

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205888

基于最优投影圆锥底面的罐口位姿测量方法*

周扬 王龙 来永斌

(安徽理工大学机械工程学院 淮南 232001)

摘要:为了引导并联机器人装料过程中的自动对位,提出一种高精度的罐口位姿双目测量方法。通过图像预处理提取罐口图像上下边缘亚像素点,建立空间圆双目投影椭圆锥模型,在世界坐标系下构建椭圆锥底面,通过成像椭圆轮廓像素信息与椭圆锥底面之间的映射关系,寻找最优圆锥底面所在坐标系得到目标姿态,利用姿态修正计算对应真实圆心像素所在位置,用双目三角测量法得到世界坐标系下的圆心三维坐标。针对空间圆投影二义性问题,提出利用罐口沿口消除二义性。经仿真和实验验证,算法精度高且能满足大角度姿态测量,实验测量姿态的最大误差为 1.8° ,真实圆心像素提取最大误差为 0.98 pixels。方法无需任何辅助测量和约束条件,有效提高了装料过程中的自动化效率。

关键词: 双目视觉; 3D圆; 投影椭圆锥; 二义性; 位姿测量

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Measurement method of the tanker mouth pose based on optimal projection cone bottom surface

Zhou Yang Wang Long Lai Yongbin

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to guide the automatic decimal alignment of the parallel robot in the loading process, a high precision binocular measurement method of tanker mouth pose is proposed. The sub-pixels of the upper and lower edges of the tanker mouth image are extracted by image preprocessing. The binocular projection elliptical cone model of the spatial circle is established, and the bottom surface of the elliptical cone is constructed in the world coordinate system. Through the mapping relationship between the image pixels and the elliptic cone bottom, the optimal coordinate system of the cone bottom is found to obtain the target pose. The position of the pixel corresponding to the real center is calculated by pose correction, and the three-dimensional coordinates of the center in the world coordinate system are obtained by binocular triangulation. Aiming at the ambiguity problem of spatial circle projection, an ambiguity elimination method based on the tanker mouth height is proposed. The results of the simulation and experiment show that the algorithm has high accuracy and can meet the requirements of large angle pose measurement. The maximum error of the measured pose is 1.8° , and the maximum error of the real center pixel extraction is 0.98 pixels. The method does not need any auxiliary measurement and constraint conditions, and effectively improves the automatic efficiency in the loading process.

Keywords: binocular vision; 3D circle; projected elliptic cone; ambiguity; pose measurement

0 引言

在粉罐车装料过程中,利用视觉技术确定罐口位置能大幅度提高生产效率,节省人力,减少危险事故的发生^[1]。通过对罐口的位姿测量,引导并联机器人进行自

动对位完成装料。罐口作为圆形目标在图像中成像变为椭圆,没有任何特征点,且求解结果具有二义性,给位姿测量带来困难。目前,利用视觉技术对空间圆的位姿测量主要有单目方法和双目方法。

基于单目视觉的空间圆位姿测量中,计算得到的位姿解会产生二义性,为了去除错误位姿解,可借助辅助设

约束空间圆位姿。Liu 等^[2]与陈欣等^[3]将 TOF 相机加入计算中,约束了空间圆的深度信息,有效解决了计算过程中出现的错误位姿解的问题。于长志等^[4]提出利用排列点激光拟合得到的平面法向量作为法向约束,取计算姿态值与法向约束夹角最小的为正确位姿解。李志宇等^[5]提出一种基于线结构光的测量方法,根据图像中椭圆与空间圆对应的两个曲面之间的关系,求取空间圆位姿,且无需空间圆半径约束。除了借助辅助设备条件约束外,许多学者致力于将空间几何约束加入计算中。Huang 等^[6]提出利用单幅图像中的双圆确定最佳姿态解。Li 等^[7]提出建立椭圆先验模型,三维圆投影到二维图像中拥有唯一确定椭圆方程,利用先验模型得到空间圆的姿态解。Yang 等^[8]针对飞行器精准着陆,提出利用着陆平台中的字母 H,消除解的二义性。通过自主加入几何约束,构造空间三线^[9]、圆外矩形约束^[10]、运动角度约束^[11]、同心圆约束^[12]、直线约束^[13]等,都能消除求解过程中的错误解,但在实际应用中,加入辅助设备会大大增加成本费用,增加几何辅助条件实施困难,在工程应用中一般不会采用。且在利用单目相机计算空间圆的位姿中,往往需要加入半径约束^[14-16]。

在基于双目相机的空间圆位姿测量中,李政源等^[17]利用双目相机对匹配误差较小的点进行重建,对部分遮挡的汽车轮胎轮毂进行位姿测量,得到圆心相对误差为 0.338%,法向量相误差为 3.978°,但双目特征匹配往往需要花费大量时间且匹配精度不高。Liu 等^[18]通过构造空间圆的特殊法向量计算目标法向量,分别获得左右图像中真实圆心所对应的像素,利用双目三角测量法计算三维坐标。刘传凯等^[19]提出一种基于双目逆投影变换的空间圆位姿测量方法,结合月面采样机械臂的构型特点,建立圆形目标法向约束,但此方法需要对空间圆的半径进行约束。

本文针对电厂灰罐车装料自动化,提出一种新的罐口位姿双目测量方法,在世界坐标系下构建投影圆锥底面,找到最优底面,无需计算空间圆对应法向量且无需任何辅助约束,完成对空间罐口的位姿测量,能够满足大角度姿态测量且测量精度高。通过对罐口图像的上下边缘提取,利用双目相机分别测量左右图像罐口的位姿与圆心像素,用沿口约束消除投影二义性,最终通过双目匹配点测量三维坐标,把得到位姿信息传递给并联机器人,完成自动装料。

1 基于亚像素的罐口上下沿口边缘检测

1.1 罐口图像特征描述

实际拍摄罐口如图 1 所示,图像包含以下特征:1) 相机倾斜拍摄空间罐口圆成像变为椭圆;2) 图像黑色区域

由两条椭圆弧组成,下椭圆弧来自罐口外部沿口,而上椭圆弧来自罐口内部沿口;3) 图像拍摄区域与外部背景对比度明显。基于以上特征,本文利用容易提取的黑色区域部分完成对空间罐口的位姿测量,对左右相机拍摄到的罐口图像分别做相同处理。



图 1 实际拍摄罐口图像

Fig. 1 Image of actual tanker mouth

1.2 边缘提取

粉状物料装料过程条件恶劣,受到粉尘和光线等外部因素影响,成像图片会产生噪声,通过高斯滤波减小噪声对边缘提取的干扰。黑色区域与背景对比度较大,通过阈值分割提取黑色区域,阈值分割后的图片会产生小面积连通区域干扰,通过图像取反后保留最大连通区域。

常用的边缘检测算子有 Canny 算子^[20]、Sobel 算子^[21]、Prewitt 算子等,Canny 算子提取的边缘与实际边缘最为接近。为了加快算法运行速度,先利用 Canny 算子提取罐口粗边缘,然后计算粗边缘各像素点对应亚像素,罐口边缘提取过程如图 2 所示。

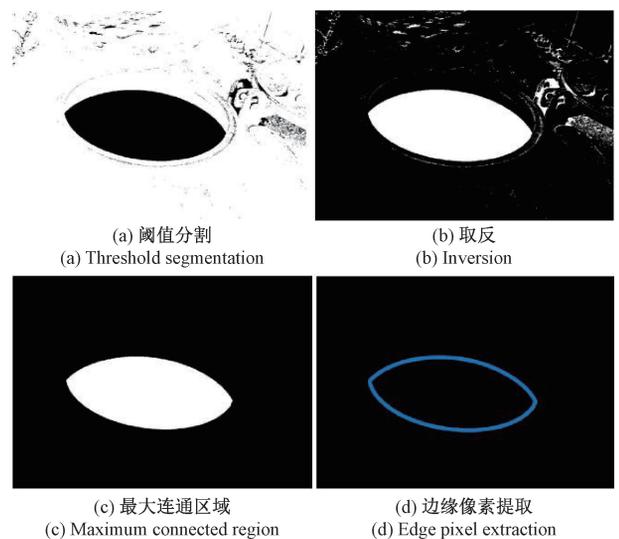


图 2 边缘提取过程

Fig. 2 Edge extraction process

1.3 基于 Zernike 矩的亚像素边缘提取

亚像素边缘提取主要有插值法、拟合法和矩方法。

为了保证精度和计算速度,选择基于 Zernike 矩的亚像素计算方法^[22],通过计算到的图像相关参数,把粗边缘利用各参数计算其对应亚像素值。图像参数计算公式如下:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}[A_{11}]}{\text{Re}[A_{11}]}\right) \quad (1)$$

$$l = A_{20}/A'_{11} \quad (2)$$

$$g = \frac{3A'_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}} \quad (3)$$

式中: φ 表示图像旋转角, l 表示原点到边缘的最小距离, g 表示边缘灰度差, A_{11} 和 A_{20} 表示对应 Zernike 矩。通过上述参数计算提取边缘亚像素值,公式如下:

$$\begin{bmatrix} i_s \\ j_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} + \frac{N}{2} l \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: (i, j) 表示粗边缘像素值, (i_s, j_s) 表示对应亚像素值, N 为模板大小,本文采用 7×7 模板大小。

1.4 基于斜率分割的上下边缘提取

对罐口的位姿测量需要分别利用上下沿口边缘,由于拍摄罐口姿态未知,难以直接区分上下沿口,提出采用了长轴斜率区分上下沿口边缘的方法。将长轴最左端和最右端点像素分为记为 (u^{left}, v^{left}) 和 (u^{right}, v^{right}) , 计算公式如下:

$$k = \frac{v^{right} - v^{left}}{u^{right} - u^{left}} \quad (5)$$

$$k_i = \frac{v_i - v^{left}}{u_i - u^{left}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \{P^{up}(u_i, v_i) \mid k_i \leq k\} \\ \{P^{down}(u_i, v_i) \mid k_i > k\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 代表长轴斜率, k_i 代表边缘上任意一点与长轴最左边点连线所成的斜率, P^{up} 用来存储上沿口像素点, P^{down} 用来存储下沿口像素点。

2 基于双目视觉的罐口位姿测量方法

2.1 计算流程

空间圆位姿测量算法具体流程可描述为:

- 1) 通过双目相机标定,分别得到左右相机内外参数,建立世界坐标系。
- 2) 图像预处理,对左右图像进行相同操作,分别得到左右相机罐口上下边缘亚像素值。
- 3) 构建双目空间投影圆锥,建立圆锥底面。
- 4) 判断圆锥底面是否为最优圆,若不是,改变圆锥底面所在坐标系,找到最优底面,得到空间姿态值。
- 5) 通过沿口高度约束或者圆心约束消除空间投影圆二义性。

6) 确定正确姿态下的左右图像上边缘对应圆心像素,利用双目相机完成三维测量。

2.2 姿态测量

把左右相机通过标定转至同一世界坐标系,建立双目空间投影圆锥模型如图 3 所示。以世界坐标系 $X_w O Y_w$ 平面构建圆锥底面,为了得到最优圆锥底面,需要旋转世界坐标系,保持世界坐标系原点不变,由于圆形绕自身法向旋转不改变其形状,只需通过旋转世界坐标系的俯仰角与偏航角来获取最优投影坐标系。

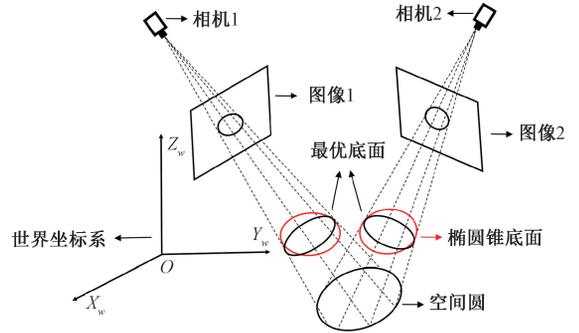


图 3 空间圆双目投影模型

Fig. 3 Spatial circular binocular projection model

在视觉测量中,图像像素坐标点映射到世界坐标点的公式为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

R 和 T 共同构成相机的外部参数,分别为相机对于世界坐标系的旋转矩阵和平移矩阵, m 为像素坐标系到世界坐标下的投影矩阵, Z_c 为相机光心到计算像素点的距离。

由式(8)可得到像素坐标与圆锥底面的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} X_{w1} \\ Y_{w1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} - m_{34}u \\ m_{24} - m_{34}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{31}u - m_{11} & m_{32}u - m_{12} \\ m_{31}v - m_{12} & m_{31}v - m_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (9)$$

将提取的上边缘轮廓像素点通过式(9)得到圆锥底面椭圆弧轮廓,利用最小二乘法拟合将椭圆弧拟合为椭圆。

平面内一般椭圆方程:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (10)$$

平面内一般圆方程:

$$x^2 + xy + y^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (11)$$

将得到的圆锥底面得到如式(10)的平面内一般椭圆方程,式中的 A 与 C 相等且 B 为 0 为标准圆,通过寻找最优圆锥底面所在的 $X_{w1}OY_{w1}$ 平面计算目标姿态。旋转世界坐标系的俯仰角和偏航角,对应旋转矩阵如下:

$$R_i(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_i(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, φ 表示俯仰角, θ 表示偏航角。世界坐标系旋转后像素与圆锥底面的投影矩阵为:

$$m_i = \begin{bmatrix} R_i(\varphi)R_i(\theta)R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据精度需要设置一定步长改变俯仰角和偏航角,本文设置精度为 0.01° 。用式(14)得到新的投影矩阵代入式(9)得到对应不同的圆锥底面,得到最优圆锥底面所对应的旋转矩阵。

$$\begin{cases} \varphi_{ci} = \arctan\left(\frac{R_{ii}(2,3)}{R_{ii}(3,3)}\right) \\ \theta_{ci} = \arcsin(-R_{ii}(1,3)) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $i = 1$ 或 2 , 分别对应计算得到位姿 1 与位姿 2; R_{ii} 表示对应圆锥底面所在坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵; φ_{ci} 和 θ_{ci} 分别表示对应位姿圆锥底面相对于世界坐标系的俯仰角与偏航角。为了提高测量精度,取左右相机测量到的平均值作为最终姿态值。

2.3 位置测量

透视投影的存在,空间圆在成像过程中圆心已经发生偏移。在 2.2 节得到了最优圆锥底面所在的坐标系,根据射影几何与透视投影相关知识,各投影切面中相同点的齐次坐标之间相差一个倍数,所以在任意投影切面下圆心值返回图像所在的投影切面均为圆心像素,利用在最优圆锥底面坐标系下的椭圆公式得到最优圆锥底面圆心对应三维坐标:

$$\begin{cases} O_{ix} = (BE - 2CD)/(4AC - B^2) \\ O_{iy} = (BD - 2AE)/(4AC - B^2) \\ O_{iz} = Z_w = 0 \end{cases} \quad (16)$$

把最优圆锥底面的圆心三维坐标返回至世界坐标系,计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{bmatrix} = \text{inv}(R_t) \begin{bmatrix} O_{ix} \\ O_{iy} \\ O_{iz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

将世界坐标系下圆心三维坐标反代入式(8),得到

图像上边缘对应真实圆心像素为:

$$u_c = \frac{m_{t11}O_x + m_{t12}O_y + m_{t13}O_z + m_{t14}}{m_{t31}O_x + m_{t32}O_y + m_{t33}O_z + m_{t34}} \quad (18)$$

$$v_c = \frac{m_{t21}O_x + m_{t22}O_y + m_{t23}O_z + m_{t24}}{m_{t31}O_x + m_{t32}O_y + m_{t33}O_z + m_{t34}}$$

对左右图像做同样处理,分别得到左右图像中上边缘对应的圆心真实像素点,利用双目三角测量法,得到圆心对应三维坐标,计算公式为:

$$\begin{bmatrix} u_c^l m_{31}^l - m_{11}^l & u_c^l m_{32}^l - m_{12}^l & u_c^l m_{33}^l - m_{13}^l \\ v_c^l m_{31}^l - m_{21}^l & v_c^l m_{32}^l - m_{22}^l & v_c^l m_{33}^l - m_{23}^l \\ u_c^r m_{31}^r - m_{11}^r & u_c^r m_{32}^r - m_{12}^r & u_c^r m_{33}^r - m_{13}^r \\ v_c^r m_{31}^r - m_{21}^r & v_c^r m_{32}^r - m_{22}^r & v_c^r m_{33}^r - m_{23}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^l - u_c^l m_{34}^l \\ m_{24}^l - v_c^l m_{34}^l \\ m_{14}^r - u_c^r m_{34}^r \\ m_{24}^r - v_c^r m_{34}^r \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, (u_c^l, v_c^l) 表示左图上边缘对应的圆心真实像素点, (u_c^r, v_c^r) 表示右图上边缘对应的圆心真实像素点, m^l 和 m^r 分别为左右图像到世界坐标系的投影矩阵。

2.4 基于罐口沿口的投影二义性消除方法

由于圆投影二义性的存在,在位姿计算中将会得到两个位姿解,需要去除错误解。在图像中提取的上下边缘椭圆弧来自空间中半径相同的平行平面,上下边缘对应圆心的三维坐标仅在深度方向相差一个沿口高度值,罐口的空间特征描述如图 4 所示。

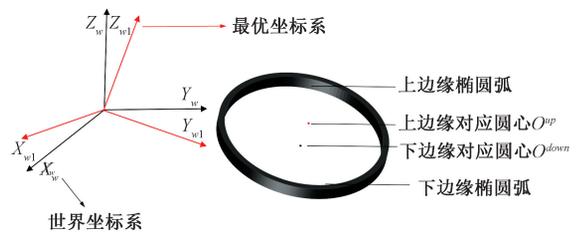


图 4 罐口空间特征描述

Fig. 4 Tanker mouth spatial characteristics description

错误位姿下的投影平面齐次坐标信息与正确位姿平面相差比例不同,利用沿口高度或者圆心约束去除错误解。通过沿口高度得到约束方程为:

$$\min[(O_{tz}^{up} - O_{tz}^{down} - h)_i] \quad (20)$$

式中: h 为沿口高度。通过圆心得到位姿约束方程为:

$$\min[(O_{ix}^{up} - O_{ix}^{down})_i \& (O_{iy}^{up} - O_{iy}^{down})_i] \quad (21)$$

其中, $i = 1$ 或 2 , 分别表示位姿 1 与位姿 2 对应三维坐标。在提前知道沿口高度的情况下,利用沿口高度约束可去除错误解,若沿口高度未知,可利用圆心约束去除

错误解,圆心约束可在任意投影切面适用,更具有使用价值。

3 仿真及实验

3.1 算法仿真验证

利用 MATLAB 平台进行仿真实验,生成双目视觉模型和空间罐口模型,模拟相机分辨率为 $3\ 000 \times 3\ 000$,成像中心位于 $(1\ 500, 1\ 500)$,左右相机内参为:

$$M = \begin{bmatrix} 4\ 000 & 0 & 1\ 500 \\ 0 & 4\ 000 & 1\ 500 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

左右相机外参为:

$$R_1 = R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_1 = \begin{bmatrix} -25 \\ 0 \\ 1\ 000 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} 25 \\ 0 \\ 1\ 000 \end{bmatrix}$$

罐口模型中心位于世界坐标 $(0, 0, 0)$ 点,半径为 225 mm 。改变罐口模型的姿态值,用圆心约束消除投影二义性平面,利用文中算法得到姿态后计算位置信息,不断改变姿态验证文中算法。在实际成像过程中由于环境、相机信号干扰等影响,生成的图像会产生噪声,为体现真实性,对成像图像加入方差为 0.01 的高斯噪声。在世界坐标中,目标俯仰角或偏航角相对于相机成 90° (或 90° 的倍数) 时,空间投影圆锥消失,此时文中算法无意义,所以仿真 80° 之内的角度变化观察姿态测量误差值。首先,固定偏航角,观察空间罐口模型旋转俯仰角对测量的影响;其次,固定俯仰角,观察空间罐口模型旋转偏航角对测量的影响;最后,同时旋转俯仰角与偏航角,在俯仰角与偏航角同时旋转超过 80° 时,沿口部分将会遮挡边缘部分,边缘特征消失,仿真时只研究至 70° ,右相机中部分仿真图片如图 5 所示。观察仿真状态下姿态的测量误差,姿态仿真结果如图 6 所示。受罐口遮挡与投影的影响,获得的边缘像素信息越来越少,影响椭圆曲线的拟合,产生的误差不断增大,在只旋转一个角度的情况下,角度大于 70° 时,误差开始增大;在两个角度同时旋转的情况下,角度大于 60° 时,误差开始增大。

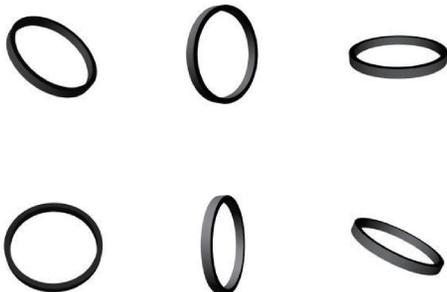


图 5 右相机中部分仿真图像

Fig. 5 Part of the simulation image in the right camera

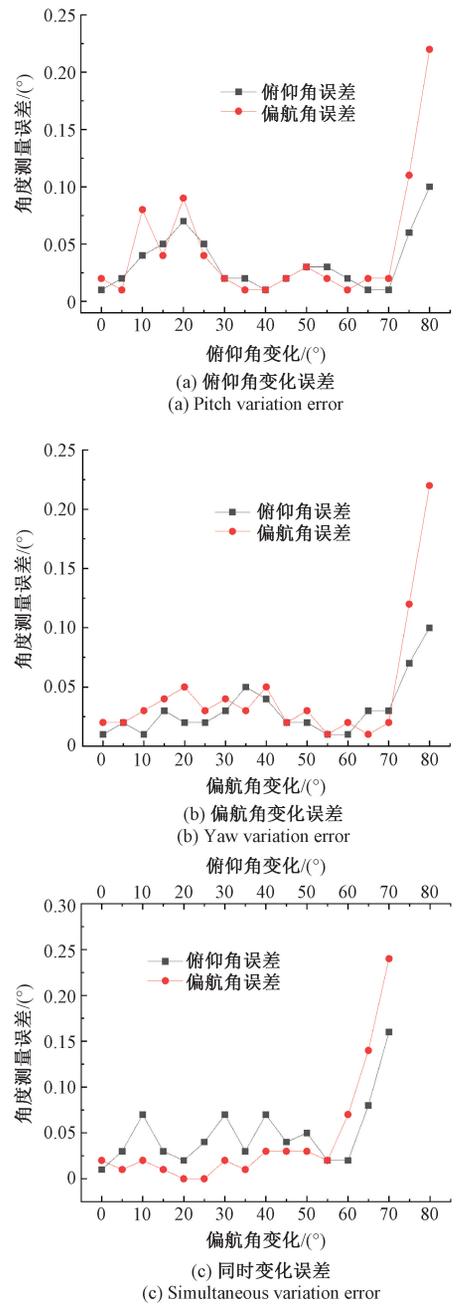


图 6 不同姿态角度下姿态测量误差

Fig. 6 Pose measurement error under different pose angles

用姿态值修正得到对应实际圆心像素并计算三维坐标,观察位置误差变化,位置仿真结果如图 7 所示。由于位姿测量误差、边缘点提取误差等干扰,且一个方向若有误差产生,在计算过程中将会影响其他方向,产生误差干扰。通过位置测量发现,姿态变化对 z 轴与 y 轴测量的影响较大,且姿态角度越大,误差越大,但始终不超过 1 mm 。

从仿真结果可以看出,本文算法适用于圆形目标大

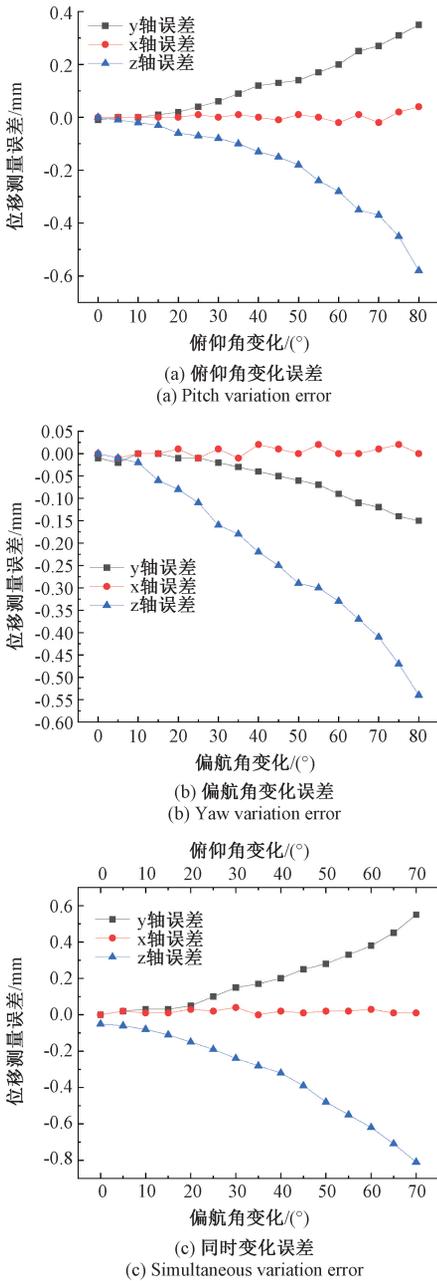


图7 不同姿态角度下位移测量误差

Fig. 7 Position measurement error under different pose angles

角度的位姿测量,在 $-70^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间测量精确,仿真姿态误差在 0.25° 以内,位移误差在 1 mm 以内,说明本文推导双目视觉测量空间罐口算法正确且精度高,完全满足罐口位姿测量的需求。

3.2 罐口测量实验

搭建实验平台如图8所示,用于验证本文算法。制作标准罐口模型,半径为 225 mm ,视觉检测装置采用两个MV-CE050-30GM海康威视500万像素工业相机,镜头为海康工业镜头 $1/1.8''4.5\text{ mm}$ 。相机倾斜安装,相机与

罐口距离约为 1 m ,成像视野约为 $1\text{ 000 mm} \times 800\text{ mm}$,为了增强图片拍摄质量,加入光源增强图片对比度,使边缘提取精度更高。



图8 实验平台搭建

Fig. 8 The experiment platform

本文采用张友正标定法标定相机,利用标定得到的外参作为理论值,把测量得到的图像三维坐标转为图像像素值与罐口实际圆心像素理论值比较,并将本文方法与文献[10]测量方法进行对比。采用标定板位姿如图9所示,实验罐口图像如图10所示,标定板位姿1同实验罐口图像水平,标定板1所在世界坐标系即罐口图像最优投影坐标系,其他标定板位姿的姿态值与位姿1的姿态值之差为它们的姿态基准值,误差则为测量姿态值与基准值的差值,标定板姿态参数如表1所示。

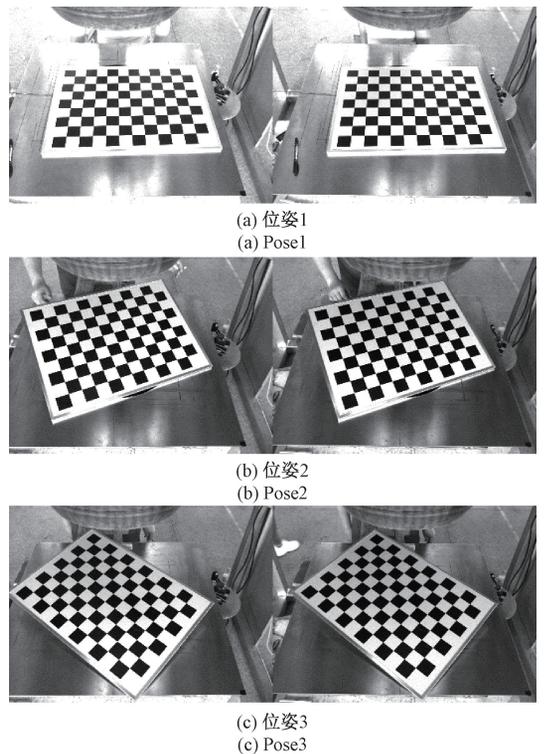


图9 标定板位姿

Fig. 9 Calibrate plate pose

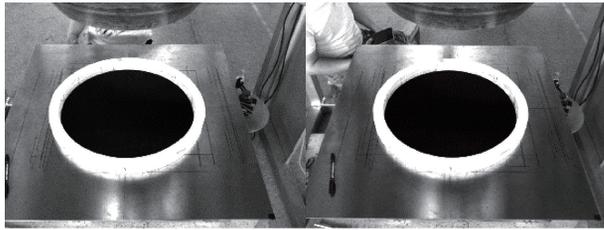


图 10 实验罐口图

Fig. 10 Experimental tanker mouth image

表 1 标定板姿态值

Table 1 Calibration plate pose value

标定板 位姿	左相机中姿态/(°)		右相机中姿态/(°)	
	φ	θ	φ	θ
1	42.49	1.72	42.67	1.70
2	32.11	13.42	32.12	13.25
3	-4.48	-19.71	-4.07	-20.36

对实验罐口图像在 3 个标定板位姿下进行姿态测量实验,实验结果如表 2 所示。

表 2 位姿测量实验结果

Table 2 Experimental results of pose measurement

标定板 位姿	左图像姿态/(°)		右图像姿态/(°)	
	φ	θ	φ	θ
1	0.33	0.37	0.44	0.41
2	11.65	13.05	11.93	13.34
3	46.78	-22.70	46.92	-22.81
文献[10]方法	41.22	3.78	41.66	3.64

左图像上边缘对应图像真实圆心像素为(1 060.81, 899.67),右图像上边缘对应图像真实圆心像素为(1 231.56, 921.18),位置测量实验结果如表 3 所示。位姿测量结果的误差值如表 4 所示。

表 3 位置测量实验结果

Table 3 Experimental results of position measurement

标定板位姿 /方法	左图像圆心像素/pixel		右图像圆心像素/pixel	
	u	v	u	v
1	1 059.83	898.85	1 230.81	920.57
2	1 059.83	898.82	1 230.83	920.59
3	1 059.88	898.79	1 230.89	920.68
文献[10]方法	1 059.71	898.54	1 230.88	920.62

表 4 位姿测量误差

Table 4 Pose measurement error

方法	姿态最大误差/(°)		圆心像素最大误差/pixel	
	φ	θ	u	v
本文方法	1.38	1.79	0.98	0.88
文献[10]方法	1.27	2.06	1.10	1.13

相对于仿真实验,由于相机标定误差、加工误差、图像处理误差等影响,实际实验产生的误差较大。本文算法姿态角度测量误差在 1.8°以内,真实圆心像素计算误差在 1 pixel 以内,通过计算到世界坐标系最大位置误差为 0.5 mm 以内。文献[10]方法姿态角度最大误差为 2.06°,圆心像素最大误差为 1.13 pixels,但文献[10]方法在对空间位置测量时,必须对检测目标半径进行约束,不适用于罐口测量的工业现场。并联机器人与罐口对位处采用柔性结构,在对位时会自动调整姿态与罐口姿态一致,根据各种不同口径的罐车罐口,并联机器人允许三维方向最大偏差为 10 mm 以内,姿态测量的主要目的是通过姿态值修正圆心偏差值。通过多组实验,利用本文算法计算得到误差值稳定,满足实际测量要求。若直接提取成像椭圆圆心作为特征圆心,倾斜拍摄下圆心像素误差将达到 20 pixels 以上。

在模拟真实罐口的基础上,针对工程应用,开展电厂灰库罐车罐口测量实验,分别挑选了不同时段的 4 m 罐车(低沿口)与 3.85 m 罐车(高沿口)进行实验,如图 11 所示,测量结果如表 5 所示。

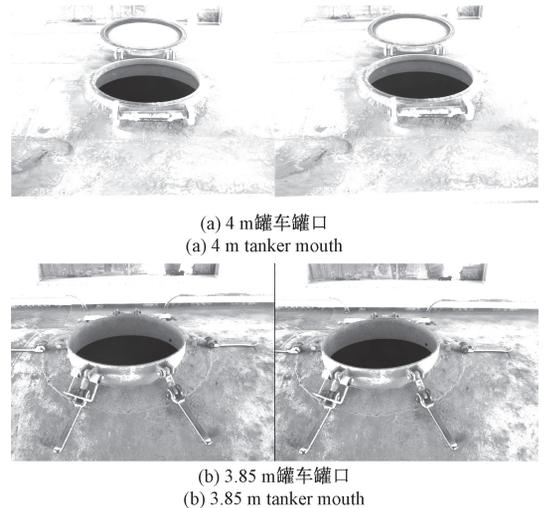


图 11 真实罐车罐口图

Fig. 11 Real tanker mouth image

表 5 真实罐口测量结果

Table 5 Results of real tanker mouth measurement

罐车型号	圆心误差/mm	φ 误差/(°)	θ 误差/(°)
4 m 罐车	1.35	0.85	1.33
3.85 m 罐车	1.47	0.74	1.25

实验结果表明,现场罐口圆心位置测量精度不如实验室理想罐口,最主要因素为现场罐口附近覆灰较多导致边缘处产生额外的噪点,从而影响椭圆的拟合,但其精度能够满足实际工程应用。

4 结 论

本文提出的罐口位姿测量方法,无需任何辅助条件和半径约束,且无需计算空间圆法向量。创新性提出在世界坐标系下构建空间投影圆锥底面,利用沿口消除空间圆投影二义性,为空间圆特征物位姿测量提供了新的思路和方法。仿真及实验结果表明,本文位姿测量算法具有较高精度,能够测量姿态范围值大,能满足 $-70^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间的空间罐口姿态测量。方法成功应用于电厂灰罐车位姿测量中,配合并联机器人实现智能化装料。提出的测量方法还可用于许多工业应用场景,如航空航天、管道测量、机器人装配等。

参考文献

- [1] 刘士兴,周启航,马登科,等. 基于单目视觉的电梯曳引轮磨损检测系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 55-61.
LIU SH X, ZHOU Q H, MA D K, et al. Development of elevator traction sheave wear detection system based on monocular vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 55-61.
- [2] LIU Y, ZHANG S J, ZHAO X T. Relative pose determination of uncooperative spacecraft based on circle feature[J]. Sensors, 2022, 21(24): 8495.
- [3] 陈欣,高隽,张旭东,等. 融合距离图像和彩色图像的圆位姿测量方法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(6): 190-194.
CHEN X, GAO J, ZHANG X D, et al. Circle pose measurement based on fusion of distance image and colour image[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(6): 190-194.
- [4] 于长志,张连新,孙鹏飞,等. 基于法向约束的背靠视觉端面对接定位方法[J]. 计算机工程, 2022, 48(9): 213-222.
YU CH ZH, ZHANG L X, SUN P F, et al. End-face butt-joint positioning method with back against vision based on normal constraint[J]. Computer Engineering, 2022, 48(9): 213-222.
- [5] 李志宇,林嘉睿,孙岩标,等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 105-114.
LI ZH Y, LIN J R, SUN Y B, et al. A method for measuring circular pose base on line structured light sensor[J]. Acta Optic Sinica, 2020, 40(15): 105-114.
- [6] HUANG B, SUN Y R, ZHU Y F, et al. Vision pose estimation from planar dual circles in a single image [J]. Optik, 2016, 127(10): 4275-4280.
- [7] LI C, CHEN D R, GONG J L, et al. Elliptic shape prior for object 2D-3D pose estimation using circular feature[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2020, 2020(1): 1-19.
- [8] YANG S W, SCHERER S A, ZELL A. An onboard monocular vision system for autonomous takeoff, hovering and landing of a micro aerial vehicle [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 69(1-4): 499-155.
- [9] 张李俊,黄学祥,冯渭春,等. 圆位姿二义性的三线构型法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 120-128.
ZHANG L J, HUANG X X, FENG W CH, et al. Solution of duality in circular feature with three line configuration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 120-128.
- [10] 陈至坤,胡连军,王一,等. 单圆位姿识别二义性的矩形约束消除[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 351-356.
CHEN ZH K, HU L J, WANG Y, et al. Solution of duality in pose estimation of a single circle using rectangle constrain [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 351-356.
- [11] 张李俊,黄学祥,冯渭春,等. 运动重建约束角的圆位姿二义性消除方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 195-204.
ZHANG L J, HUANG X X, FENG W CH, et al. Solution of duality in pose estimation of a single circle utilizing constraint angles motion reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 195-204.
- [12] FU M L, LENG Y Q. A new solution of ambiguity in pose estimation of circle feature using a concentric circle constraint [C]. 2016 Sixth International Conference on Information Science and Technology (ICIST). IEEE, 2016: 470-475.
- [13] MENG C, LI Z X, SUN H C, et al. Satellite pose estimation via single perspective circle and line [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 3084-3095.
- [14] 王斌,吴丹,盖宇航. 面向机器人精密装配的高精度圆片位姿视觉检测[J/OL]. 机械工程学报 [2022-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220805.1736.058.html>.
WANG B, WU D, GAI Y H. High-precision wafer pose visual detection for robot precise assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering [2022-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220805.1736.058.html>.
- [15] MEI J P, ZHANG D A, DING Y B. Monocular vision for pose estimation in space based on cone projection [J]. Optical Engineering, 2017, 56(10): 103108.

- [16] 姚海滨,翁金平,程筱胜,等. 单张平面圆图像的空间圆心快速提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(23):189-193.
YAO H B, WEN J P, CHENG X SH, et al. Fast extraction method of spatial center based on single plane circular image [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(23):189-193.
- [17] 李政源,马昕,李贻斌. 基于最优投影平面的立体视觉空间圆位姿高精度测量方法[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(1):58-66.
LI ZH Y, MA X, LI Y B. An optimal projection plane-based spatial circle measurement method using stereo vision system [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(1):58-66.
- [18] LIU Z, LIU X, DUAN G, et al. Precise pose and radius estimation of circular target based on binocular vision[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 30(2):025006.
- [19] 刘传凯,李东升,王俊魁,等. 基于双目椭圆特征的月面采样机械臂末端位姿精确测量方法[J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(12):1453-1464.
LIU CH K, LI D SH, WANG J K, et al. Precise pose measurement of lunar sampling manipulator based on binocular ellipse feature [J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51(12):1453-1464.
- [20] 阙禄松,王明泉,张俊生,等. 基于 Canny 算子和形态学滤波的焊缝图像背景去除技术[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1):10-14.
QUE L S, WANG M Q, ZHANG J SH, et al. Background removal technology of weld image based on canny operator and mathematical morphology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(1):10-14.
- [21] 伏金浩,王剑平,闻路红,等. 基于改进阈值与边缘梯

度的亮场干细胞图像分割方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20):109-114.

FU J H, WANG J P, WEN L H, et al. Bright-field stem cell image segmentation based on improved threshold and edge gradient [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20):109-114.

- [22] 刘明佩,朱维斌,叶树亮. 基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8):259-267.

LIU M P, ZHU W B, YE SH L. Sub-pixel edge detection based on improved Zernike moment in the small modulus gear image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8):259-267.

作者简介



周扬, 2021 年于中国计量大学现代科技学院获学士学位, 现为安徽理工大学硕士研究生, 主要研究方向为视觉测量与机器学习。

E-mail: zy542927@163.com

Zhou Yang received his B. Sc. degree from China Jiliang University College of Modern Science and Technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include vision measurement and machine learning.



王龙(通信作者), 2013 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为安徽理工大学副教授, 主要研究方向为流体机械与图像处理。

E-mail: nuaawl@126.com

Wang Long (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Now he is an associate professor at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include fluid machinery and image processing.