On single-scanline camera calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(1): 71-75.
- [9] Song K C, Hou B, Niu M H, et al. Flexible line-scan camera calibration method using a coded eight trigrams pattern[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 296-307.
- [10] Li C, Li H Y, Zhang X, et al. Coding line structured light based on a line-scan camera and its calibration[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24799-24812.
- [11] Usamentiaga R. Static calibration for line-scan cameras based on a novel calibration target[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5015812.
- [12] Yuan S P, Bi D X, Li Z X, et al. A static and fast calibration method for line scan camera based on cross-ratio invariance[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69(11): 619-627.
- [13] Luna C A, Mazo M, Lazaro J L, et al. Calibration of line-scan cameras[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(8): 2185-2190.
- [14] Li D D, Wen G J, Qiu S H. Cross-ratio-based line scan camera calibration using a planar pattern[J]. Optical Engineering, 2016, 55(1): 014104.
- [15] 安世勇, 朱江平, 杨红雨, 等. 基于绝对相位靶的摄像机标定仿真与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0412001. An S Y, Zhu J P, Yang H Y, et al. Simulation and experiment research on camera calibration based on absolute phase target[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0412001.
- [16] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001. Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
- [17] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303004. Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.
- [18] 王浩然, 吴周杰, 张启灿, 等. 基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0112003. Wang H R, Wu Z J, Zhang Q C, et al. High-speed three-dimensional topography measurement method based on time multiplexing coding[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 0112003.
- [19] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [20] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [21] Usamentiaga R, Garcia D F, de la Calle F J. Line-scan camera calibration: a robust linear approach[J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9443-9453.

Line-Scan Camera Calibration Method Based on Absolute Phase Target

Huang Gan, Shao Shuangyun*, Luo Jueting

School of Physical Science and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract

Objective The accuracy of camera calibration directly determines the precision of 3D measurements, underscoring its importance in the research of 3D measurement techniques. Due to the advantages of high speed and high resolution, line-scan cameras are increasingly in demand for 3D measurement applications, necessitating high-precision calibration. Currently, there are two main methods for line-scan camera calibration: dynamic calibration and static calibration. Dynamic calibration is a process that requires the uniform movement of the line-scan camera with a displacement stage, while simultaneously scanning a calibration target, thereby generating 2D images for calibration purposes. Although this method realizes high accuracy, the calibration process is complex and often unfeasible in industrial settings where camera movement is restricted. On the other hand, static calibration depends on a parallel line calibration board, designed according to the principle of projective invariance. This method determines the calibration parameters by calculating the intersection coordinates of camera lines on the calibration target, which is performed by measuring the distance between parallel lines in the images. Static calibration methods reduce calibration costs and improve flexibility. However, they are susceptible to nonlinear mapping errors, insufficient feature information, and low calibration accuracy when the target is out of focus. To address these challenges, in this study, we propose a high-precision calibration method for line-scan cameras based on an absolute phase target. Leveraging the advantages of phase targets, such as high-precision positioning, rich feature points, and robustness against defocus, we design a phase target and calibration method appropriate for line-scan camera calibration. By combining the strengths of phase targets and assistance from a complementary area scan camera, this method establishes an accurate correspondence between line-scan camera images and spatial points via absolute phase information, thereby realizing high-precision calibration for line-scan cameras.

Methods Initially, a phase target suitable for line-scan cameras is designed, composed of phase-shifted fringe targets and Gray codes. To circumvent issues of phase unwrapping failures and wrapped phase calculation in line-scan camera images, we introduce a non-orthogonal absolute phase target. The absolute phase values of slanted fringe targets and vertical fringe targets are employed to encode the coordinates of feature points on the target. Subsequently, the phase-shifted fringe target image of the target is displayed on a monitor, and the line-scan camera captures the fringe targets to compute the wrapped phase values on the target within the image. During phase unwrapping, Gray codes are utilized to resolve phase ambiguities in slanted fringe targets by encoding the phase levels of the first column of the slanted fringe target image. The decoded Gray code values are first multiplied by 2π , then added to the unwrapped phase of the slanted fringe target in the image, and finally the unambiguous absolute phase values are obtained. Finally,

the phase target is placed in various spatial positions, and an auxiliary frame camera is utilized to determine the relative spatial positions between the targets. This process creates an accurate alignment between the line-scan camera images and spatial points. A two-step calibration process is then deployed to calculate the intrinsic parameters of the line-scan camera and the coordinate transformation between the two cameras.

Results and Discussions To verify the feasibility and accuracy of the proposed method, we conduct tests using simulated and real data. In the simulation experiments, we investigate the impact of image noise, defocus level, and lens distortion on the calibration results. In the image noise test, the results (Fig. 5) indicate that the maximum residual values of the intrinsic parameters f_y and v_0 do not exceed 3.5 pixel, the absolute residual of the translation vector remains under 0.9 mm, and the root-mean-square-error (RMSE) of reprojection peaks at 0.165 pixel. In the defocus image test, the image undergoes convolution with a defocus point spread function. The results (Fig. 6) demonstrate that the residuals of f_y and v_0 typically stay below 1.4 pixel, the residual of the translation vector remains under 0.5 mm, and the reprojection error maintains relative stability. In the lens distortion test, we introduce a first-order radial distortion to the image and draw a comparison between the phase target and the geometric target based on projective invariance. The results (Fig. 7) show that the calibration residuals and RMSE of the phase target outperform those of the cross-ratio target. These findings highlight that the proposed method exhibits strong robustness and resistance to defocus, and adapts more efficiently to image distortion and noise compared to traditional methods.

In the practical calibration experiments, the calibration system (Fig. 8) is constructed using the devices specified in Table 2. The system is calibrated three times utilizing the proposed method and cross-ratio target. To assess the accuracy of the algorithms, the residuals and root mean square errors of all reprojection points are computed using the calibration results (Table 3). The computation results (Table 4) reveal that the maximum residual of the reprojection points for the phase target calibration is 0.468 pixel, and the maximum RMSE is 0.091 pixel. Conversely, the geometric cross-ratio target results in the maximum residual of 2.366 pixel and the maximum RMSE of 0.496 pixel. This significant improvement in accuracy suggests that the proposed method outperforms traditional methods, thereby demonstrating superior calibration precision.

Conclusions In this study, a high-precision calibration method for line-scan cameras is proposed using an absolute phase target. During calibration, two sets of non-orthogonal fringe target images are captured by the line scan camera and an auxiliary frame camera. The absolute phase and target position relationship are calculated to establish a highly accurate correspondence between the spatial coordinates of feature points and the image coordinates of the line scan camera. The initial values are obtained using direct linear transform (DLT) and further refined via nonlinear optimization to obtain the calibration parameters. Experimental results demonstrate that the proposed method can realize a mean reprojection error of 0.089 pixel in practical calibration, which represents a reduction of more than 70% when compared to existing geometric targets based on parallel lines. Although the proposed method exhibits reduced flexibility, it effectively improves the calibration accuracy of line scan cameras. Furthermore, the method is capable of efficiently completing the calibration even in the presence of defocus, and thereby, satisfying the high-precision calibration requirements of line scan cameras for optical 3D measurement applications.

Key words measurement; camera calibration; line-scan camera; phase target; visual measurement