

基于单目视觉的单图标定算法

李杭龙¹, 杨涛², 李济泽¹

(1.福建省智能加工技术及装备重点实验室,福建 福州 350118;
2.福建工程学院 设计学院·海峡工学院,福建 福州 350118)

摘要: 为了满足现代工业生产中精度要求高、操作快捷的要求,提出基于单目视觉的单图标定算法。通过采集一张棋盘格标定板图像,精确提取棋盘格角点坐标,使用仿射变换得到像素坐标系和世界坐标系的仿射变换矩阵,分析 Halcon 仿射变换矩阵和张氏标定法相机模型的对应关系,得到详细的相机内参,再对图像进行畸变矫正,得到像素当量。多次 Halcon 实验结果表明,提出的算法与其他方法相比,操作更加快捷,标定结果标准差可控制在 0.02 mm 以内,能够满足现代工业生产需要。

关键词: 单目视觉;单图标定;仿射变换;畸变矫正;Halcon

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2022)06-0573-07

Research on single image calibration algorithm based on monocular vision

LI Hanglong¹, YANG Tao², LI Jize¹

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China;
2. School of Design · Straits College of Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to meet the requirement of high accuracy and fast operation in modern industrial production, a single image identification algorithm based on monocular vision was proposed. By collecting a checkerboard calibration board image, accurate extraction of checkerboard corner coordinates, affine transformation matrix of pixel coordinate system and world coordinate system was obtained by affine transformation. By analyzing the corresponding relationship between Halcon affine transformation matrix and Zhang's calibration camera model, detailed camera internal parameters were obtained. Finally, the pixel equivalent was obtained by distortion correction of the image. Halcon experiments show that the proposed method is faster than other methods, and the standard deviation of calibration results can be controlled within 0.02 mm, which can meet the needs of modern industrial production.

Keywords: monocular vision; single graph calibration; affine transformation; distortion correction; Halcon

计算机视觉的基本任务之一是从摄像机获取的图像信息出发计算三维空间中物体的几何信息,并由此重建和识别物体;而空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系是由摄像机成像的几何模型决定的,这些几何模型参数就是摄像机参数^[1]。相机标定就是根据一组已知空间位置的点与其图像对应点求解相机参数的过程。

早期的相机标定的方法有 Tsai 两步法^[2]和张正友平面标定法^[3]和自标定法等。Tsai 两步法和张正友平面标定法主要依靠多幅图和非线性优化提高精度,不满足现代工业生产的操作对便捷性和精确性的要求;另外,这两种方法由于程序封装,不利于用户自行开发使用。自标定法的原

收稿日期: 2022-08-15

基金项目: 福建省社会科学基金项目(FJ2021B187);福建工程学院科研启动基金项目(JY-Z20089)

第一作者简介: 李杭龙(1997—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向:机器视觉、康复机器人。

通信作者: 杨涛(1981—),男,河北迁安人,副教授,博士,研究方向:工业设计、康复机器人、交互设计。

理是利用 Krupp 方程为摄像机建立绝对二次曲面方程或者绝对二次曲面方程进行求解,对实验环境要求不是很高,但是鲁棒性和精度也不高^[4]。现代工业生产的相机标定多以张氏标定法为基础,通过对像素坐标点的精确提取构建像素坐标系,与世界坐标系建立映射关系,完成相机标定。例如,彭妍^[5]等提出一种基于平面变换的高精度相机标定方法,通过将标记点由椭圆投影成近似的标准圆,再利用图像矩提取标准圆圆心的坐标,投影回原标定板平面,得到标记点实际圆心的像素坐标,有效解决了提取椭圆圆心作为真实物理圆心投影点造成相机标定误差的问题,将相机标定的误差降低了 66.169%。娄群^[6]等提出基于亚像素边缘检测的双目相机标定方法,对亚像素边缘点集进行椭圆拟合,得到靶标识点的准确位置;最后矫正标识点的排序位置,获取用于求解标定参数的标识点检测点集,从而实现了复杂环境下相机的高精度标定,相较于常规环境的标定精度提升 23%。

上述方法都需要使用多张图进行多次标定来求得相机参数,标定过程过于繁琐,计算量大、效率低,不满足现代工业生产对简单快捷的要求;而且,使用圆孔标定板虽然降低了偏心畸变带来的影响,但依然会引入偏心误差。鉴于现场环境的特殊性,相机与被测物体的位置往往相对固定,相机标定的参数可以忽略外参带来的影响。综上,本研究通过简化张正友标定法,在不考虑相机外参的情况下对棋盘格标定板采集一张图像,得到相机内参和像素当量。

1 棋盘格角点提取

摄像机标定的精度直接影响着后续机器视觉任务的精度,而摄像机标定的精度很大程度上取决于标定板控制点的图像定位精度^[7]。多数相机标定算法都是针对实心圆孔或者棋盘格模式,如图 1 所示。实心圆孔标定是通过提取实心圆孔的圆心作为图像标志点与空间坐标系的标志点坐标建立关系。目前,圆心提取的主流算法较为成熟,对圆心的中心拟合度高,但是有偏心误差^[8]。棋盘格标定是通过提取棋盘格角点与世界坐标系的角点坐标建立关系。相较于实心圆孔标定,棋盘格标定对于标志点的提取精准度低,但不存在偏心误差^[9]。本研究通过选用合适的算法,调节

相应的参数提高角点提取精度,选择棋盘格标定板作为标志物。

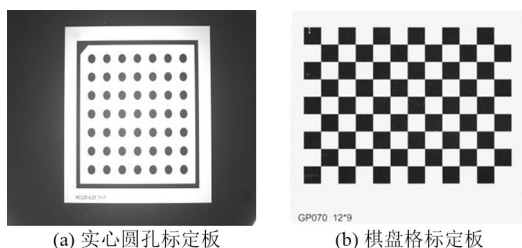


图 1 相机标定板

Fig.1 Camera calibration board

棋盘格的角点是图像中梯度值和梯度方向的变化速率都很高的点,Harris 算法利用卷积窗口滑动的思想,以某点为中心的窗口在该点附近滑动来判断图像角点。当滑动窗口在所有方向移动时,窗口内的像素灰度值出现了较大变化,就可能是角点^[9]。本研究选用棋盘格标定板如图 1 所示,型号为 GP070,每个方格边长为 5 mm,共有 88 个角点,棋盘格精度为 0.01 mm。

2 相机单图标定

提取棋盘格角点后,使用仿射变换与当前棋盘格标定板的规格尺寸建立的世界坐标系形成映射,其中 `vector_to_hom_mat2d()` 算子可以得到相应的仿射变换矩阵。

根据张正友标定法^[3],可以得到:

$$\tilde{s}\tilde{m} = A \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \tilde{M}, \quad A = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & -\frac{f \cot \theta}{dy} & u_0 \\ 0 & \frac{f}{d \sin \theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, s 是比例因子, \tilde{m}, \tilde{M} 表示最后一个元素为 1 的增广矩阵, $\tilde{m} = [u \ v \ 1]^T$, $\tilde{M} = [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$ 。其中, $[u \ v]^T$ 表示一个 2D 点, $[X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ 表示一个 3D 点。 A 被称作摄像机的内参矩阵, (u_0, v_0) 是相机坐标系主点, dx, dy 分别是 x 方向和 y 方向的像素当量,单位是 mm/pix。 f 为焦距, θ 表示像素坐标系坐标轴的夹角。以上长度单位统一取 mm,像素单位为 pix。

实际工程中,相机和被测物体的相对高度一般固定。假定相机模型平面在世界坐标系 $z = 0$ 上,则可以将式(1)修改为:

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} \frac{f}{dx} & -\frac{f \cot \theta}{dx} & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy \sin \theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

对于 Halcon 中 hom_mat2d_to_affine_par 算子形式如下:

$$\text{HomMat2D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\text{Phi}) & -\sin(\text{Phi}) & 0 \\ \sin(\text{Phi}) & \cos(\text{Phi}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\sin(\text{Theta}) & 0 \\ 0 & \cos(\text{Theta}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\text{Phi}) & -\sin(\text{Phi}) & T_x \\ \sin(\text{Phi}) & \cos(\text{Phi}) & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x & -S_y \sin(\text{Theta}) & 0 \\ 0 & S_y \cos(\text{Theta}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

记 $\mathbf{ER} = \begin{pmatrix} \cos(\text{Phi}) & -\sin(\text{Phi}) & T_x \\ \sin(\text{Phi}) & \cos(\text{Phi}) & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$; $\mathbf{IR} = \begin{pmatrix} S_x & -S_y \sin(\text{Theta}) & 0 \\ 0 & S_y \cos(\text{Theta}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 即

$$\text{HomMat2D} = \mathbf{ER} \times \mathbf{IR} \quad (3)$$

将

$$\begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} = \text{HomMat2D} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

写成与张氏标定法一致的顺序为:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = (\mathbf{IR})^{-1} (\mathbf{ER})^{-1} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$(\mathbf{ER})^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\cos(\text{Phi})}{\cos^2(\text{Phi}) + \sin^2(\text{Phi})} & \frac{\sin(\text{Phi})}{\cos^2(\text{Phi}) + \sin^2(\text{Phi})} & \frac{-(x \cos(\text{Phi}) + y \sin(\text{Phi}))}{\cos^2(\text{Phi}) + \sin^2(\text{Phi})} \\ \frac{-\sin(\text{Phi})}{\cos^2(\text{Phi}) + \sin^2(\text{Phi})} & \frac{\cos(\text{Phi})}{\cos^2(\text{Phi}) + \sin^2(\text{Phi})} & \frac{-(y \cos(\text{Phi}) - x \sin(\text{Phi}))}{\cos^2(\text{Phi}) + \sin^2(\text{Phi})} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$(\mathbf{IR})^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_x} & \frac{\sin(\text{Theta})}{S_x \cos(\text{Theta})} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_y \cos(\text{Theta})} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

与张氏标定法公式(1)对比,多了 (u_0, v_0) , 把 (u_0, v_0) 用 t 表示。

$$\begin{pmatrix} \frac{f}{dx} & -\frac{f \cot \theta}{dx} & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy \cdot \sin \theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & u_0 \\ 0 & a_3 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t_1 \\ r_3 & r_4 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} a_1 r_1 + a_2 r_3 & a_1 r_2 + a_2 r_4 & a_1 t_1 + a_2 t_2 + u_0 \\ a_3 r_3 & a_3 r_4 & a_3 t_2 + v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

令 $t'_2 = t_2 + \frac{v_0}{a_3}$, 则 $a_3 t_2 + v_0 = a_3 t'_2$, 令 $t'_1 = t_1 - \frac{a_2 v_0}{a_1 a_3} + \frac{u_0}{a_1}$, 则有式(9):

$$\begin{pmatrix} a_1 r_1 + a_2 r_3 & a_1 r_2 + a_2 r_4 & a_1 t_1 + a_2 t_2 + u_0 \\ a_3 r_3 & a_3 r_4 & a_3 t_2 + v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 r_1 + a_2 r_3 & a_1 r_2 + a_2 r_4 & a_1 t'_1 + a_2 t'_2 \\ a_3 r_3 & a_3 r_4 & a_3 t'_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t'_1 \\ r_3 & r_4 & t'_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{dx} & -\frac{f \cot \theta}{dx} & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy \sin \theta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (r_1 \quad r_2 \quad t') \quad (9)$$

公式(1)可以改写为:

$$Z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{dx} & -\frac{f \cot \theta}{dx} & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy \sin \theta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (r_1 \quad r_2 \quad t') \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

对比 Halcon 中 HomMat2D 的使用:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_x} & \frac{\sin(\Theta)}{S_x \cos(\Theta)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_y \cos(\Theta)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\cos(\Phi)}{\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)} & \frac{\sin(\Phi)}{\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)} & \frac{- (x \cos(\Phi) + y \sin(\Phi))}{\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)} \\ \frac{- \sin(\Phi)}{\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)} & \frac{\cos(\Phi)}{\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)} & \frac{- (y \cos(\Phi) - x \sin(\Phi))}{\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

通过 Halcon 中 hom_mat2d_to_affine_par 算子去解仿射变换矩阵, 得到相机内参和以下结论: 第一, Theta 是斜切, 它表示的是像素坐标系和图像坐标系的夹角 Phi; 第二, Phi 是确定变换 x 轴相对于原始 x 轴的旋转角度。

对比公式(10)与(11), 可以发现: 首先, 关于斜切角 Theta, Halcon 对其说明为: 变换后的坐标系是正交的, 则 $\Theta = 0$ 。参考算子 hom_mat2d_slant (Operator) 中对倾斜角度 Theta 的说明: 将倾斜角度 Theta 加入仿射变换矩阵 HomMat2D 中。由此可知, Theta 为 y 轴逆时针旋转与 x 轴构成的夹角, 并且与张氏标定法模型中的 θ 存在以下关系:

$$\Theta = \theta - \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

如此, 可以得到:

$$\begin{cases} \frac{1}{S_x} = \frac{f}{dx} \\ \frac{\tan\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}{S_x} = -\frac{f}{dx} \cot \theta \Rightarrow \begin{cases} S_x = \frac{dx}{f} \\ S_y = \frac{dy}{f} \end{cases} \\ \frac{1}{S_y \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{f}{dy} \sin \theta \end{cases} \quad (13)$$

其中, dx 、 dy 为像素当量, 单位为 mm/pix, 表示 x 轴方向和 y 轴方向单位像素所代表的实际物理长

度; f 为焦距。

3 畸变系数求解与畸变矫正

在实际应用中,摄像机镜头并不能满足理想的线性透视成像技术需求,存在多种非线性畸变产生的误差,所以需要进行畸变矫正^[10]。为了求解畸变参数。定义像面实际点 (X_d, Y_d) ,理想点 (X_n, Y_n) ,其中:

$$\begin{cases} X_d = X_n + W_x \\ Y_d = Y_n + W_y \end{cases} \quad (14)$$

由于图像平面上径向畸变比切向畸变更加明显^[11],因此本研究只考虑径向畸变。即,

$$\begin{cases} W_{xr} = X_n(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ W_{yr} = Y_n(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $r = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2}$, k_1, k_2, k_3 被定义为径向畸变系数。相机的非线性成像模型为:

$$\begin{cases} X_d = X_n + W_{xr} \\ Y_d = Y_n + W_{yr} \end{cases} \quad (16)$$

Tsai 文献^[2]中指出,引入过多的畸变系数不但无法提高标定精度,反而还会引起标定过程中解的不稳定性,因此暂且不考虑三阶径向畸变。

公式(16)的推导建立在相机畸变上,参考坐标系为相机坐标系。由于使用像素坐标进行操作,所以需要将相机坐标系转为像素坐标系。根据张正友标定法中坐标系转换的关系,可以得到实际像素坐标与成像面上实际坐标的转换关系:

$$\begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

从而可知,

$$\begin{cases} \hat{u} = \alpha X_d + \gamma Y_d + u_0 \\ \hat{v} = \beta Y_d + v_0 \end{cases} \quad (18)$$

同理,可以得到理想像素坐标与成像面上理想坐标的转换关系:

$$\begin{cases} u = \alpha X_u + \gamma Y_u + u_0 \\ v = \beta Y_u + v_0 \end{cases} \quad (19)$$

其中, (\hat{u}, \hat{v}) 为实际像素坐标, (u, v) 为理想像素坐标。实际成像面上的点转换为实际像素坐标时,偏移起点为理想像点;而理想成像面上的点转换为理想像素坐标时,偏移起点为 (u_0, v_0) 。所以,由公式(1)(2)可知:

$$\begin{cases} \hat{u} = u + (u - u_0) \times \\ \left(k_1 (X_n^2 + Y_n^2) + \right. \\ \left. k_2 (X_n^2 + Y_n^2)^2 + k_3 (X_n^2 + Y_n^2)^4 \right) \\ \hat{v} = v + (v - v_0) \times \\ \left(k_1 (X_n^2 + Y_n^2) + \right. \\ \left. k_2 (X_n^2 + Y_n^2)^2 + k_3 (X_n^2 + Y_n^2)^4 \right) \end{cases} \quad (20)$$

写成矩阵的表现形式为:

$$\begin{pmatrix} (u - u_0)(X_n^2 + Y_n^2) & (u - u_0)(X_n^2 + Y_n^2)^2 \\ (v - v_0)(X_n^2 + Y_n^2) & (v - v_0)(X_n^2 + Y_n^2)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_d - u \\ v_d - v \end{pmatrix} \quad (21)$$

简化(21)为:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} (u - u_0)r^2 & (u - u_0)r^4 \\ (v - v_0)r^2 & (v - v_0)r^4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix}, \mathbf{d} = \begin{pmatrix} u_d - u \\ v_d - v \end{pmatrix}$$

通过线性最小二乘法求径向畸变参数如式(22):

$$\mathbf{k} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d} \quad (22)$$

4 实验验证

实验选用器材为 BASLER 的 acA3800-10gm 相机,标定板选用型号为 GP070,12 * 9 规格棋盘格标定板,以及一块尺寸公差按 GB/T1804-m 制作的标准件。

首先,通过 Halcon 的 Harris 算子得到精准的全部 88 个棋盘格角点的图像坐标,如图 2(a)所示。调节算子相关参数,可以改善提取效果,任取一点放大后,得到的角点坐标为两个棋盘格角点的中间像素坐标,如图 2(b)所示。

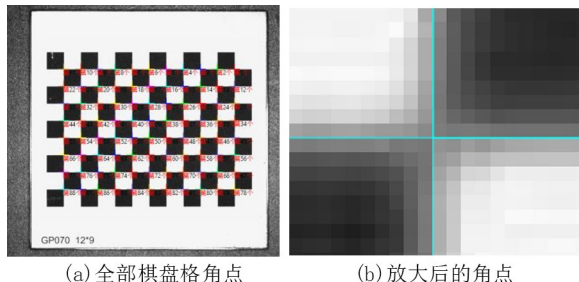


图2 提取的棋盘格标定板角点
Fig.2 Extracted checkerboard calibration board corners

得到所有的角点坐标后,建立图像坐标对应的物理坐标,通过 Halcon 算子得到仿射变换矩阵 HomMat2D,解析仿射变换矩阵得到详细的相机内参,对原图进行畸变矫正,只用矫正后的图像重新进行标定流程,得到标定后的相机内参。 S_x 和 S_y 为 0.024, Φ 等于 $-1.569\ 9$, Θ 则接近于 0,各个参数的意义之前已有讲述。

计算标定得到的仿射变换矩阵推导出的世界坐标系和标定板尺寸设定的世界坐标系的标准差,如表 1 所示,畸变矫正前后的标定误差变化明显。

表 1 畸变矫正前后的标定误差

Tab.1 Calibration error before and after distortion correction

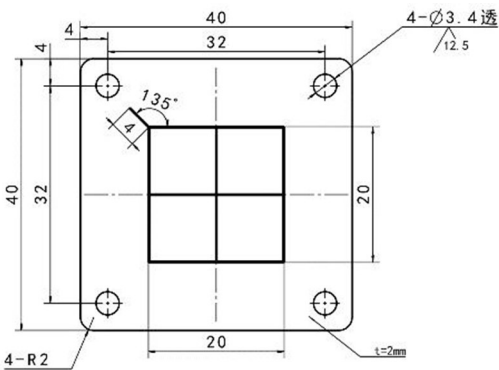
图像	标准误差/mm	
	畸变矫正前	畸变矫正后
标定图像 1	0.053 330	0.009 820
标定图像 2	0.053 243	0.009 892
标定图像 3	0.040 371	0.009 771
标定图像 4	0.065 840	0.009 828
标定图像 5	0.040 335	0.009 693
标定图像 6	0.069 460	0.009 230

从表 1 中多张标定图像各自的标定数据可知,进行畸变矫正后,该方法的标定误差为 0.01 mm 左右,考虑到标定板自身存在 0.01 mm 的误差,可以验证该方案的标定精度为 0.02 mm。

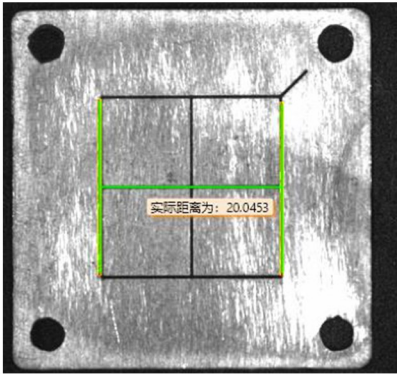
根据棋盘格标定的数据结果可以发现。Halcon 中像素坐标系 θ 为 $-\frac{\pi}{2}$ (已知量),根据公式 (12),能够可以验证 Θ 和 θ 的关系 ($\Theta + \frac{\pi}{2} = \frac{3\pi}{2}$,实际在图上也就是 $-\frac{\pi}{2}$)。同时求出像素当量。

通过尺寸公差按 GB/T1804-m 制作的标准件来计算标定误差,如图 3 所示。图 3(a)是标准件的详细尺寸图。中间网格线为黑色,网格线宽度 0.2 mm,深度为 0.1 mm。通过 Halcon 卡尺工具拟合得到中间卡尺线,计算网格线距离,如图 3(b)所示。

重复实验多次,选取其中的 6 组像素当量和



(a) 标准件尺寸图



(b) 标准件测量图

图 3 测量标定精度的验证(单位:mm)

Fig.3 Verification of measurement calibration accuracy (unit: mm)

网格线实际物理值,通过 MATLAB 工具实现张氏标定法得到相应的像素当量,与单图标定得到的像素当量进行比较,如表 2 所示。

表 2 多张图像的单图标定数据与张氏标定法数据

Tab.2 Single chart and Zhang's calibration data for multiple images

标定图像	像素当量/ $\text{mm} \cdot \text{pix}^{-1}$	网格线物 理值/mm	单图标定 误差/mm
单图标定 1	0.024 047 0	20.044 5	0.044 5
单图标定 2	0.024 038 9	20.039 2	0.039 2
单图标定 3	0.024 068 1	20.063 5	0.063 5
单图标定 4	0.024 036 2	20.038 8	0.038 8
单图标定 5	0.024 050 3	20.015 3	0.015 3
单图标定 6	0.024 014 9	20.018 4	0.018 4
张氏标定法	0.023 978 0	19.987 0	0.013 0

从表 2 中多张标定图像得到的像素当量以及每次对标准件的测量结果可知,使用单图标定得到的像素当量能满足 0.07 mm 的测量精度要求。分析使用张氏标定法与单图标定得到的像素当量和测量误差可知,相较于张氏标定法标定需要改变标定板位姿采集多张图,单图标定仅需采集一次图像就可以逼近张氏标定法得到的像素当量,更加简单、快捷。

5 结语

本研究使用一张棋盘格标定板图片,通过对

张正友标定法内参、外参和需要多张图片标定的要求分析,提出了一种单目视觉的单图标定算法。首先对棋盘格标定板图片的角点进行精确提取,利用标定板的实际物理尺寸建立世界坐标系,再通过 Halcon 算子对相应角点的像素坐标和物理坐标进行仿射变换,得到仿射变换矩阵。并通过对原图进行畸变矫正之后,得到相机内参和像素当量,并验证标定误差为 0.02 mm。通过对标准件的长度测量和误差分析,可以验证该方案满足 0.07 mm 的测量精度要求。

参考文献:

[1] 汤小伟, 杨玉萍, 张磊, 等. 一种考虑畸变的摄像机线性标定方法[J]. 机械设计与制造, 2021(5): 251-255.

[2] TSAI R. 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 and Automation, 1987, 3(4): 323-344.

[3] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[4] 项志宇, 孙波. 折反射全向相机镜面位姿的自标定方法[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 161-168.

[5] 彭妍, 郭君斌, 于传强, 等. 基于平面变换的高精度相机标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(7): 1297-1303.

[6] 娄群, 吕钧澹, 文立华, 等. 基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法[J/OL]. 光学学报: 1-16[2022-09-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20220714.1356.160.html>.

[7] 杨幸芳, 黄玉美, 高峰, 等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1109-1113.

[8] DATTA A, KIM J S, KANADE T. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops. Kyoto, Japan: IEEE: 1201-1208.

[9] 王丞, 田暄, 郭瑞, 等. 自适应 Harris 角点提取的点云粗配准算法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3): 33-44.

[10] 张建国, 陈维光, 莘明星, 等. 一种基于 LabVIEW 的摄像机非线性畸变标定方法[J]. 船舶工程, 2018, 40(12): 64-68, 76.

[11] 胡均平, 宋菲菲, 罗春雷, 等. 一种基于自适应角点检测的非量测畸变校正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 175-181.

(责任编辑: 方素华)