

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407682

动态摆角测量的单目非标定方法*

非正亮 李佳田 何 烽

(昆明理工大学国土资源工程学院 昆明 650093)

摘要: 动力控制工程实现消摆需精确测量摆角,而双目摆角测量方法精度依赖相机标定结果,相机位置变化会对测量结果产生偏差,且难以高效稳定地测量。为解决以上问题,提出一种单目非标定测量方法。首先,连续捕捉目标图像,结合卡尔曼滤波颜色空间转换法定位标记点位置。其次,基于交比进行坐标转换,与初始位置对比,由三角变换算出实时摆角。最后,应用高斯与均值结合的滤波方法进行平滑处理,并与姿态传感器结果对比验证。实验结果为:在变速、匀速两种运动状态下与双目方法的对比表明,变速运动状态下最大摆角为 1.871° ,同时刻与传感器的最大角度误差为 0.184° ,相较于双目方法精度提高了 0.018° ;匀速运动状态下最大摆角为 3.075° ,与传感器的最大角度误差为 0.259° ,相较于双目方法精度提高了 0.021° ,计算效率提高了 133.3%。相机位置发生偏差用标定方法计算出的值与传感器最大角度误差超过 0.5° ,非标定方法不高于 0.3° ,能有效消除偏差实现动态摆角的准确测量。

关键词: 单目视觉;动态摆角;标记点检测;相机标定;滤波平滑

中图分类号: TN911;TP237

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 420.20

Monocular non-calibration method for dynamic pendulum angle measurement

Fei Zhengliang Li Jiatian He Feng

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In dynamic control engineering, precise measurement of pendulum angle is crucial for achieving swing suppression. While binocular pendulum angle measurement methods rely on camera calibration results, changes in camera positions can introduce measurement deviations and pose challenges for efficient and stable measurements. To address these issues, this study proposes a monocular non-calibrated measurement method. The proposed method involves several key steps. First, continuous target image capture is combined with Kalman filtering and color space transformation to locate marker positions. Second, coordinate transformation based on cross-ratio is applied, comparing the current position with the initial position to calculate real-time pendulum angles through trigonometric transformations. Finally, a smoothing process using a combination of Gaussian and mean filtering is employed, and the results are validated against attitude sensor measurements. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method. Comparisons with binocular methods under variable-speed and constant-speed motion states yield the following findings: In variable-speed motion, the maximum pendulum angle is 1.871° , with a maximum angle error of 0.184° compared to the sensor. This represents an accuracy improvement of 0.018° over the binocular method. In constant-speed motion, the maximum pendulum angle is 3.075° , with a maximum angle error of 0.259° compared to the sensor, showing an accuracy improvement of 0.021° over the binocular method. Moreover, the computational efficiency is enhanced by 133.3%. When camera position deviations occur, the calibrated method produces maximum angle errors exceeding 0.5° compared to the sensor, while the non-calibrated method maintains errors below 0.3° . This non-calibrated approach effectively eliminates deviations, enabling accurate measurement of dynamic pendulum angles.

Keywords: monocular vision; dynamic pendulum angle; marker point detection; camera calibration; filtering and smoothing

收稿日期: 2024-07-15 Received Date: 2024-07-15

* 基金项目: 国家自然科学基金(41561082)项目资助

0 引言

精确测量摆角是实现高效精准控制的关键^[1]。在吊装负载动力控制领域,大幅摆动会给传送设备带来较大的动态负荷和机械冲击,需精准测量动态摆角并通过调整运动速度实现消摆。因此,摆角测量具有重要意义。

摆角测量方法主要包括接触式与非接触式两种。工程测量摆角方法通常包括陀螺仪、加速度计和磁力计等传感器,文献[2-4]安装陀螺仪,结合滤波技术测量出物体摆角或倾斜角。采用陀螺仪易受干扰,灵活性和适应性较低。视觉方法属于非接触式方法,具有高分辨率,能够实时动态地测量摆角,逐渐发展成重要摆角测量手段。文献[5-6]将计算机视觉的方法引入桥式吊车摆角测量和汽车转弯直径测量,利用背景建模结合背景去除的方法进行运动负载的快速识别从而准确计算摆角。黄荔生等^[7]提出一种基于机器视觉的空间向量夹角测量方法,通过分析双目成像模型和设计空间向量夹角测量系统,实现了便携高效的摆角检测,但得提前获取相机内部参数。叶雪轲等^[8]设计了一种用于测量绳索摆角的高精度视觉测量系统,并说明该系统在悬吊式重力补偿系统中的应用,但实验存在局限,未测量微小角度,相机参数依赖标定精度。文献[9-10]介绍了一种基于单目视觉的平面运动测量方法,通过相机标定确定轨迹测量的相机模型,利用亚像素精度和解耦模型同时得到位移、角度和轨道,但计算较为复杂,且依赖于仪器。文献[11-12]通过标定的双目系统跟踪特征点图像,重建三维坐标以计算物体的动态角度,但需要高精度标定,且只测了摆角较大的情况。然而,在上述研究测量过程中,测量成本高,不易部署,计算过程复杂,难以满足实时性的要求。由于相机抖动使自身位置变化,双目方法依赖于高精度标定,相机位置发生变化会导致测量结果失效。因此,文中提出一种单目非标定摆角测量方法,通过交比原理建立像素与世界图像坐标间的联系,进而通过三角化由边长计算摆角。单目非标定测量方法消除了双目标定方法相机位置变化产生的偏差,测量更稳定,且提高了效率和精度,结果表明提出方法可以有效避免相机标定产生的偏差。

1 单目非标定摆角测量方法

1.1 运动系统

如图1所示,以水平运动轴所在的竖直平面为运动平面, S 为摄影中心, S' 为相机沿水平运动轴运动到图1所示的摄影中心。绳子下端挂被测物,在相机运动的过程中,每拍摄一帧图像都在空间两个方向上产生摆动幅

度,分别为向运动方向(X 轴)左右摆动的幅度,记为 α 角,垂直于运动方向(Y 轴)前后微小摆动的幅度,记为 β 角。 $S-X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系,以棋盘格标定板左上角内角点 O 为世界坐标原点, $O-X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系。由电机控制运动过程,运动轴带动相机运动,相机采集目标图像,通过提取重物重心标记点获取位置,根据坐标可知摆动幅度,由此计算并平滑摆角。

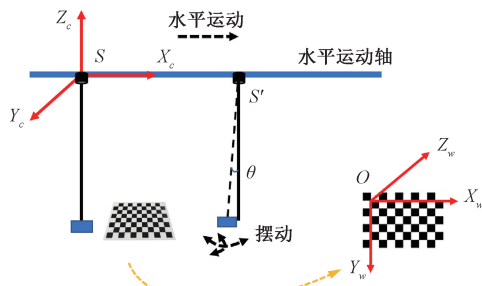


图1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system structure

1.2 标记点提取

标记点提取方法主要有颜色空间转换法^[13]、亚像素检测法^[14]以及特征点匹配法^[15]。重物中心用红色实心圆标记,为快速且稳定提取标记点,采用结合卡尔曼滤波^[16]的颜色空间转换法提取特征点,使每次查找标记点的区域由整张图像缩小为预测点附近小片区域,在下一帧图像中,基于上一帧的预测结果,缩小搜索区域,从而提高检测和跟踪的效率。如图2所示,其中蓝色点为卡尔曼滤波预测的下一帧的标记点,查找区域为绿色框内区域。

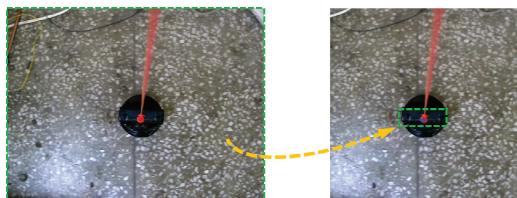


图2 标记点检测区域

Fig. 2 Marker point detection region

为了增强标记点特征强度,对采集到的图像进行预处理,包括非局部均值滤波去噪、亮度和对比度调整。接着将图像从红绿蓝(red green blue, RGB)色彩空间转换至色调饱和度亮度(hue saturation value, HSV)空间,以更好地分离出红色分量。设置合适的红色阈值,提取出红色区域,采用卡尔曼滤波算法对红色区域的中心点进行跟踪,利用系统状态方程和观测方程,结合当前测量值和预测值,递归地估计下一时刻的状态,从而平滑噪声并预测下一帧中心点的位置,计算过程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}_k^-) \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{A}(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 为当前时刻的系统状态向量; $\mathbf{x}_{k-1}$ 上一时刻的系统状态向量; $\mathbf{A}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{B}$ 为控制输入矩阵; $\mathbf{u}_{k-1}$ 为上一时刻的控制量; $\mathbf{W}_{k-1}$ 为系统过程噪声协方差矩阵; $\mathbf{z}_k$ 为当前时刻的观测向量; $\mathbf{H}$ 为观测矩阵; $\mathbf{V}_k$ 为观测噪声; $\mathbf{K}_k$ 为当前时刻的卡尔曼增益; $\mathbf{P}_k^-$ 为当前时刻状态预测协方差矩阵; $\mathbf{R}$ 为观测噪声协方差矩阵; $\mathbf{x}_k^-$ 为当前时刻状态的预测值; $\hat{\mathbf{x}}_k$ 为当前时刻状态的更新值; $\mathbf{P}_k$ 为当前时刻状态协方差矩阵; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

根据卡尔曼滤波的预测结果,在下一帧图像中定位可能出现红色标记点的区域,并在该区域内进行局部的颜色阈值分割和形态学处理,精确提取出红色标记点的位置坐标。

1.3 坐标转换

为反映出物体的真实尺寸建立图像坐标系,将尺寸统一为与实际绳长同数量级便于计算,标记点像素坐标转换到图像坐标差两个缩放比例。使棋盘格与被测物等高并与运动轴平行放置,以第 1 个棋盘格子右下角角点为原点 $O(X_1, Y_1)$, 并以此为第 1 个角点,第 2 个角点距第 1 个角点 7 个格子的水平距离,第 3 个角点距第 2 个角点 5 个格子的垂直距离,第 4 个角点距第 1 个角点 5 个格子的垂直距离。测量出对应 3 个角点的实际坐标,如图 3 所示。以此世界坐标系 X 轴和 Y 轴建立二维图像坐标系,以 mm 为单位,对应 4 个角点的坐标分别为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), (X_4, Y_4)$ 。提取棋盘格对应 4 个角点的像素坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$, 基于交比方法^[17], 可以建立像素坐标与图像坐标之间的联系,通过 4 个点约束,能在一定程度上消除相机径向畸变。

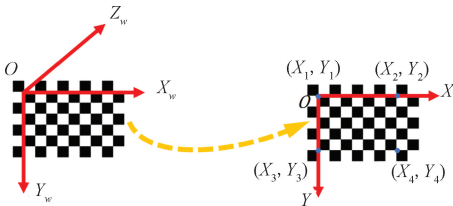


图 3 图像坐标系建立过程图

Fig. 3 Establishment process of the image coordinate system

根据交比性质,可建立等式,如式(2)所示。

$$\begin{cases} (x_1 - x_4)/(x_2 - x_4) = (X_1 - X_4)/(X_2 - X_4) \\ (y_1 - y_4)/(y_2 - y_4) = (Y_1 - Y_4)/(Y_2 - Y_4) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得缩放系数 a, c , 如式(3)所示。

$$\begin{cases} a = (X_1 - X_4)/(x_1 - x_4) \\ b = (X_2 - X_4)/(x_2 - x_4) \\ c = (Y_1 - Y_4)/(y_1 - y_4) \\ d = (Y_2 - Y_4)/(y_2 - y_4) \end{cases} \quad (3)$$

通过以下转换,能将任意像素坐标转换到图像坐标,如式(4)所示。

$$\begin{cases} X = a(x - x_4) + X_4 \\ Y = c(y - y_4) + Y_4 \end{cases} \quad (4)$$

1.4 摆角计算

记录下第一张图像标记点的坐标 P_0 , 之后的每一张图像的标记点依次记为 $P_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 由于成像平面离相机距离不变,相机焦距不变,并且相机拍摄的视野是固定的,因此可以将后面的标记点视为相对于 P_0 在运动,像素中的距离与实际距离相差两个缩放因子,需计算交比变换系数。绳长为 91 cm, 记为 l , 将 P_0 点、后续图像 P_i 以及相机光心所在点连接成三角形,摆角测量过程如图 4 所示。

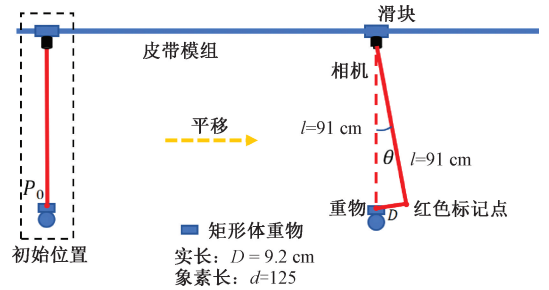


图 4 摆角测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of tilting angle measurement

由式(3)和(4)将像素坐标转换成图像坐标,接着计算后续标记点 $P_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 与 P_0 的实际距离 c , 通过余弦定理,由三边长可求出每一张图像对应的摆角,如式(5)所示。

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{l^2 + l^2 - c^2}{2l^4} \right) (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

1.5 摆角结果平滑

在理想状态下,结果为一条平滑的曲线,但在实际测量中,由于相机在运动过程中会存在微小的摆动,导致一些漂移点提取不准确,所以需要数据平滑处理。较好的平滑方式有递推均值滤波、高斯滤波等^[18]。高斯滤波需要选取一个合适的卷积核 k ^[19], 在实验中取 $k = (0.2, 0.6, 0.2)$, 由于拍摄过程是将连续过程分解为单一图像,导致均值滤波后极值有偏差,通过整体的极值来预估卷积核,可以解决这一问题。先计算原数据中所有 α 角极大值的均值 $\bar{\theta}_1$, 再计算进行均值滤波后的所有

极大值的均值 $\bar{\theta}_2$,通过变化量 $\Delta\bar{\theta}$ 确定卷积核,极小值处理方法相同,最后在交接处进行均值滤波,该值记为 $\theta_{b-1},\theta_b,\theta_{b+1}$,经过两次平滑后取得较好的效果,计算如式(6)所示。

$$\begin{cases} \theta_{b-1} = 0.2 \times (1 + |(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)|) \\ \theta_b = 0.6 \times (1 + |(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)|) \\ \theta_{b+1} = 0.2 \times (1 + |(\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)|) \end{cases} \quad (6)$$

2 实验与分析

2.1 实验器具及平台搭建

实验器具电源、数字步进电机驱动器、单片机、电机、滑块、皮带模组、重物、相机和 PC 组成。由单片机、驱动器和电机构成动力装置,其中相机为高清 500 万像素 USB 高帧率工业相机。相机作为采集装置固定在滑块上,在运动过程中连续拍摄目标,由 PC 端处理目标图像,进行摆角计算和平滑。被测摆角分别为绕 X 轴运动的 α 角以及绕 Y 轴运动的 β 角。将结果与传感器测出的值对比,验证准确性,传感器采用维特智能蓝牙 5.0 无线传输的加速度陀螺仪高精度姿态传感器,能实现 10^{-4}° 高精度的倾角测量。棋盘格标定板由 10×7 个方格组成,每个方格大小为 $25\text{ mm}\times25\text{ mm}$,预先置于相机正下方计算坐标转换系数。实验过程中进行两种运动模式下的测量,一种为二级梯形加速,先加速、匀速、再加速、再匀速、减速、匀速、再减速,直到速度减为 0,另一种为全过程匀速。相机每隔 10 ms 拍摄一次,变速情况下共拍摄了 406 张图像,匀速情况下拍摄了 261 张图像,每张图像的像素均为 640×480 。

采用普通的工业相机固定在滑块上,编写程序用 STM32F407 输入脉冲数控制步进电机转动,从而实现轴的运动。实验环境如图 5 所示。

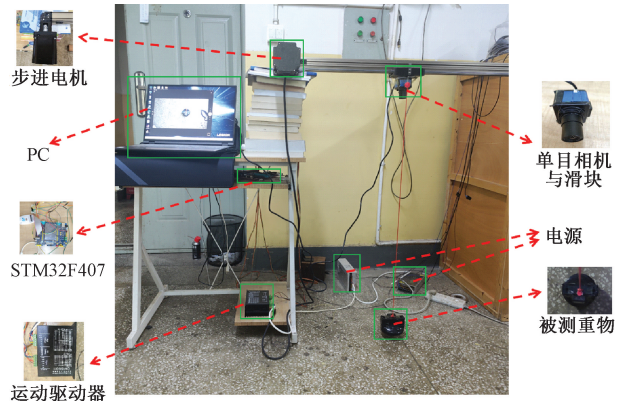


图 5 实验环境图

Fig. 5 Experimental environment diagram

在部署过程中,单目更具灵活性,占用空间小,降低了系统的复杂性和搭建难度。

2.2 标记点精度验证

预先在棋盘格上贴有已知标记点的坐标,用人工标注的方法标注标记点的亚像素坐标,并与已知坐标对比,误差均小于 0.1 像素,可将人工标注结果作为真实坐标。为验证本研究标记点检测方法的精度,对变速情况使用结合卡尔曼滤波的颜色空间转换法与人工标注对比,通过计算本研究方法到人工标注的亚像素坐标的欧氏距离的平方评价精度,欧式距离越小,表明提取精度越高。标记点提取结果如图 6 所示,图中绿框内的绿色点为标记点提取结果。每一帧图像提取结果精度统计如图 7 所示。

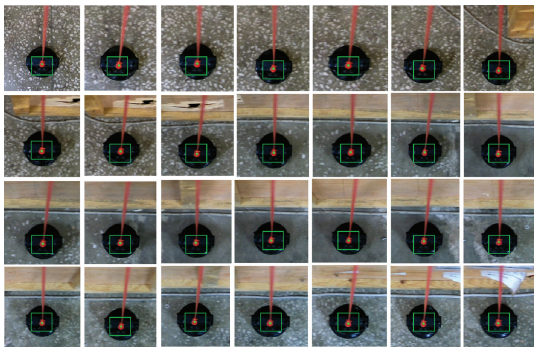


图 6 标记点提取结果

Fig. 6 Results of marker point extraction

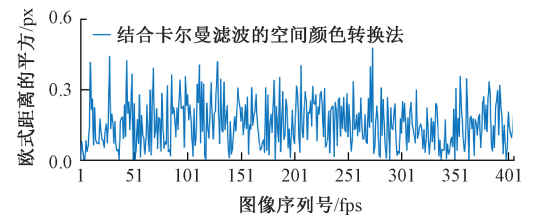


图 7 标记点提取结果精度分析图

Fig. 7 Accuracy analysis of marker point extraction results

采用该方法提取标记点,效率得到提升,标记点提取效率如表 1 所示。

表 1 标记点提取效率

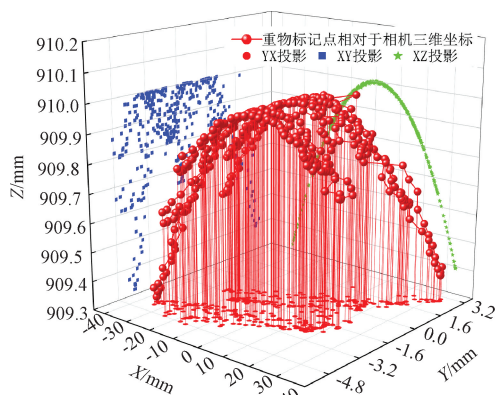
Table 1 Efficiency of marker point extraction		
方法	每一帧图像用时/ms	总用时/s
颜色空间转换法	2.2	0.9
结合卡尔曼滤波颜色空间转换法	1.5	0.6

图 7 表明,本研究方法标记点检测的精度较高,距人工标注的距离均小于 0.5 个像素。此外,由表 1 可知,结合卡尔曼滤波后总体提取时间加速了 0.3 s,比使用颜色空间转换法效率更高。

2.3 摆角测量有效性验证

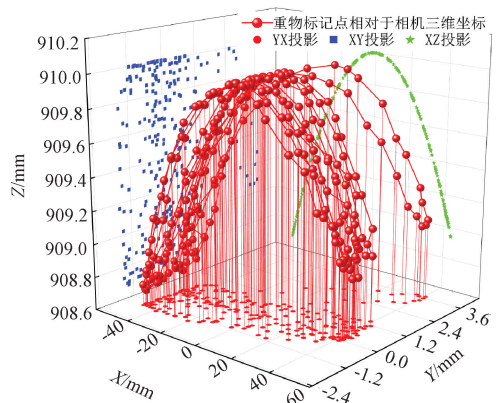
1) 重物标记点三维坐标

为了记录重物相对于相机的运动范围,采用列文伯格-马夸尔特(levenberg-marquardt, LM)算法求解透视-n-点^[20](perspective-n-points, PnP), PnP 能够估计出单目相机的位姿。先获取特征点对的像素坐标,输入已知的三维坐标和对应的二维像素坐标,由 PnP 算法求解出相机外参,通过重建三维坐标获得每个时刻重物的三维位置,以相机为坐标原点,竖直向下的方向为 Z 轴正方向,运动轴运动方向为 X 轴正方向,变速运动模式下重物位置如图 8 (a) 所示,匀速运动模式下重物位置如图 8 (b) 所示。由图可知,相对于相机,物体运动轨迹为一段圆弧,符合实际运动情况。



(a) 变速运动中重物标记点相对于相机三维坐标

(a) 3D coordinates of the marker point on the moving object variable speed relative to the camera



(b) 匀速运动中重物标记点相对于相机三维坐标

(b) 3D coordinates of the marker point on the object moving at constant speed relative to the camera

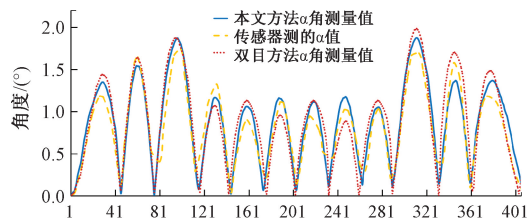
图 8 重物标记点相对于相机的三维运动情况

Fig. 8 3D motion of the marker points relative to the camera

2) 摆角计算结果

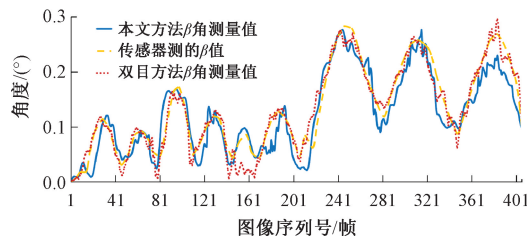
为提高计算效率,利用图形处理器 (graphic processing unit, GPU) 计算变速过程下的摆角。首先验

证传感器测量精度,采用不同的 4 个传感器同时测量摆角结果,同一时刻同一帧 4 个摆角结果一致,可将传感器测量结果作为真实值。同时,为了验证系统测量的准确度及效率,采用双目立体视觉的方法进行测量结果对比,变速情况下运动过程相同。以下是每一帧图像 α 角和 β 角的测量结果,在变速情况下测量结果如图 9 所示。对变速情况下 α 角进行不同平滑方式后的结果如图 10 所示。



(a) α 角计算结果图

(a) Diagram of α angle calculation results

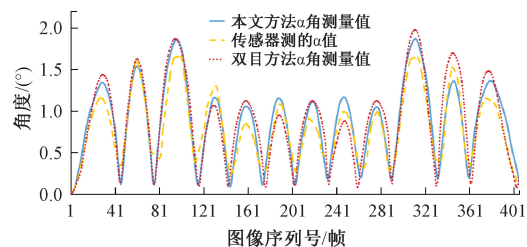


(b) β 角计算结果图

(b) Diagram of β angle calculation results

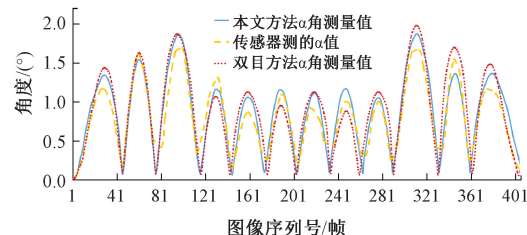
图 9 摆角计算结果图

Fig. 9 Diagram of tilting angle calculation results



(a) 均值滤波平滑后摆角计算结果图

(a) Diagram of tilting angle calculation results after mean filtering and smoothing



(b) 均值+高斯平滑后摆角计算结果图

(b) Diagram of tilting angle calculation results after mean and Gaussian filtering and smoothing

图 10 不同滤波平滑后摆角计算结果图

Fig. 10 Diagram of tilting angle calculation results after different filtering and smoothing

匀速过程中速度为 0.36 m/s,共拍摄了 261 张图像,计算结果如图 11 所示。同样对数据进行不同平滑,平滑结果如图 12 所示。

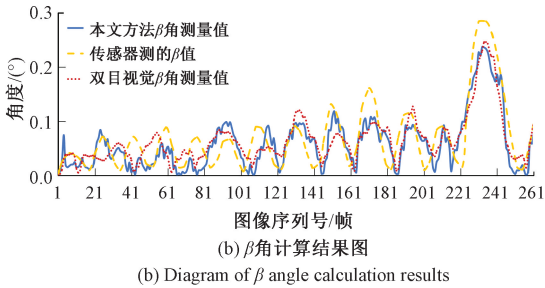
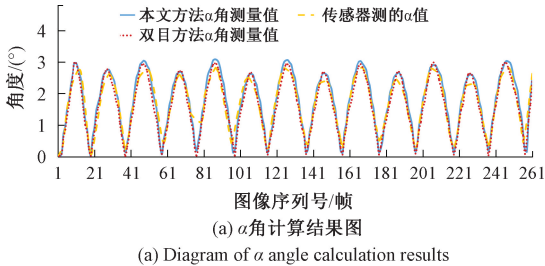


图 11 摆角计算结果图

Fig. 11 Diagram of tilting angle calculation results

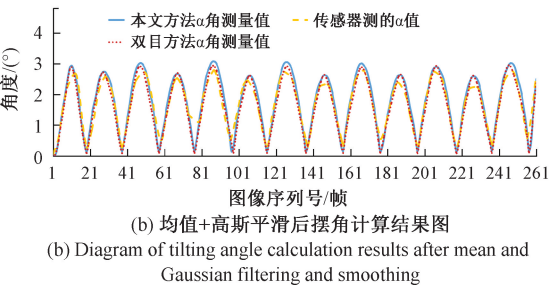
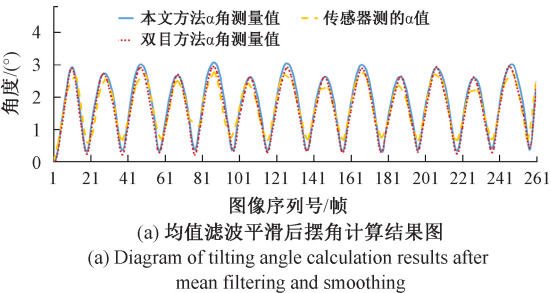


图 12 不同滤波平滑后摆角计算结果图

Fig. 12 Diagram of tilting angle calculation results after different filtering and smoothing

实验结果表明,本研究方法与进行标定的双目立体视觉方法摆角测量结果一致,但存在一些漂移值,且在极值处易丢失数据的真实性,采用上述方法进行高斯加均值滤波,能解决这一问题。

2.4 摆角测量准确度及效率验证

1) 摆角准确度验证

吊装负载动力控制领域, α 角的准确测量更具有现实意义,以下实验均以 α 角开展。针对 α 角,为了验证测量结果准确性,将传感器实测的数据作为真实值,进行平均值、最大值和极差以及本研究方法和双目立体视觉方法计算用时统计,最大差值指本研究方法和传感器同一时刻的角度最大差值,即摆角测量最大误差。实验中小数点后两位均能影响结果曲线,将传感器角度测量值及计算出的角度值均保留 3 位小数,统计结果如表 2 所示。

表 2 α 摆角测量精度分析

Table 2 Tilting angle measurement accuracy analysis (Angle α)

实验	平滑方法	测量方法	最大摆角/ ($^{\circ}$)	平均摆角/ ($^{\circ}$)	最大误差/ ($^{\circ}$)
变速	未平滑	传感器	1.786	0.810	
		本研究方法(1.2 s)	1.876	0.877	0.207 0
		双目方法(2.8 s)	1.985	0.896	0.314
	均值	传感器	1.732	0.809	
		本研究方法	1.868	0.877	0.267
		双目方法	1.976	0.896	0.301
匀速	高斯+均值	传感器	1.753	0.816	
		本研究方法	1.871	0.877	0.184
		双目方法	1.977	0.895	0.279
	未平滑	传感器	2.846	1.697	
		本研究方法(0.9 s)	3.084	1.791	0.238
		双目方法(2.1 s)	2.985	1.636	0.368
匀速	均值	传感器	2.760	1.699	
		本研究方法	3.069	1.791	0.356
		双目方法	2.948	1.637	0.426
	高斯+均值	传感器	2.782	1.699	
		本研究方法	3.075	1.791	0.259
		双目方法	2.949	1.627	0.312

注:“()”中的内容表示采用该方法计算摆角耗时量

与传感器测量数值越接近,则准确性越高,可靠性越强。该方法均方根误差(root mean square error, RMSE)为 0.006 9°,双目视觉的方法 RMSE 为 0.009 9°,由表 2 可知,进行均值平滑后极小值处误差较大,未平滑数据及进行高斯平滑后的数据最大差值均小于 0.3°。在变速和匀速两种状态下单目非标定方法与传感器的平均摆角的差值为 0.061°和 0.092°,双目方法与传感器的平均摆角的差值为 0.079°和 0.163°,相对于双目视觉精度提高了 0.018°和 0.021°。

2) 效率

采用双目方法进行动态摆角测量,先进行相机标定获取内外参,为后续三维重建做准备。同步采集左右目相机的图像序列,利用空间颜色转换法提取标记点中心的像素坐标,然后根据双目视觉原理计算视差并进行坐标转换,重建三维坐标,最后利用三角化计算摆角。本研

究方法则避免了三维坐标重建,基于交比进行坐标转换,如表 3 所示。
的该方法相较于双目视觉方法,有以下优势,

表 3 变速情况与双目立体视觉方法对比

Table 3 Comparison with the binocular stereo vision method under the variable speed condition					
	需提取特征点数量	坐标维度	是否需要标定	计算时间/s	最大角度差/(°)
本研究方法	一个	二维	无需标定	1.2(0.9)	0.184(0.259)
双目方法	多个	三维	需准确标定	2.8(2.1)	0.279(0.312)

注:“()”中的内容表示实匀速状态下的数据。
由表 3 可知,本研究方法在减少了空间复杂度的基础上,还提高了测量精度,计算效率提高 133.3%。

3) 最大摆角准确度

为了验证最大摆角的准确性,用 Image-J 软件测量最大摆角,Image-J 是一款强大的图像处理软件,能够精确测量角度。选择初始图像及摆动最大的图像,根据标记点位置和绳子位置的变化用 Image-J 测量摆角,并与单目非标定测量结果对比,数值越接近,结果越准确。结果如表 4 所示。

表 4 最大摆角验证

Table 4 Verification of maximum tilting angle		
运动状态	测量方式	最大摆角/(°)
变速	Image-J	1.90
	本研究方法	1.871
匀速	Image-J	3.04
	本研究方法	3.075

由表 4 可知,最大摆角与本研究方法计算出的结果接近,波动不超过 0.05°,具有可靠性。

实验结果表明,本研究方法能有效测量动态摆角,无需进行准确的相机标定,整个变速计算过程只需 1.2 s,匀速过程 0.9 s。不同方法测出的最大摆角一致,在变速情况下计算出的最大摆角为 1.871 5°,在匀速的情况下最大摆角为 3.075 2°。计算速度快,准确度高。

2.5 摆角测量方法的普适性验证

1) 不同形状不同重量的物体

针对 α 角为了验证该方法的普适性和适用范围,进行不同条件下的 α 摆角实验验证,包括不同大小和质量的摆动物体,并用与传感器的平均误差来衡量测量效果,两种运动模式下普适性验证如表 5、6 所示。

表 7 匀速运动下相机位置变化对 α 角影响

Table 7 The influence of camera position changes on angle measurement under variable speed motion (Angle α)					
方法	实验次数	无偏离	偏离 1°	偏离 2°	偏离 5°
标定方法与传感器最大角度差	第 1 次	0.279	0.352	0.387	0.442
	第 2 次	0.278	0.410	0.395	0.497
	第 3 次	0.276	0.316	0.456	0.584
非标定方法与传感器最大角度差	第 1 次	0.184	0.186	0.184	0.195
	第 2 次	0.185	0.187	0.186	0.193
	第 3 次	0.184	0.187	0.188	0.193

表 5 变速运动 α 角普适性验证

Table 5 Verification of universality for variable speed motion (Angle α)			
形状	重量/kg	最大摆角/(°)	平均误差/(°)
方体+圆环	0.7	1.871	0.067
方体	0.2	1.924	0.071
圆环块	0.5	1.857	0.055
球体	0.5	1.844	0.036
不规则铁块	0.48	1.906	0.071

表 6 匀速运动 α 角普适性验证

Table 6 Verification of universality for constant speed motion (Angle α)			
形状	重量/kg	最大摆角/(°)	平均误差/(°)
方体+圆环	0.7	3.075	0.092
方体	0.2	3.246	0.098
圆环块	0.5	3.097	0.082
球体	0.5	3.115	0.076
不规则铁块	0.48	3.146	0.089

实验结果表明,单目非标定方法能在不同运动情况下实现不同重量、不同形状物体的摆角准确测量,普适性强。

2) 相机位置变化

为验证对相机位置变化是否有影响,在运动过程使其位置发生微小变化,进行多次相同实验,每进行一次实验,都将相机取下后重新安装固定。相机位于被测物正上方,镜头光轴大致垂直于物体表面,以此记为无偏离的情况,用偏离角度作为相机微小变化程度,并用与传感器的最大角度差来评价两种方法的稳定性,差值越小,测量方法越可靠。两种运动模式下的结果如表 7、8 所示。

由表 7、8 可知,变速情况下通过标定计算出的值与传感器最大差超过 0.5°,相同情况下采用单目非标定方

表 8 变速运动下相机位置变化对 α 角影响

Table 8 The influence of camera position changes on angle measurement under constant-speed motion (Angle α)

方法	实验次数	无偏离	偏离 1°	偏离 2°	偏离 5°
标定方法与传感器最大角度差	第 1 次	0.312	0.412	0.453	0.572
	第 2 次	0.325	0.396	0.463	0.616
	第 3 次	0.365	0.476	0.517	0.580
非标定方法与传感器最大角度差	第 1 次	0.259	0.258	0.259	0.261
	第 2 次	0.258	0.264	0.260	0.256
	第 3 次	0.259	0.254	0.256	0.253

法最大差不超过 0.2°,匀速情况下通过标定计算出的值与传感器最大差超过 0.5°,相同情况下采用单目非标定方法最大差不超过 0.3°,采用标定的方法每次结果不一致,而非标定方法与之前的计算结果一致。双目视觉方法进行测量摆角得预先进行相机标定,相机位置不能发生变化,此外,在运动过程中如果相机位置发生改变,会导致测量结果产生偏差。单目非标定方法有效避免了这一问题,每次测量的结果一致,对相机位置发生微小变化无影响。

3 结 论

论文利用平面运动控制器实现单目相机连续拍摄被测物体,结合卡尔曼滤波的颜色空间转换法提取标记点,基于交比进行坐标转换,由标记点位姿变化结合视觉图像处理技术及滤波方法进行摆角准确测量,并用 Image-J 软件进行了最大摆角结果验证,解决了标定的偏差影响,降低了测量成本,提高了效率。该方法为摆角测量提供了新思路,在工程控制领域有广泛的应用前景。鉴于视觉方法在远距离拍摄、大幅震动等环境下效果不佳,后续研究将着重优化跟踪方法及图片质量,提高适应性。

参考文献

[1] 姚鑫亚,陈鹤. 基于扩张状态观测器的双摆吊车分层滑模控制[J]. 智能系统学报, 2024, 19(2): 344-352.

YAO X Y, CHEN H. Hierarchical sliding mode control of double-pendulum cranes based on extended state observer[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2024, 19(2): 344-352.

[2] SHI L Q, HE Y G, LUO Q W, et al. Research on the measurement method of tilt angle based on sensor data fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(7):1683-1689.

[3] 朱力,赵建学,薛斌,等. 基于拉线传感器的喷管摆角测试技术研究[J]. 新技术新工艺, 2021(12): 74-77.

ZHU L, ZHAO J X, XUE B, et al. Research on nozzle angle test technology based on cable tension sensor[J]. New Technology and New Process, 2021(12): 74-77.

[4] 刘蓬勃,王威,赵剑,等. 基于虚拟陀螺技术的车辆质心侧偏角估计[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(3): 1-6.

LIU P B, WANG W, ZHAO J, et al. Vehicle lateral sideslip angle estimation based on virtual gyroscope technology[J]. Experimental Science and Technology, 2022, 20(3):1-6.

[5] 许鹏,方勇纯,陈鹤. 基于背景建模的桥式吊车负载摆角测量算法[J]. 控制工程, 2019, 26(9): 1613-1619.

XU P, FANG Y CH, CHEN H. Load sway angle measurement algorithm for bridge crane based on background modeling[J]. Control Engineering, 2019, 26(9): 1613-1619.

[6] 张海峰,朱攀,周兴林. 单目视觉测量汽车最小转弯直径研究[J]. 中国测试, 2023, 49(3): 109-113.

ZHANG H F, ZHU P, ZHOU X L. Research on measurement of minimum turning diameter of vehicles using monocular vision[J]. China Measurement, 2023, 49(3): 109-113.

[7] 黄荔生,王花秀,鄢峰,等. 基于机器视觉的大型游乐设施摆角测量[J]. 特种设备安全技术, 2024, 1(1): 42-44.

HUANG L SH, WANG H X, YAN F, et al. Swing angle measurement of large amusement rides based on machine vision[J]. Special Equipment Safety Technology, 2024, 1(1): 42-44.

[8] 叶雪轲,甘叔玮,张小虎,等. 绳索摆角高精度视觉测量系统设计及其在悬吊式重力补偿系统中的应用[J]. 实验力学, 2021, 36(6): 735-745.

YE X ZH, GAN SH W, ZHANG X H, et al. Design of a high-precision vision measurement system for rope swing angle and its application in suspended gravity compensation systems [J]. Experimental Mechanics, 2021, 36(6): 735-745.

[9] YANG M, WANG Y, ZHI H, et al. A monocular vision-based decoupling measurement method for plane motion orbits[J]. Measurement, 2022, 187:110312.

[10] 刘建国,徐为民. 基于单目视觉实时测量桥式起重机负载摆角[J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(1): 22-29.

- LIU J G, XU W M. Real-time measurement of load sway angle for bridge crane based on monocular vision [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2022, 43(1): 22-29.
- [11] 郭继平, 李阿蒙, 于冀平, 等. 双目立体视觉动态角度测量方法[J]. 中国测试, 2015, 41(7): 21-23.
GUO J P, LI A M, YU J P, et al. Dynamic angle measurement method based on binocular stereo vision[J]. China Measurement, 2015, 41(7): 21-23.
- [12] ZHANG D, YANG Y X, HAN H Z, et al. Binocular visual pendulum angle detection and anti-swing control of quadrotor suspension system [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2023, 45(4): 723-735.
- [13] 顾明, 郑林涛, 尤政. 基于颜色空间转换的交通图像增强算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1901-1907.
GU M, ZHENG L T, YOU ZH. Traffic image enhancement algorithm based on color space transformation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1901-1907.
- [14] 李佳田, 阿晓荟, 王聪聪, 等. 利用高帧频相机检测运动控制轴精细形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 388-395.
LI J T, A X H, WANG C C, et al. Detection of fine deformation of motion control axis using high-frame-rate camera [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(3): 388-395.
- [15] 杨弘凡, 李航, 陈凯阳, 等. 基于改进 ORB 算法的图像特征点提取与匹配方法[J]. 图学学报, 2020, 41(4): 548-555.
YANG H F, LI H, CHEN K Y, et al. Image feature point extraction and matching method based on improved ORB algorithm[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(4): 548-555.
- [16] 高凤强, 王若宇, 曹光求, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的疏散行人密度预测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024(5): 1-9.
GAO F Q, WANG R Y, CAO G Q, et al. Research on pedestrian density prediction algorithm based on extended Kalman filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024(5): 1-9.
- [17] 华岑, 傅骁, 段发阶, 等. 基于射影不变量的多点坐标匹配方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 244-254.
HUA C, FU X, DUAN F J, et al. Multi-point coordinate matching method based on projective invariants [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(10): 244-254.
- [18] 周巍巍, 高银, 吴仪芳, 等. 局部高斯均差变分保边图像平滑算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 94-107.
ZHOU W W, GAO Y, WU Y F, et al. Local Gaussian difference variation preserving image smoothing algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 94-107.
- [19] 博浩, 杜劲松, 王林松, 等. 基于后向递推与扩展指数的球谐域高斯滤波系数高精度计算方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(9): 963-969.
BO H, DU J S, WANG L S, et al. High-precision calculation method of spherical harmonic domain Gaussian filter coefficients based on backward recursion and extended exponentials [J]. Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(9): 963-969.
- [20] 李凯林, 李建胜, 王安成, 等. 单目视觉里程计姿解算质量评估因素分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 175-183.
LI K L, LI J SH, WANG AN CH, et al. Analysis of factors affecting the quality evaluation of monocular visual odometry pose estimation [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 175-183.

作者简介



非正亮, 2022 年于昆明理工大学获得学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为摄影测量技术与机器视觉。
E-mail: 2393812884@qq.com

Fei Zhengliang received his B. Sc. degree in 2022 from Kunming University of Science and Technology. Now he is a M. Sc. candidate in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include photogrammetry and machine vision.



李佳田(通信作者), 2007 年于中国矿业大学(北京)获得博士学位, 现为昆明理工大学教授, 主要研究方向为摄影测量和数值最优化方法。
E-mail: ljtwex@163.com

Li Jiatian (Corresponding author) received her Ph. D. degree in 2007 from China University of Mining and Technology-Beijing. Now he is a professor in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include photogrammetry and numerical optimization method.



何烽, 2022 年于莆田学院获得学士学位, 现为昆明理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为摄影测量与机器视觉。
E-mail: 1305559198@qq.com

He Feng received his B. Sc. degree in 2022 from Putian University. Now he is a M. Sc. candidate in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include photogrammetry and machine vision.