

引文格式: 齐凯, 李泷杲, 黄翔, 等. 基于机器视觉的直升机传动系统回转轴线标定方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(22): 110–117.

QI Kai, LI Shuanggao, HUANG Xiang, et al. Calibration method for rotary axis of helicopter transmission system based on machine vision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(22): 110–117.

基于机器视觉的直升机传动系统回转轴线标定方法*

齐凯¹, 李泷杲¹, 黄翔¹, 李根², 候国义¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学苏州研究院, 苏州 215000)

[摘要] 直升机传动系统中存在多个回转轴线, 其空间位姿信息是后续装配的重要依据, 传统的测量方法精度低, 速度慢, 难以实现数字化。针对上述问题, 提出一种基于机器视觉的直升机传动系统回转轴线标定方法。首先通过视觉靶标建立绝对坐标系, 其次基于 Radon 变换的棋盘格角点检测技术进行亚像素角点检测, 然后通过 Levenberg–Marquadt 算法进行单目相机的绝对位姿估计, 最后进行单目相机运动轨迹拟合, 得到回转轴线的空间位姿信息。结果表明, 此方法的标定精度优于 0.35 mm, 可以满足后续传动系统装配的要求。

关键词: 视觉测量; 回转轴线; 亚像素角点; PnP 问题; 空间圆拟合

Calibration Method for Rotary Axis of Helicopter Transmission System Based on Machine Vision

QI Kai¹, LI Shuanggao¹, HUANG Xiang¹, LI Gen², HOU Guoyi¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Suzhou Research Institute of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Suzhou 215000, China)

[ABSTRACT] There are multiple rotary axes in the helicopter transmission system and their spatial pose information is an important basis for subsequent assembly. Traditional measurement methods have low accuracy and slow speed, and are difficult to realize digitalization. Aiming at the above problems, a machine vision-based rotation axis calibration method for helicopter transmission system is proposed. Firstly, the absolute coordinate system is established by the visual target, and the sub-pixel corner is detected by the checkerboard corner detection technology based on Radon transform. Then the absolute pose of the monocular camera is estimated by the Levenberg–Marquadt algorithm. Finally, the spatial pose information of the rotary axis is obtained by fitting the motion trajectory of monocular camera. Experimental results show that the calibration accuracy of this method is higher than 0.35 mm, which meets the requirements of subsequent transmission system assembly.

Keywords: Vision measurement; Rotary axis; Sub-pixel corner; PnP problem; Spatial circle fitting

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.22.110

近年来, 随着航空工业的不断发展, 新一代直升机在安全性、可靠性和先进性方面也有着更高的要求。直升机传动系统是发动机向尾翼及直升机附件提供转速和扭矩的唯一途径, 其性能是影响直升机工作寿命和效率的重要指标。Muelaner 等^[1]的研究表明, 航空航天

工业中 50% 机械设备的损坏是由轴系同轴度误差超出正当范围导致的, 因此, 保证传动系统的装配精度对直升机性能具有重要意义。

现有的直升机传动系统安装调整技术规范通常要求在完成装配后, 主减速器输出轴线、中减速器输入轴

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(NP2022421); 江苏省卓越博士后计划(2022ZB217)。

线、传动轴安装座孔中心连线之间的同轴度偏差不大于 0.6 mm, 夹角不大于 $10'$ 。其中, 减速器的输入、输出轴线均为回转轴线, 因此需要对回转轴线空间位姿信息进行精确标定, 以此作为后续装配的重要依据。

回转轴线是虚拟的直线, 不能被直接测量^[2], 因此需要对回转运动中某一点的运动轨迹进行拟合。百分表法是日前旋转机械设备对中的常用方法^[3], 该方法根据百分表测头在光滑轴面形成的轨迹来确定其回转轴线的位置, 属于接触式测量, 当被测物体存在表面缺陷或不为圆柱体时, 则无法使用此方法。在视觉测量领域, 汪亭玉^[4]提出了一种基于 CMOS 图像传感器的轴系同轴度测量方法。毕超等^[5]提出了一种面向回转工作台的回转轴线标定方法, 这些测量标定方法都需要电控旋转设备的参与, 不适用于直升机传动系统的装配。在激光测量领域, 美国(FIXTURLASER 系列)、瑞典(Easy-laserD 系列)、德国(OPTALIGN PLUS 系列)的激光对中仪均能实现对不同轴径的同轴度进行非接触式测量^[6], 但这些技术都只能对多个回转轴线之间的位姿关系进行测量与标定, 难以实现回转轴线与绝对坐标系下固定物理对象位姿关系的标定。

针对上述问题, 本文提出一种基于机器视觉的直升机传动系统回转轴线标定方法, 给出坐标系建立和图像采集的方法, 采用 Radon 变换和基于中心线的角点检测模型, 基于自适应的思想, 进行亚像素棋盘格角点检测, 获取多个空间特征点与其对应的图像点。利用检测结果进行坐标系转换矩阵计算, 得到单目相机的绝对位姿, 基于超最小二乘的思想, 进行法向约束的空间圆拟合, 得到单目相机的运动轨迹和回转轴线的空间位置信息。通过试验验证了该方法的标定结果具有较好的精度和稳定性, 可以满足后续装配的要求, 为直升机传动系统的数字化装配提供了一定的借鉴和新思路。

1 回转轴线视觉标定方法

1.1 坐标系设置与图像采集方法

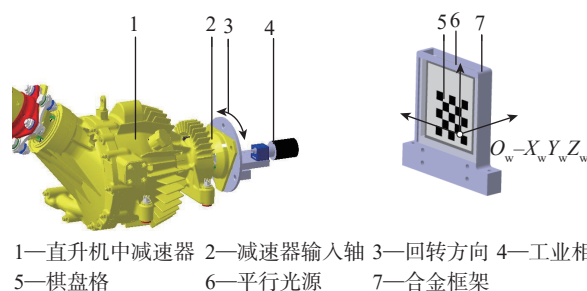
在直升机传动系统装配中, 常根据主减速器输出端回转轴线对中减速器、轴承支座的装配孔位和安装垫片进行调整。根据直升机传动系统中回转轴线的分布特点与测量需求设计视觉靶标, 搭建视觉测量环境, 如图 1 所示, 工业相机与减速器端面连接, 视觉靶标与装配孔连接。棋盘格是一种由黑白方块间隔组成的平面图案, 相较于复杂的三维物体, 平面棋盘格在相机内参标定、位姿估计等领域有着更广泛的应用。内嵌式的平行光源可以减少环境光的影响, 因此设计视觉靶标主要包含棋盘格、内嵌式平行光源及合金框架, 其中棋盘格除黑色方块外均为透明材质, 内嵌式平行光源位

于棋盘格后方。合金框架上含有与地面或其他装配基准连接的孔, 因此可在视觉靶标上建立绝对坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$, 为后续步骤提供统一的基准。

以相机光心为原点建立相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$, 其中相机光轴为 Z_c 轴, 当工业相机与减速器端面进行安装时, 相机坐标系与回转轴线之间存在位置偏差, 为避免安装偏差对标定结果的影响, 在进行图像采集时需沿回转方向转动减速器输入端一周, 在不同的位置采集 n 张图像。回转轴线标定流程如图 2 所示。

1.2 改进的 Radon 变换角点检测算法

拟合空间轴线需要对每一次图像采集时单目相机的位姿进行解算, 解算过程通过多个空间特征点与其所对应的图像点来实现。本文选取视觉靶标中的角点作为空间特征点, 因此角点的检测精度直接关系到标定和测量的精度。Harris 算子是一种常用的角点检测工具^[7], Douskos 等^[8]在此基础上加入亚像素细化进行角点检测, 精度可达 0.1 像素。同样地, 王民等^[9]在 Harris 算法的基础上, 引入了最小亮度变化算法、局部加权熵等方法来提取角点, 但此法并不适用于灰度变化不明显的图像。Sinzinger^[10]提出了一种基于模板的棋盘格角点检测算法, 分为两种模型: 基于中心线的检测模型(图 3(a))和基于边缘线的检测模型(图 3(b))。Duda 等^[11]利用局部 Radon 变换算法得到了如图 3(a)所示的 2 条中心线及其交点, 实现了角点检测; 作为对照组, Duda 等^[11]还利用梯度检测得到了如图 3(b)所示的 2 条边缘线



1—直升机中减速器 2—减速器输入轴 3—回转方向 4—工业相机
5—棋盘格 6—平行光源 7—合金框架

图 1 回转轴线的标定环境

Fig.1 Environment for rotary axis calibration

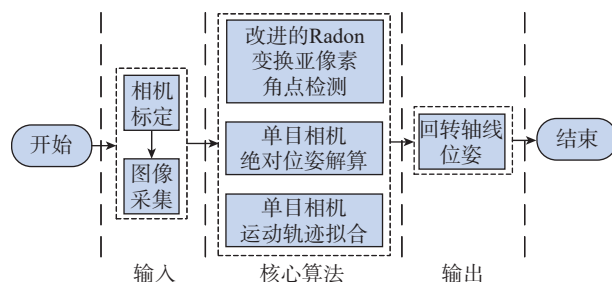


图 2 回转轴线标定流程

Fig.2 Flow chart of rotary axis calibration

及其交点,通过对比2种方法,证实了Radon变换角点检测算法具有更好的准确性和鲁棒性。Radon变换角点检测法的基本概念:以一个图像点为中心,沿所有可能存在中心线的方向计算积分,找出其中的最大值和最小值,棋盘格具有对称性,因此若该点为棋盘格角点,则两个积分值的差值将最大化。本文将通过增加自适应非极大值抑制(Soft-NMS),从而对该方法进行改进。

将某一图像点的灰度值表示为 $f(x, y)$,沿所有可能存在中心线的方向计算积分值,即以该点为原点做 $s=0$ 的Radon变换 $R(s, \alpha)$,当积分长度为 $2m+1$ 时, Radon变换表示为

$$Rf(x, y, \alpha) = \sum_{k=-m}^{k=m} G[x+k \cos(\alpha), y+k \sin(\alpha), v],$$

$$k = -m, -(m+1), \dots, m-1, m \quad (1)$$

式中, $G(x, y) = f(x, y) \otimes \text{Gaussian}(x, y, v)$,采用比例因子为 v 的高斯卷积核对图像进行滤波处理。对于同一个图像点,所有方向上积分最大值与最小值的差值表示为

$$f_c(x, y) = \max_{\alpha \in [0, \pi]} [Rf(x, y, \alpha)] - \min_{\alpha \in [0, \pi]} [Rf(x, y, \alpha)] \quad (2)$$

如图4所示,当图像点 c 为角点时, c 处的响应数值应为局部最大值,因此当某个图像点的响应函数 $f_c(x, y)$ 值为局部最大值时,该点为候选角点。需要对 $f_c(x, y)$ 进行非极大值抑制(NMS)筛选,在保留细节特征的条件下去除噪点和伪角点,检测出局部最大值。NMS算法是一种经典的局部最大值搜索方法,在目标检测、定位等领域中被广泛使用,其原理是对于每个选定的窗口,只保留响应度最高的特征点,丢弃其他特征点。在棋盘格角点的检测过程中,当棋盘格在图像中的占比或图像分辨率不同时,对窗口大小的选择也不同。窗口过大时会导致过滤掉本应被检测到的角点,窗口过小时会增加伪角点的产生。采用自适应非极大值抑制(Soft-NMS)算法可以解决这一问题。Soft-NMS算法的基本思想是评估候选角点的极大区域并进行排序,从而避免窗口大小选择的问题。具体的步骤为,首先设定阈值 t_c ,从而筛选出候选角点点集 S ,即

$$S = \{(x, y) | f_c(x, y) > t_c\} \quad (3)$$

对于每一个候选角点 (x_i, y_i) ,计算其响应值 $f_c(x_i, y_i)$ 作为局部最大值的最大区域半径 r_i 为

$$r_i = \min \left[\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right], \quad (4)$$

$$f_c(x_i, y_i) \leq f_c(x_j, y_j), (x_i, y_i) \in S$$

通过对比 r_i 的大小对 S 中的每个点 (x_i, y_i) 进行降

序排列,根据视觉靶标中棋盘格角点的个数设置数量约束Num_Cheessboardcorner,选取前Num_Cheessboardcorner个候选角点储存至棋盘格角点点集Chessboardcorner_Point中,完成像素级棋盘格角点的提取。

1.3 角点亚像素定位

在真实世界中,棋盘格角点的坐标值不是整数,因此采用改进的Radon变换角点检测算法提取的整像素角点并不是理想的角点位置。为了提高角点的检测精度,采用梯度法实现角点位置的亚像素优化^[12]。

假设理想角点的位置为 c ,记其邻域中任一图像点 p 的梯度为 g_p ,则这个梯度的方向应与线段 $p-c$ 垂直,因此有

$$g_p^T(p-c) = 0 \quad (5)$$

考虑到真实图像中的线段宽度不会只有一个像素大小,梯度方向也不会如此理想,则理想角点 c 的位置应满足

$$c = \arg \min_{c'} \sum_{p \in N_1(c')} (g_p^T(p-c'))^2 \quad (6)$$

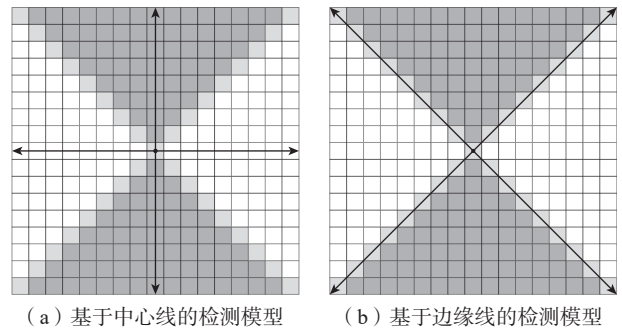


图3 角点检测模型^[10]
Fig.3 Corner detection models^[10]

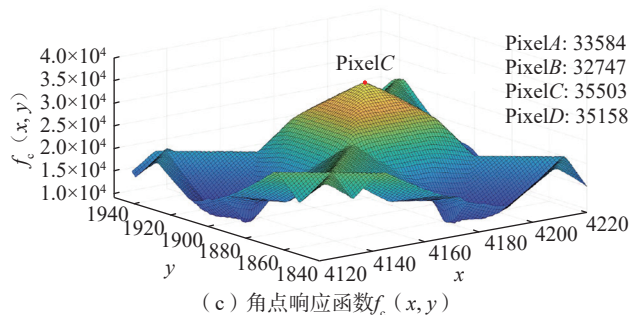
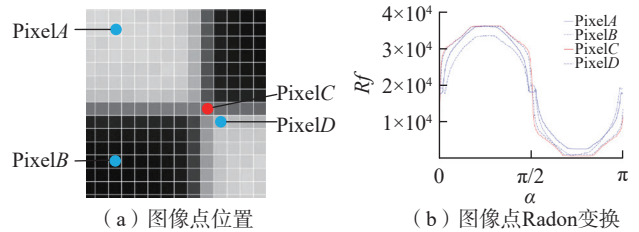


图4 不同图像点的响应函数
Fig.4 Response functions of different image points

式中, $N_1(c')$ 为 Chessboardcorner_Point 中的像素级角点 c' 周围 11×11 的像素邻域; 通过对 c' 求导并令求导结果为 0, 可得到解析解

$$c = \left(\sum_{p \in N_1} g_p g_p^T \right)^{-1} \sum_{p \in N_1} (g_p g_p^T) p \quad (7)$$

将求得的亚像素角点更新至 Chessboardcorner_Point 中, 即完成了棋盘格角点的亚像素提取, 如图 5 所示。Lavest 等^[13]的研究表明, 摄像机标定的重投影误差可以定性反映棋盘格角点的提取精度。为了验证亚像素角点检测方法的优越性, 对于一组相同的图片, 分别以该方法中像素级的检测结果和亚像素级的检测结果作为输入, 采用文献 [14] 中的标定方法进行摄像机标定, 两种输入的平均重投影误差如表 1 所示, 结果表明, 亚像素级坐标的精度优于像素级坐标的精度。

1.4 单目相机绝对位姿估计

工业相机与减速器端面完成连接后, 回转轴线与相机光轴 O_c-Z_c 之间存在位姿偏差, 如图 6 所示。当转动减速器端面一周并在任意角度进行图像采集时, 由回转运动的特性可知, 光心 O_c 的运动轨迹为空间圆 \odot_1 , 且 \odot_1 、 O_c-Z_c 与回转轴线存在以下约束: 回转轴线经过 \odot_1 的圆心, 回转轴线与 O_c-Z_c 的夹角不变, 回转轴线与 \odot_1 所在的平面垂直。因此, 可通过 O_c-Z_c 的运动轨迹拟合对回转轴线进行位姿解算, 运动轨迹的拟合需要在减速器端面的旋转过程中进行采样并进行单目相机绝对位姿的估计, 通过多个空间特征点及其对应的图像点来估算相机的位姿信息, 即 PnP (Perspective- n -Point) 问题^[15]。

相机成像模型中包含像素坐标系 O_p-uv 、相机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 、绝对坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$, 其中 $q_i = [u_i, v_i]^T$ 为像素坐标点, $P_i^c = [X_i^c, Y_i^c, Z_i^c]^T$ 为相机坐标系下的三维点, $P_i^w = [X_i^w, Y_i^w, Z_i^w]^T$ 为绝对坐标系下的三维点,

从像素坐标系到绝对坐标系的转换关系表示为

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

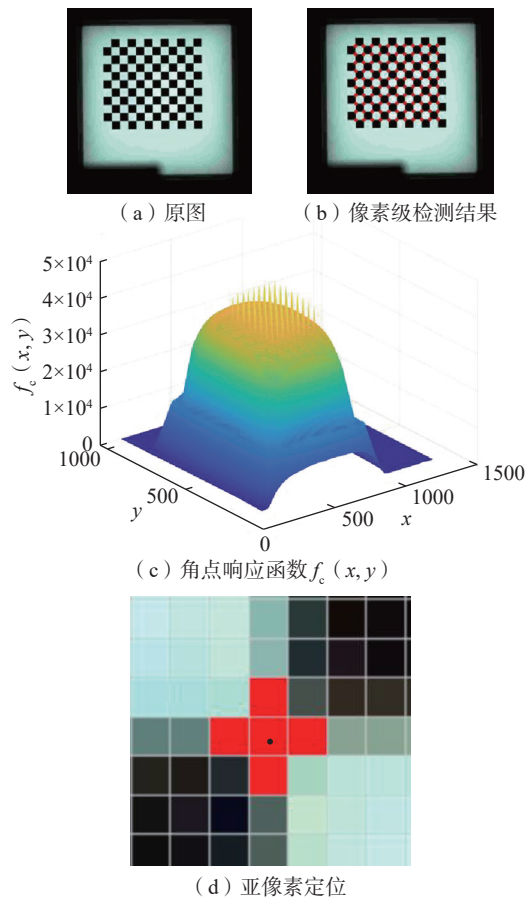


图 5 亚像素角点检测流程
Fig.5 Detection process of sub-pixel corner

表 1 两种角点检测结果的相机标定重投影误差

Table 1 Camera calibration re-projection errors of two corner detection methods

组别	图片数量	平均重投影误差 /pixel		平均重投影误差 /mm	
		像素级	亚像素级	像素级	亚像素级
1	18	0.1535	0.0352	1.0754×10^{-2}	2.3999×10^{-3}
2	18	0.2110	0.0437	1.4137×10^{-2}	2.9934×10^{-3}
3	18	0.2661	0.0428	1.7829×10^{-2}	2.9279×10^{-3}
4	20	0.2514	0.0376	1.6819×10^{-2}	2.565×10^{-3}
5	19	0.2180	0.0407	1.478×10^{-2}	2.8083×10^{-3}
6	18	0.1996	0.0389	1.3573×10^{-2}	2.6258×10^{-3}

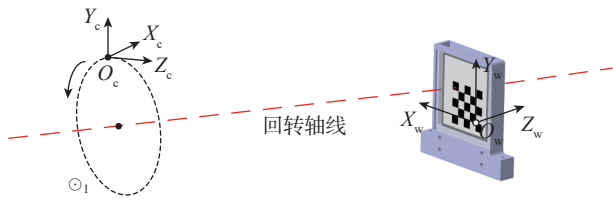


图6 相机与回转轴线安装误差

Fig.6 Installation error between camera and rotary axis

式中, λ 为缩放因子; A 为相机内参矩阵; $\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为绝对坐标系和相机坐标系之间的转换矩阵。在 PnP 问题中相机内参矩阵为已知, 一组绝对坐标点及与其对应的像素坐标点为输入量, 旋转矩阵 R 和平移向量 T 为待求解量。

目前应用比较广泛的 PnP 问题求解算法主要可分为解析算法和迭代算法, 解析算法中包含直接线性变换 (Direct linear transform, DLT)^[16]、EPnP^[17] 等, 迭代算法中包含正交迭代算法 (LHM)^[18]、Levenberg-Marquadt (LM)^[19] 优化算法等。为了提高回转轴线的标定精度, 针对本文方法中所使用的棋盘格视觉靶标, 对几种主流 PnP 算法进行对比, 具体如下。

(1) DLT 算法: 将 $\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 看作一个包含 12 个未知量的矩阵, 将式 (8) 转化为方程组形式后共包含 3 个方程, 消去缩放因子 λ 后包含 2 个方程, 即每组 2D-3D 匹配点可以对应 2 个方程, 则至少需要 6 组匹配点才能解出 12 个未知量。

(2) EPnP 算法: 该方法的基本概念是将绝对坐标系下的三维点转换至相机坐标系下, 然后采用 ICP (Iterative closest point) 法计算待求矩阵, 可求解 4 组以上匹配点的位姿问题。

(3) UPnP 算法^[20]: 在 EPnP 算法的基础上估算了焦距, 因此适用于未进行相机标定的情况。

(4) OPnP 算法^[21]: 该方法采用 Gröbner 基进行最优化求解, 具有很高的求解精度和鲁棒性, 但可能会得到多个解析解。

(5) LM 算法: 是一种非线性优化算法, 目标是为了最小化系统误差, 其迭代过程为, 给出一个初始 R , 求出此时最优化的 T 后, 再求出最优解 R , 从而不断更新 R 和 T 。

上述方法得到重投影误差的均值和中值, 如图 7 所示, 在本文测量环境下, 共包含 110 组 2D-3D 匹配点, LM 算法具有更高的求解精度, 因此单目相机绝对位姿的估计步骤如下。

(1) 以棋盘格视觉靶标最靠近右下角的角点作为绝对坐标系原点 $O_w (0, 0, 0)$, 每一个棋盘格都是 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的正方形, 则原点上方相邻点的坐标为 $(0, 5, 0)$, 左侧相邻点的坐标为 $(5, 0, 0)$, 以棋盘格平面作为 $O_w-X_w Y_w$ 平面, 以棋盘格平面法向作为 O_w-Z_w 轴, 将 110 个角点的坐标储存至点集 Worldcorner_Point 中;

(2) 通过行列数目的约束, 调整 Worldcorner_Point 内部点的顺序, 使之与 Chessboardcorner_Point 形成对应关系;

(3) 通过 LM 算法解算出 $\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 可以表示视觉靶标在相机坐标系下的位姿, 求逆得到 $\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$, 即完成了单目相机绝对位姿的估计。

1.5 回转轴线空间位姿求解

转动减速器端面一周, 在不同位置采集 n 张图像, 利用单目相机的 n 次绝对位姿估计结果拟合单目相机的运动轨迹, 进而获得回转轴线的空间位姿信息。

相较于平面圆拟合, 空间圆拟合的方法更多、复

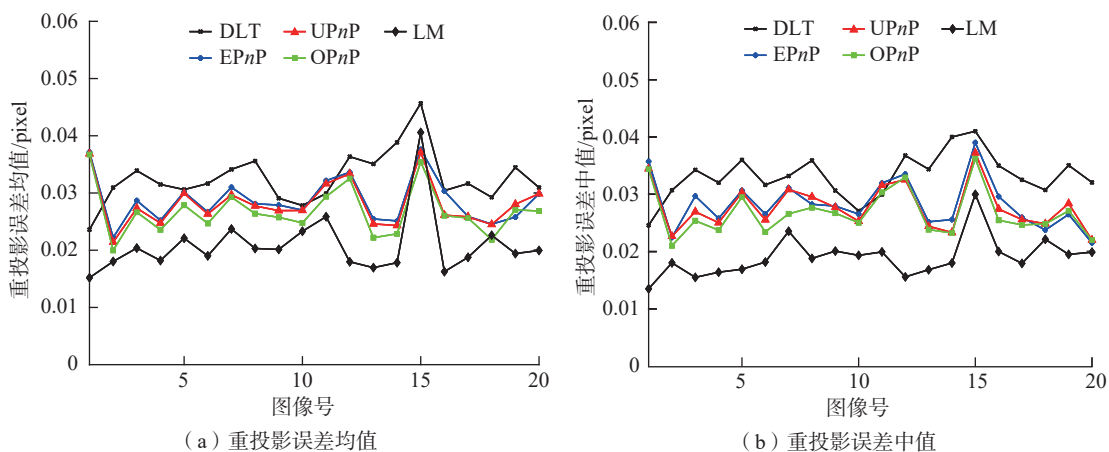


图7 不同算法得到重投影误差的均值和中值

Fig.7 Median and mean re-projection errors of different algorithms

杂度更高,主要分为两类:(1)将空间圆看作一个球体与过球心平面相交所形成的圆,首先利用球面上两点的中垂面经过圆心拟合出球体,然后与所有三维点拟合出的平面联立,解出空间圆的信息;(2)将所有三维点投影至拟合平面,得到这些点在平面的二维坐标,从而将问题转化为平面圆的拟合。上述两种方法都需要对三维点所在的平面进行拟合,而该平面的法向量就是回转轴线在绝对坐标系中的方向向量,因此该平面的拟合精度直接影响最终的标定精度。通过测试可知,在单目相机绝对位姿估计中,与光心 O_c 相比,光轴方向 O_c-Z_c 的测量结果具有更高的稳定性,因此在减速器端面旋转过程中,确定回转轴线与 O_c-Z_c 的夹角不变这一约束条件进行平面法向量的求解,并以法向量为约束进行平面求解和噪点过滤。对于 O_c-Z_c 的测量结果 $n_i = (a_i, b_i, c_i)^T$ ($i=1,2,3, \dots$),建立空间圆的平面方程 $Ax+By+Cz-D=0$,平面单位法向量为 $n = (A, B, C)^T$,则

$$Nn - E = 0 \quad (9)$$

式中, $N = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}$; $E = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \vdots \\ \cos\theta \end{bmatrix}$ 。其中, θ 为回转轴线与 O_c-Z_c 的夹角。代入 O_c 的测量结果 $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ ($i=1,2,3, \dots$),得到

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^T n \quad (10)$$

设置阈值 t_D , 去除 $|p_i^T n - D| > t_D$ 的 p_i 后,再次计算式(10)直至所有的 p_i 都满足阈值要求,得到空间圆所在平面 $Ax+By+Cz-D=0$ 。将噪点过滤后的 p_i 投影至该平面,空间圆拟合问题便转换成了平面圆的拟合问题,利用超最小二乘法进行平面圆拟合^[22],再将拟合结果转换至绝对坐标系,得到半径 R 和圆心坐标 $O(x, y, z)^T$ 。至此,完成了回转轴线的空间位姿求解,即回转轴线的标定过程(图8),其中轴线的单位方向向量 $n = (A, B, C)^T$,且经过回转中心 $O(x, y, z)^T$ 。

2 结果与分析

为了验证基于机器视觉回转轴线标定方法的准确性和鲁棒性,在图9所示的测量环境下进行回转轴线的标定。带有内嵌式光源的棋盘格视觉靶标固连于传动系统精密驱动平台,视觉靶标的合金框架中置有4个激光靶球孔位,工业相机与直升机中减速器模拟件的输入端面固连,镜头端面对正视觉靶标,确保旋转端面一周时,在任意位置都可清晰捕捉到完整的棋盘格图像。试验平台采用MER2-2000-19U3C工业数字相机(大恒图

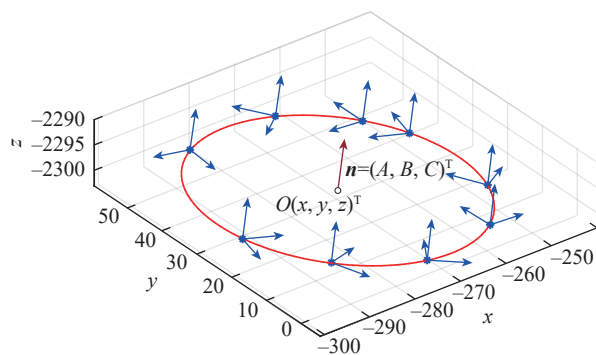


图8 回转轴线的标定结果

Fig.8 Calibration result of rotary axis

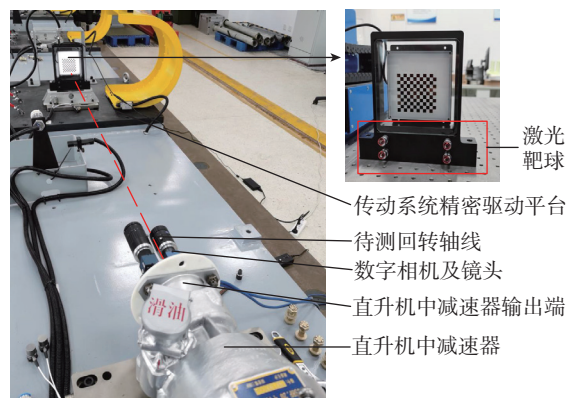


图9 直升机传动系统回转轴线标定精度验证平台

Fig.9 Precision verification platform for rotary axis calibration of helicopter transmission system

像公司),分辨率为 5496×3672 ,像素尺寸为 $2.4 \mu\text{m}$;镜头为HN-5024-20M-C1定焦镜头(大恒图像公司),焦距为 50 mm ,工作距离为 $1400 \sim 1500 \text{ mm}$ 。

为验证准确性,使用本方法完成一次回转轴线的标定后,移动传动系统精密驱动平台并再次进行回转轴线标定,与通过激光跟踪仪和激光靶球求解得到的第二次回转轴线空间位姿信息进行对比,得到回转中心偏差和角度偏差。为验证鲁棒性,通过多次调整传动系统精密驱动平台改变视觉靶标位姿,检验本方法的标定准确度,具体试验步骤如下。

(1)完成相机内参标定,打开平行光源,在视觉靶标上放置4个激光靶球,在视觉靶标方圆 2 m 内且无遮挡的环境中放置Leica激光跟踪仪;

(2)通过本方法获取方向向量 $n_0 = (A_0, B_0, C_0)^T$,回转中心点 $O_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$,通过激光跟踪仪获取当前视觉靶标空间位姿信息,为了去除激光靶球孔的加工误差和棋盘格与合金框架之间的装配误差,靶球孔位与棋盘格之间的位置关系通过影像测量仪进行测量;

(3)移动传动系统精密驱动平台,通过本方法获取方

向向量 $n_i = (A_i, B_i, C_i)^T$, 回转中心点 $O_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, 通过激光跟踪仪获取当前视觉靶标空间位姿信息并解算出两次视觉靶标的位姿转换关系 T , 根据激光跟踪仪的测量结果, 当前回转轴线的方向向量为 $Tn_0 = (A_L, B_L, C_L)^T$, 回转中心点 $TO_0 = (x_L, y_L, z_L)^T$, 因此本方法标定的回转中心偏差 $\Delta d = \sqrt{(x_1 - x_L)^2 + (y_1 - y_L)^2 + (z_1 - z_L)^2}$, 夹角偏差 $\Delta\theta = \arccos(A_1 A_L + B_1 B_L + C_1 C_L)$;

(4) 移动传动系统精密驱动平台, 重复步骤(2)和(3), 记录 10 组数据;

(5) 分析试验数据。

回转中心和回转轴线夹角标定结果如表 2 和 3 所示。

现有直升机传动系统的装配要求通常为同轴度偏差不大于 0.6 mm, 夹角误差不大于 10'。通过本方法标定所得回转轴线空间位姿的范围为 0.1190044~

0.3124269 mm, 平均回转中心偏差 Δd 为 0.201034 mm; 夹角偏差范围为 0.00226°~0.01175°, 平均夹角偏差 $\Delta\theta$ 为 0.00636°。激光跟踪仪在 2 m 工作距离下的测量精度小于 0.03 mm, 因此可知, 本方法的标定精度优于 0.35 mm, 可满足传动系统后续装配的要求。

3 结论

针对直升机传动系统的装配需求, 提出了一种基于机器视觉的直升机传动系统回转轴线标定方法。利用改进的 Radon 变换角点检测算法提取视觉靶标上的关键特征, 提高了检测器的准确性和鲁棒性, 解决了非极大值抑制时难以确定窗口大小的问题。对比了 5 种常见 PnP 问题的求解方法, 根据对比结果选用 Levenberg-Marquadt 优化算法进行单目相机的绝对位姿估计, 最后进行了法向约束的空间圆拟合, 得到回转轴线的空间位

表 2 回转中心标定结果
Table 2 Calibration result of rotary center

组别	激光跟踪仪回转中心 /mm	本方法回转中心 /mm	回转中心偏差 Δd /mm
1	(28.231264, -38.975975, -1454.41411)	(28.230994, -38.986733, -1454.22463)	0.1897853
2	(29.106781, -37.502500, -1454.50288)	(29.030165, -37.5997845, -1454.4536)	0.1332770
3	(41.483309, -58.606570, -1444.11256)	(41.430794, -58.774107, -1443.91845)	0.2617349
4	(52.156907, -36.111005, -1454.33231)	(52.185457, -36.101210, -1454.47434)	0.1452018
5	(24.320059, -63.53972, -1451.889710)	(24.376088, -63.53831, -1451.784730)	0.1190044
6	(22.555230, -13.457549, -1448.08754)	(22.457763, -13.352598, -1447.90276)	0.2337909
7	(38.297811, -25.879255, -1447.69180)	(38.326113, -26.028777, -1447.56077)	0.2008151
8	(23.856921, -37.525785, -1449.39907)	(24.045881, -37.673381, -1449.59937)	0.3124269
9	(30.162960, -53.231899, -1454.35694)	(30.342091, -53.112668, -1454.22828)	0.2507137
10	(51.817766, -34.305501, -1450.19098)	(51.951819, -34.327089, -1450.28223)	0.1635934

表 3 回转轴线夹角标定结果
Table 3 Calibration result of rotary axis angle

组别	激光跟踪仪方向向量	本方法方向向量	夹角偏差 $\Delta\theta$ / (°)
1	(0.12522332, -0.0297464, 0.9917867)	(0.12504176, -0.0296542, 0.9918113)	0.01175
2	(0.1252873, -0.0296033, 0.99178190)	(0.12530635, -0.02963789, 0.9917791)	0.00226
3	(0.1195233, 0.11829111, 0.98575929)	(0.11952678, 0.11838824, 0.9857472)	0.00561
4	(0.10525278, 0.11848343, 0.9873619)	(0.10509786, 0.11840763, 0.9873875)	0.00999
5	(0.00009806, -0.19611613, 0.9805807)	(0.0001177, -0.1961633, 0.98057124)	0.00297
6	(0.2873347, -0.0095778, 0.95778235)	(0.28736079, -0.0096783, 0.9577735)	0.00597
7	(0.1104634, -0.0110424, 0.9938188)	(0.1104574, -0.01115837, 0.9938182)	0.00665
8	(-0.21696704, -0.0002212, 0.9761789)	(-0.2169615, -0.0001139, 0.97618016)	0.00616
9	(-0.3162920, -0.0001096, 0.9486619)	(-0.316287, -0.0002477, 0.94866357)	0.00792
10	(-0.2249006, 0.0000780, 0.9743817)	(-0.22489677, 0.00015366, 0.9743826)	0.00434

姿信息,为后续装配提供依据。将此方法的标定结果与激光跟踪仪的测量结果进行对比,多次试验结果表明,此方法的标定精度优于 0.35 mm,能够满足直升机传动系统后续装配的需求。

参考文献

- [1] MUELANER J E, MAROPOULOS P. Large scale metrology in aerospace assembly[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Digital Enterprise Technology. Nantes: University of Bath, 2008.
- [2] 史耀强,郑渊.轴系回转轴线指向误差测量方法[J].上海航天,2020,37(4):128-132,140.
- SHI Yaoqiang, ZHENG Yuan. A measurement method for the pointing error of a shafting rotation axis[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(4): 128-132, 140.
- [3] 刘召,王炜,丁宁.百分表对中的理论与操作指导[J].价值工程,2019,38(36):236-238.
- LIU Zhao, WANG Wei, DING Ning. Theory and operation guidance of dial indicator alignment[J]. Value Engineering, 2019, 38(36): 236-238.
- [4] 汪亭玉.基于 CMOS 图像传感器的船舶轴系同轴度测量方法研究[J].中国造船,2012,53(3):175-180.
- WANG Tingyu. Research on coaxiality measurement method of ship shafting based on CMOS image sensor[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(3): 175-180.
- [5] 毕超,郝雪,刘孟晨,等.基于视觉测量的回转轴线标定方法研究[J].红外与激光工程,2020,49(4):0413004.
- BI Chao, HAO Xue, LIU Mengchen, et al. Study on calibration method of rotary axis based on vision measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0413004.
- [6] 田留德,刘朝晖,赵建科,等.三轴误差对光电经纬仪测角的影响[J].红外与激光工程,2013,42(S1):192-197.
- TIAN Liude, LIU Chaohui, ZHAO Jianke, et al. Impact of three-axis error on angle measurement of photoelectric theodolite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 192-197.
- [7] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988. Manchester: Alvey Vision Club, 1988: 147-152.
- [8] DOUSKOS V, KALISPERAKIS I, KARRAS G, et al. Fully automatic camera calibration using regular planar patterns[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37(B5): 21-26.
- [9] 王民,刘涛,负卫国.基于图像局部加权熵和自适应阈值的角点检测算法[J].激光与光电子学进展,2017,54(5):051003.
- WANG Min, LIU Tao, YUN Weiguo. Corner detection algorithm based on local weighted entropy and adaptive threshold[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051003.
- [10] SINZINGER E D. A model-based approach to junction detection using radial energy[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 494-505.
- [11] DUDA A, FRESE U. Accurate detection and localization of checkerboard corners for calibration[C]//Proceedings of the 29th British Machine Vision Conference. Newcastle: BMVA, 2018.
- [12] GEIGER A, MOOSMANN F, CAR O, et al. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St Paul: IEEE, 2012: 3936-3943.
- [13] LAVEST J M, VIALA M, DHOME M. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration? [M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998: 158-174.
- [14] ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra: IEEE, 1999.
- [15] 王平,周雪峰,安爱民,等.一种鲁棒且线性的 PnP 问题求解方法[J].仪器仪表学报,2020,41(9):271-280.
- WANG Ping, ZHOU Xuefeng, AN Aimin, et al. Robust and linear solving method for Perspective- n -Point problem [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 271-280.
- [16] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M, HAUCK M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
- [17] 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.
- [18] LU C P, HAGER G D, MJOLSNES E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.
- [19] JIANG W S, WANG Z Y. Calibration of visual model for space manipulator with a hybrid LM-GA algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66: 399-409.
- [20] PENATE-SANCHEZ A, ANDRADE-CETTO J, MORENO-NOGUER F. Exhaustive linearization for robust camera pose and focal length estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(10): 2387-2400.
- [21] ZHENG Y Q, KUANG Y B, SUGIMOTO S, et al. Revisiting the PnP problem: A fast, general and optimal solution[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision. Sydney: IEEE, 2013.
- [22] KANATANI K, RANGARAJAN P. Hyper least squares fitting of circles and ellipses[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2011, 55(6): 2197-2208.

通讯作者:李泷泉,副教授,博士,主要研究方向为飞机数字化装配与测量技术。

(责编 向阳)