

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.015

基于变焦单目视觉的大型筒框对接同轴度调测

陆蕴仪¹, 黄翔¹, 李泷杲¹, 李根², 侯国义¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学苏州研究院, 江苏 苏州 215163)

摘要:为了提高航空航天生产装配的可靠性,设计一种基于变焦单目视觉的大型筒框对接的同轴度测量方法,通过识别框体和筒体上的圆形特征,建立同轴度基准轴线,计算筒体相对框体的同轴度。基于改进 Canny 算法设计一种复杂环境下框体和筒体圆形特征边缘提取方法;运用梯度下降法计算基准圆心校准基准轴线;根据筒段件调姿需求,运用坐标系转换方法求解出筒体垂直径向及水平径向上的同轴度,将同轴度转换为调姿量输出。开展筒段调姿实验对上述方法有效性及精度进行验证,结果表明:该方法对于直径达到 2 m 的筒框测量精度可达 1.50 mm。

关键词:航空航天;装配;同轴度;单目视觉;圆位姿计算

中图分类号:V263.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0075-04

Coaxiality Measurement and Pose Adjustment of Large Barrel Frame Docking Based on Zoom Monocular Vision

LU Yunyi¹, HUANG Xiang¹, LI Longgao¹, LI Gen², HOU Guoyi¹(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Suzhou Research Institute of NUAU, Suzhou 215163, China)

Abstract:To improve the reliability of aerospace production and assembly, a coaxiality measurement method based on zoom monocular vision for large barrel frame docking was designed. The coaxiality reference axis was established by identifying the circular features of the frame and the cylinder, and the coaxiality of the cylinder relative to the frame was calculated. Based on improved Canny algorithm, a feature edge extraction method for box and cylinder in complex environment was designed. Gradient descent method was used to calculate the center of reference and calibrate the axis of reference. According to the pose adjustment requirements of the cylinder segment, the coaxiality in vertical and horizontal radial directions of the cylinder was solved by using the coordinate system transformation method, and the coaxiality was converted into the pose adjustment output. A cylinder pose adjustment experiment was conducted to verify the effectiveness and accuracy of the above method. The results show that the measuring accuracy of the designed method is as high as 1.50 mm for a cylinder frame with a diameter of 2 m.

Keywords: aerospace; assembly; coaxiality; monocular vision; circular orientation calculation

0 引言

在航空航天产品生产过程中,会将产品装填入大型筒段件存放,装填时需将筒段件与装填导向装置的框体对接。因此,以大型框体和筒体作为待测特征的精准进行对接是保证装填质量最重要的因素。

国内现有筒框对接以操作人员手工作业为主,考虑到航空航天产品质量和尺寸较大,径向尺寸约 2 m,轴向尺寸约 20 m,装配精度要求高,同轴度精度要求不大于 4.5 mm,以手工作业为主的装填方式效率低,装填误差大,需要操作人员依据过往经验反复试装。基于机器视觉的测量方法中,双目立体视觉的测量方法会随着测量距离的

增加,测量精度降低^[1],不适用于大型筒段件的同轴度测量。而定焦单目视觉的测量方法应用于大型筒框对接的场合,无法在一个焦段获得清晰的框体与筒体的特征;若采用两组不同焦段的单目定焦视觉系统,两台相机焦平面相距较远且无公共视场。李勤文等^[2]提出用经纬仪测量移动靶的标方法进行标定;LIU Z 等^[3]提出固定两个平面标定板的相对位置组成复合目标进行标定。这些方法均不适用于筒体前后端面 20 m 的视差。而单目变焦视觉可以通过一台相机分两个焦段拍摄图像,不需要标定相机间相对位置。

针对上述问题,本文利用变焦相机分焦段采集图像,提出基于改进 Canny 算法^[4]的复杂环境圆形特征提取方法,识别筒框特征圆、计算特征圆

第一作者简介:陆蕴仪(1998—),女,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为飞机装配,layaya330@163.com。

空间位姿,采用最小二乘法 and 梯度下降法拟合、校准测量基准轴线,结合坐标系转换的方法将同轴度沿调姿方向分解,提出一种基于变焦单目视觉的大型筒框对接同轴度测量与调姿的方法,提高航空航天产品生产装配的可靠性。

1 大型筒框对接同轴度测量方法

本文设计的同轴度测量方法基于单目变焦视觉,核心硬件为高分辨率相机和变焦镜头组成的视觉系统。测量对象为框体和筒体,并结合调姿机构的调姿原理计算同轴度。

2 筒框端面圆特征识别与位姿计算

在测量同轴度时,需要提取框体和筒体端面的圆形特征,而圆形特征在图像上一般投影为一个椭圆,需要获取圆形特征的边缘进行椭圆拟合,并还原圆形特征的空间信息。由于用于航天器装配的筒体尺寸大,其圆形特征边缘不连续、周围干扰线段多、特征提取困难。本文提出一种复杂环境下非合作目标的圆形特征提取方法,先提取成像平面特征边缘并拟合椭圆,再根据椭圆的二维尺寸和空间圆的实际尺寸解算空间圆位姿。

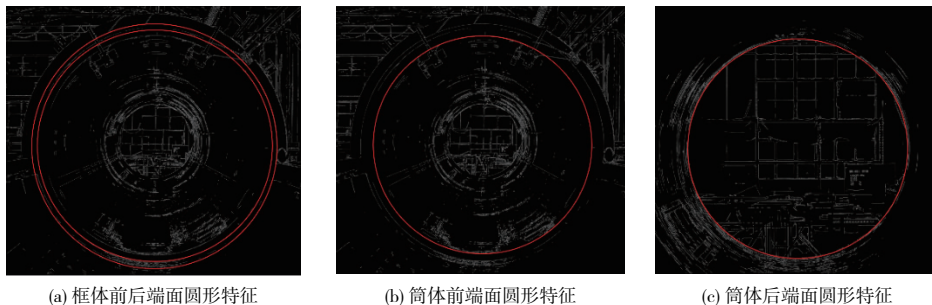


图1 各端面圆形特征拟合结果

2.2 空间圆位姿计算

在测量过程中,相机的两段工作距离约为6 m和26 m,视场约为 $2.2\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 。面对这样大的视场与工作距离,根据ZHANG Z^[8]提出的标定方法需要一块尺寸至少为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的标定板,且要使标定板俯仰不发生变形,难度是极大的。又因为本文圆形特征识别方法要求框体与筒体端面圆到相机的轴向距离相对固定,所以可以基于成像平面的椭圆尺寸求解空间圆的位姿,故无需相机内参标定,只需进行相机畸变矫正。用文献[9]所提出方法进行大视场畸变矫正。

假设端面圆实际直径为 D ,像素坐标系下椭圆

2.1 圆形特征边缘提取

本文用改进Canny算法提取图像边缘,解决了传统Canny算法需要凭经验设定阈值^[5]的问题。改进Canny算法首先用二维高斯函数的一阶导数对图像进行平滑,再用Sobel算子计算图像梯度和方向。根据梯度方向进行非极大值抑制,保留局部梯度最大的点,以得到细化的边缘。最后运用Otsu算法确定阈值^[6],采用滞后阈值法(hysteresis thresholding)判定边缘像素。

Canny算法提取的边缘像素不是单一像素的边缘,线段凸性的计算困难。所以用改进算法细化边缘^[7],并得到单一像素的边缘像素集 E 。根据像素集中连续线段的凸性,筛选出可能属于框体以及筒体端面圆边缘特征的弧段,得到像素集 E_{ef} 。将像素集 E_{ef} 中的弧段分组,并用最小二乘法拟合椭圆,然后建立筛选机制得到框体以及筒体端面圆。

为了保证端面圆的像素尺寸相对稳定,采集图像时需将筒体轴向移动到固定位置,得到4个端面椭圆大致的像素尺寸后,再根据干扰弧段位置及密集程度选择合适的筛选阈值进行粗筛选。拟合效果如图1所示。

长轴长度为 d ,圆心像素坐标为 (x_p, y_p) ,认为相机光心在像素坐标系的投影为图像中心像素坐标为 (x_u, y_u) ,端面圆到相机光心的距离为 z 。则空间圆心位空间位置为 $\left(\frac{D}{d}(x_p - x_u), \frac{D}{d}(y_p - y_u), z\right)$ 。

根据上述空间圆位姿计算理论,所求得空间圆位姿均在相机坐标系下。虽然筒体前后端面圆分为两个焦段采集图像,但是不需要转换两个焦段像平面的位置关系。

3 同轴度计算

求得框体和筒体的前端面圆和后端面圆空间位置后,就可以计算同轴度。计算同轴度需要先

拟合同轴度基准轴线,即框体轴线;再分别计算筒体前、后端面圆心到轴线距离;最后根据调姿原理,将距离分解为水平径向和竖直径向,并基于调姿误差模型误差补偿,输出前后端面调姿量。

3.1 同轴度基准轴线计算

假设轴线的空间直线方程为

$$\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z}{1} \quad (1)$$

求得框体前端面圆心为 (x_1, y_1, z_1) ,后端面圆心为 (x_2, y_2, z_2) ,带入方程得

$$\begin{bmatrix} m & x_0 \\ n & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

但是框体的轴向尺寸仅为筒体轴向尺寸的1/100左右,仅通过框体前后端面圆心坐标拟合轴线,对框体两端面圆的拟合精度约为0.05个像素,远小于亚像素级^[10],难以拟合准确的轴线。轴线拟合精度对后续同轴度计算的影响很大,因此需要校准轴线。本文多次采样装配位置下筒体前后端面圆心,求取到这些圆心位置距离之和最小的点位置作为参考基准校准轴线。

因为前端面圆圆心和后端面圆圆心的 z 是给定的,因此可以转换为二维平面计算基准圆心。 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_{10}$ 即为取得10个圆心,它们坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_{10}, y_{10})$,求解到这10点距离之和最小的点坐标。

本文用梯度下降法求解函数。梯度下降法搜索,步长定为 $\frac{1}{3}$ 个像素映射的实际距离 $\frac{D}{3d}$;方向为

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & -\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ -\cos\beta\sin\gamma & -\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma \\ \sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ z-z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

4 实验及数据

为验证本文提出的同轴度测量方法是否满足装配精度要求,运用筒框对接平台,进行同轴度测量精度验证实验。验证平台如图2所示,由视觉系统、直径2m及长20m的筒体、直径2m及长200mm的框体和调姿机构组成,调姿机构可以水平径向和竖直径向调姿。将相机置于轴向距框体6m的位置,按照本文提出的轴线校准方法得到基准轴线。将筒体放置在调姿工装上,开始进行

导数的逆方向,导数方向为

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{10} \frac{x-x_i}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \\ \sum_{i=1}^{10} \frac{y-y_i}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

求解函数后,记筒体前端面圆心基准为 (x_3, y_3, z_3) ,记筒体后端面圆心基准为 (x_4, y_4, z_4) ,解得

$$\begin{bmatrix} m & x_0 \\ n & y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 x_i z_i & \sum_{i=1}^4 x_i \\ \sum_{i=1}^4 y_i z_i & \sum_{i=1}^4 y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 z_i^2 & \sum_{i=1}^4 z_i \\ \sum_{i=1}^4 z_i & n \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

3.2 同轴度计算

得到筒体前后端面圆心位置和同轴度基准轴线后,求解同轴度。根据筒体调姿机构调姿原理,筒体前后端面同轴度不能单一计算圆心到直线距离,需要分解成水平径向和竖直径向的距离。

设筒体一个端面的圆心到基准轴线的水平径向距离为 x_m 、竖直径向距离为 y_m 、到轴线端点轴向距离为 z_m 。轴线端点即为基准轴与框体后端面的交点。根据轴线的空间位置和端面圆的空间位置求解 x_m, y_m 和 z_m 。

求解在框体坐标系下筒体端面圆圆心坐标,即 $[x_m \ y_m \ z_m]^T$ 。设筒体该端面圆圆心在相机坐标系下坐标为 $[x \ y \ z]^T$,则

测量实验。

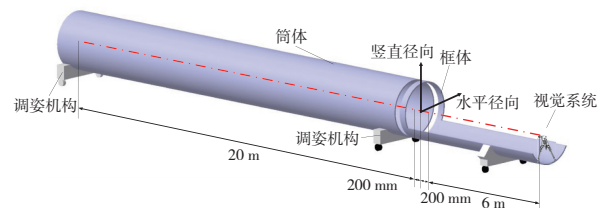


图2 验证实验平台

首先手动调姿完成筒体与框体的对接,再将

筒体沿轴向移动至筒体前端面和框体后端面相距 200 mm 处。该位置记为 0 位,即筒体前端面、后端面圆心距基准轴线的水平径向距离和竖直径向距离理论上均为 0 mm。随后调整调姿机构,将筒体前后端面调整至不同位置。每次调姿后记录调姿机构调姿量,再运用视觉系统根据本文提出测量方法进行测量,记录测量值。最后将测量值与调姿量比对,得到单向误差(单向测量值与单向调姿量之差)。实验结果如表 1—表 3 所示。

表 1 筒体前端面测量结果 单位:mm

方向	调姿量	测量	误差
水平径向	-15	-16.898 7	-1.898 7
	-10	-11.610 2	-1.610 2
	-5	-5.663 4	-0.663 4
	0	0.425 0	0.425 0
	5	5.778 1	0.778 1
	10	10.053 9	0.053 9
竖直径向	-15	-14.187 9	0.812 1
	-10	-9.414 7	0.585 3
	-5	-4.823 3	0.176 7
	0	0.827 1	0.827 1
	5	5.397 2	0.397 2
	10	9.700 5	-0.299 5
15	15.397 3	0.397 3	

表 2 筒体后端面测量结果 单位:mm

方向	调姿量	测量	误差
水平径向	-40	-38.875 4	1.124 6
	-20	-21.310 9	-1.310 9
	-10	-10.714 5	-0.714 5
	0	-1.434 3	-1.434 3
	10	8.886 1	-1.113 9
	20	20.675 2	0.675 2
竖直径向	40	42.099 8	2.099 8
	-15	-12.819 1	2.180 9
	-10	-10.176 6	-0.176 6
	-5	-5.307 0	-0.307 0
	0	-0.408 3	-0.408 3
	5	5.225 6	0.225 4
10	8.937 7	-1.062 3	
15	13.389 2	-1.610 8	

表 3 实验误差分析 单位:mm

被测端面	误差平均值	误差最大值	误差最小值	标准误差
前端面	1.03	1.90	0.05	0.87
后端面	0.71	2.18	0.18	1.21

根据测量结果得:前端面水平径向误差绝对值的平均值为 1.21 mm,前端面竖直径向误差绝对值的平均值为 0.85 mm,前端面整体平均误差为 1.03 mm,标准误差为 0.87 mm;后端面水平径向误差绝对值的平均值为 0.91 mm,后端面竖直径向误差绝对值的平均值为 0.50 mm,后端面整体平均误差为 0.71 mm,标准误差为 1.21 mm。已知调姿机构精度为 0.25 mm,测量值相较调姿量的最大平均误差为 1.21 mm,即本文测量精度可达 1.50 mm。

5 结语

本文针对大型筒框对接中同轴度检测困难的问题提出了基于变焦单目视觉的同轴度测量方法。基于 Canny 算法提出复杂环境下非合作目标圆形特征提取方法,解决了筒框圆形特征难以提取的问题;基于成像平面椭圆二维尺寸计算空间圆位姿,规避了大视场、远距离相机难以高精度标定内参的问题;通过多次采样基准校准同轴度计算轴线,解决了框体轴线拟合不准确的问题;结合坐标系转换方法将同轴度沿竖直径向和水平径向分解,转化为调姿量。通过筒框对接实验验证本文提出方法实际测量精度为 1.50 mm,且适用于复杂环境,满足大型筒框对接的要求。

参考文献:

- [1] 徐杰,陈一民,史志龙. 双目视觉变焦测距技术[J]. 上海大学学报(自然科学版),2009,15(2):169-174.
- [2] 李勤文,倪首军,王志乾,等. 非公共视场双目相机位姿标定[J]. 光学精密工程,2020,28(12):2737-2744.
- [3] LIU Z,ZHANG G J,WEI Z Z,et al. A global calibration method for multiple vision sensors based on multiple targets[J]. Measurement Science and Technology,2011,22(12):125102.
- [4] 唐路路,张启灿,胡松. 一种自适应阈值的 Canny 边缘检测算法[J]. 光电工程,2011,38(5):127-132.
- [5] 林磊,臧铁钢. 基于机器视觉的树脂镜片表面疵病边缘检测[J]. 机械制造与自动化,2021,50(2):230-232,240.
- [6] FANG M, YUE G X, YU Q C. The study on an application of Otsu method in Canny operator [C]// Proceedings of the International Symposium on Information Proces, [S.I.;s.n.], 2009: 109-112.
- [7] 牟少敏,杜海洋,苏平,等. 一种改进的快速并行细化算法[J]. 微电子学与计算机,2013,30(1):53-55,60.
- [8] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [9] 李重阳,董欣,岳丽清,等. 航天大视场遥感相机畸变测试方法[J]. 红外与激光工程,2018,47(11):217-221.
- [10] 李红俊,韩冀皖. 数字图像处理技术及其应用[J]. 计算机测量与控制,2002,10(9):620-622.

收稿日期:2022-10-11