

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513666

基于多目视觉的立体靶标位姿测量方法*

关玮童¹, 罗 哉^{1,2}, 江文松^{1,2}, 杨 力³

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310000; 2. 中国计量大学军事装备原位计量教育部重点实验室 杭州 310008; 3. 中国计量大学信息工程学院 杭州 310000)

摘要:激光三维测量是现代大型复杂曲面高精度测量技术的重要手段,广泛应用于车辆、船舶、飞行器等领域,尤其是在大场景的数字化成像方面。针对视觉跟踪三维测量精度和范围不能同时兼优的问题,提出了一种基于多目视觉跟踪的三维测量方法。该方法采用多相机联合标定算法建立全局共基准位姿转换模型,实现激光传感器的位姿跟踪;以立体靶标定位精度最高为优化目标,建立最优视场决策模型;根据立体靶标与线激光传感器之间的结构特征,建立靶标-激光传感器之间的空间几何相对位姿关系;采用几何距离的位姿匹配算法获取线激光传感器的位姿,并结合多相机视场空间完成激光点云数据的拼接,最终实现三维点云成像。为了验证方法的有效性,在1.8 m×2.5 m×1.5 m范围内搭建了四目激光三维测量系统。实验结果表明,该测量方法对立体靶标的平移定位不确定度为0.054 3 mm,旋转定位不确定度为0.047 8°;该方法在距离多目系统0.5、1和2 m处的横向测量范围分别为0.93、1.18和1.46 m;在使用同焦距相机以达到同等精度的条件下,分别比单目测量范围大0.57、0.7和0.82 m;比双目测量范围大0.35、0.46和0.49 m。说明基于多目视觉的立体靶标位姿测量方法在精度和测量范围上具有较好的工程优势。

关键词:多相机视觉;三维重建;姿态跟踪;线激光

中图分类号: TB92 TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

A stereoscopic target position measurement method based on multi-camera vision

Guan Weitong¹, Luo Zai^{1,2}, Jiang Wensong^{1,2}, Yang Li³

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China;

2. Key Laboratory of In-situ Measurement of Military Equipment, Ministry of Education, China Jiliang University, Hangzhou

310000, China; 3. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Laser 3D measurement is an important means of modern high-precision measurement technology for large and complex surfaces, which is widely used in vehicles, ships, aircraft, and other fields, especially in the digital imaging of large scenes. To address the problem that the accuracy and range of visual tracking 3D measurement cannot be optimized at the same time, this article proposes a 3D measurement method based on multi-camera visual tracking. The method adopts the multi-camera joint calibration algorithm to formulate the global co-baseline position conversion model to realize the position tracking of the laser sensor, establishing the optimal field-of-view decision model with the highest accuracy of stereo target positioning as the optimization goal. The spatial geometric relative position relationship between the target and the laser sensor is established according to the structural characteristics between the stereo target and the line laser sensor. The position-matching algorithm of geometric distance is adopted to obtain the position of the line laser sensor and combines the multi-camera field of view to complete the laser point cloud data splicing. Finally, the three-dimensional point cloud imaging is realized. In order to evaluate the effectiveness of the method, a four-eye laser 3D measurement system is built within the range of 1.8 m×2.5 m×1.5 m. The experimental results show that the measurement method achieves a translational positioning uncertainty of 0.054 3 mm and a rotational positioning uncertainty of 0.047 8° for the stereoscopic target; the lateral measurement range of this method is 0.93, 1.18 and 1.46 m at the distance of 0.5, 1 and 2 m from the binocular system, respectively. Under the condition of using a camera of the same focal length in order to achieve the same accuracy, it is respectively larger than the monocular

收稿日期:2025-01-10 Received Date: 2025-01-10

* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0705704)、国家自然科学基金(52075511,51927811,52475576)项目资助

measurement range of 0.57, 0.7 and 0.82 m; 0.35, 0.46 and 0.49 m larger than the binocular measurement range. It shows that the stereo target position measurement method based on binocular vision has good engineering advantages in terms of accuracy and measurement range.

Keywords: multi-camera vision; 3D reconstruction; attitude tracking; line lasers

0 引言

近年来,随着航空航天、船舶工业、大型车辆等产业的飞速发展,产业界对大型工件的需求日益增长^[1]。现代制造领域的的数据表明,传统人工检测方式存在着重复测量精度较低且单件检测耗时较长的局限性,而且针对大型复杂曲面的测量,频繁的现场标定过程会引入机械重复定位误差^[2]。因此,目前对于大尺度三维测量研究热点主要集中于非接触式技术,其中基于光学成像原理的视觉三维测量方法因其精度高、效率高、适用性广的特性在工业检测领域逐渐普及^[3-4]。

传统的视觉跟踪方法有单目或双目测量方式,在等精度条件下具有测量范围小的问题,很难满足大尺寸跨尺度测量任务^[5]。例如,在单目方面,Li^[6]设计了一种轴类测量系统,采用 Mallat 小波分解算法对图像进行多尺度降噪处理,并开发了改进型 Canny 算子,通过结合 Otsu 动态阈值分割和边缘方向验证,实现对轴测量。针对背光成像中厚壁平面零件产生的边缘衍射效应,李晓捷等^[7]提出了一种基于伪边缘特征重构的真实边缘定位方法,有效提升了零件尺寸测量精度。Zhang 等^[8]通过系统研究测量噪声的统计特性并改进降噪算法,开发了一种基于视觉的零件尺寸检测技术。该方法结合快速中值滤波与多项式插值算法,实现了噪声抑制和亚像素级边缘检测,显著提升了轮廓尺寸测量精度。

在双目方面,针对工业生产中大型工件测量难题,刘建伟等^[9]开发了一种便携式立体视觉测量系统,能够对工业制造中的大型工件进行三维扫描重建,有效解决了传统测量方法的应用局限。Xiang 等^[10]借助双目视觉技术,构建了一套高精度的视觉检测系统,实现了对大型汽车刹车片卡口长度的测量。针对不规则平面零件的测量,Huang 等^[11]提出了采用线角度特征的双目视觉测量方案,有效解决了不规则平面零件的检测难题。

为了解决大工作场景的问题,使用多目视觉进行跟踪可以更好地处理遮挡、视角变化和深度估计等问题,从而提高三维重建的精度和鲁棒性^[12-14]。因此,提出使用多目视觉系统实现对线激光传感器的实时定位,通过数据拼接来实现大尺寸物体的多角度三维重建。该方法可以减少测量盲区,获得更大的视野范围,适应各种场景。

1 测量原理

1.1 系统总体流程

多目视觉跟踪测量系统的测量原理主要分为3部分:多相机联合标定、最优相机视场决策和位姿求解及优化,具体流程如图1所示。

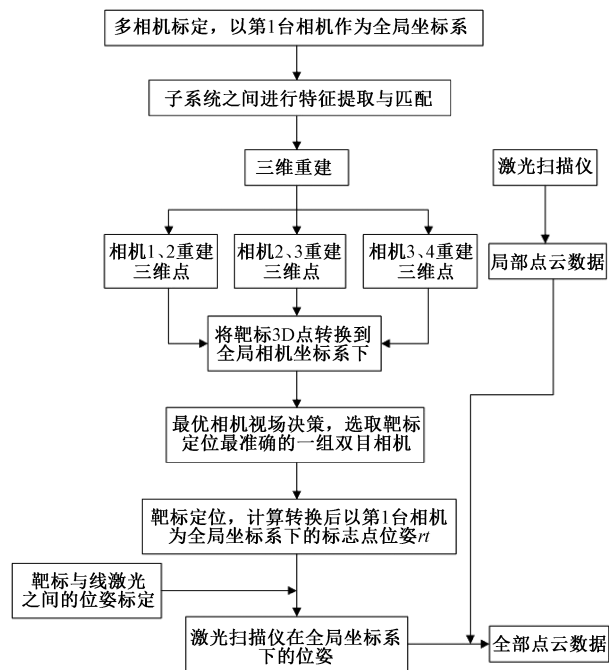


图1 整体流程

Fig. 1 Overall flow chart

使用四目相机捕捉球形立体靶标的图像信息,结合多目视觉定位算法,实时计算靶标在三维空间中的位姿。其中,线激光传感器与立体靶标刚性连接,通过对立体靶标实时定位,可求解出线激光传感器的位姿信息。多目视觉跟踪测量系统中各坐标系之间的转换关系如图2所示。

在系统中,设置4个相机以合理的基线距离分布,组成多目视觉系统。立体靶标始终在多目视觉系统的测量范围内移动,以便多目视觉系统对其进行实时定位。同时,与立体靶标刚性连接的线激光传感器采集被测物体的实时点云数据,并通过数据线将点云信息传输至工控机中。

1.2 多相机联合标定

基于张正友标定法完成单目相机的内参标定,对于双目相机系统的外参标定,左右相机坐标系间的空间转

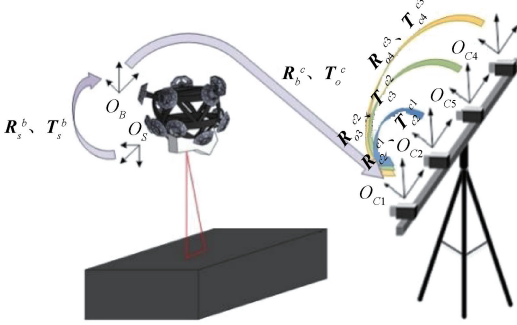


图2 系统模型

Fig. 2 Diagram of the system model

换关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbf{R}_l \mathbf{R}_l^T \\ \mathbf{T} = \mathbf{T}_l - \mathbf{R} \mathbf{T}_l \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 为右相机对于左相机的旋转和平移矩阵; \mathbf{R}_l 、 \mathbf{R}_r 表示空间内一点相对于左右相机的旋转矩阵; \mathbf{T}_l 、 \mathbf{T}_r 表示空间内一点相对于左右相机的平移矩阵。

设置 N 个相机处于同一高度水平线上, 调整相机之间的间距, 保证相邻相机间视野重叠度不低于 $1/3$ 。在多相机系统中, 选取相邻相机组成双目系统, 将棋盘格标定板置于双目系统的公共视场内, 确保标定板可同时被 2 个相机完整成像^[15]。通过多次调整标定板的空位姿并检测其角点特征, 求解得到相机 2 相对于相机 1 相对位姿关系 $\mathbf{R}_{c_2}^1$ 、 $\mathbf{T}_{c_2}^1$ 、相机 3 对于相机 2 的相对位姿关系 $\mathbf{R}_{c_3}^2$ 、 $\mathbf{T}_{c_3}^2$ 、……、相机 N 对于相机 $N-1$ 的相对位姿关系 $\mathbf{R}_{c_N}^{N-1}$ 、 $\mathbf{T}_{c_N}^{N-1}$ 。

选取多相机系统中的相机 1 作为主相机, 即令相机 1 坐标系作为全局坐标系, 求取各个副相机坐标系到全局坐标系的映射关系。每个双目系统中右相机坐标系相对于左相机坐标系的转换关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{c_1} = \mathbf{R}_{c_2}^1 \mathbf{X}_{c_2} + \mathbf{T}_{c_2}^1 \\ \mathbf{X}_{c_2} = \mathbf{R}_{c_3}^2 \mathbf{X}_{c_3} + \mathbf{T}_{c_3}^2 \\ \dots \\ \mathbf{X}_{c_{N-1}} = \mathbf{R}_{c_N}^{N-1} \mathbf{X}_{c_N} + \mathbf{T}_{c_N}^{N-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X}_{c_1} 、 \mathbf{X}_{c_2} 、……、 \mathbf{X}_{c_N} 分别为基于相机 1、相机 2、……、相机 N 坐标系下的某点。

相机 3 相对于相机 1 坐标系的位姿可通过相机 2 计算得到, 如式(3)所示。

$$\mathbf{X}_{c_1} = \mathbf{R}_{c_2}^1 \mathbf{R}_{c_3}^2 \mathbf{X}_{c_3} + \mathbf{R}_{c_2}^1 \mathbf{T}_{c_3}^2 + \mathbf{T}_{c_2}^1 \quad (3)$$

同理, 相机 4 相对于相机 1 的位姿转换关系也能通过相机 2 和 3 求得, 如式(4)所示。

$$\mathbf{X}_{c_1} = \mathbf{R}_{c_2}^1 \mathbf{R}_{c_3}^2 \mathbf{R}_{c_4}^3 \mathbf{X}_{c_4} + \mathbf{R}_{c_2}^1 \mathbf{R}_{c_3}^2 \mathbf{T}_{c_4}^3 + \mathbf{R}_{c_2}^1 \mathbf{T}_{c_3}^2 + \mathbf{T}_{c_2}^1 \quad (4)$$

1.3 最优相机视场决策

对立体靶标的定位主要依靠相邻双目相机对其上

标志点的识别与匹配, 采用直径为 9 mm 的圆形标志点, 其投影为椭圆, 进行实时定位过程中, 在偏暗的环境下使用环形光源进行补光, 利用图像中目标与背景的亮度信息差别将标志点的信息突出, 基于图像中心矩平移不变的特性, 借用图像矩原理完成对圆形标志点的中心检测。

设图像有 i 、 j 两个方向, m 、 n 分别为 i 、 j 方向像素的数量, $g(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值, 利用灰度质心原理求解圆心像素坐标, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j) \times i}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \\ y = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j) \times j}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \end{cases} \quad (5)$$

对多次得到的圆心像素值加权取平均值, 减少偏心误差。

当立体靶标在多相机系统内移动时, 同一时刻至多有 3 个相机可拍摄到立体靶标, 只需选取其中一组相邻相机组成双目系统, 即可实现对立体靶标的定位。为有效地选择出对立体靶标定位更为准确的最优相机视场, 以视场内可识别到的标志点数量为判断依据, 设立优化函数, 如式(6)所示。

$$Z_1 = \begin{cases} \max x_i \\ \max x_j \end{cases}, i, j \in 1, 2, 3, 4, j \neq i, \text{且 } |j - i| = 1 \quad (6)$$

式中: x_i 表示第 i 个相机视场内识别到的标志点数量。

通过上式可选择出拍摄到更完整的立体靶标的相机视场, 并保证选取的两个相机视场为相邻相机视场。

该相邻相机视场中视场编号较小的相机即为该双目系统中的左相机, 如式(7)所示。

$$h = \begin{cases} i, & i < j \\ j, & i > j \end{cases} \quad (7)$$

1.4 线激光与立体靶标相对位姿标定

通过标定立体靶标与线激光传感器的空间相对位姿, 建立靶标坐标系到激光传感器坐标系的刚性变换关系, 实现测量数据的坐标统一^[16]。

选用相机 1 和 2 组成双目系统, 将标准球固定放置在距相机系统 1.2 m 处, 通过将线激光投射至标准球体表面, 采集激光坐标系下的球面圆弧点云数据, 基于空间几何拟合可计算得到球心在激光传感器坐标系中的三维坐标^[17]。

使用线激光传感器在不同位姿下对标准球进行多次扫描测量, 根据球心在全局坐标系中的空间不变特

性^[18],计算得到传感器坐标系与靶标坐标系之间的位姿矩阵 R_x 、 T_x 。

1.5 立体靶标标定与定位

建立靶标坐标系,将各个视角下靶标标志点的坐标统一整合到同一坐标系下,实现对所有标志点三维坐标的标定。使用最优视场决策算法选取一组相邻相机组成双目系统,从多角度对靶标进行拍摄,确保相邻的任意两个视角之间,应至少存在5个公共点。采用同名点匹配与位姿解算方法^[19],将不同视角下的标志点坐标拼接至靶标坐标系下^[20]。

针对数据拼接中存在的误差累积问题,通过光束平差算法对全部标志点测量数据进行整体优化,从而降低累计误差对最终测量结果的影响^[21],如式(8)所示。

$$\arg \min_{P_i, M_i} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n v_{ij} d(Q(P_j, M_j), m_{ij})^2 \quad (8)$$

式中: k 为三维空间点个数; n 为拍摄平面个数; m_{ij} 为第 i 个标记点在第 j 个像平面对应的标记点坐标; v_{ij} 表示点 i 在平面 j 上有无成像; P_j 为各个像平面的外参数向量; M_i 为各标志点的坐标向量; $Q(P_j, M_j)$ 是重投影函数; $d(x, y)$ 为欧式距离函数。

1.6 立体靶标位姿优化

使用基于非线性优化与图论原理的图优化算法^[22]对选取的相机视场中识别到的立体靶标位姿进行优化,将3个相机相对于相机1的标定矩阵设为节点位姿,如式(9)所示。

$$V_i = \begin{bmatrix} R_{ci}^{c1} & T_{ci}^{c1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: R_{ci}^{c1} 表示相机 i 相对于相机1的旋转矩阵; T_{ci}^{c1} 表示相机 i 相对于相机1的平移矩阵; V_i 表示第 i 个初始节点位姿。

将识别到的立体靶标的标志点坐标与靶标库内的同名匹配点坐标之间的误差定义为边,优化目标为最小化所有边的代价函数的总和,如式(10)所示。

$$Z_2 = \min \sum_{a=1}^l (p_a - L_a)^2 \quad (10)$$

式中: p_a 表示识别到的标志点坐标; L_a 表示对应靶标库内同名匹配点的坐标。代价函数 $e = p_a - L_a$ 。

当立体靶标在多相机系统内移动时,使用最优相机视场决策识别立体靶标所处的双目视场中左视场位置 h ,参照1.1节,可将标志点位姿统一到相机1坐标系下。当 $h = 1$ 时,坐标系转换公式如式(11)所示。

$$X_1 = R_{c2}^{c1} p + T_{c2}^{c1} \quad (11)$$

式中: X_1 表示转换到相机1坐标系下的标志点三维坐标; p 表示经位姿求解后统一到相机 h 坐标系下的标志点三维坐标。

同理,当 $h = 2$ 时,转换公式如式(12)所示。

$$X_1 = R_{c2}^{c1} R_{c3}^{c2} p + R_{c2}^{c1} T_{c3}^{c2} + T_{c2}^{c1} \quad (12)$$

当 $h = 3$ 时,转换公式如式(13)所示。

$$X_1 = R_{c2}^{c1} R_{c3}^{c2} R_{c4}^{c3} p + R_{c2}^{c1} R_{c3}^{c2} T_{c4}^{c3} + R_{c2}^{c1} T_{c3}^{c2} + T_{c2}^{c1} \quad (13)$$

2 实验验证

2.1 实验系统搭建

为了验证基于多目视觉的立体靶标位姿测量方法的可靠性,搭建了多目视觉-激光跟踪系统。为对立体靶标的精确定位,将4个工业相机和球形立体靶标结合线激光传感器组成了一套三维重建装置。采用外部四目相机系统实现立体靶标的实时定位,结合线激光传感器完成对被测工件的扫描测量。

由于相机的焦距会直接影响相机的视场范围与边缘畸变率^[23],为了平衡成像精度与系统成本,选用焦距为12 mm的工业镜头,其边缘畸变率 $<1\%$,显著低于8 mm工业镜头2.5%~3%的边缘畸变率。在工作距离为1.8 m时,焦距为12 mm的单相机视场为0.96 m×0.72 m,需4台相机才可覆盖1.5 m×1 m的测量范围。因此,系统采用4台配备12 mm焦距镜头的工业相机,设置分辨率为1 920×1 080,采集速率为100 fps。采用双线程架构确保相机拍摄与线激光数据采集的同步性,实验装置布局如图3所示。



图3 实验装置

Fig. 3 Diagram of experimental setup

2.2 多相机标定实验

根据第1章建立的多相机标定模型,使用边长为49.8 mm,规格为12×9的黑白棋盘格实现4个相机的内参标定及各个双目系统的外参标定,解算出4个相机的内部参数如表1所示。

通过获取的相机标定参数反向推导出特征角点的重投影误差,评估的标定精度结果如图4所示。

实验结果显示,多目视觉系统中各双目系统的平均重投影误差为0.05 pixels,最大重投影误差为

表1 相机1~4的内部参数

Table 1 Internal parameters for camera 1 to 4

相机名称	(f_x, f_y)	(u_0, v_0)	k_1	k_2
相机 1	(2 318.89, 2 319.41)	(656.30, 517.85)	-0.005 4	0.603 7
相机 2	(2 327.76, 2 328.67)	(634.17, 521.41)	0.004 5	0.272 8
相机 3	(2 337.79, 2 338.43)	(666.64, 520.58)	0.004 8	0.194 6
相机 4	(2 262.91, 2 263.35)	(676.96, 501.60)	0.011 2	0.167 5

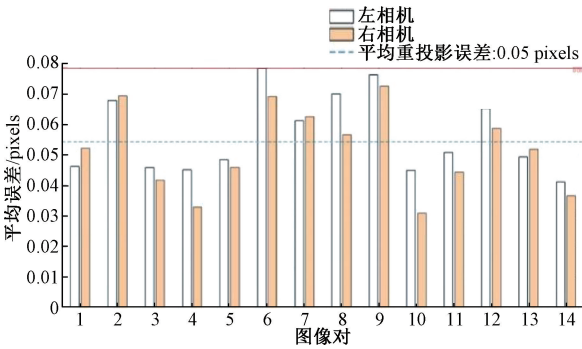


图4 双目系统的标定误差

Fig. 4 Calibration error plot for binocular system

0.08 pixels。而多目系统的联合标定通过公式推导实现,产生的误差可忽略不计,由此可见标定实验的精度较高,标定结果比较接近真实值。

使用1.2节中的相机坐标系转换公式进行计算,求解出相机2、3、4坐标系相对于相机1坐标系的转换关系,并解算成旋转平移参数,结果如表2所示。

2.3 靶标标定精度分析

采用2个工业相机,使用上述检测方法对靶标标志点进行检测,对靶标进行灰度化和阈值化处理,经过滤除后的椭圆拟合定位可视化检测结果如图5所示。

表2 相机2~4相对于相机1坐标系的旋转平移参数

Table 2 Rotational translation parameters of cameras 2~4 with respect to the camera 1 coordinate system

相机名称	旋转角度			平移量		
	X轴	Y轴	Z轴	X轴	Y轴	Z轴
相机 1	0	0	0	0	0	0
相机 2	-0.018 6	0.137 9	-0.021 8	-425.566 6	2.456 9	-35.208 2
相机 3	0.008 9	0.009 6	-0.056 6	-760.777 5	4.364 0	-56.605 1
相机 4	0.000 2	0.067 1	-0.026 3	-1 198.570 7	7.110 5	-87.809 4



图5 靶标标志点检测定位结果

Fig. 5 Target marker detection and localization results

由图5可知,剔除无效椭圆后,左右图像中均识别到17个标志点,可见椭圆拟合定位算法可精确识别出立体靶标上的标志点,且未出现误识别现象。

为了验证双目相机标定立体靶标库的精度,使用重建精度可达0.012 mm的复合式手持激光扫描仪Kscan-Magic对立体的标志点坐标进行标定,并将获取的数据作

为基准值,与1.5节的立体靶标标定方法的进行对比验证,得到所有标志点的三维坐标值如图6所示。

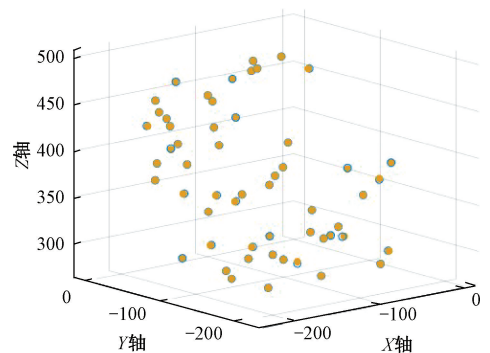


图6 靶标标定实验结果

Fig. 6 Target calibration experiment results

图 6 中空心点为使用靶标库扫描重建方法的标定结果,实心点为使用 Kscan-Magic 激光扫描仪扫描得到的标定结果。因 2 种方法的标定结果重合度较高,随着观察角度的改变,坐标数据将会互相覆盖。

为了更直观的显示两种标定方法的差别,计算两系统重建的同名点之间的绝对距离偏差,结果如图 7 所示。

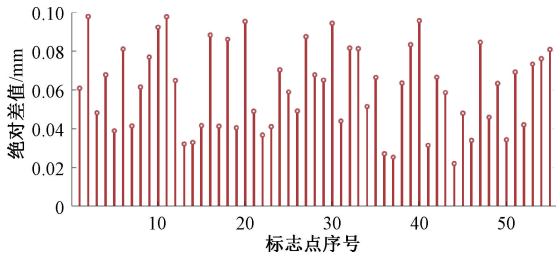


图 7 两系统间的绝对误差

Fig. 7 Absolute error between two systems

实验结果表明,该标定方法的平均绝对误差为 0.06 mm,最大误差不超过 0.1 mm。这一精度水平满足靶标库标定的技术要求,能够为后续实验提供可靠的数据基础。

为验证靶标的定位精度,将立体靶标固定于可移动支撑机构,在 1.8 m 距离处布置相机系统。支撑架运位移程中,某一时刻下左右相机的定位匹配结果如图 8 所示。

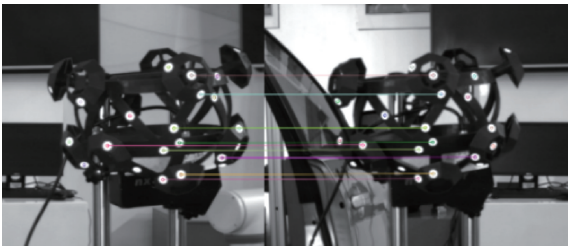


图 8 左右相机在某一时刻的定位匹配结果

Fig. 8 Localization matching results for left and right cameras at a given moment in time

图中左右相机视角下的立体靶标成功匹配且匹配结果正确的同名点个数为 9 个,符合位姿解算方法的要求(同名点个数>5 个)。

可利用同名点匹配和位姿解算方法,计算出由相机重建识别到的点转换到靶标库的坐标的变换矩阵 $[R, T]$,即:

$$R = \begin{bmatrix} -0.771 & 257.4 & -0.441 & 873.67 & -0.458 & 158.02 \\ 0.0537 & 981.09 & 0.671 & 955.59 & -0.738 & 634.59 \\ 0.634 & 245.22 & -0.594 & 325.66 & -0.494 & 479.36 \end{bmatrix}$$

$$T = [911.227 \ 42 \ 943.917 \ 66 \ 813.977 \ 29]^T$$

由此可以获得目标帧中 9 个标志点转换到全局坐标

系下的一系列三维坐标,如图 9 所示,图中实心点即为该目标帧识别到的标志点坐标。

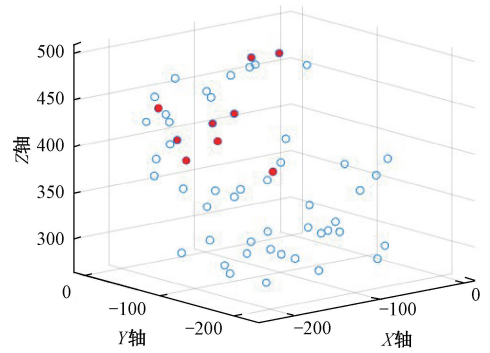


图 9 目标帧识别的标志点图

Fig. 9 Map of marker points for target frame identification

将目标帧中标志点转换到全局坐标系的坐标与对应的靶标库中三维点坐标进行对比,计算出对应的定位误差,如式(14)所示。

$$E = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2 + (Z_a - Z_b)^2} \tag{14}$$

式中: X_a, Y_a, Z_a 分别表示目标帧中识别到的标志点经位姿解算转换到全局坐标系中的三维坐标; X_b, Y_b, Z_b 分别表示与目标帧识别的标志点对应的靶标库中的三维坐标。对比结果如表 3 所示。

表 3 标志点转换坐标与靶标库坐标之间的定位误差
Table 3 Positioning error between the transformed coordinates of the marking point and the coordinates of the target library

序号	X_a	Y_a	Z_a	X_b	Y_b	Z_b	误差/mm
1	-114.88	10.21	363.46	-114.79	10.05	363.18	0.112 1
2	-120.19	15.70	385.15	-120.53	15.68	385.04	0.128 1
3	-154.71	1.25	428.76	-154.97	1.36	428.52	0.137 2
4	-98.42	-13.97	386.29	-98.85	-13.77	386.28	0.225 0
5	-41.72	-22.17	344.72	-41.40	-22.06	344.89	0.143 4
6	-104.62	-13.75	406.39	-104.87	-13.99	406.55	0.145 7
7	-85.29	-20.62	415.36	-85.53	-20.87	415.18	0.152 5
8	-62.35	-17.51	471.04	-62.87	-17.79	471.07	0.349 7
9	-47.07	-36.59	476.93	-46.91	-36.73	476.89	0.046 8
平均绝对误差							0.160 1

由表格数据可以看出,该定位算法识别的目标帧标志点坐标与靶标库坐标之间的平均定位误差为 0.160 1 mm,有较高的定位精度。可视化图像如图 10 所示。

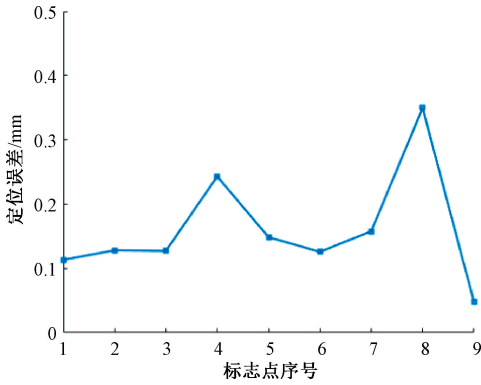


图10 标志点定位误差

Fig. 10 Marker positioning error chart

由图10可知,在距多目视觉系统1.8 m处,立体靶标的最小定位误差为0.05 mm,最大定位误差为0.35 mm,可以实现对靶标的精准定位。

2.4 立体靶标测量不确定度评估

为评估靶标定位的不确定度,实验采用高精度六自由度机械臂(平移精度0.03 mm,旋转精度 0.003°)作为运动平台,将立体靶标安装于其末端。在1.8 m测试距离下,控制机械臂沿相机三轴方向各进行20次固定距离的平移运动。识别并记录每次平移完成后的靶标位置信息,通过计算立体靶标当前帧与前一帧的相对位姿,得到靶标在相机坐标系下的位移变化量。将测量结果与机械臂预设的5 mm位移量进行对比,通过计算立体靶标在 x 、 y 、 z 轴方向位移误差的平均值,定量评估系统的平移定位精度。实验结果如图11所示, t_x 、 t_y 、 t_z 分别表示 x 、 y 、 z 方向的平移误差分量。

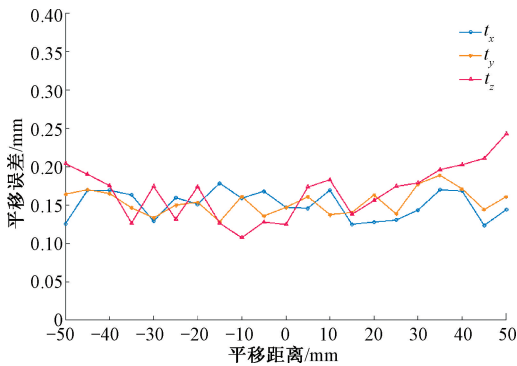


图11 立体靶标平移误差分析

Fig. 11 Stereo target translation error analysis

如图11所示,在 x 与 y 轴的100 mm平移区间内,立体靶标 x 、 y 轴方向上的平移误差 t_x 、 t_y 均 <0.2 mm。随着沿 z 轴距离增加, t_z 方向上的误差逐渐增大。

同理,控制机械臂分别沿相机坐标系 x 、 y 、 z 轴各执行20次 5° 固定角度的旋转运动,采用与平移定位误差分

析同样的方法,对系统旋转定位精度进行定量分析。实验结果如图12所示, r_x 、 r_y 、 r_z 分别表示 x 、 y 、 z 方向的旋转误差分量。

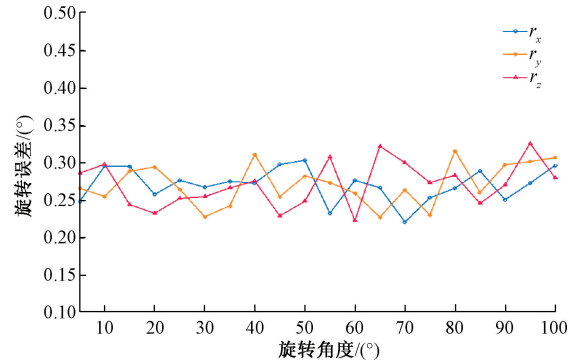


图12 立体靶标旋转误差分析

Fig. 12 Stereo target rotation error analysis

如图12所示,在绕相机 x 、 y 、 z 轴旋转 $0^\circ \sim 100^\circ$ 的范围内,立体靶标的旋转误差 r_x 、 r_y 、 r_z 基本稳定在 $0.25^\circ \sim 0.35^\circ$ 。

通过计算可以得出,立体靶标重复性定位的平移误差以及旋转误差的平均值与标准差如表4所示。

表4 立体靶标重复性定位误差表

Table 4 Table of repeatable positioning errors for stereo targets

立体靶标重复性定位	平均值	标准差
位移误差/mm	0.168 7	0.045 3
旋转误差/ $^\circ$	0.278 1	0.037 2

根据实验数据,对立体靶标的测量进行不确定度评估,如式(15)所示。

$$u_A = s_\Delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2} \quad (15)$$

式中: u_A 表示由实验统计引起的测量不确定度分量; s_Δ 表示测量误差的标准差; n 表示测量次数; Δ_i 表示系统测量值与机械臂测量值的差值; $\bar{\Delta}$ 表示测量误差的均值。

由表4可知,实验测量得到的立体靶标平移不确定度分量为0.045 3 mm,旋转不确定度分量为 $0.037 2^\circ$ 。实验使用的高精度机械臂的平移校准不确定度为0.03 mm,旋转不确定度为 0.03° ,则合成标准不确定度如式(16)所示。

$$\begin{cases} u_t = \sqrt{u_{At}^2 + u_{Bt}^2} \\ u_r = \sqrt{u_{Ar}^2 + u_{Br}^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_t 、 u_r 分别表示立体靶标的平移、旋转合成不确定度; u_{At} 、 u_{Ar} 分别表示实验测量得到的靶标平移、旋转不确

定度量; u_{B_t} 、 u_{B_r} 分别表示高精度机械臂引入的平移、旋转不确定度量。

通过计算可得, 立体靶标的平移合成不确定度为 0.054 3 mm, 旋转合成不确定度为 0.047 8°。

2.5 测量范围对比实验

为了更直观地展示多目视觉系统与单目系统和双目系统的区别, 本研究使用相同参数的工业相机, 分别搭建了单目系统、双目系统和多目系统, 以视觉系统的水平分布线为基线, 分别测量了距离单目系统、双目系统和多目系统 0.5、1 和 2 m 处的横向检测范围, 测量结果如表 5 所示。结果表明, 多相机系统有效地扩大了测量范围, 更有利于大型工件的测量。

表 5 单目、双目和多目系统测量范围验证表

Table 5 Verification table for measurement range of monocular, binocular, and multiocular systems

与相机系统水平分布 线的垂直距离	单目系统 测量范围	双目系统 测量范围	多目系统 测量范围
0.5	0.36	0.58	0.93
1.0	0.48	0.72	1.18
2.0	0.64	0.97	1.46

2.6 复杂大曲面重建实验

为在复杂大曲率构件重建中的适用性, 选取尺寸为 1.2 m×0.8 m 的汽车前门为测量对象进行扫描重建。通过线激光传感器实时采集三维点云数据, 经工控机处理后生成的点云数据模型如图 13(a) 所示。点云渲染图如图 13(b) 所示, 可以看出除不可避免的遮挡区域外, 实验的整体扫描效果较好。

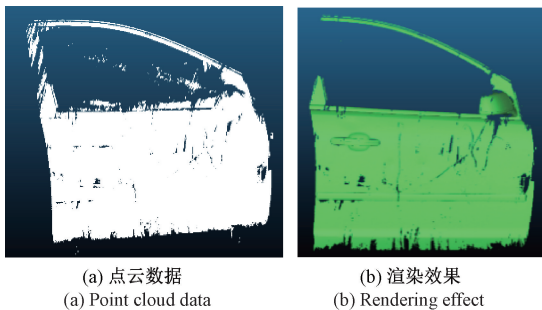


图 13 扫描重建实验结果

Fig. 13 Scanning reconstruction experiment results

3 结 论

文中提出了一种基于多相机视觉跟踪的大型工件三

维重建方法。与传统方法相比, 采用立体靶标作为空间基准标志物, 在立体靶标上放置标志点, 避免了将标记直接贴在被测工件上。同时有效解决了线激光传感器表面特征不明显, 难以识别的问题。多相机提供的大范围视野配合最优相机视场决策, 使得线激光传感器可以实现对大型工件的一次性扫描, 无需进行点云拼接, 避免引入重复误差。

由于线激光扫描技术属于光学测量原理, 其测量精度易受环境光照和目标表面反射特性的影响。在实验实施过程中, 应当控制环境光照强度并增设人造光源作为主要光照, 同时选择哑光材质的试件。为了提升该系统的环境适应性, 需进一步开发抗环境干扰的算法。

实验表明, 测量系统对立体靶标的平均定位误差为 0.160 1 mm, 平移合成不确定度为 0.054 3 mm, 旋转合成不确定度为 0.047 8°, 证明了该定位测量系统的有效性, 满足大型构件三维形貌测量的基本要求。

参考文献

- [1] PENG Y P, WU ZH B, CAO G ZH, et al. Three-dimensional reconstruction of wear particles by multi-view contour fitting and dense point-cloud interpolation [J]. Measurement, 2021, 181(2):109638.
- [2] JATESIKTAT P, LIM G M, ANG W T, et al. Multi-camera calibration using far-range dual-LED wand and near-range chessboard fused in bundle adjustment [J]. Sensors, 2024, 24(23):7416.
- [3] LIU ZH, LI X J, LI F J, et al. Fast and flexible movable vision measurement for the surface of a large-sized object [J]. Sensors, 2015, 15(3):4643-4657.
- [4] SHI J L, SUN ZH X. Large-scale three-dimensional measurement based on LED marker tracking [J]. The Visual Computer, 2016, 32(2):179-190.
- [5] JI X P, FANG Q, DONG J T, et al. A survey on monocular 3D human pose estimation [J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2020, 2(6):471-500.
- [6] LI B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision [J]. Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018(1):1-9.
- [7] 李晓捷, 王佳, 耿磊, 等. 边缘恢复的大尺寸平面零件测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4):54-62. LI X J, WANG J, GENG L, et al. Edge-recovery-based measurement method for large-scale planar components [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4):

- 54-62.
- [8] ZHANG L G, YANG Q L, SUN Q, et al. Research on the size of mechanical parts based on image recognition[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, 59(2):425-432.
- [9] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学 精密工程*, 2010,18(1):126-134.
LIU J W, LIANG J, LIANG X H, et al. Large-scale industrial vision measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 126-134.
- [10] XIANG R, HE W H, ZHANG X N, et al. Size measurement based on a two-camera machine vision system for the bayonets of automobile brake pads [J]. *Measurement*, 2018, 122(6): 106-116.
- [11] HUANG SH F, QIN H F, ZHOU ZH F. Vision measurement for flat parts based on local line-angle contour segmentation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(8): 085012.
- [12] ZHANG G Y, ZOU W B, ZHANG X J, et al. Singular value decomposition based virtual representation for face recognition [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(6): 7171-7186.
- [13] XU J, BO CH J, WANG D, et al. A novel multi-target multi-camera tracking approach based on feature grouping[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 92(9): 107153.
- [14] HAMID R, KUMAR R, HODGINS J, et al. A visualization framework for team sports captured using multiple static cameras[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2014, 118: 171-183.
- [15] 黄刚. 双目视觉系统实现羽毛球实时跟踪[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(6): 117-123.
HUANG G. Real-time badminton tracking using binocular vision system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(6): 117-123.
- [16] 石照耀,孙衍强. 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法[J]. *仪器仪表学报*,2021, 42(12):39-46.
SHI ZH Y, SUN Y Q. Pose calibration method for line laser sensors in gear 3D measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(12): 39-46.
- [17] 罗哉,赵洪楠,江文松,等. 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(12): 184-190.
LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. Detection and localization of reference holes based on line laser scanning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(12): 184-190.
- [18] WU CH Y, YANG L, LUO Z, et al. Linear laser scanning measurement method tracking by a binocular vision[J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3572.
- [19] 陈媛,罗哉,杨力,等. 一种基于立体靶标定位的三维重建方法[J]. *计量学报*, 2024, 45(4): 471-479.
CHEN Y, LUO Z, YANG L, et al. A stereo target-based 3D reconstruction method with metrological characterization[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2024, 45(4): 471-479.
- [20] CHEN Y, JIANG W S, LUO Z, et al. A novel 3D reconstruction method with a binocular-line laser system[J]. *Measurement*, 2024, 227(11): 114238.
- [21] 姚二亮,张合新,张国良,等. 基于 Vision-IMU 的机器人同时定位与地图创建算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(4): 230-238.
YAO ER L, ZHANG H X, ZHANG G L, et al. Vision-IMU-based simultaneous localization and mapping algorithm for robots [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(4): 230-238.
- [22] SUN H X, ZHANG Y Y, ZHENG Y J, et al. G2O-Pose: Real-time monocular 3D human pose estimation based on general graph optimization[J]. *Sensors*, 2022, 22(21): 8335.
- [23] HOLD-GEOFFROY Y, PICHÉ-MEUNIER D, SUNKAVALLI K, et al. A perceptual measure for deep single image camera and lens calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023, 45(9): 10603-10614.

作者简介



关玮童,2022 年于中国计量大学获得学士学位,现于中国计量大学攻读硕士学位,主要研究方向为三维测量与重建技术。

E-mail: 180020134@cjlu.edu.cn

Guan Weitong received her B. Sc. degree from China Jiliang University in 2022. She is currently pursuing her M. Sc. degree at China Jiliang University. Her main research interests include 3D measurement and reconstruction technologies.



罗哉(通信作者),2001年于合肥工业大学获得学士学位,2005年于合肥工业大学获得硕士和博士学位,现为中国计量大学教授,主要研究方向为汽车零部件检测与精密测试技术。

E-mail: luozai@cjl. edu. cn

Luo Zai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2001, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Hefei University of Technology in 2005. He is currently a professor at China Jiliang University. His main research interests include automotive component inspection and precision measurement technology.



江文松,2011年于安徽理工大学获得学士学位,2014年于中国计量大学获得硕士学位,2018年于北京航空航天大学获得博士学位,现为中国计量大学副教授,主要研究方向为视觉测量及仪器与智能检测及装备。

E-mail: jwensong@cjl. edu. cn

Jiang Wensong received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2011, M. Sc. degree from China Jiliang University in 2014, and Ph. D. degree from Beihang University in 2018. He is currently an associate professor at China Jiliang University. His main research interests include integrated vision metrology instrumentation and intelligent inspection systems.



杨力,2001年于武汉科技学院获得学士学位,2004年于武汉大学获得硕士学位,2013年于浙江大学获得博士学位,现为中国计量大学教授,主要研究方向为人工智能技术。

E-mail: lyang@cjl. edu. cn

Yang Li received his B. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 2001, M. Sc. degree from Wuhan University in 2004, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2013. He is currently a professor at China Jiliang University. His main research interest is artificial intelligence technology.