

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413010

载荷摆运动参数测量的射影校正法*

何 烽, 李佳田, 阿晓荟, 刘佳音

(昆明理工大学国土资源工程学院 昆明 650093)

摘要:精确测量载荷摆运动参数对起重运输的消摆控制至关重要。但现有单幅图像射影校正测量法因易受背景等因素干扰,导致共面直线约束提取难度增加,从而影响测量精度。为此,提出一种时序图像动态直线约束的射影校正法。首先,从特定时序图像中提取动态直线,并通过改进随机样本一致算法聚类,以确立直线约束;其次,根据直线约束采用列文伯格-马夸尔特(LM)迭代法估计灭点和绝对二次曲线,计算校正矩阵;最后,利用校正矩阵对标记点坐标进行校正,并推算摆角和小车速度。试验结果表明,本文方法较惯性测量单元测角的均方根误差为 0.124° ,较设置小车速度的均方根误差为 0.0036 m/s ;同时,与逆透视校正法、单幅图像共面直线约束和非共面直线约束的射影校正法相比,测角精度分别提高69.05%、76.35%和93.91%,测速精度分别提高42.85%、47.06%和59.55%,表明方法可有效提高载荷摆运动参数测量精度。

关键词: 载荷摆; 运动参数; 射影校正; 动态直线; 单目视觉

中图分类号: TH215 P235.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.20

Measurement of the kinematic parameters of payload swing using projective correction

He Feng, Li Jiatian, A Xiaohui, Liu Jiayin

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

Abstract: Accurate measurement of the kinematic parameters of payload swing is crucial for lifting and transporting dissipative swing control. However, the existing single-image projective correction methods are susceptible to the interference of background and other factors. It is difficult to automatically extract the coplanar straight-line constraints, thus restricting the measurement accuracy. To address this problem, a projective rectification method is proposed that utilizes dynamic line constraints from temporal image sequences. Firstly, dynamic straight lines are extracted from specific temporal images through the integration of background differencing and color thresholding methods. Subsequently, clustering is performed using an improved random sample consensus algorithm, thereby establishing reliable constraint conditions. Secondly, the Levenberg-Marquardt iterative method is used to estimate the vanishing point and the absolute quadratic curve based on the linear constraints. Then, the correction matrix was calculated. Thirdly, the coordinates of the marker points are rectified, which are employed to calculate the swing angle and trolley speed. In the measurement of kinematic parameters of the payload swing, the aforementioned method achieves a root mean square error of 0.124° in comparison with angle measurement by the inertial measurement unit, and a root mean square error of 0.0036 m/s in comparison with the set trolley speed. Compared with the inverse perspective correction method, the projective correction method with coplanar linear constraints and non-coplanar linear constraints, the angular accuracy is improved by 69.05%, 76.35%, and 93.91%, and the velocity accuracy is improved by 42.85%, 47.06%, and 59.55%, respectively. The proposed method utilizes the swing string in the payload swing as constraint for projective rectification, aiming to obtain richer and more precise constraint conditions, thereby enabling superior measurement precision of kinematic parameters in the payload swing.

Keywords: payload swing; kinematic parameters; projective correction; dynamic lines; monocular vision

0 引 言

消摆控制对提升起重运输的安全性、效率和自动化水平至关重要,而载荷摆动参数测量是消摆闭环反馈中的重要环节^[1-3]。目前,载荷摆动参数测量主要关注摆角与小车速度两个参数,测量方式分为接触式与非接触式两种。接触式测量包括射频识别(radio frequency identification, RFID)技术^[4]、超宽带(ultra-wide band, UWB)技术^[5]和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)技术^[6-7]。RFID 通过天线阵列追踪标签位置来测量摆动参数,具有精度高、频带宽等优点,但在金属环境中 RFID 标签无法被准确读取,导致测量误差较大。UWB 利用脉冲信号时间差进行定位,穿透能力强,但在多路径干扰下其精度受限。IMU 通过测量加速度和角速度来推算运动参数,但积分累计误差会导致数据漂移。此外,高温和强磁环境会导致上述接触式设备性能下降。

非接触式测量主要采用视觉传感器,具有灵活性高和适应能力强等优势^[8-9],但相机成像模型中的透视畸变会造成测量偏差。因此,在视觉测量领域所面临的主要挑战是消除透视畸变以恢复度量性质。目前,相关研究主要围绕正射摄影、逆透视校正与射影校正 3 方面展开。其中,正射摄影法通过严格确保相机主轴垂直于测量平面来消除透视畸变。如 Huang 等^[10]提出桥式起重机载荷摆角的正射摄影测量法;Yang 等^[11]提出结合 Zernike 矩亚像素边缘提取法与平面运动解耦模型的正射摄影测量法。然而,因实际应用中受环境和操作限制,难以保持相机主轴垂直于测量平面,从而影响正射摄影测量精度。逆透视校正法则基于相机固有和位姿参数进行逆向映射校正透视畸变。如 Oliveira 等^[12]提出融合多模态传感器的逆透视校正模型;胡钊政等^[13]提出利用逆透视差分的障碍物检测方法;Yang 等^[14]提出利用灭点计算标定参数的逆透视算法。该类方法可克服正射摄影法对拍摄角度的严格限制,但在位姿变化后需重新标定相机,且难以确保标定平面与测量平面对齐。射影校正法选取单幅图像的共面直线为约束,通过求解单应性矩阵校正透视畸变。如 Sun 等^[15]提出基于两组正交平行线对的单幅图像射影校正方法;Zhang 等^[16]提出利用太阳能板平行线校正轨相机畸变的方法;卢昱杰等^[17]和 Chai 等^[18]提出基于无穷远直线和绝对二次曲线的射影校正法;Luo 等^[19]和 Guo 等^[20]提出利用等距平行线来校正图像度量性质的方法。该方法以测量平面中的直线为约束,有效避免逆透视校正法中标定和测量平面不一致的问题,且无需标定相机位姿。虽然这种方法表现出色,但载荷摆运动的测量平面是由摆绳摆动构成的虚拟平面,不易被直接观测,且受非测量平面的背景直线干扰,难以自动提取有

效直线约束,导致运动参数的测量精度较低。

为此,本文提出一种时序图像动态直线约束的射影校正方法,利用载荷摆动摆绳位于测量平面的特性,来确保所提取直线的共面性,并增加有效约束条件。在提取动态直线后,采用改进的随机样本一致(random sample consensus, RANSAC)算法聚类直线,滤除模糊约束。此外,在射影校正矩阵计算中,利用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)迭代法估计灭点和绝对二次曲线,提高校正矩阵的鲁棒性和准确性。试验结果表明,本文方法能更精确地测量载荷摆动参数。

1 动态直线约束的射影校正法

1.1 约束条件确立

直线是射影校正的关键约束,而镜头径向畸变会导致图像中的直线扭曲为曲线,破坏其保线性。鉴于差分模型^[21]在计算效率和精度上的优势,本文选用该模型进行校正,表达式如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} + L(r) \cdot \begin{bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $(\hat{x}, \hat{y}, 1)^T$ 、 $(x, y, 1)^T$ 与 $(x_c, y_c, 1)^T$ 分别为无畸变图像点、畸变图像点和畸变中心。 $L(r)$ 是关于径向距离 $r = \|(x, y, 1)^T - (x_c, y_c, 1)^T\|$ 的函数,由泰勒展开式近似可得:

$$L(r) = \frac{1}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4} \quad (2)$$

式中:畸变参数(k_1, k_2)为已知参数。

校正径向畸变后提取直线,一般的射影校正方法选取单幅图像共面直线为约束,所需必要约束条件为铅锤和水平方向的平行线各一对。但载荷摆运动的测量平面难以被直接观测,且直线提取算法因背景干扰导致所提取直线可能非共面或偏离测量平面。因此,本文根据载荷摆绳在测量平面运动的特性来提取动态直线,从而强化直线的共面性,并增加约束条件。摆绳在静止时为铅锤线,摆动过程中摆绳抵达铅垂位置一次便新增一条铅锤方向平行线,如图 1 所示。摆绳在铅垂位置时,标记小球拟合的直线提供水平方向平行线,但绳长需保持不变。摆绳抵达铅垂位置的图像可以通过激光对射触发器标记,结合摆绳静止时的图像与这一特定时序图像,即可满足射影校正所需约束条件。随着标记时序图像数量的递增,约束条件亦会增加,这有利于增强系统的鲁棒性和精度。

1.2 时序图像直线约束提取

为从标记时序图像中提取动态直线和标记小球,本

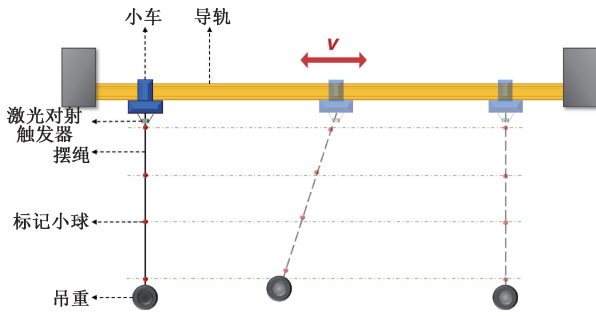


图1 载荷摆运动示意图

Fig. 1 Schematic chart of the payload swing

文采用融合背景差分与色调饱和度亮度 (hue saturation value, HSV) 分割的方法^[22]。首先,利用混合高斯模型进行背景建模,通过背景差分捕捉运动物体的位置。其次,在 HSV 空间中使用色彩阈值分割出目标区域。接着,将背景差分与 HSV 分割的结果进行“与”运算,并进行形态学操作以去除噪声和优化目标轮廓。最后,运用霍夫变换从中识别出直线和圆两种形状。

由于提取过程可能引入离群线,所以需利用 RANSAC 算法^[23]来聚类直线并剔除离群线。但 RANSAC 算法为兼顾直线聚类需采用较大阈值,这可能导致约束条件的模糊性,从而影响到后续灭点和绝对二次曲线估计的准确性。为此,对 RANSAC 算法进行改进,在判断内群的原有逻辑上增加阈值判断,以更精细地区分可靠的直线约束,表达式如下:

$$\begin{cases} \text{in-group,} & d_{\perp}^2 < \theta_1^2 \begin{cases} \text{strong-support,} & d_{\perp}^2 < \theta_2^2 \\ \text{weak-support,} & \theta_2^2 < d_{\perp}^2 < \theta_1^2 \end{cases} \\ \text{out-group,} & d_{\perp}^2 \geq \theta_1^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d_{\perp}$ 表示点到直线的垂直距离; θ_1 表示 RANSAC 阈值,为保证亚像素精度一般取 1.2; θ_2 表示强支持阈值。

1.3 射影校正矩阵估计

从时序图像提取动态直线约束后,先估计灭点和绝对二次曲线,再计算射影校正矩阵。其中,最小必要约束

法是估计灭点和绝对二次曲线的常规方法,即根据必要约束条件利用最小二乘法求解,但其抗噪能力弱,易受约束细微异常影响。考虑到上述所获约束超过必要约束,且 LM 迭代法^[24]兼顾稳定性和快速收敛的特点,因此本文选用此方法来优化估计灭点和绝对二次曲线。利用提取的动态直线中两个方向上的平行线作为约束条件估计灭点,同一方向上平行线的像都将交于对应灭点 v_h 和 v_z ,存在如下关系:

$$D \cdot v = b \quad (4)$$

式中: $D_{n \times 3}$ 为 n 条同方向平行线齐次坐标所构成的矩阵; b 是由像素误差和噪声造成的残差; v 为对应的灭点 v_h 、 v_z 。通过 LM 迭代法最小化代价函数 $\|b\|$,估计最优灭点,则最优灭线为 $L_v = v_h \times v_z$ 。

通过构造变换矩阵 H 将灭线 $L_v = (l_1, l_2, l_3)^T$ 映射到无穷远直线 $L_{\infty} = (0, 0, 1)^T$ 即可实现仿射校正,变换矩阵为:

$$H = H_A \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ l_1 & l_2 & l_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: H_A 为 3×3 的仿射变换, $(l_1, l_2, l_3)^T$ 为灭线 L_v ,可得到:

$$H^{-T} L_v = H^{-T} [l_1 \ l_2 \ l_3]^T = L_{\infty} \quad (6)$$

通过求得变换矩阵 U^T 使得对偶二次曲线的像 C_{∞}^{*} 恢复为 C_{∞}^* ,即可将几何失真校正到相差一个相似变换, C_{∞}^{*} 是由正交直线的像 L, M 按式(6)进行仿射校正后得到的 L', M' 作为约束条件确定,推导过程如下:

$$\begin{aligned} L^T C_{\infty}^{*} M' &= L^T U C_{\infty}^* U^T M' = \\ L^T \begin{bmatrix} K_{2 \times 2} & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{2 \times 2}^T & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} M' &= \\ L^T \begin{bmatrix} K K^T & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} M' &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: U 为 3×3 仿射变换矩阵,仿射成 K 为 U 的分块矩阵。此外, KK^T 为对称矩阵并有 3 个独立元素 k_{11}, k_{12}, k_{22} 。由 n 组直线 L', M' 作为约束条件计算 KK^T 的方程组如下:

$$\begin{bmatrix} l'_{11} m'_{11} / l'_{13} m'_{13} & l'_{11} m'_{12} / l'_{13} m'_{13} + l'_{12} m'_{11} / l'_{13} m'_{13} & l'_{12} m'_{12} / l'_{13} m'_{13} \\ l'_{21} m'_{21} / l'_{23} m'_{23} & l'_{21} m'_{22} / l'_{23} m'_{23} + l'_{22} m'_{21} / l'_{23} m'_{23} & l'_{22} m'_{22} / l'_{23} m'_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l'_{n1} m'_{n1} / l'_{n3} m'_{n3} & l'_{n1} m'_{n2} / l'_{n3} m'_{n3} + l'_{n2} m'_{n1} / l'_{n3} m'_{n3} & l'_{n2} m'_{n2} / l'_{n3} m'_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{12} \\ k_{22} \end{bmatrix} = b \quad (8)$$

式中: $(l'_{n1}, l'_{n2}, l'_{n3})^T, (m'_{n1}, m'_{n2}, m'_{n3})^T$ 分别为第 n 条 L', M' 直线的齐次表示。同理,通过 LM 迭代最小化代价函数 $\|b\|$ 估计右零向量,即估计最优 KK^T 矩阵。随后,进一步对其进行 Cholesky 分解获得 K ,即可获得变换矩阵 U^T 。最终获得的射影校正矩阵为:

$$E = U^T H \quad (9)$$

1.4 运动参数计算

得到射影校正矩阵后,即可应用于图像度量性质校正。由于摆绳两端标记小球直接关联运动参数的推算,因此仅校正其质心坐标以减少计算负担。根据式(9)得

到的校正矩阵 $\mathbf{E}$ 对质心坐标进行校正:

$$\begin{bmatrix} u' & v' & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{E} \cdot \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T \tag{10}$$

式中: $(u, v, 1)^T$ 为校正前质心坐标。校正后, 图像上两点与真实世界中对应两点之间的距离之比即为长度性质的尺度因子 j , 角度性质则与实际角度性质一致。

时序图像中, 同名像点的相对位移和绝对位移利用欧几里得距离公式可求得:

$$\Delta s_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \tag{11}$$

$$s_i = \sum_{t=1}^i \Delta s_t \tag{12}$$

式中: (x_i, y_i) 为当前帧中坐标; (x_{i-1}, y_{i-1}) 为其在前一帧中的坐标。速度可由式 (11) 进一步求得:

$$v_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t} \tag{13}$$

式中: Δt 为帧间采样时间。摆角由余弦定理求得, 若已知图像上 3 个坐标点分别为当前帧小车端标记点 $a(x_i, y_i)$ 、当前帧摆锤端标记点 $b(x_d, y_d)$ 和初始帧小车端标记点 $c(x_e, y_e)$, 组成的直线向量为:

$$\mathbf{ba} = (x_i - x_d, y_i - y_d) \tag{14}$$

$$\mathbf{ac} = (x_e - x_i, y_e - y_i)$$

其夹角由三角函数变换求得:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\mathbf{ba} \cdot \mathbf{ac}}{|\mathbf{ba}| |\mathbf{ac}|}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \tag{15}$$

由此得出的角度减去初始静止时的角度便可获得运动过程的摆角。

2 试验与分析

试验装置如下: 1) 海康威视 MV-CA050-20UC 工业相机, 分辨率 1 920×1 080 pixels, 帧率 64 fps, 传感器类型 COMS; 2) 维特智能 WITMOTION BWT901BLECL5.0 姿态传感器, 内置卡尔曼滤波角度校正算法, 俯仰、横滚角倾角精度为 0.2°; 3) 正点原子 STM32F407 开发板; 4) 博亿 ER2-22LV 激光对射触发器, 光点大小 2 mm, 响应时间 ≤ 100 μs。

2.1 算法有效性验证

算法有效性验证试验主要对改进 RANSAC 算法和灭点、绝对二次曲线 LM 迭代算法进行验证。试验数据集的构建借鉴关于不同视角相机校正精度验证的方法, 该方法不仅可避免单一视角可能带来的偶然性偏差, 还通过增加样本量提高了统计分析的可靠性。同时, 棋盘格图像提供亚像素精度角点, 能够自动获取准确的共面平行线信息, 从而精确计算灭点位置, 避免人工标注的不确定性。因此, 本文采集 200 幅不同视角下的棋盘格标定板图像作为数据集, 其中部分数据集图像如图 2 所示。

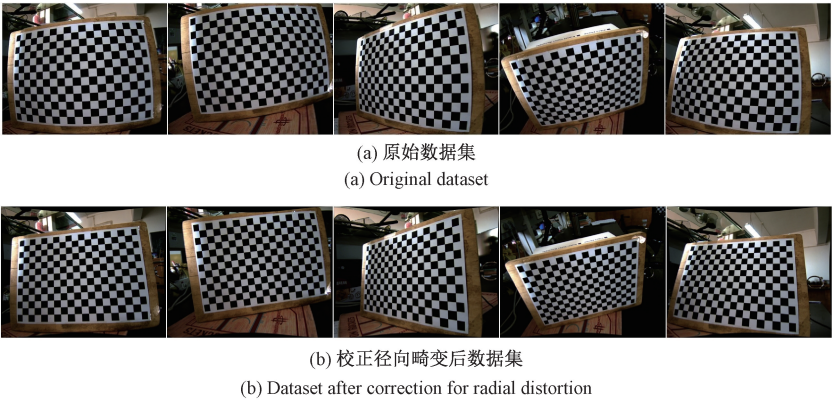


图 2 棋盘格图像数据集
Fig. 2 Checkerboard image dataset

1) 改进 RANSAC 算法有效性验证
为了验证改进 RANSAC 算法滤除模糊约束的有效性, 利用人工、RANSAC 算法和改进 RANSAC 算法从棋盘格标定板图像中提取平行线, 并计算灭点。最后, 利用计算的灭点与其准确值的几何误差来评估各算法的性能, 平均误差结果如表 1 所示。
试验结果表明, 人工确立平行线约束的灭点误差最大。RANSAC 算法因约束条件的模糊性, 估计的灭点

表 1 灭点几何误差统计	
Table 1 Vanishing point geometry error statistics	
约束建立方法	灭点几何误差/pixels
人工选取	267.433 1
RANSAC 算法	146.939 2
本文方法	64.561 1

误差较大。而改进 RANSAC 算法得到的灭点精度比 RANSAC 算法提升了 56.06%,说明该算法能有效滤除模糊约束,证明其有效性。

2) 灭点、绝对二次曲线迭代估计法有效性验证

为验证 LM 迭代法估计灭点和绝对二次曲线的有效性,利用逆透视校正法、等距平行线法、最小必要约束法、LM 迭代法以及结合改进 RANSAC 与 LM 迭代法对棋盘格标定板图像进行校正。棋盘格标定板中,每个角点与相邻 4 个角点构成的角度真值为 90°,且角点间距离相等。因此,可通过计算校正后棋盘格的角度、长度比与其真值间的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评估校正效果。

为排除棋盘格图像校正试验结果是偶然因素所引起,先进行统计显著性检验,设置显著性水平为 0.05,试验结果虽服从正态分布,但不满足方差齐性,故选择 Kruskal-Wallis H 检验法^[25],比较结果如表 2 所示。

表 2 显著性检验参数

Table 2 Parameter table of significance test

组别	角度 p 值	长度比 p 值
存在-消除镜头畸变*	0.000	0.000
逆透视-等距平行线*	0.017	0.000
逆透视-最小必要约束*	0.000	0.000
逆透视-LM 迭代*	0.013	0.000
逆透视-本文方法*	0.019	0.000
等距平行线-最小必要约束*	0.000	0.015
等距平行线-LM 迭代*	0.000	0.000
等距平行线-本文方法*	0.016	0.000
最小必要约束-LM 迭代*	0.013	0.000
最小必要约束-本文方法*	0.000	0.000
LM 迭代-本文方法*	0.000	0.003

注: * 表示具有显著性差异

表 2 中所有比较的 p 值均显示显著性差异 ($p < 0.05$),这表明不同校正方法在测量角度和长度上的表现存在显著差异。试验结果如图 3 和表 3 所示。

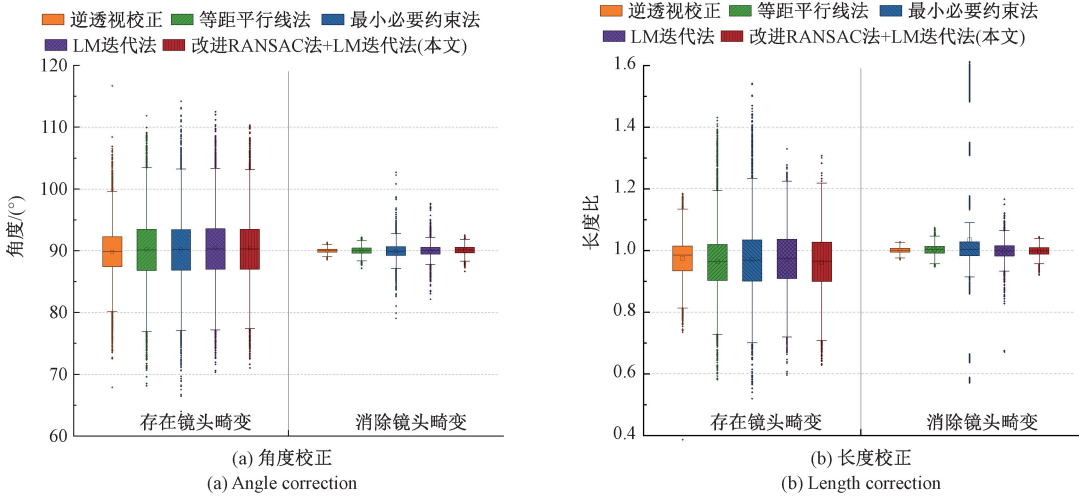


图 3 图像度量性质校正对比

Fig. 3 Comparison chart of image metric property corrections

通过分析图 3 及表 3 发现,径向畸变对度量校正效果有显著影响。试验严格确保标定平面与测量平面为同一平面,故逆透视校正法表现最佳。等距平行线法避免灭点估计不稳定问题,故校正效果较稳定。最小必要约束法由于约束条件的模糊性,导致稳定性和校正效果较差。LM 迭代法的角度和长度比校正效果比最小必要约束法提升了 20.15% 和 86.61%,证明该方法能提高估计精度。结合改进 RANSAC 和 LM 迭代法的角度和长度比校正效果比 LM 迭代法提升了 44.12% 和 34.83%,进一步验证改进 RANSAC 算法能滤除模糊约束,提升灭点和绝对二次曲线估计的精度。

2.2 载荷摆动运动参数测量

上述试验已验证,结合改进 RANSAC 与 LM 迭代估计的射影校正法在度量性质校正方面的有效性。因此,本节试验将该算法分别与单幅图像共面直线、单幅图像非共面直线和时序图像动态直线 3 种约束条件相结合,用于载荷摆动运动参数测量。由于单幅图像共面直线约束无法从场景中提取有效约束,故试验借助标定板将直线范围限制在标定板内,这虽能排除非共面直线的干扰,但仍无法确保标定板和测量平面对齐。试验场景布置如图 4 所示,小车放置在水平导轨上,激光对射触发器安装于小车,并保持光点对准摆绳。相机置于测量平面前,

表 3 图像度量性质统计分析表

Table 3 Statistical analysis table of image metrics

镜头畸变	校正方法	角度标准差/(°)	角度 RMSE/(°)	长度比标准差	长度比 RMSE
存在	逆透视校正	4.685 9	4.688 9	0.065 9	0.070 8
	等距平行线法	5.628 9	5.617 8	0.099 3	0.116 4
	最小必要约束法	5.691 0	5.694 6	0.118 5	0.126 2
	LM 迭代法	5.646 9	5.680 8	0.106 6	0.119 5
	本文方法	5.587 1	5.590 8	0.095 1	0.104 0
消除	逆透视校正	0.371 9	0.374 2	0.009 1	0.009 2
	等距平行线法	0.521 6	0.528 8	0.015 6	0.015 2
	最小必要约束法	1.254 5	1.235 5	0.193 9	0.199 4
	LM 迭代法	0.985 5	0.986 5	0.026 9	0.026 7
	本文方法	0.550 7	0.549 4	0.016 8	0.017 4

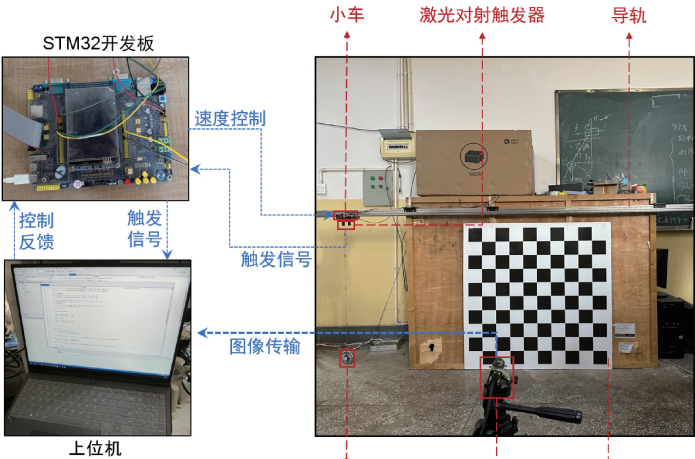


图 4 试验场景布置

Fig. 4 Experimental scene layout chart

IMU 安装于吊重中心,摆绳上附有标记小球用于跟踪。STM32 开发板连接电机和激光对射触发器,负责小车速度控制与触发信号接收。上位机连接 STM32 开发板和相机,用于图像采集和控制反馈。

为确保在同一数据集上验证,正式采集数据前先借助标定板完成逆透视校正法、单幅图像共面直线约束情形的校正矩阵计算。随后,在保持相机位姿不变的情况下撤去标定板,开始正式采集数据。在小车匀速和二级加速运动模式下,分别拍摄两组时序图像,提取其摆绳两端标记小球质心坐标,并应用所得校正矩阵对其进行校正,以此推算载荷摆运动参数。

为排除不同方法所测摆角、速度和运动轨迹由偶然因素造成,对试验结果进行统计显著性检验,设置显著性水平为 0.05,试验结果不服从正态分布,因此选择

Kruskal-Wallis H 检验法,比较结果如表 4 所示。

表 4 显著性检验参数

Table 4 Parameter table of significance test

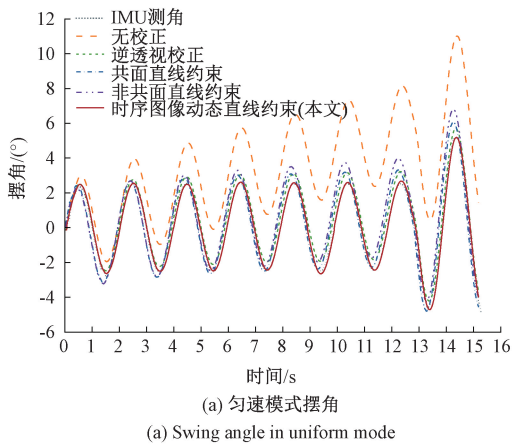
组别	摆角 p 值	速度 p 值	运动轨迹 p 值
逆透视校正-共面直线约束 *	0.039	0.042	0.025
逆透视校正-非共面直线约束 *	0.000	0.000	0.000
逆透视校正-本文方法 *	0.000	0.000	0.000
共面直线约束-非共面直线约束 *	0.000	0.001	0.000
共面直线约束-本文方法 *	0.003	0.000	0.000
非共面直线约束-本文方法 *	0.000	0.000	0.000

注: * 表示具有显著性差异

表 4 中所有 p 值均显示显著性差异($p < 0.05$),这

表明不同方法对测量摆角、速度和运动轨迹上的表现确实存在显著影响。

1) 摆角精度分析



摆角由式 (15) 计算得出,测角对比结果如图 5 所示。通过计算所测摆角与 IMU 测角的 RMSE,来评估测量精度,结果如表 5 所示。

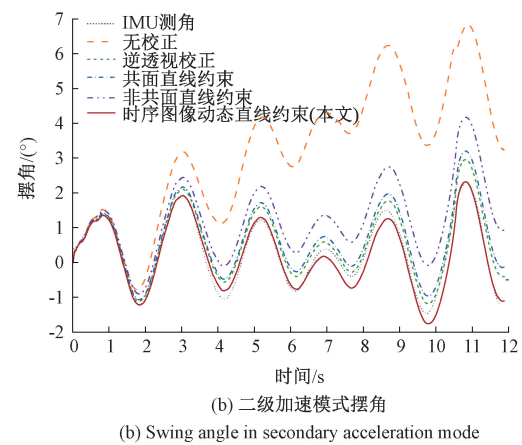


图 5 摆角测量对比
Fig. 5 Comparison chart of swing angle measurement

表 5 摆角测量分析表

Table 5 Swing angle measurement analysis table

校正方法	与 IMU 测角 RMSE/(°)
无校正	3.594 9
逆透视校正	0.402 9
共面直线约束	0.527 2
非共面直线约束	2.047 9
本文方法	0.124 7

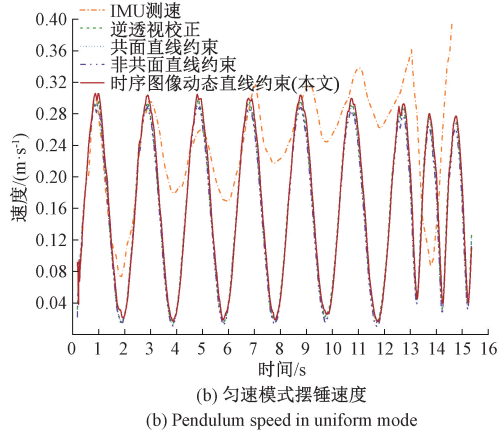
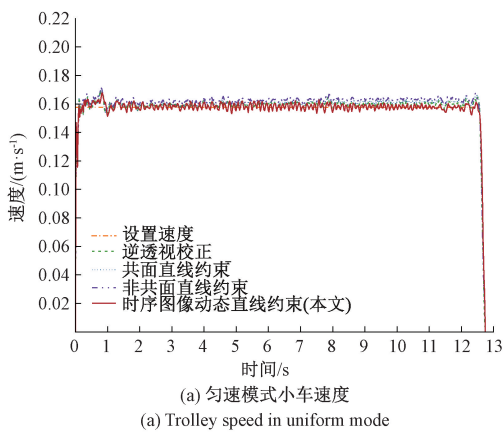
由图 5 和表 5 可知,未经过校正的视觉方法测得摆角偏差显著,不具备实用性。非共面直线约束情形由于背景直线干扰,结果偏差较大。共面直线约束情形和逆透视校正法的摆角测量结果出现偏离趋势,这是由于标定平面与测量平面偏离所致。相比之下,本文方法表现出较高的稳定性和准确性,其测角精度比逆透视校正法

提升了 69.05%,比共面直线约束情形提升了 76.35%,比非共面直线约束情形提升了 93.91%,验证了该方法能够提升摆角测量精度。

2) 速度精度分析

小车和摆锤的速度由式 (13) 计算得到,得到的速度如图 6 所示。通过计算测得小车速度与设定的小车速度的 RMSE 作为速度精度指标,结果如表 6 所示。

由图 6 和表 6 可知,由于加速度积分计算速度的过程受累积误差影响,IMU 测速产生显著偏差。非共面直线约束情形测得速度偏差最大,而共面直线约束情形和逆透视校正法的速度测量结果因标定平面和测量平面不一致,也存在不同程度的偏差。相比之下,本文方法所测小车速度最接近设定值,其精度比逆透视校正法提升了 42.85%,比共面直线约束情形提升了 47.06%,比非共面直线约束情形提升了 59.55%,验证了该方法能够提升速度测量精度。



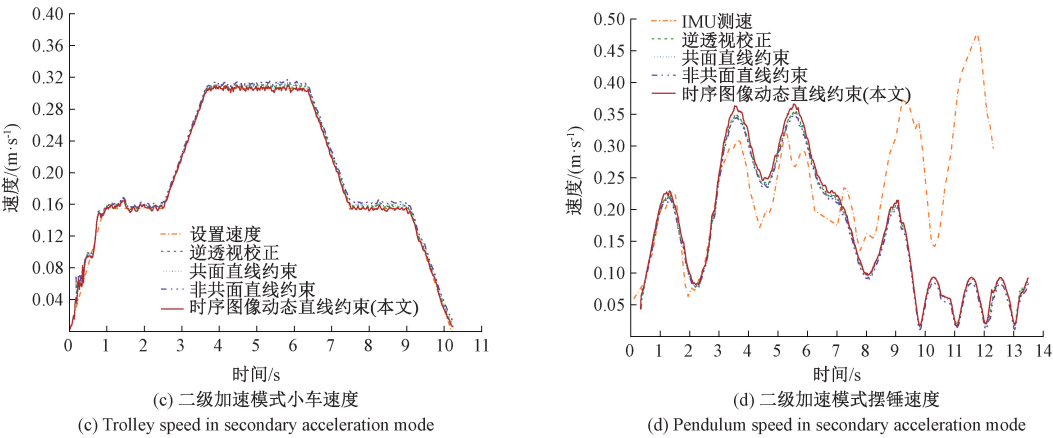


图 6 速度测量对比
Fig. 6 Velocity measurement comparison chart

表 6 速度测量分析表

Table 6 Velocity measurement analysis table

校正方法	与设置速度 RMSE/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
逆透视校正	0.006 3
共面直线约束	0.006 8
非共面直线约束	0.008 9
本文方法	0.003 6

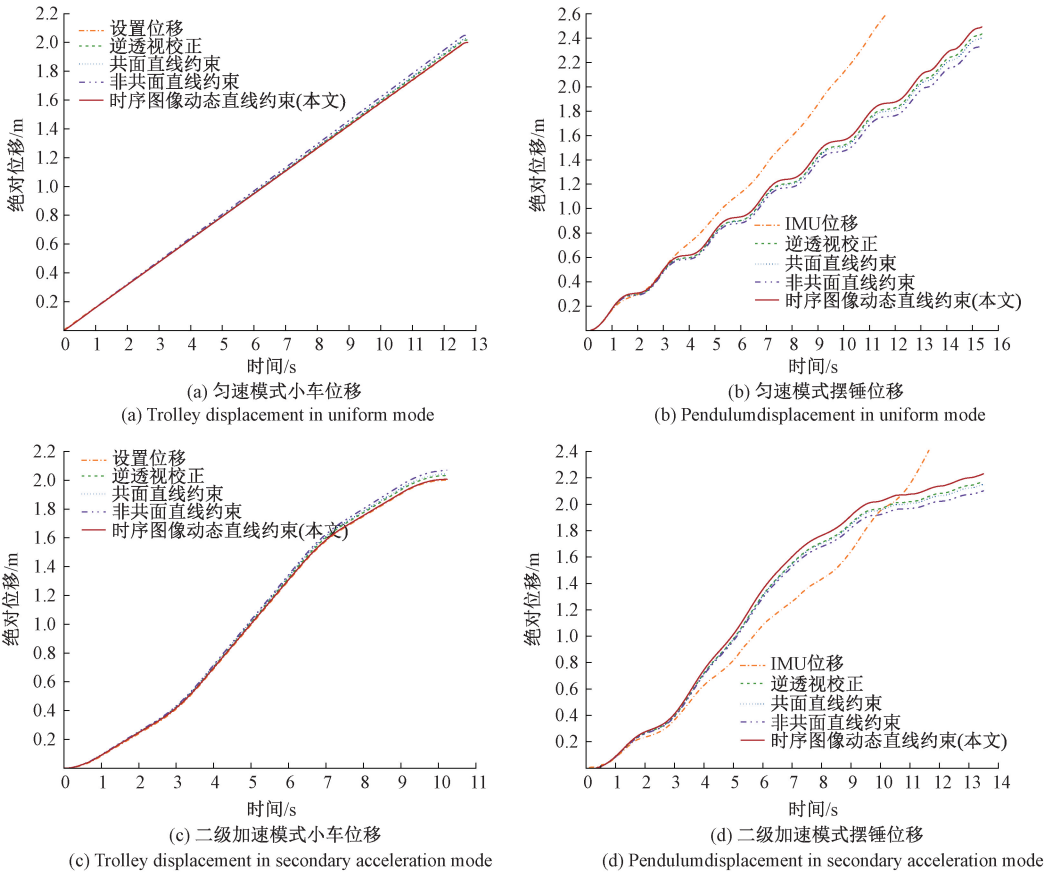


图 7 位移估计对比
Fig. 7 Comparison chart of displacement estimates

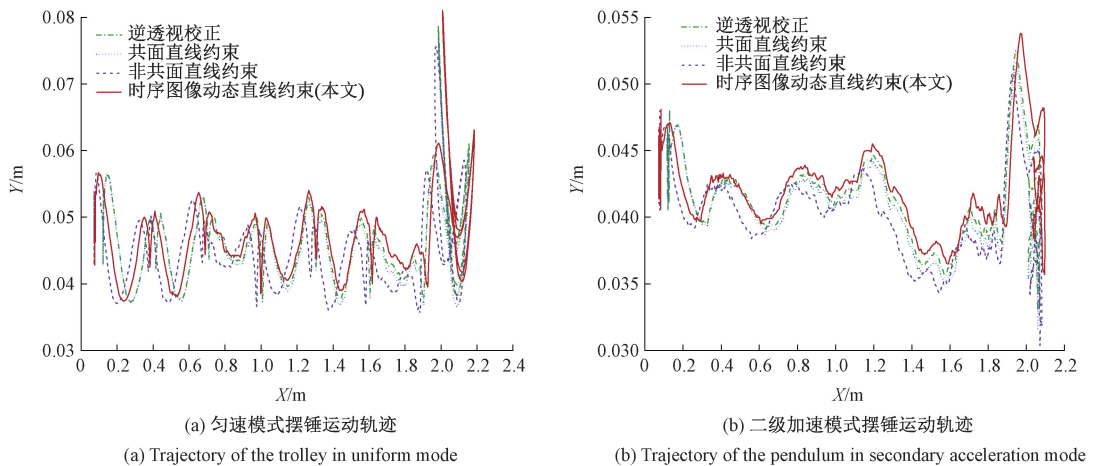


图8 摆锤轨迹复原对比

Fig. 8 Pendulum trajectory reconstruction comparative chart

由图7和8可知,IMU位移误差相较于速度误差更为显著,这是由于加速度二重积分计算位移的过程受累积误差影响更显著。非共面直线约束情形的位移偏差较大,共面直线约束情形和逆透视校正法的位移测量结果也出现了偏移。相比之下,本文提出的方法在位移估算中表现出最小的偏差,测量结果与预期位移最为接近。同时,由于运动轨迹精度由图像校正效果决定,试验表明,本文方法在运动参数测量方面均优于非共面、共面直线约束的射影校正法和逆透视校正法。因此,本文方法所测的运动轨迹具有更高的精度。

3 结 论

本文提出一种利用载荷摆动摆绳作为直线约束的射影校正方法,通过引入时序图像动态直线,克服单幅图像射影校正法的局限性,提高了测量的精度和鲁棒性。该方法为射影校正法提供了新的思路,具备广泛的工程应用前景,尤其在机器人视觉导航和工业检测等对测量精度要求较高的领域。鉴于视觉方法在强弱光、振动和起雾等恶劣环境下表现不佳,后续研究将着重于评估和提升图像质量,以提高方法的适应能力。

参考文献

- [1] ZHU B J, ZHAO T SH, TANG ZH F, et al. Hierarchical coupling control of cable-driven multi-loop crane for underactuated positioning [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 259: 108620.
- [2] TIAN ZH, YU L L, OUYANG H M, et al. Swing suppression control in tower cranes with time-varying rope length using real-time modified trajectory planning [J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103954.
- [3] RAMLI L, MOHAMED Z, EFE M Ö, et al. Efficient swing control of an overhead crane with simultaneous payload hoisting and external disturbances [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106326.
- [4] 谢良波, 夏晨晖, 张钰坤, 等. 基于双频点载波相位的RFID室内定位算法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 267-277.
XIE L B, XIA CH H, ZHANG Y K, et al. RFID indoor localization algorithm based on dual-frequency carrier phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 267-277.
- [5] 曹波, 朱万洁, 姜春霞, 等. 基于VBKF-CPA-TSA算法的UWB定位技术 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 120-129.
CAO B, ZHU W J, JIANG CH X, et al. A UWB localization technique based on the VBKF-CPA-TSA algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 120-129.
- [6] LI Q P, ZHUANG Y, HUAI J ZH, et al. A robust data-model dual-driven fusion with uncertainty estimation for LiDAR-IMU localization system [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 210: 128-140.
- [7] 程为彬, 陈烛炆, 张夷非, 等. IMU姿态误差均衡校正模型与验证 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 202-213.
CHENG W B, CHEN ZH J, ZHANG Y F, et al. Balance correction and verification of IMU posture error [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 202-213.
- [8] WANGCHUK S, SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Modal analysis and tension estimation of stay cables using noncontact vision-based motion magnification method [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(7): e2957.
- [9] YU SH SH, SU Z Y, ZHANG J. Robust optical

- displacement measurement of bridge structures in complex environments[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 192: 395-408.
- [10] HUANG J L, XU W M, ZHAO W W, et al. An improved method for swing measurement based on monocular vision to the payload of overhead crane[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2022, 44(1): 50-59.
- [11] YANG M, WANG Y, LIU ZH H, et al. A monocular vision-based decoupling measurement method for plane motion orbits[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110312.
- [12] OLIVEIRA M, SANTOS V, SAPP A D A. Multimodal inverse perspective mapping [J]. *Information Fusion*, 2015, 24: 108-121.
- [13] 胡钊政, 伍锦祥, 肖汉彪, 等. 基于逆投影差分的移动机器人障碍物快速检测[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(11): 95-102.
HU ZH ZH, WU J X, XIAO H B, et al. Fast obstacle detection based on inverse perspective mapping difference for mobile robots [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(11): 95-102.
- [14] YANG W B, FANG B, TANG Y Y. Fast and accurate vanishing point detection and its application in inverse perspective mapping of structured road [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(5): 755-766.
- [15] SUN J, WANG H P, ZHU X L. A fast underwater calibration method based on vanishing point optimization of two orthogonal parallel lines[J]. *Measurement*, 2021, 178: 109305.
- [16] ZHANG G P, WANG F, ZHANG G D, et al. On-orbit calibration of space camera lens distortion using a single image [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 177: 108140.
- [17] 卢昱杰, 王瑞, 魏伟, 等. 基于单目三维尺度恢复的人机碰撞识别与预警[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(7): 56-68.
LU Y J, WANG R, WEI W, et al. Automated collision recognition and warning for human-machine interaction based on 3D scale recovery of monocular vision [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(7): 56-68.
- [18] CHAI B H, WEI ZH ZH. Stratified camera calibration algorithm based on the calibrating conic [J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1282-1302.
- [19] LUO Y W, LI P, SHI G, et al. Lane departure assessment via enhanced single lane-marking [J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 2024.
- [20] GUO J, XIANG Y, FUJITA K, et al. Vision-based building seismic displacement measurement by stratification of projective rectification using lines [J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5775.
- [21] ZHOU P W, YIN H CH, XU G ZH, et al. Meta-Calib: A generic, robust and accurate camera calibration framework with ArUco-encoded meta-board [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 212: 357-380.
- [22] SULTANA M, MAHMOOD A, JUNG S K. Unsupervised moving object segmentation using background subtraction and optimal adversarial noise sample search[J]. *Pattern Recognition*, 2022, 129: 108719.
- [23] 吴建平, 陈珂, 刘业. 融合随机抽样一致性和 Hough 变换的实时消失点检测[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2022, 34(8): 1238-1251.
WU J P, CHEN K, LIU Y. Real-time vanishing point detector combining RANSAC and Hough transform [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2022, 34(8): 1238-1251.
- [24] 吴修振, 刘刚, 于凤全, 等. 基于单目视觉的 GPS 辅助相机外参数标定 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2252-2258.
WU X ZH, LIU G, YU F Q, et al. Calibration of camera extrinsic parameters based on monocular visual with GPS assistant [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2252-2258.
- [25] WALLACE D L. Simplified beta-approximations to the Kruskal-Wallis H test [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1959, 54(285): 225-230.

作者简介



何烽, 2022 年于莆田学院获得学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为摄影测量与机器视觉。

E-mail: 1305559198@qq.com

He Feng received his B.Sc. degree from Putian University in 2022. He is currently a master student at 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: ljtwcx@163.com

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