

基于编码立体靶标的单轴转台标定方法

王昊天, 王 鹏, 李 岳, 魏家起, 付鲁华

(天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

摘要:针对目前单轴转台标定存在流程繁琐且精度较低的问题,在深入剖析转台标定原理的基础上,设计一种新型编码立体靶标,并提出高精度转台参数多约束优化方法,用于提高单轴转台标定的效率和精度。首先,靶标整合3个含有编码特征点的不同位置姿态的正方形平面,利用编码的唯一性可准确确定出各个平面的位姿变化情况,只需对靶标位姿进行一次调整,即可标定出转台的参数,显著简化了标定流程;其次,设计了编码特征点识别与处理算法,通过生成自适应椭圆掩膜,实现目标特征点的鲁棒分离,从而稳定、准确地识别编码特征点并完成解码,具备较强的鲁棒性;最后,设计了高精度转台参数多约束优化方法,结合点位约束、共面约束和法向量夹角约束建立目标函数,设置了权重参数,对转台标定参数进行优化,提高了标定精度。实验结果显示,使用所提方法标定转台,只需调整一次靶标位姿,即可使标定精度达到0.021 mm,与传统方法相比,精度可提高约36.363%。同时,根据标定结果拼接标准球,精度可达0.025 mm,相比于传统算法,误差约下降16.667%,进一步验证了该方法的可行性。此外,面对不同水平噪声时,所提优化算法可保持较为稳定的优化结果,展现出较好的鲁棒性。

关键词:转台标定;编码立体靶标;多约束优化;精密测量

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

Single-axis turntable calibration method based on coded stereo target

Wang Haotian, Wang Peng, Li Yue, Wei Jiaqi, Fu Luhua

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problem of cumbersome process and low accuracy in the calibration of single-axis turntable, based on the in-depth analysis of the principle of turntable calibration, this paper presents a new type of coded stereo target and a multi-constraint optimization method for high-precision turntable parameters. Firstly, the target integrates three square planes with different positions and poses of coded feature points. The uniqueness of the code can accurately determine the pose changes of each plane. The parameters of the turntable can be calibrated with only a single adjustment of the target pose, significantly simplifies the calibration process. Secondly, an encoding feature point recognition and processing algorithm is designed. By generating an adaptive elliptical mask, the algorithm robustly separates and accurately identifies the coded feature points for reliable decoding, demonstrating strong robustness in various conditions. Finally, a multi-constraint optimization method for high-precision turntable parameters is designed. The objective function is established by combining point constraint, coplanar constraint and normal vector angle constraint, with appropriate weighting parameters to improve calibration accuracy. The experimental results show that the proposed method achieves a calibration accuracy of 0.021 mm with only a single adjustment of the target pose—an improvement of approximately 36.4% compared to traditional methods. Additionally, when assembling a standard sphere based on the calibration results, an accuracy of 0.025 mm is achieved, reducing the error by about 16.7% compared to conventional algorithms. This further validates the effectiveness of the proposed method. Moreover, under varying levels of noise, the optimization algorithm consistently produces stable results, demonstrating excellent robustness.

Keywords: turntable calibration; coding stereo target; multi-constraint optimization; precision measurement

0 引言

高精度转台因其能够准确改变被测物体相对于测量系统的位置关系,已成为位姿测量^[1-2]、三维重建^[3-4]等计算机视觉测量领域的核心设备。对于单轴转台,在测量系统的坐标系当中,拥有转轴的方向向量和旋转中心两个参数,需要通过标定精确获取。当前,如何建立高效率、高精度的转台标定方法,已成为计算机视觉测量领域的关键研究方向。

针对单轴转台的标定,目前可分为圆轨迹拟合(circle trajectory fitting, CTF)和靶标位姿变换(target pose transformation, TPT)两种方法。CTF 法需要在转台表面安装标准球或具备明显特征标识点的标准件,通过测量标准球球心或者特征点旋转轨迹,进行圆轨迹拟合,利用不同特征点的圆轨迹圆心连线来确定转轴,再进一步优化得到旋转中心^[5]。杨洪涛等^[6]使用棋盘格靶标,使用单目相机采集特征点数据,利用最小二乘法拟合空间平面和圆轨迹中心完成标定,但仅使用单目相机,精度较差。Cai 等^[7]为提高特征点识别准确性,使用一个辅助相机,垂直于转台平面记录靶标特征点的圆轨迹,实现转台的精确标定,但需要坐标系之间的统一,引入了新的误差来源。张海涛等^[8]提出了一种基于对径测量的机床转台标定方法,通过测量安装在转台对径位置两个标准球转动前后的球心位置,完成转台的标定,但是仅限于配备高精度测头的机床转台,应用领域较窄。刘涛等^[9]提出了一种适用于水下旋转体转轴标定的方法,以绕转台做圆周运动的相机的光心作为特征点来拟合圆轨迹,该方法形式新颖,专业性强,但坐标系之间的转换略显复杂。总的来看,CTF 法原理简单,操作简便,但常需拟合重建大量特征点的坐标,精度难以保证。

对于 TPT 法,通常使用平面靶标,通过测量靶标转动前后的位姿变化,利用相关算法求出转轴和旋转中心^[10]。Kang 等^[11]通过在转台上安装两个平面靶标来标定转台,设计算法无需已知准确的旋转角度即可实现标定,但靶标位姿变动次数较多,流程繁琐。刘昶等^[12]使用一种 V 型棋盘格标定板,通过采集激光雷达投射的多个位姿下的两条光条图像,实现转台参数的精确解算,但仅限于转台搭载 2D 激光雷达的场景。Yang 等^[13]通过拟合重建立体标准块平面点云,根据位姿变换关系,运用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)计算标定参数,并对转动角度进行了校正,该方法使用简单立体物块代替平面靶标,降低了成本,但是计算方法较为复杂。Yan 等^[14]采用双相机位姿动态调整策略,通过改变靶标和相机的相对位置关系,基于最小化多视点重投影误差优化转轴参数,虽保证了精度但系统复杂度显著提升。

综合分析可知,TPT 法普遍存在流程繁琐、算法复杂的问题,因此如何在保证精度的前提下尽可能提高标定效率是一个亟待解决的难题。

综合现有的转台标定研究现状,目前缺乏一种可兼顾效率和精度的标定方法。为应对这一挑战,提出了一种基于编码立体靶标的单轴转台标定方法,在深入分析 TPT 法标定转台的原理的基础上,设计了一种编码立体靶标,仅需对靶标位姿进行一次改变,即可完成转台的标定工作,有效提高了标定效率。同时,设计了编码特征点识别与处理算法,包含了提取、分离、校正 3 个环节,可实现目标特征点的鲁棒分离,从而稳定、准确地识别编码特征点并完成解码。为兼顾标定精度,设计了高精度转台参数多约束优化方法^[15],建立了包含点位约束、共面约束和法向量夹角约束的目标函数,客观设置了权重参数,充分利用靶标的三维信息,保证了最终的标定精度,并通过实验验证了该方法的可靠性。

1 标定原理

1.1 测量系统

使用双目立体视觉系统完成转台的标定工作,如图 1 所示。首先对左右相机进行标定,得到两相机的内外参数,并统一二者的坐标系,规定左相机的坐标系为测量系统的世界坐标系。之后将靶标固定在单轴高精密电控转台表面,调整工作距离,确保两相机能完整捕获靶标图像信息。通过采集靶标图像,识别靶标特征点,基于双目立体视觉重建原理,计算靶标特征点的三维世界坐标。将转台旋转一定角度,改变靶标位姿,确保靶标始终位于相机视场范围内,重复上述过程,测量靶标转动前后的位姿变化,从而实现转台的标定。

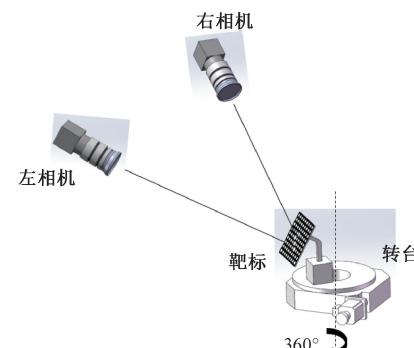


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

完成标定后,可利用转台完成被测物体表面三维形貌测量。将被测物体安放在转台表面,转台带动被测物体绕着垂直于转台平面的 z 轴旋转,由此实现被测物体

在360°全圆周下的多视角测量重建。转台在测量系统的世界坐标系下有转轴的方向向量和旋转中心两大参数,对转台进行高精度标定是完成全圆周三维重建任务的关键。

1.2 TPT法标定原理

假设在世界坐标系下,转台的转轴方向向量 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$ 经过原点,靶标上某一特征点旋转前的坐标为 $\mathbf{X}(x, y, z)$,旋转后的坐标为 $\mathbf{X}'(x', y', z')$,旋转角度为 θ ,则根据罗德里格斯公式^[16],有:

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = (n_x \cdot n_x \cdot (1 - \cos \theta) + \cos \theta) \cdot x + \\ \quad (n_x \cdot n_y \cdot (1 - \cos \theta) - n_z \cdot \sin \theta) \cdot y + \\ \quad (n_x \cdot n_z \cdot (1 - \cos \theta) + n_y \cdot \sin \theta) \cdot z \\ y' = (n_x \cdot n_y \cdot (1 - \cos \theta) + n_z \cdot \sin \theta) \cdot x + \\ \quad (n_y \cdot n_y \cdot (1 - \cos \theta) + \cos \theta) \cdot y + \\ \quad (n_y \cdot n_z \cdot (1 - \cos \theta) - n_x \cdot \sin \theta) \cdot z \\ z' = (n_x \cdot n_z \cdot (1 - \cos \theta) - n_y \cdot \sin \theta) \cdot x + \\ \quad (n_y \cdot n_z \cdot (1 - \cos \theta) + n_x \cdot \sin \theta) \cdot y + \\ \quad (n_z \cdot n_z \cdot (1 - \cos \theta) + \cos \theta) \cdot z \end{array} \right. \quad (1)$$

根据式(1),可以构造出点在旋转特定角度时的旋转矩阵。实际操作中,旋转轴一般不经过传感器系统坐标系的原点,所以需要将坐标系原点平移到旋转中心 $\mathbf{O}(o_x, o_y, o_z)$,即用旋转前空间点的三维坐标减去旋转中心坐标,然后再应用旋转变换,最后将坐标系还原到原来的位置,如式(2)所示。

$$\mathbf{X}_A - \mathbf{C} = \mathbf{R}(\mathbf{X}_B - \mathbf{C}) \quad (2)$$

其中, \mathbf{X}_A 表示旋转后空间点的三维坐标, \mathbf{X}_B 表示旋转前空间点的三维坐标, \mathbf{C} 是旋转中心的三维世界坐标。

由于在标定转轴方向向量时,旋转中心还未知,因此标定转轴时通常不关注靶标上某一特征点的位置变化,而是利用靶标特征点的三维世界坐标来拟合靶标平面,求取平面法向量,通过靶标平面位姿的变化来标定转轴的方向向量。则转台旋转前后,靶标的平面法向量与转轴应存在如式(3)所示关系。

$$\mathbf{P}_A = \mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta) \mathbf{P}_B \quad (3)$$

其中, \mathbf{P}_A 表示旋转后平面法向量, \mathbf{P}_B 表示旋转前平面法向量, \mathbf{n} 表示转轴方向向量, θ 表示旋转角度, \mathbf{R} 表示旋转矩阵,由 \mathbf{n} 和 θ 决定。 \mathbf{n} 应当满足:

$$\|\mathbf{n}\| = 1 \quad (4)$$

为标定转轴方向向量,应使得上式左右作差尽可能相等,即使式(5)达到最小值。

$$\mathbf{\epsilon} = \mathbf{P}_A - \mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta) \mathbf{P}_B \quad (5)$$

其中, \mathbf{n} 含有3个未知数, \mathbf{R} 为 3×3 的矩阵,含有9个未知数,因此至少需要3个式(2)这样的方程构成的方程组才能求解 \mathbf{n} ,即实际操作中至少需要将转台转动3次,改变靶标位姿3次,且每次转动角度相同。

在式(5)中加入下标*i*表示第*i*次转动,如式(6)所示。

$$\mathbf{\epsilon}_i = \mathbf{P}_{Ai} - \mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta) \mathbf{P}_{Bi} \quad (6)$$

后续求解 \mathbf{n} ,需要构建旋转前后平面法向量矩阵,利用SVD求出 $\mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta)$,再利用式(7)计算 \mathbf{n} ,具体过程可参照文献[11]。

$$\mathbf{n} = (\mathbf{R}_{32} - \mathbf{R}_{23}, \mathbf{R}_{13} - \mathbf{R}_{31}, \mathbf{R}_{21} - \mathbf{R}_{12}) \quad (7)$$

基于式(7)求解出 \mathbf{n} 后,通过实施归一化处理,即可得到转轴的单位方向向量。注意到旋转矩阵 \mathbf{R} 的计算是根据法向量旋转前后的变化来完成的,实际求解时并不显示依赖于旋转角度 θ 这个信息,同时 \mathbf{n} 最后的归一化操作也会损失掉角度信息,因此实际工程应用中无需精确的旋转角度。上述特性已由文献[11]研究证实,且有研究更进一步表明可以根据法向量的变化反推出角度参数 θ 的精确值,文献[13]对此作出了深入探究并阐述了其原理。

对于旋转中心,采用文献[13]提出的方法进行计算,其示意图如图2所示。

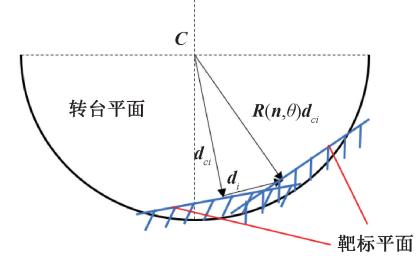


图2 旋转中心求解示意图

Fig. 2 Solution diagram of rotation center

定义 \mathbf{d}_i 和 \mathbf{d}_{ci} , \mathbf{d}_i 表示旋转中心 \mathbf{C} 到靶标第*i*个面引垂线与平面的交点的三维坐标,即垂足; \mathbf{d}_{ci} 为 \mathbf{d}_i 做如式(8)所示变换,即:

$$\mathbf{d}_{ci} = \mathbf{d}_i - \mathbf{C} \quad (8)$$

对于靶标上第*i*个平面,其平面方程可以拟合成 $A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0$ 的形式,则 \mathbf{d}_{ci} 可进一步写为:

$$\mathbf{d}_{ci} = -\mathbf{P}_i(\mathbf{P}_i^T \mathbf{C} + D_i) \quad (9)$$

为了使同一平面在旋转前后垂足变化的误差最小,将计算旋转中心的目标函数定为:

$$\mathbf{C} = \arg \min \sum_{i=1}^n \|\mathbf{d}_{ci} - \mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta) \mathbf{d}_{bi}\|^2 \quad (10)$$

将式(10)展开,并联立式(9)可得式(11)。

$$\mathbf{C} = \arg \min \sum_{i=1}^n ((\mathbf{P}_{Ai}^T \mathbf{C} + D_{Ai})^2 + (\mathbf{P}_{Bi}^T \mathbf{C} + D_{Bi})^2 - 2q_i(\mathbf{P}_{Ai}^T \mathbf{C} + D_{Ai})(\mathbf{P}_{Bi}^T \mathbf{C} + D_{Bi})) \quad (11)$$

其中, $q_i = \mathbf{P}_{Ai}^T \mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta) \mathbf{P}_{Bi}$ 。利用该式求解旋转中心,需要在构建旋转前后平面法向量矩阵的基础上,求出其对 \mathbf{C} 的偏导数,使梯度为0,以得到 \mathbf{C} 的最优解。具体过

程可参照文献[13]。

研究将借助编码立体靶标,基于上述原理标定得到转台的转轴方向向量和旋转中心,并建立高精度转台参数多约束优化方法,具体实现过程将在第3章详细介绍。

2 编码立体靶标设计与使用

2.1 靶标基本结构

1.2节中提到,若使用平面靶标,标定时至少需要改变3次靶标位姿,为简化标定流程,设计了一种组合3个不同位姿的正方形编码平面的编码立体靶标,如图3(a)

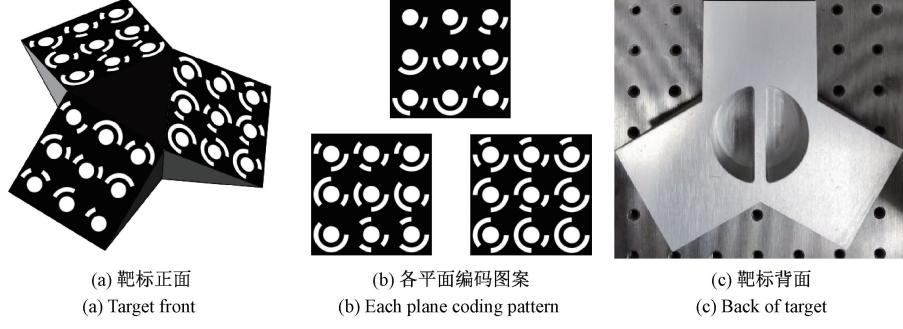


图3 编码立体靶标

Fig. 3 Encoding stereo target

利用该靶标3个编码特征平面,可实现高效率单轴转台标定。标定时,将靶标固定在转台上,调节位姿确保测量系统的相机能同时拍摄到这3个正方形平面,通过识别编码图案中心白色圆斑的圆心作为特征点,基于双目立体视觉的三维重建原理即可求出各特征点的三维世界坐标。以特定角度旋转转台,保证靶标在旋转后仍然能够被相机完整拍摄,依托编码的唯一性,可准确确定出各特征点在旋转后的三维世界坐标,同时根据解码信息实现同一平面的特征点三维坐标的聚类,从而利用平面拟合算法得到3个平面旋转前后的法向量,进而标定出转轴的方向向量,再联合旋转前后各特征点的三维世界坐标的变化,根据1.2节介绍的原理计算出旋转中心。使用该编码立体靶标进行标定,转台只需按特定角度转动一次,即改变一次靶标位姿,即可拟合出3个平面的法向量前后变换关系,显著简化了标定的流程。同时,3个正方形平面均由9个特征点的三维世界坐标完成法向量的拟合,保证了拟合精度。

2.2 特征点识别与解码

在使用靶标进行标定时,首先需要对相机拍摄到的图像进行预处理并识别特征点圆心,由于平面间空间位姿的差异导致的投影形变,在相机视野中靶标图案中的白色圆斑会变成椭圆,影响后续的解码工作,因此设计了

所示。该靶标正面由3个正方形平面和一个三角形平面组成,3个正方形平面在空间中两两夹角120°,结构稳定,减轻重量,三者与三角形平面夹角设计为30°,此角度可满足相机与靶标之间最佳拍摄角度范围,减少镜头畸变带来的影响^[17]。3个正方形平面均各自包含9个编码特征点图案,每个编码特征图案各不相同,如图3(b)所示。编码特征点图案由一个白色圆斑和周围的环形带组成,整体背景为黑色,圆斑的圆心即为可精确定位的特征点,不同的环形带样式存储了唯一的编码信息。此种编码特征点解码流程较为简单,且采用圆形特征图案,是高精度标定领域常用特征类型^[18]。靶标背面设计了两个半圆形的凹槽,便于夹具夹持,如图3(c)所示。

编码特征点的识别与处理算法,主要包括以下3步。

1) 预处理。首先对拍摄的原图进行二值化等预处理操作,之后根据图像边缘检测等算法拟合圆轮廓,并筛选出符合条件的椭圆轮廓,利用灰度质心法求解出圆心坐标^[19],最后根据圆心坐标和椭圆轮廓求得椭圆的长短轴等信息,为后续进一步处理奠定基础。

2) 识别编码图案,包括提取、分离、校正3个环节。根据获取的椭圆圆心位置信息,确定一个包含了目标特征点图案的Roi区域,根据椭圆的长短轴等信息,生成自适应椭圆掩膜,实现目标特征点的鲁棒分离,再对分离出来的靶标图案进行畸变校正,将其校正成标准的图案,由此可进行进一步解码工作。

3) 解码。该编码图案通过周围环形带的样式存储编码信息。使用8位编码特征点,外围环形带被等分为8段,每一段的颜色非黑即白,分别代表了0和1。以白色圆斑右侧水平的环形带分段线为起点,顺时针旋转记录每段环形带所代表的数字,8段环形带所代表的数字连在一起,即形成了特征点所代表的二进制编码序列信息。将二进制序列转换成十进制数字,即可实现解码的过程^[20]。

经过以上编码特征点的识别与处理算法,即可获取整个靶标全部特征点信息和解码结果。整个靶标的特征点识别与解码原理如图4所示,解码算法流程如图5所示。

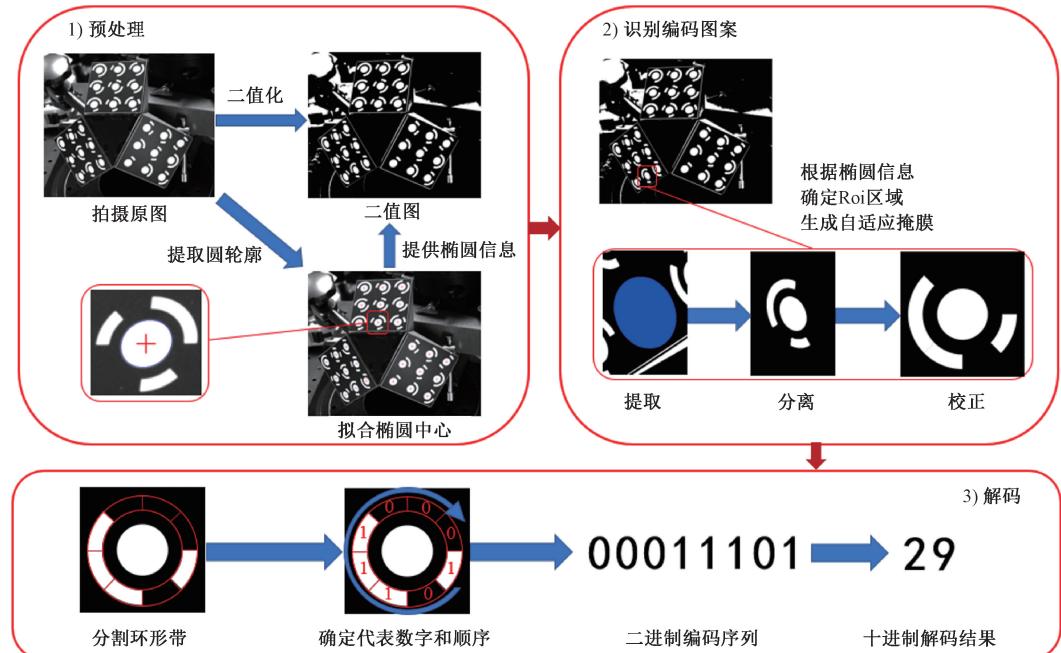


图4 编码立体靶标特征点识别与解码原理

Fig. 4 Coding stereo target feature point recognition and decoding schematic diagram

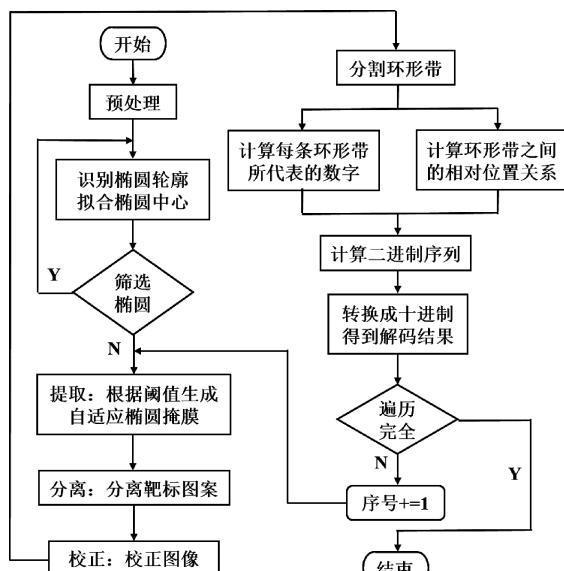


Fig. 5 Coding feature point recognition and decoding algorithm flow chart

3 参数优化

3.1 多约束优化

为了使标定在提高效率的同时兼顾精度,通过借鉴文献[15]提出的高精度相机参数优化思想,设计了高精度转台参数多约束优化算法,利用点位约束、共面约束和

法向量夹角约束,对应点位误差、共面误差和法向量夹角误差,并使用基于指标间相关性的客观赋权法(criteria through intercriteria correlation, CRITIC)对三者赋予各自的权重,以三者加权之和最小为目标建立优化函数,通过不断迭代使转轴方向向量和旋转中心达到最优值。

1) 点位约束

点位约束对应点位误差,表示为每个特征点在位姿变换后三维世界坐标真实值与通过计算得出的位姿变换后三维世界坐标理论值之间的误差。使用第2章介绍的编码立体靶标标定,点位误差如式(12)所示。

$$J_{\text{rep}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \| \mathbf{p}_{i,j} - \hat{\mathbf{p}}_{i,j}(\mathbf{n}, \mathbf{C}) \|^2 \quad (12)$$

其中, $\hat{\mathbf{p}}_{i,j}(\mathbf{n}, \mathbf{C})$ 表示第 i 个平面上的第 j 个特征点通过计算得出的位姿变换后三维世界坐标理论值,可由1.2节中式(2)计算得出, $\mathbf{p}_{i,j}$ 为真实值。

2) 共面约束

共面约束对应共面误差,表示为每个特征点在位姿变换后与该点所在平面内所有特征点位姿变换后拟合得到的平面之间的距离误差。使用第2章介绍的编码立体靶标标定,共面误差如式(13)所示。

$$J_{\text{cop}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 | \hat{d}(\hat{\mathbf{p}}_{i,j}(\mathbf{n}, \mathbf{C}), \mathbf{M}_i) | \quad (13)$$

其中, \mathbf{M}_i 表示第 i 个平面内所有特征点位姿变换后拟合得到的平面, $\hat{d}(\hat{\mathbf{p}}_{i,j}(\mathbf{n}, \mathbf{C}), \mathbf{M}_i)$ 表示第 i 个平面上的第 j 个特征点位姿变换后与该点所在平面的距离。

3) 法向量夹角约束

法向量夹角约束带来的误差是指所有特征点位姿变换后拟合得到的 3 个平面之间存在的空间位置关系, 为靶标自身结构带来的约束。用法向量表示平面之间的空间位置关系, 如图 6(a) 所示, 两法向量之间的关系可简化为如图 6(b) 所示的三棱锥模型, $\triangle ABD$ 和 $\triangle ACD$ 全等, 表示为两法向量所在平面, $\angle BAD = \angle CAD = 90^\circ$, $\angle BAC = 120^\circ$ 表示为两者的夹角, \mathbf{BD} 和 \mathbf{CD} 表示为两法向量, $\angle ADB = \angle ADC = 30^\circ$, 若设 $AB = AC = a$, 则能推导出其他线段的长度, 根据余弦定理可计算出 $\angle BDC$ 的余弦值为 $5/8$, 则法向量夹角应为 51.318° 左右。

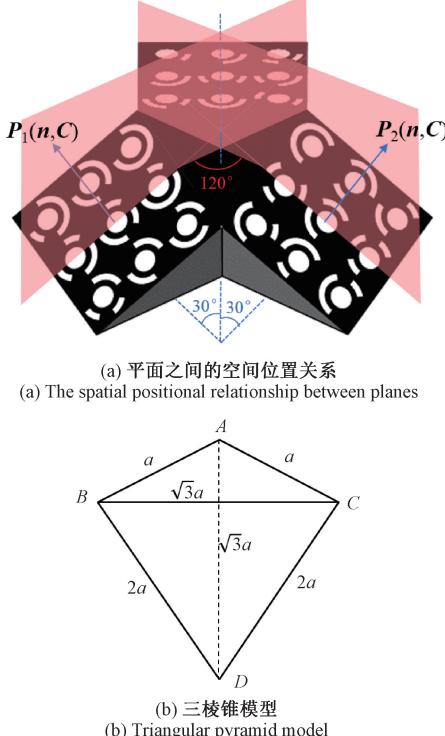


图 6 法向量夹角约束示意图

Fig. 6 Schematic diagram of normal vector angle constraint

根据上述推导, 法向量夹角误差如式(14)所示。

$$J_{\text{nva}} = \min \sum_{i=1}^3 \left| \cos \theta_i(\mathbf{P}_i(\mathbf{n}, \mathbf{C}), \mathbf{P}_{i \bmod 3+1}(\mathbf{n}, \mathbf{C})) - \frac{5}{8} \right| \quad (14)$$

其中, $\mathbf{P}_i(\mathbf{n}, \mathbf{C})$ 表示第 i 个平面拟合后的法向量, $\theta_i(\mathbf{P}_i(\mathbf{n}, \mathbf{C}), \mathbf{P}_{i \bmod 3+1}(\mathbf{n}, \mathbf{C}))$ 表示两个法向量之间的夹角。

3.2 权重设置

实际应用中, 3 种约束可能存在一定冲突, 需要对三者赋予各自的权重, 以此协调优先级。CRITIC 法是一种客观赋权法, 该方法完全基于数据本身特性, 利用指标之间的对比性和冲突性来确定权重, 具备较强的科学性和客观性^[21]。后文采用该方法设置权重。

在转台的不同位置共采集了 12 组数据, 分别计算每组的点位误差、共面误差和法向量夹角误差各自的平均值, 并对数据进行归一化操作, 以消除因量纲不同带来的影响。误差属于逆向指标, 数值越小越优, 故使用式(15)完成数据的归一化操作。

$$x'_i = \frac{\max(X) - x_i}{\max(X) - \min(X)}, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (15)$$

其中, X 表示 12 组样本下该误差项平均值组成的序列, $\max(X)$ 和 $\min(X)$ 分别表示其中的最大值和最小值, x_i 表示其中第 i 个数值。

归一化后的各组误差项指标数据如图 7 所示。图 7 中将“法向量夹角误差”简写为“夹角误差”, 后文的表 1 亦如此。

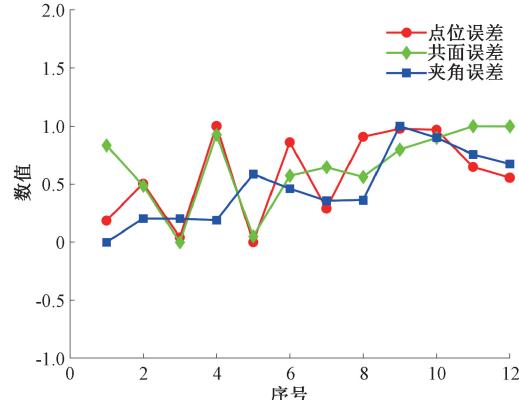


图 7 归一化后各组误差指标

Fig. 7 Normalized error index of each group

之后, 计算各指标的标准差, 表示对比性, 构建相关性矩阵得到冲突系数, 进而计算信息承载量, 最终得到归一化后的权重数值, 如表 1 所示。

表 1 各误差指标权重数值

Table 1 The weight value of each error index

指标	对比性	冲突系数	信息承载量	权重
点位误差	0.382	1.188	0.454	0.359
共面误差	0.345	1.241	0.428	0.339
夹角误差	0.312	1.221	0.382	0.302

将 3 个权重分别取成 0.4、0.3、0.3, 由此可得转台参数的优化目标函数为:

$$f = \min(0.4 \times J_{\text{rep}} + 0.3 \times J_{\text{cop}} + 0.3 \times J_{\text{nva}}) \quad (16)$$

对于该优化问题, 列文伯格-马夸尔特 (Levenberg-Marquardt, LM) 算法是最常见的方法, 该算法同时具备了梯度法和高斯牛顿法的特点, 拥有高收敛速度和最优逼近特性, 可以快速找到目标函数的最优值^[22]。研究采用该算法完成转台标定参数的优化, 最终可得到转轴方向向量和旋转中心的精确值。

4 实验结果与分析

4.1 实验装置与选型

实验系统如图 8 所示, 测量系统由两个巴斯勒公司的型号为 acA2440-25 μm 的黑白相机和一个型号为 DLP4710 的投影仪组成, 相机的镜头使用海康威视公司的 25 mm 镜头。

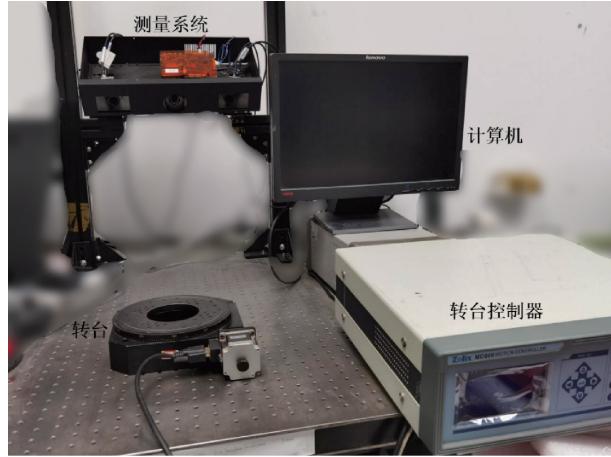


图 8 实验系统

Fig. 8 Experimental system

两相机负责转台的标定工作, 投影仪可投射光栅条纹, 用于转台标定后对物体进行多视角三维重建工作, 将在 4.4 节中介绍。转台使用北京卓立汉光公司的 RSA200 单轴精密转台, 配备控制器, 可实现 360° 全圆周电控精密转动, 精度可达 10''. 测量系统斜向下约 30° 拍摄转台, 工作距离为 500 mm。测量传感器系统如图 9 所示。

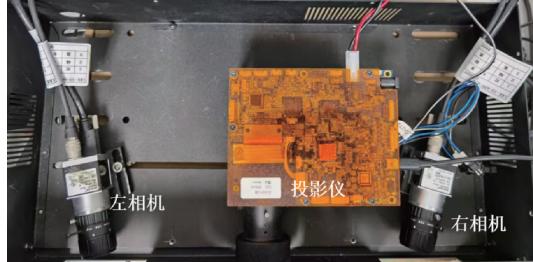


图 9 传感器系统

Fig. 9 Sensor system

4.2 精度验证实验

为了验证所提方法的有效性, 使用该靶标对转台进行标定, 并进行精度验证。为避免偶然性, 实际标定时, 在转台的 0°、90°、180° 和 270° 这 4 个不同位置分别进行一次靶标位姿变换, 转动度数为 5°, 将 4 个位置得到的平

面法向量数据集合到同一矩阵做 SVD 运算。精度验证采用如图 10 所示的定向阵列圆形平面靶标, 包含了 4 个大圆和若干个小圆, 4 个大圆可唯一确定出各圆之间的拓扑关系^[23]。

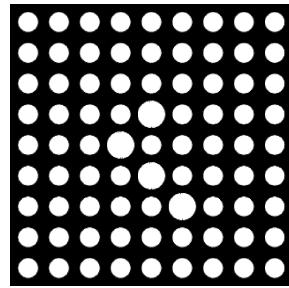


图 10 定向阵列圆形靶标

Fig. 10 Directional array circular target

完成标定后, 通过重建旋转前后的平面靶标来实现标定精度验证。根据标定得到的参数, 构建旋转矩阵, 将平面靶标旋转一定角度后得到的特征点坐标转换成未经旋转的坐标, 再将变换后得到的坐标与旋转前真实特征点的坐标进行对比, 计算二者之间的误差, 最后统计所有对应点的误差, 计算均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 来评定转台标定的精度, 如式(17)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (17)$$

其中, n 是特征点数量, y_i 是计算值, \hat{y}_i 是实际值。为避免偶然性, 选取 45°、135°、225° 和 315° 这 4 个不同的初始位置, 在 45° 和 225° 这 2 个位置设置旋转角度为 5° 和 10°, 在 135° 和 315° 设置为 -5° 和 -10°, 共重复 8 次, 统计每次的 RMSE 并计算平均值, 作为标定的精度验证结果, 如表 2 所示。

表 2 精度验证实验结果

Table 2 Accuracy verification experiment results

序号	初始位置/(°)	旋转角度/(°)	RMSE/mm
1	45	5	0.018
2	45	10	0.021
3	135	-5	0.020
4	135	-10	0.024
5	225	5	0.019
6	225	10	0.023
7	315	-5	0.021
8	315	-10	0.025
平均值			0.021
标准差			0.044

如表 2 结果所示, 使用编码立体靶标标定, 精度验证的 RMSE 平均值为 0.021 mm, 标准差为 0.044 mm, 说明所提方法具有一定可行性。由于转台自身存在一定的制造误差, 故实验结果并不能达到完全理想的状态。4.3 节中将与传统方法进行对比, 进一步增强说服力。

4.3 对比实验

为进一步验证所提方法的可行性, 与传统标定方法进行对比, 记录标定结果, 并使用 4.2 节中的精度验证方法作对比验证。

传统方法即包括了 CTF 和 TPT 两大标定方法, 其中, CFT 分为靶标特征点圆轨迹拟合方法 (target feature point circular trajectory fitting, TCF) 和标准球球心圆轨迹拟合方法 (fitting of the center circle trajectory of a standard ball, FCT), TPT 特指平面靶标位姿变换方法 (plane target pose transformation, PTPT), 靶标使用 4.2 节介绍的定向阵列圆形靶标, 标准球使用直径为 50.813 mm 的标准陶瓷球, 如图 11 所示。



图 11 陶瓷标准球

Fig. 11 Ceramic standard ball

正式实验时, PTPT 方法设置 3 组实验, 每组同样在转台的 0°、90°、180° 和 270° 这 4 个不同位置进行靶标位姿变换, 每个位置分别改变靶标位姿 3、4、5 次, 转动度数为 5°, 通过设计不同的位姿改变次数进行实验以增强说服力。不同方法标定的结果和精度验证的 RMSE 平均值如表 3 所示, 对比情况如图 12 所示。

表 3 对比实验结果

Table 3 Comparative experimental results

方法	位姿变 换次数	标定结果		RMSE/mm
		<i>n</i>	<i>C</i>	
PTPT	3	$[0.113, 0.802, 0.586]^T$	$[-384.114, -2673.601, -1410.032]^T$	0.085
	4	$[0.112, 0.814, 0.569]^T$	$[2.450, 76.092, 595.301]^T$	0.048
	5	$[0.113, 0.809, 0.577]^T$	$[-304.018, -2125.094, -975.549]^T$	0.043
TCF	18	$[0.109, 0.810, 0.576]^T$	$[-9.597, -9.979, 535.106]^T$	0.036
FCT	18	$[0.108, 0.812, 0.574]^T$	$[-16.146, -60.108, 499.760]^T$	0.033
本文所提方法	1	$[0.109, 0.811, 0.575]^T$	$[3806.871, 26589.419, 19271.402]^T$	0.021

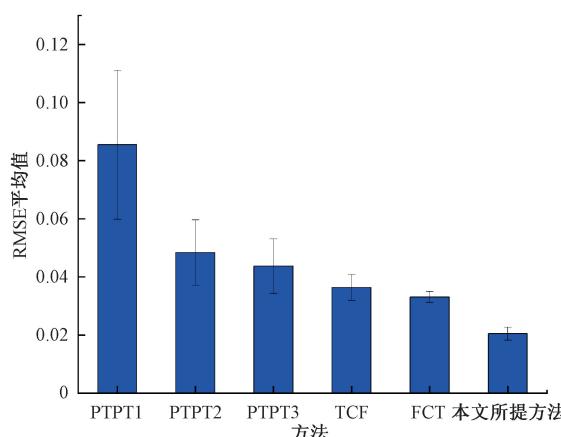


图 12 不同方法精度验证对比

Fig. 12 The comparison chart of accuracy verification of different methods

图 12 中 PTPT 方法 3 组不同位姿变动次数的实验分别用 PTPT1、PTPT2、PTPT3 表示。误差棒表示为不同方法的标准差。

如图 12 和表 3 结果所示, 使用所提方法标定, RMSE 可减小至 0.021 mm, 与传统方法当中精度最高的 FCT 方法相比, 所提方法可将精度提高 36.363%, 说明所提方法在提高标定效率的同时, 也有效提高了标定精度。

4.4 三维重建实验

为进一步反映标定的效果, 说明所提方法的可行性, 使用 4.1 节中介绍的投影仪+双相机的测量系统, 利用标定好的转台, 完成物体多视角重建后的全圆周点云拼接工作。

如 4.1 节中图 9 所示, 光栅条纹投射器安放在左右相机中间, 负责投射特定频率的正弦条纹到被测物体表面, 左右相机分别采集经被测物体表面调制后的变形光栅条纹图像, 通过双目标定参数计算左右图像的极线对应关

系,利用条纹相位信息完成立体匹配,得到左右图像对应匹配点^[24],最后根据双目立体视觉原理完成三维重建。

首先选择重建4.3节中提到的标准球,将标准球固定在转台平面,使用测量系统在转台的6个不同位置分别做单次三维重建,不同位置之间间隔均为60°。该测量系统的单次重建误差可保持在0.01 mm左右。利用不同标定方法得到的标定参数,将6个位置下单独测量获取的点云进行拼接,从而获得标准球360°全圆周的点云模型,再对其进行球面拟合,计算拟合直径,与真值的误差大小即反映出不同标定方法在重建领域的效果。每种方法均进行6次拼接实验。图13表示了4种不同的方法之间历次重建拼接精度对比情况,表4记录了各方法重建拼接误差的平均值和标准差(PTPT只选取改变5次靶标位姿的标定结果)。

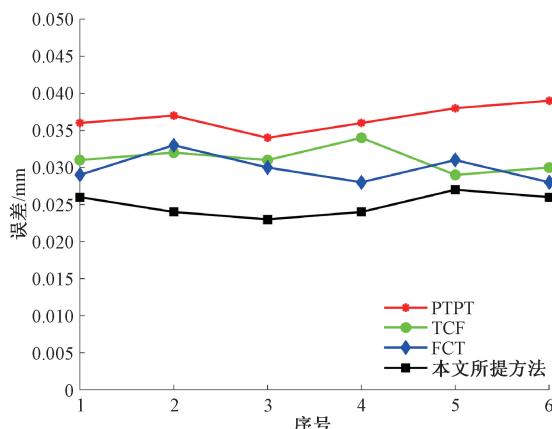


图13 标准球重建精度对比

Fig. 13 Comparison of reconstruction accuracy of standard spheres

表4 标准球重建实验结果对比

Table 4 Comparison of standard ball reconstruction experimental results (mm)

方法	平均值	标准差
PTPT	0.037	0.037
TCF	0.031	0.035
FCT	0.030	0.038
本文方法	0.025	0.037

由于单次重建误差和拼接累计误差,重建拼接的精度不能达到十分理想的状态。上述数据表明,所提方法历次重建拼接误差均低于传统方法,平均误差为0.025 mm,相比于传统方法当中最好的0.030 mm,降低了约16.667%。由此可见,使用所提方法标定,在实际点云拼接的工程领域,提高了最终测量精度,具有一定可靠性。标准球重建拼接效果如图14所示。

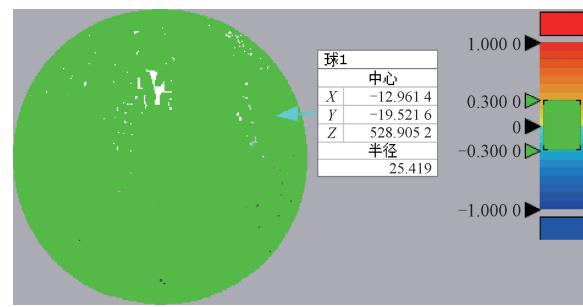


图14 标准球重建拼接效果

Fig. 14 Standard ball reconstruction stitching effect

对于不规则物体,同样可以实现多视角拼接效果。选用两个小型石膏人物造型雕像作为被测物体,同样每次间隔60°做单视角重建,使用所提方法标定转台,利用标定得到的参数对点云进行拼接,从而重建得到被测物体全圆周的三维形貌。重建及拼接效果如图15所示。

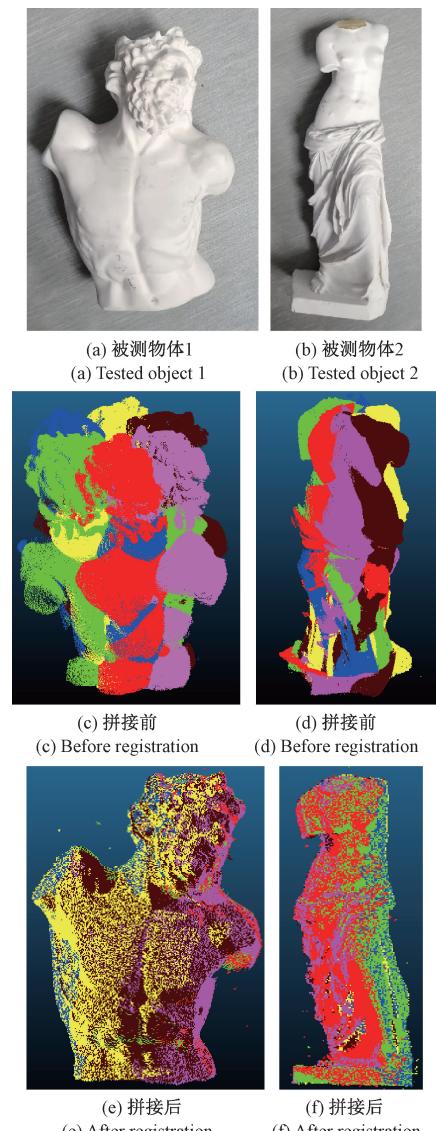


图15 不规则物体重建拼接效果

Fig. 15 Reconstruction stitching effect of irregular objects

图 15 表明,对于复杂表面的不规则物体,同样可使用所提方法完成全圆周拼接重建,进一步说明了所提方法的可靠性。

4.5 鲁棒性分析实验

为分析所提方法的鲁棒性情况,在特征点识别环节中,对每个特征点的图像坐标添加不同水平的高斯噪声,以测试优化算法的鲁棒性。高斯噪声均值设置为 0,标准差从 0.1 取值到 1.0,步长为 0.1,分别记录标定后的精度验证结果,如图 16 所示。其中水平线是参考线,表示无噪声时的标定精度验证结果,即 4.2 节中的 0.021 mm。

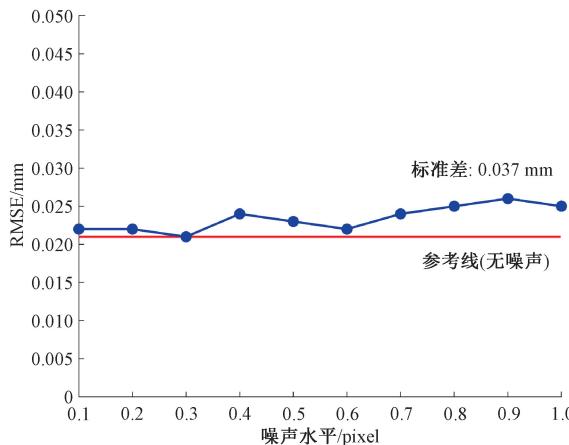


图 16 不同噪声水平下标定优化效果

Fig. 16 Calibration optimization effect under different noise levels

图 16 表明,在不同噪声水平下,所提方法均能计算得到标定参数的最优值,精度验证的 RMSE 较为稳定,展现出较好的鲁棒性。

5 结 论

本研究提出一种基于编码立体靶标的单轴转台标定方法,用于高精度高效率视觉测量领域。利用靶标包含的 3 个不同姿态的正方形编码平面,依托编码的唯一性,实现了靶标单次位姿转换完成转台标定的工作,有效简化了标定流程。根据编码特征点识别与处理算法,通过自适应生成椭圆掩膜,实现目标区域鲁棒分离,保证特征点识别和解码的准确性。通过设计高精度转台参数多约束优化方法,充分利用靶标三维特征信息,结合点位约束、共面约束和法向量夹角约束,合理设置权重,实现高精度转台参数优化。实验结果表明,所提方法在标定时只需调整一次靶标位姿,即可使标定精度达到 0.021 mm,相比传统方法提高 36.363%,在重建拼接标

准件方面,标准球的重建拼接精度达到 0.025 mm,优于传统方法约 16.667%,充分验证了所提方法的实用性。同时,鲁棒性分析实验表明,所提优化算法在面对不同水平噪声时,可保持较为稳定的优化结果,展现出较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 李岳,孙长库,王大为,等. 基于惯性辅助跟踪的未知对应姿态估计方法[J]. 仪器仪表学报,2024,45(8): 145-153.
LI Y, SUN CH K, WANG D W, et al. An attitude estimation method with inertial aid tracking from unknown correspondences[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 145-153.
- [2] LI L, WANG P, WANG L R, et al. DSCNet: Lightweight and efficient self-supervised network via depthwise separable cross convolution blocks for speckle image matching[J]. Optics Express, 2024, 32(6): 10715-10731.
- [3] 董力,江文松,罗哉,等. 多角度弱纹理文物三维扫描测量方法[J]. 计量学报,2024,45(6): 769-776.
DONG L, JIANG W S, LUO Z, et al. Multi-angle weak texture cultural relics 3D scanning measurement method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(6): 769-776.
- [4] 卢欣,黄昶,金志伟. 基于转台的多视角多姿态锁销点云模型重建[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2024(2): 86-96.
LU X, HUANG CH, JIN ZH W. Multi-view and multi-pose lock pin point cloud model reconstruction based on turntable[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2024(2): 86-96.
- [5] WANG SH H, QIAO ZH F, HUANG J H. A calibration method of external parameters of 2D laser in rotary 3D scanning[J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(12): 730-736.
- [6] 杨洪涛,刘士萍,刘月琪,等. 线扫描齿轮测量机转台基准轴标定方法[J]. 应用激光,2024,44(3): 115-123.
YANG H T, LIU SH P, LIU Y Q, et al. A calibration method for rotary table reference axis of line scan gear measuring machine[J]. Applied Laser, 2024, 44(3): 115-123.
- [7] CAI X Q, ZHONG K J, FU Y J, et al. Calibration method for the rotating axis in panoramic 3D shape

- measurement based on a turntable [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(3): 035004.
- [8] 张海涛, 刘书桂, 于振. 基于对径测量的转台分度误差标定技术 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(10): 67-69.
- ZHANG H T, LIU SH G, YU ZH. A calibration technique for the indexing error of rotary table based on the diametric measurement [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(10): 67-69.
- [9] 刘涛, 关添航, 杜宏旺, 等. 基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 260-270.
- LIU T, GUAN T H, DU H W, et al. Research on the high precision measurement method of underwater rotary scanning based on linear structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 260-270.
- [10] 王郑拓, 杨波, 林志伟, 等. 机器人三维视觉实验平台坐标系标定实验设计 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(8): 52-56.
- WANG ZH T, YANG B, LIN ZH W, et al. Experiment design of robot 3D vision platform coordinate system calibration [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(8): 52-56.
- [11] KANG H, SEO Y, PARK Y, et al. Geometric calibration of a camera and a turntable system using two views [J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7443-7450.
- [12] 刘昶, 姜楠, 贾峻权, 等. 单轴转台上 2D 激光雷达的位姿估计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 87-95.
- LIU CH, JIANG N, JIA J Q, et al. Pose estimation of 2D LiDAR on a single axis turntable [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 87-95.
- [13] YANG B, WANG ZH T, XU Y T, et al. An SVD-based turntable calibration method with multiple reference planes segmented from point clouds [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 35(1): 015002.
- [14] YAN G Z, ZHANG J, CHENG ZH, et al. Geometric calibration of rotational vision system for dynamic exterior orientation [J]. Instrumentation, 2023, 10(3): 23-33.
- [15] 杨昭辉, 朱华炳, 殷玉龙, 等. 基于编码立体靶标的高精度双目相机标定 [J]. 中国激光, 2023, 50(6): 65-73.
- YANG ZH H, ZHU H B, YIN Y L, et al. High-precision binocular camera calibration based on coding stereoscopic target [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(6): 65-73.
- [16] 刘锋. 罗德里格斯旋转公式的证明及应用 [J]. 江苏科技信息, 2020, 37(28): 37-40.
- LIU F. Proof and application of Rodriguez rotation formula [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2020, 37(28): 37-40.
- [17] 秦鹏举, 蒋周翔, 苏瑞, 等. 基于蜂窝立体结构靶标的多目相机标定方法 [J]. 机床与液压, 2024, 52(12): 10-16.
- QIN P J, JIANG ZH X, SU R, et al. Calibration method for multi-camera based on honeycomb stereo target [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(12): 10-16.
- [18] 魏家起, 王鹏, 李岳, 等. 考虑圆心偏差补偿的分步相机标定方法 (英文) [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2024, 15(4): 445-457.
- WEI J Q, WANG P, LI Y, et al. A stepwise camera calibration method incorporating compensation for eccentricity error [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2024, 15(4): 445-457.
- [19] 关玮童, 罗哉, 江文松, 等. 基于多目视觉的立体靶标位姿测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 214-223.
- GUAN W T, LUO Z, JIANG W S, et al. Stereoscopic target position measurement method based on multi-camera vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 214-223.
- [20] 孙丽君, 李石, 陈天飞. 基于仿射变换和均值像素法的环状编码点鲁棒识别 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 71-80.
- SUN L J, LI SH, CHEN T F. Robust recognition of circular coded point based on affine transformation and average pixel method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 71-80.
- [21] 温晨, 黄敏, 饶帝军, 等. 环境影响下基于 CRITIC 法的露天矿山道路综合成本分析 [J]. 黄金, 2025, 46(4): 39-43.
- WEN CH, HUANG M, RAO D J. Comprehensive cost analysis of open-pit mine roads under environmental impact based on CRITIC method [J]. Gold, 2025, 46(4): 39-43.
- [22] 李亚飞, 王泰华, 张润雨, 等. 基于主成分分析与

- ILM-DGRBF 网络的 SOH 估算 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(17): 30-36.
- LI Y F, WANG T H, ZHANG R Y, et al. SOH estimation based on principal component analysis and ILM-DGRBF network [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(17): 30-36.
- [23] 张效栋, 孙长库. 新型方向性平面靶标及拓扑定位算法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(11): 104-106. ZHANG X D, SUN CH K. Novel directional pattern and mapping location algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(11): 104-106.
- [24] 王鹏, 张宇倩, 孙长库, 等. 极线和级次双约束的光栅投影测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 144-150. WANG P, ZHANG Y Q, SUN CH K, et al. Fringe projection measurement method based on polar line and fringe order double constraint [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 144-150.

作者简介



王昊天, 2023 年于西安理工大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为激光及光电检测和机器视觉。
E-mail: 2023202087@tju.edu.cn

Wang Haotian received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2023.

Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interests include laser and photoelectric detection and machine vision.



王鹏, 分别在 2004 年、2008 年于天津大学获得学士学位和博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为激光及光电测试技术和三维数字化测量技术。
E-mail: wang_peng@tju.edu.cn

Wang Peng received his B. Sc. degree and Ph. D. degree from Tianjin University in 2004 and 2008, respectively. Now he is a professor at Tianjin University. His main research interests include laser and photoelectric testing technology and three dimensional digital measurement technology.



李岳(通信作者), 分别在 2018 年、2021 年于天津大学获得学士学位和硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为视觉惯性融合姿态测量。
E-mail: liyue_2021@tju.edu.cn

Li Yue (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Tianjin University in 2018 and 2021, respectively. Now he is a Ph. D. candidate at Tianjin University. His main research interest includes vision-inertial fusion attitude measurement.