

基于双目视觉的工件位姿检测

龚友彬¹ 康 曦^{1,2} 王 军¹

GONG Youbin KANG Xi WANG Jun

摘 要

基于双目视觉技术的工件位姿检测,旨在提高工业自动化中的精确度和效率。首先完成了双目系统的标定,利用张正友标定法对双目相机进行了详细的内外参数标定。随后,采用 SURF 算法对目标工件的特征点进行快速且鲁棒的提取,为位姿检测提供了关键的视觉特征。在位姿检测方法的研究中,结合了三维空间定位技术和双目视觉的优势,设计了一种新的工件空间定位方法。该方法通过计算工件特征点在双目图像中的对应关系,实现了对工件空间姿态的准确测量。此外,探索了工件偏转角的定位方法,进一步提高了位姿检测的精度。实验结果表明,所设计的双目视觉系统能够有效地对工业工件进行位姿检测,具有较高的精度和可靠性。

关键词

双目视觉技术; 工件位置检测; 特征点提取; 机器视觉; 目标定位

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.11.033

0 引言

随着计算机性能的不不断提升,机器视觉已经成为当今社会的一种重要生产辅助工具,工业机器人结合基于视觉的识别与定位技术在多领域得到广泛应用,尤其是在工业 4.0^[1]和“中国制造 2025”^[2]的趋势下,工件位姿检测已成为自动化生产的关键一环。将机器视觉技术运用到计算机和机器人工业生产中,不仅大大提高了工作效率和自动化程度,而且还保证了工业生产环境的可靠。本文利用双目视觉技术对圆柱形工件进行位置检测。首先使用张氏标定法^[3],推导拍摄图片中标定模板的特征点和其成像平面中像点的对应关系^[4],进而得到双目相机的内参数^[5]和外参数^[6]。在基于 SURF 算法^[7]和欧式空间^[8]对目标工件进行三维重建^[9],用 SURF 算法对双目相机得到的目标工件的图片进行运算,得到图像的二维特征点;然后通过欧式空间将 SURF 算法得到的目标工件二维特征点映射成三维坐标;最后进行目标工件的空间定位,计算工件的姿态,得到工件的中心点坐标和偏航角^[10]及俯仰角^[11]。

1 双目立体视觉标定结果

1.1 双目立体视觉标定原理

张氏标定法中,世界坐标系和相机坐标系的转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_w \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:用 R 和 T 来表示物体与摄像机之间的相对位置关系。在本文中,以左侧摄像机为基准,因此,公式中 M_w 为工业摄像机的外参数矩阵,即左摄像机与右摄像机之间的位置关系。

将 2D 转换为 3D:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

工业相机内外参数标定结果:

$$\begin{cases} \alpha_x = \|m_1 \times m_3\| \\ \alpha_y = \|m_2 \times m_3\| \\ u_0 = m_1^T m_3 \\ v_0 = m_2^T m_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_1 = (m_1 - u_0 m_3)/\alpha_x \\ r_2 = (m_2 - v_0 m_3)/\alpha_y \\ r_3 = m_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_x = (m_{14} - u_0 m_{34})/\alpha_x \\ T_y = (m_{24} - v_0 m_{34})/\alpha_y \\ T_z = m_{34} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 标定结果

本文采用棋盘标定法,如图 1 基于 MATLAB 工具箱进行相机的标定。对采集到的 22 张图像进行同样的取点操作,经过左右相机标定后内参结果如表 1,标定角点总数为 $6 \times 10 \times 22 = 1320$ 个。

1. 江西理工大学机电工程学院 江西赣州 341000

2. 国网江西省电力有限公司赣州供电分公司 江西赣州 341000

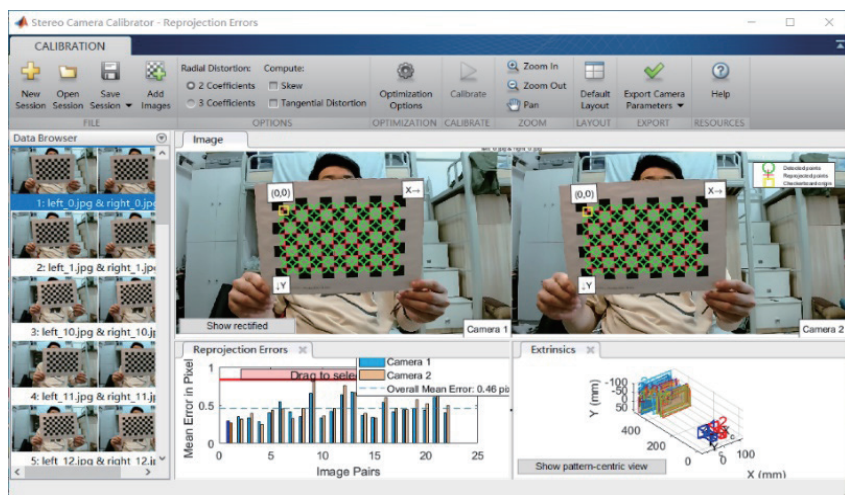


图 1 基于 MATLAB 标定

表 1 内参结果

标定结果	左侧相机	右侧相机
内参数	$\begin{bmatrix} 1\ 050.359\ 6 & 0 & 582.069\ 7 \\ 0 & 1\ 057.276\ 7 & 324.134\ 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1\ 047.746\ 1 & 0 & 653.617\ 9 \\ 0 & 1\ 054.857\ 0 & 335.010\ 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
畸变系数	$[-0.202\ 2\ 0.057\ 0\ 0]$	$[-0.189\ 7\ 0.008\ 0\ 0]$
焦距	$(1.050\ 359\ 6\ 1.057\ 276\ 7)$	$(1.047\ 746\ 1\ 1.054\ 857\ 0)$
主点	$(582.069\ 7\ 324.134\ 1)$	$(653.617\ 9\ 335.010\ 1)$

世界坐标系的旋转矩阵和平移向量分别为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.997\ 8 & 0.000\ 1 & -0.065\ 7 \\ -0.000\ 6 & 1.000\ 0 & -0.007\ 4 \\ 0.065\ 7 & 0.007\ 4 & 0.997\ 8 \end{bmatrix}$$

$$T = [-55.870\ 2\ -0.072\ 9\ 0.539\ 5]$$

相机的固有参数: 焦距为 2.4 mm, 分辨率为 1280×720 , 相对距离为 60 mm。

左右相机标定的平均值由上述结果计算得出:

$$(1.050\ 359\ 6 + 1.057\ 276\ 7 + 1.047\ 746\ 1 + 1.054\ 857\ 0) \times 2.2 \div 4 = 2.315\ 6\ \text{mm}, \text{ 与固定参数 } 2.4\ \text{mm} \text{ 的焦距十分接近。}$$

主点位置由分辨率推算:

$$\begin{cases} u_0 = \frac{H}{2} \\ v_0 = \frac{V}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: (u_0, v_0) 为主点坐标为; $H \times V$ 为相机的分辨率。
 $1280/2 = 640$, $720/2 = 360$ 与相机标定的左侧相机的主点坐标 $(582.069\ 72, 34.134\ 1)$ 以及右侧相机的主点坐标 $(653.617\ 9, 335.010\ 1)$ 主点坐标相机相差不大; 两相机相对距离通过平移向量 T 来推算:

$\sqrt{(-55.870\ 2)^2 + (-0.072\ 9)^2 + (0.539\ 5)^2} = 55.873\ \text{mm}$
 与相机固定参数相对距离 60 mm 十分接近。平移向量 T 中间的分量 T_y 是接近于 0 的, 这是因为 xoy 坐标平面十分平行于相机安装平面, 所以偏移量在 y 方向上接近于 0。

2 目标工件的特征点提取

2.1 SURF 算法原理

SURF 算法的基本思想是对整幅图像进行运算, 并根据各像素点的海森矩阵行列式, 构造 SURF 的标度锥体:

$$I_{\Sigma}(x, y) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(x, y) \quad (7)$$

式中: $I(x, y)$ 是图像像素。

构造尺度空间利用 Hessian 矩阵判断极值点:

$$H(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Hessian 矩阵的计算公式为:

$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 \quad (9)$$

利用二阶标准高斯函数对图像进行离散化处理, 从而构造出具有不同尺度特征的多个响应图像。在象点 $A(x, y)$ 上具有相应尺度的海森矩阵是:

$$H(A, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(A, \sigma) & L_{xy}(A, \sigma) \\ L_{xy}(A, \sigma) & L_{yy}(A, \sigma) \end{bmatrix} \quad (10)$$

在图像点 (x, y) 处标准二阶高斯函数的卷积结果为:

$$L_{xx} = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y) \quad (11)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{\partial^2 g(x, y, \sigma)}{\partial x^2} \quad (12)$$

式中: $g(x, y, \sigma)$ 是标准高斯函数。同理可得 L_{xy} 、 L_{yy} 。图像上所有点的 Hessian 行列式得以计算。

接着, 对每个领域空间和尺度内的相应值进行比较, 每个像素与其周围的 26 个像素元素进行比较, 包括下一层的 9 个像素、上一层的 9 个像素以及同一层的 8 个像素, 保留最大值。

对于每一个可能的特征点 $H(x, y, \sigma)$ 假设为:

$$H(x) = H + \frac{\partial H^T}{\partial x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} x \quad (13)$$

对式 (13) 求导得:

$$\hat{x} = -\frac{\partial^2 H^{-1} \partial H}{\partial x^2 \partial x} \quad (14)$$

当 $\hat{x} = 0$ 时可得:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{yx} & d_{sx} \\ d_{xy} & d_{yy} & d_{sy} \\ d_{xs} & d_{ys} & d_{ss} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

由此获得了各特征点的位置。

2.2 基于欧氏空间的坐标映射

将 SURF 算法得到的图像的像素点 (u, v) 通过式 (17) 映射为三维坐标。

$$f(u, v) = F(x, y, z) \quad (17)$$

利用相似三角形原理, 导出相应的解析公式:

$$\frac{D-f}{D} = \frac{B-(x_1-x_r)}{B} \quad (18)$$

在 3D 视差图像处理中, 利用视差求取空间点 $P(x, y, z)$ 的三维坐标。利用三角形的相似性, 结合像元与真实坐标之间的对应关系, 推导出精确的计算公式:

$$X_1 = f \frac{x}{z} \quad (19)$$

$$X_r = f \frac{X-B}{z} \quad (20)$$

在双目平行视觉模式下, 要求两台摄像机的中心点位于同一平面上, 并满足 $y_r=y_l=y_t$ 的条件。

$$y_y = f \frac{y}{z} \quad (21)$$

根据上述三个式子即可求解得空间点 P 的三维坐标式, 其公式为:

$$\begin{cases} x = \frac{Bx_1}{x_1-x_r} \\ y = \frac{By_t}{x_1-x_r} \\ z = \frac{Bf}{x_1-x_r} \end{cases} \quad (22)$$

工件视差图如图 2 所示。

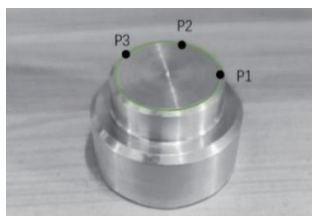


图 2 视差空间图像

圆柱体选择角点 P_1 、 P_2 、 P_3 , 求出其三维坐标, 见表 2。

表 2 四个角点的空间三维坐标值

角点	角点左图像 像素坐标	角点右图像 像素坐标	角点三维坐标
P_1	4.10, 3.36	9.90, 3.36	4.81, 8.77, 18.88
P_2	7.75, 3.74	4.65, 3.75	8.75, 4.84, 18.36
P_3	7.60, 5.06	4.55, 5.08	7.89, 6.14, 18.98

3 工件的空间定位方法

3.1 工件空间定位方法研究

根据相机模型计算, 可以得到轮廓各点相对于相机坐标系在空间中的位置信息:

$$X_i = \frac{(u_i - u_0)\sigma_x}{f} Z_i \quad (23)$$

$$Y_i = \frac{(u_i - u_0)\sigma_y}{f} Z_i \quad (24)$$

目标圆轮廓各点的空间坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 即可获得, 通过使用轮廓中三点即可获得圆心坐标。空间定位双目图像如图 3 所示。

随机抽取轮廓中的三个点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 、 $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$, 则此圆的空间法向量为:

$$\vec{o}_1 = \vec{P_1P_2} \times \vec{P_2P_3} \quad (25)$$

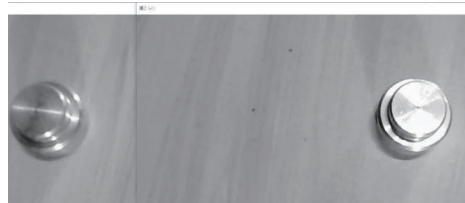


图 3 空间定位双目图像

P_1 、 P_2 、 P_3 组成的两条线的中垂线方向向量分别为:

$$P_1P_{2\perp} = \vec{o}_1 \times P_1P_2 = (a_1, b_1, c_1) \quad (26)$$

$$P_1P_{3\perp} = \vec{o}_1 \times P_1P_3 = (a_2, b_2, c_2) \quad (27)$$

线段 P_1P_2 和 P_2P_3 的中点分别是 $\frac{P_1+P_2}{2}(x_{12}, y_{12}, z_{12})$ 和 $\frac{P_2+P_3}{2}(x_{23}, y_{23}, z_{23})$ 。所以两条线段的中垂线可以表示为:

$$l_1: \frac{x-x_{12}}{a_1} = \frac{y-y_{12}}{b_1} = \frac{z-z_{12}}{c_1} \quad (28)$$

$$l_2: \frac{x-x_{23}}{a_2} = \frac{y-y_{23}}{b_2} = \frac{z-z_{23}}{c_2} \quad (29)$$

此时的空间圆心 $O = l_1 \times l_2$ 即为 l_1 与 l_2 的交点。通过取值计算圆心的平均值来减少因为特征点提取误差带来的定位误差。

3.2 工件偏转角定位方法

俯仰角与偏航角由 α 和 β 来表示, 见图 4。

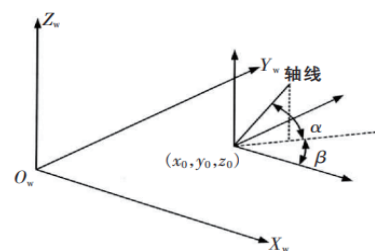


图 4 空间轴线参数示意图

交汇理论是指空间线段或空间直线, 它必定会在两个相机图像平面上与相应的照相系统光心所决定的平面相交, 其原理见图 5。

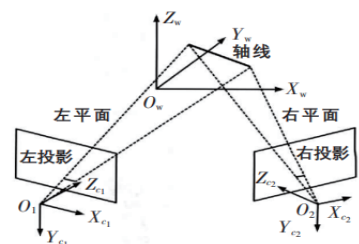


图 5 交汇原理图

左右相机光心和轴线在左右投影面上的投影共同确定的面,其表达式为:

$$a_l x + b_l y + \frac{c_l}{f_l} z = 0 \quad (30)$$

$$a_r x + b_r y + \frac{c_r}{f_r} z = 0 \quad (31)$$

左右两个平面在世界坐标系下的坐标为:

$$A_l x + B_l y + C_l z + D_l = 0 \quad (32)$$

$$A_r x + B_r y + C_r z + D_r = 0 \quad (33)$$

联立(32)和(33)可得到空间轴线方程,之后依据数学知识求三维姿态参数,其公式为:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}} \\ \beta = \arctan \frac{n}{l} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $l = \begin{vmatrix} B_l & C_l \\ B_r & C_r \end{vmatrix}$, $m = \begin{vmatrix} C_l & A_l \\ C_r & A_r \end{vmatrix}$, $n = \begin{vmatrix} A_l & C_l \\ A_r & B_r \end{vmatrix}$ 。

当 α 和 β (偏航角和俯仰角)角度值求得后就可以判断工件的三维姿态了。

3.3 实验结果

在双目视觉系统现场,工件将按照一定的空间姿态放置,并在不同地点进行多次放置试验,以检验通过双目视觉定位系统所获得的工件空间位置。表3中为偏航角和俯仰角计算结果以及误差,表4为不同位置的Z轴坐标计算结果及误差。平台与镜头的距离为900 mm,相机镜头的拍摄区域为105°。

表3 偏航角俯仰角计算及误差

序号	固定姿态 偏航角	(°) 俯仰角	计算姿态 偏航角	(°) 俯仰角	角度误差 偏航角	(°) 俯仰角
1	30	90	29.75	88.55	0	1.45
2	30	60	30.42	59.93	0.42	0.07
3	15	30	17.82	3.12	2.82	3.12
4	15	0	16.25	2.62	1.25	2.65
5	60	0	56.65	2.97	3.35	2.97
6	150	120	152.45	123.69	2.45	3.69
7	120	150	122.33	148.45	2.33	1.55
8	30	0	31.89	3.12	1.89	3.12

表4 Z轴坐标计算结果及误差

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
Z轴/mm	18.56	18.62	18.32	18.98	18.28	18.32	18.01	18.62
误差/mm	0.56	0.62	0.32	0.98	0.28	0.32	0.01	0.62

根据上述误差分析可得,位置误差在深度方向在1 mm以内,姿态误差在4°以内。Z轴的平均坐标值为:(18.56+18.62+18.32+18.98+18.28+18.32+18.01+18.65)÷8=18.09mm

最后计算的工件中心坐标为(5.93, 6.02, 9.23)。

3.4 误差原因分析

根据上述工件位姿检测的数据来看,基于双目视觉的工件位姿检测是可行的,但仍然存在一定的误差,误差来源包括3方面:(1)图像采集误差:目标工件的表面不均匀,而环境的光照条件也会变化不定;(2)相机标定误差:可能标定板本身就存在误差,导致标定的内外参数是近似结果;(3)

图像处理算法的误差:图像的采集会受到噪音和光照的影响,因此图像的预处理和边缘检测会受影响。

4 结语

本文提出了一种新型的工件位姿检测模型,该模型将双目相机标定、SURF算法、欧式空间有效结合起来,巧妙运用了其特点,最终得到目标工件的位姿信息。实验结果表明,本文模型能有效识别目标工件的位置姿态,并适用于日常工业生产中,降低人力成本,提高生产质量。

参考文献:

- [1] 李章伟,谭美坤.工业4.0背景下技工院校智能制造专业群虚拟仿真实训环境的创建和应用[J].知识窗(教师版),2023(9):63-65.
- [2] 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL].(2015-05-19)[2023-10-01].http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [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] 刘艳,李腾飞.对张正友相机标定法的改进研究[J].光学技术,2014,40(6):565-570.
- [5] 张旭,毛庆洲,时春霖,等.基于2.5D标定扇的线阵相机内参数标定方法[J].红外与激光工程,2024,53(4):180-190.
- [6] 陈美林,蒋国涛,皮志超,等.基于特征匹配的激光雷达和相机外参标定方法[J].控制与信息技术,2024(1):102-108.
- [7] 张胜国,聂文泽,饶维冬,等.基于重叠区域改进SURF的无人机影像快速匹配算法[J].无线电工程,2024,54(8):1978-1985.
- [8] 陈黎,龚安民,丁鹏,等.基于欧式空间-加权逻辑回归迁移学习的运动想象EEG信号解码[J].南京大学学报(自然科学),2022,58(2):264-274.
- [9] 邓仕超,周炉保,何新凯.改进的三频四步相移面结构光三维重建算法[J].组合机床与自动化加工技术,2024(8):13-16+21.
- [10] 黄鑫,吉月辉.六自由度无人直升机位置和偏航角跟踪控制[J].控制工程,2020,27(5):842-847.
- [11] 屈新芬,李世玲,徐林,等.两种双矢量SINS粗对准方法大俯仰角适应性研究[J].太赫兹科学与电子信息学报,2024,22(8):859-864.

【作者简介】

龚友彬(2000—),男,江西南昌人,本科,研究方向:机器视觉。

康曦(1995—),女,江西省赣州人,本科,工程师,研究方向:电力系统运行与控制、深度学习。

王军(1979—),男,辽宁本溪人,硕士,副教授,硕士生导师,研究方向:智能控制。

(收稿日期:2024-08-14)