

文章编号 1004-924X(2024)07-0976-11

面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量

高豆豆^{1,2}, 董登峰^{1,2*}, 邱启帆^{1,3}, 崔成君¹, 王 博¹

(1. 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南京航空航天大学 自动化学学院, 江苏 南京 211106)

摘要:针对我国高端制造业对高精度空间六自由度测量系统的迫切需求,提出一种面向激光跟踪测量的基于单目视觉的大范围全自动高精度姿态测量方法。阐述了面向激光跟踪测量的姿态测量系统构成、合作靶标硬件设计,并建立了姿态测量数学模型;其次,分析了自适应清晰成像的姿态测量模块特性,基于光学畸变模型与张正友标定法建立了实时相机成像模型,动态校正特征点像素坐标模型,提升了特征点的提取精度;之后,结合作靶标几何特性、EPnP算法、Soft-POSIT算法提出一种改进的姿态测量方法,建立了姿态测量系统的自动监测纠错机制,实现测量范围内任意动态位姿的自动测量。最后,利用二维精密转台搭载合作靶标对激光跟踪测量的姿态测量系统进行精度测试。实验结果表明:在3~10 m,方位角/俯仰角为 $\pm 30^\circ$ 、滚动角为 $\pm 180^\circ$ 内,适配有14个特征点的合作靶标,姿态测量精度优于 0.049° ;适配有10个特征点的合作靶标,姿态测量精度优于 0.065° 。此方法普适性强,对合作靶标特征点布局约束较小,可以满足高端制造业激光跟踪测量的精密测量需求。

关键词:激光跟踪测量;单目视觉;自适应测量;姿态测量

中图分类号:TH744;TP391.41 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243207.0976

Large range automatic attitude measurement method for laser tracking measurement

GAO Doudou^{1,2}, DONG Dengfeng^{1,2*}, QIU Qifan^{1,3}, CUI Chengjun¹, WANG Bo¹

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

* Corresponding author, E-mail: dongdengfeng@ime.ac.cn

Abstract: Considering the critical need for a high-precision, six-degree-of-freedom measurement system in China's advanced manufacturing sector, this study introduces a novel approach for large-scale, high-accuracy attitude measurement utilizing a monocular vision module for laser tracking. Initially, the paper outlines the hardware configuration of the laser tracking measurement system, encompassing both the attitude measurement system and the cooperative target, and establishes a mathematical model to define spatial attitude angles accurately. It then delves into the adaptive clear imaging features of the attitude measurement

收稿日期:2023-09-16;修订日期:2023-10-10.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No.2023YFB3407900)

module. By leveraging an optical distortion model and Zhengyou Zhang's calibration algorithm, it crafts a real-time camera imaging model that dynamically adjusts the pixel coordinates of feature points, enhancing the precision of feature point extraction. This is further refined by integrating the geometric traits of the cooperative target with the EPnP and SoftPOSIT algorithms, leading to a sophisticated attitude measurement technique complemented by an automatic monitoring and error correction mechanism. This dual approach enables precise automatic measurement across any attitude within the specified distance and measurement range. The system's accuracy was validated through experiments using a two-dimensional precision turntable equipped with a cooperative target, showing an impressive attitude measurement accuracy within a 3-10 m range, with yaw and pitch angles within $\pm 30^\circ$ and roll angle within $\pm 180^\circ$. Specifically, accuracy was better than 0.049° with a 14-feature-point cooperative target and better than 0.065° with a 10-feature-point target. These findings underscore the superiority of this method over other recent laser tracking measurement techniques, highlighting its broad applicability and minimal constraints on the cooperative target's feature point configuration, thus fulfilling the precision measurement demands of high-end manufacturing's laser tracking and measurement.

Key words: laser tracking measurement; monocular vision; adaptive measurement; attitude measurement

1 引言

随着我国航空航天、船舶潜艇、高铁汽车和大型科学装置等高端装备的快速发展以及先进制造业的日新月异,国内相关厂商对精密测量、精密制造仪器设备的需求越来越迫切。

在航天发动机总装、航空机翼机身装配、飞行器安装、汽车装配、大型船舶装配对接和工业机器人校准补偿等大型高端智能制造领域^[1-2],装配制造系统需要同时获取目标的空间坐标信息与姿态信息,传统的三自由度空间坐标测量技术已经不能满足测量要求,因此,亟需发展高性能大范围的空间姿态测量技术,形成新型空间六自由度测量系统。当前,国内关于空间位置三自由度测量技术日趋成熟,但空间姿态三自由度高性能测量技术仍面临巨大挑战。

空间姿态包括方位角、俯仰角和滚动角空间三维转角。面向姿态测量,Liu F等^[3]提出了一种用于固定翼飞机相对姿态测量的单目非机载视觉系统,在实际飞行实验中最大姿态测量误差优于 1.0° 。薛伟等^[4]基于迭代最小二乘法与单目视觉设计了一种气浮平台姿态测量方法,动态测量精度约为 0.12° 。徐洋等^[5]设计了

一种适用于高超声速风洞的双目视觉测量系统,在1.2 m测量距离内姿态测量误差优于 0.08° 。Zeng等^[6]提出了一种利用双目视觉检测辅助标记点测量液压支架姿态的方法,可以适应煤矿生产的恶劣工作环境。Wang等^[7]设计了一种基于单目线扫描视觉的姿态测量系统。Yang等^[8]依托卷积神经网络设计了一种用于虚拟现实技术的单目视觉位姿估计方法。Li等^[9]基于红外视觉相机与激光位移传感器实现六自由度测量,姿态测量精度达到 1.1° 。Wan等^[10]融合视觉与惯性传感器实现了对掘进机的位姿测量。陈平等^[11]基于视觉与力觉组合测量沉孔零件位姿,角度误差达到 1.8° 。

综上可知,视觉测量具有模型简单、稳定性强的特点,与基于视觉的多传感器融合测量是一类通用的姿态测量方法。相较于多传感器融合方案,单目视觉测量因为涉及的坐标系与误差源较少,可作为姿态测量的首选方案。经典的视觉姿态测量方法可以分为两类:以EPnP算法^[12]为代表的通用算法,只能用于解析特征点对应关系已知的情况,不具备泛用性;以SoftPOSIT算法^[13]为代表的同时实现特征点匹配与姿态解算的算法,则需要输入较为精确的初始位姿信息用

于解算,否则无法完成精准解析。在实际工程环境中,特征点对应关系与初始姿态信息大多为未知量,因此,如何实现工程测量中的姿态测量成为一项研究重点。

面向激光跟踪的姿态测量技术研究起步较早,主要成果有 API STS, Leica T-Mac/T-Scan/T-Probe 等跟踪控制探测器^[14],使用时需要匹配相应的激光跟踪仪。国内针对该领域的姿态测量技术研发尚未成熟。天津大学团队针对盾构导向应用,以全站仪为基站,研究了融合光学、视觉、IMU 等多传感器的姿态测量技术^[15],但测角量程较小。湖北工业大学与中国科学院微电子研究所合作研究了单目视觉姿态测量方法、PSD 与单目视觉融合测量方法、加权正交迭代法等^[1,16-18],最优测角精度为 0.11° ,仍有提升空间。周道德等^[19]提出基于深度学习与 PnP 模型的姿态测量方法,在 3 m 内其测试精度达到 0.03° ,但在激光跟踪测量场景中解算错误的概率较大,实际应用受限。Meng 等^[20]展望了 PSD 在姿态测量中的前景,但未实现实际应用。

为提升激光跟踪测量系统的姿态测量精度与测量范围,并解决特征点匹配关系未知时需要初始位姿信息的问题,本文提出一种基于单目视觉的大范围全自动姿态测量方案,该方案测量精度高,具有广泛的适用性。

2 姿态测量系统设计

2.1 硬件设计

姿态测量系统通过单目视觉单元与空间合作目标配合实现姿态角的高精度大范围测量,如图 1 所示。激光跟踪测量系统主机内的主要模块包括单目视觉模块、空间坐标测量模块与跟踪模块,各模块间为刚性连接。空间合作目标为六自由度合作靶标,表面装有多组红外 LED,作为识别特征点,中心安装有角锥棱镜。

单目视觉模块包括高速采集相机、电动调焦

镜头、电控单元及数据传输单元,用于大范围自适应清晰捕捉合作目标与姿态解算。空间坐标测量模块内置激光器,激光跟踪测量系统工作时,激光器产生稳定出射光,出射光经光路折射至跟踪模块,然后经主机出光口入射至合作靶标中心的角锥棱镜,并折返回主机。依据折返光方向,跟踪模块控制调整主机方向,使出射光始终正对角锥棱镜中心,保持主机对合作靶标的跟踪状态。根据折返光与出射光的回程差,空间坐标测量模块解析出精确的空间测距值,即系统工作距离,结合主机转动量,进一步解算得到合作靶标的空间坐标。由于系统具有跟踪性能,且主机内各模块为刚性连接,因此,合作靶标在任意移动时可始终处于单目视觉模块视场内,避免合作目标无法捕捉的情形。又因系统的工作距离实时可知,电动调焦镜头依据这一参数可自适应调节景深,实现单目视觉模块对合作靶标的大范围清晰成像。

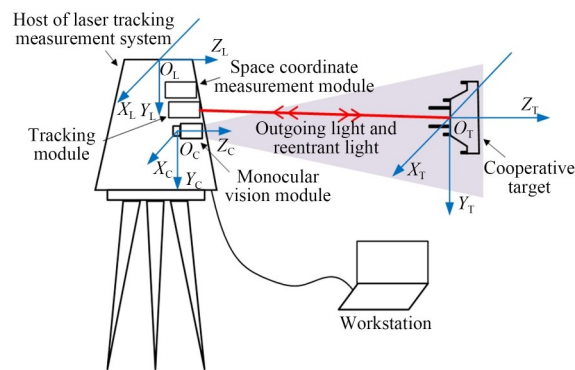


图1 激光跟踪测量的姿态测量系统组成

Fig.1 Composition of attitude measurement system for laser tracking measurement

基于特征点个数对姿态解算精度的影响^[1],合作靶标特征点数选取 10~16 个,非共面分布在合作靶标表面。图 2 展示了一种布局策略,14 个红外 LED 主动发光点均匀分布在合作靶标表面,从上到下为“2-6-6”三层分布。每层特征点个数大于 1,所有特征点满足非共面要求,构成冗余约束,用于降低特征点质心坐标检测误差对姿态解算精度的影响。

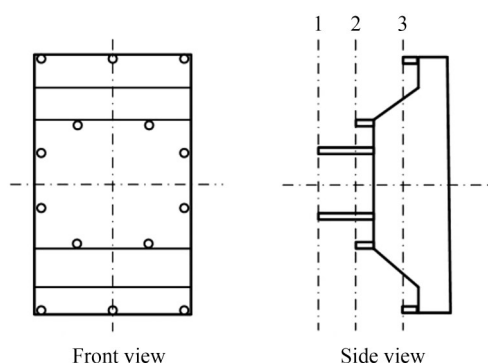


图2 合作靶标红外LED布局

Fig. 2 Infrared LEDs' layout of cooperative target

2.2 数学模型

如图1所示,姿态测量系统共包含3个刚体坐标系,分别为激光跟踪测量系统坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 、视觉模块坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ (与相机坐标系重合) 和合作靶标坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 。

记任一点空间坐标为 p , 则该点在3个坐标系间的转换关系可表示为:

$$\begin{cases} {}^L p = {}^L R \cdot {}^C p + {}^L t_C \\ {}^C p = {}^C R \cdot {}^T p + {}^C t_T \\ {}^L p = {}^L R \cdot {}^T p + {}^L t_T \end{cases} \quad (1)$$

其中: ${}^L R$ 为视觉模块坐标系相对于激光跟踪测量系统坐标系的旋转矩阵, ${}^L t_C$ 为其平移矩阵; ${}^C R$ 为合作靶标坐标系相对于视觉模块坐标系的旋转矩阵, ${}^C t_T$ 为其平移矩阵; ${}^L R$ 为合作靶标坐标系相对于激光跟踪测量系统坐标系的旋转矩阵, ${}^L t_T$ 为其平移矩阵。

由式(1)可得:

$${}^L R = {}^L R \cdot {}^C R. \quad (2)$$

进一步地,本系统的姿态测量问题可分解为实时求解 ${}^L R$ 与 ${}^C R$ 。其中, ${}^L R$ 通过系统坐标系标定得到。

为方便精度评价,定义合作靶标绕激光跟踪测量系统坐标系按照“X-Y-Z”顺序旋转,绕X轴旋转角为俯仰角 α , 绕Y轴旋转角为方位角 β , 绕Z轴旋转角为滚动角 γ 。建立姿态角与旋转矩阵

$${}^L R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \text{ 的转换关系如下:}$$

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{r_{32}}{r_{33}} \\ \beta = \arctan \frac{-r_{31}}{\sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}} \\ \gamma = \arctan \frac{r_{21}}{r_{11}} \end{cases} \quad (3)$$

3 姿态测量算法

姿态测量算法的核心为解算合作靶标坐标系相对于相机坐标系的转换矩阵,合作靶标外表面LED为特征点集,记LED个数为 N 。LED质心在合作靶标坐标系下的坐标为 ${}^T P = \{(X_i, Y_i, Z_i)^T\}$, 在相机坐标系下的坐标为 ${}^C P = \{(x_i, y_i, z_i)^T\}$, 在像素坐标系下的理想坐标为 ${}^I P = \{(u_i, v_i, 1)^T\}$, 其中 $i \in [1, N]$ 。转换关系如下:

$$\begin{cases} {}^C P = {}^C R \cdot {}^T P + {}^C t_T \\ {}^I P = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot s \cdot {}^C P \end{cases} \quad (4)$$

其中: (f_u, f_v, u_0, v_0) 分别为像素坐标系两个方向的等效焦距与相机中心点像素坐标, $s = 1/z_i$ 为缩放因子。由于镜头成像存在畸变,特征点的实际像素坐标与式(4)存在一定差异,需要对图像进行畸变校正, ${}^I P$ 为校正后坐标。

3.1 实时相机成像模型

电动调焦镜头依据镜头的光学传递函数、弥散斑在不同后截距、工作距离时的表现情况,可以确定不同物距下的最优后截距,并进行函数拟合,如图3所示,实现2~20 m测量范围内合作靶标的清晰成像。图3中, d_w 为工作距离, f_b 为后截距。

实时调焦过程中随着后截距的改变,成像畸变信息会发生较大的变化,而图像中心点位置几乎无变化。因此, (f_u, f_v, u_0, v_0) 随后截距变化产生的变化量非常微小,可忽略不计,采用张正友标定法即可完成数值标定。由于图像畸变信息动态变化,采用传统标定方法标定畸变参数则需要采集大量的数据,耗时耗力,为实现快速标定,本文基于光学仿真数据建立了畸变信息数学模

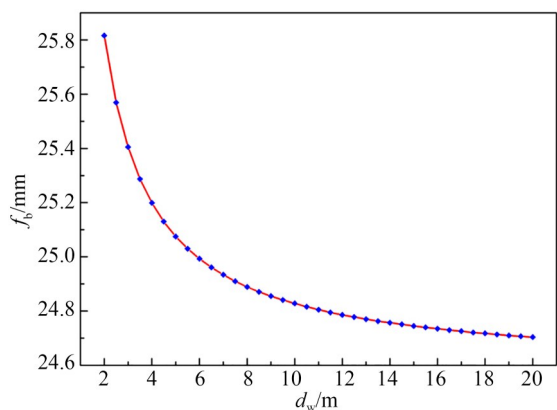


图3 电动调焦镜头工作距离-后截距拟合曲线

Fig. 3 Working distance-back focal length fitting curve of electric focusing lens

型,实现快速实时图像校正。

根据镜头光学模型的多参数畸变仿真,得到单目视觉模块畸变率随工作距离、光斑投影位置变换而产生的变化,如图4所示,光斑为合作靶标的LED经电动调焦镜头投影到相机上的像。其中,工作距离 d_w 为 0~20 m,光斑质心位置 d_p 为 0~5.5 mm,表示为:

$$d_p = \sqrt{(u_l - u_0)^2 + (v_l - v_0)^2} \cdot c, \quad (5)$$

其中: d_p 为光斑质心与相机中心点间的距离, c 为相机的像元尺寸; (u_l, v_l) 为光斑质心像素坐标,经数字图像处理技术解析获取。

畸变率表述为:

$$R_{dis} = \frac{d_p - d_{pl}}{d_{pl}}, \quad (6)$$

其中: R_{dis} 为畸变率, d_{pl} 为理想光斑质心与相机中

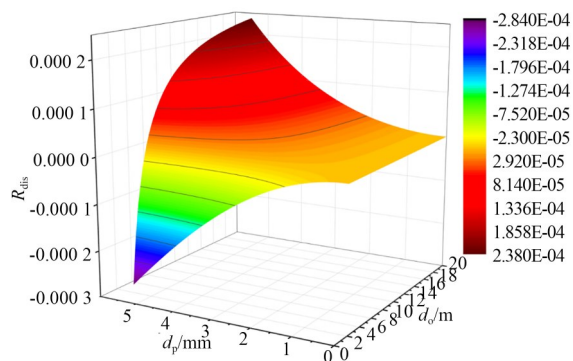


图4 单目视觉模块成像畸变的数学模型

Fig. 4 Mathematical model of monocular vision module imaging distortion

心点间的距离。

由图4可知,图像畸变率与光斑位置、工作距离存在复杂的变化关系,无法建立单一数学模型。为精确校正畸变,依照图像畸变率的全局变化趋势与函数拟合置信度统计,本文采用分段式建模。对工作距离进行4组划分,分别为(0, 3.7), [3.7, 4.4), [4.4, 9), [9, 20], 单位为m,分别进行多项式拟合。结合式(5)、式(6)与多项式拟合规律,得到理想光斑质心与实际光斑质心、工作距离的关系如下:

$$d_{pl} = f(d_p, d_w) = p_{00} + p_{10} \cdot d_p + p_{01} \cdot d_w + p_{20} \cdot d_p^2 + p_{02} \cdot d_w^2 + p_{11} \cdot d_p \cdot d_w + p_{30} \cdot d_p^3 + p_{03} \cdot d_w^3 + p_{21} \cdot d_p^2 \cdot d_w + p_{12} \cdot d_p \cdot d_w^2. \quad (7)$$

d_w 具有4个区间,因此式(7)中的 $p_{ij}(i, j \in [0, 3])$ 共有4组。

由于理想光斑质心位置位于实际光斑质心与相机中心点的连线上,因此二者存在相似的三角形比例关系, 1P 内各像素点坐标记为:

$$\begin{cases} u = \frac{d_{pl} \cdot (u_l - u_0)}{d_p} + u_0 \\ v = \frac{d_{pl} \cdot (v_l - v_0)}{d_p} + v_0 \end{cases}. \quad (8)$$

代入式(4)解得 cP ,完成相机坐标系下特征点坐标的求解。

3.2 位姿解算

在解算特征点物点和像点对应关系未知情况下的高精度姿态时,通常需要操作人员根据观测图像进行手动匹配^[16]或者构建大量初始位姿信息库并通过枚举法进行解算^[21]。前者不适用于全自动化测量,当姿态角测量范围大时,后者初始数据库信息量会爆炸式增长,无法满足对实时性有要求的场合。因此,为实现全自动化姿态测量,本文对EPnP算法和SoftPOSIT算法相结合的方法^[16]进行了改进,建立初始特征点自动匹配算法,改进特征点匹配的权重分配策略,实现姿态信息自动初始化与结果监测,完成大范围实时自动高精度姿态测量。

3.2.1 初始信息解算

${}^T P$ 与 ${}^1 P$ 的匹配关系是未知的,但由图2可知,合作靶标上最外围LED编号1,3,12,14可构成一个四边形,且在合作靶标转动过程中图

像上4点的相对位置关系变化较小,因此可将其作为定位点,基于几何关系完成特征点匹配,解算应用于 SoftPOSIT 算法的初始位姿信息。

记¹ P 中各点的欧氏距离矩阵为 M_{dist} :

$$M_{\text{dist } ij} = (u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2, (i, j \in [1, N]). \quad (9)$$

取 M_{dist} 中的最大值与次大值可定位两组边缘的对角线点,利用四边形顶点间的几何关系即可确定4点的匹配关系。将其像素坐标与合作靶标坐标系坐标按照匹配关系带入EPnP算法,得到初始位姿信息。其中,LED在合作靶标坐标系下的坐标由合作靶标设计提供。

这4点位于同一平面,得到的位姿信息必然是不够精确的,因此不能直接用于精密测量。该方法不局限于图2一种布局方案,适用于所有最外围特征点可构成一个欧氏距离相对关系唯一确定的布局方案。

3.2.2 高精度姿态解算

由EPnP算法解算的初始位姿信息可以确保 SoftPOSIT 算法正确收敛,实现高精度测量。SoftPOSIT 算法包含两层算法:softAssign算法,进行特征点匹配优化;POSIT算法,解算位姿信息。求解过程即两层算法交替迭代寻找最优匹配方案使目标函数最小:

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M m_{ij} \left((Q_1 \cdot P_i - w_i x_j)^2 + (Q_2 \cdot P_i - w_i y_j)^2 - \alpha \right), \quad (10)$$

其中: N 为特征点个数, M 为检测到的像素特征点个数, $m_{ij}(m_{ij} \in [0, 1])$ 为特征点匹配概率矩阵 $M_P(M_P \in \mathbb{R}^{N \times M})$ 的元素, (Q_1, Q_2, P_i, w_i) 为位姿推导过程量,具体含义可参考文献[13], (x_j, y_j) 为像素特征点的归一化坐标, α 为匹配阈值。

为提升正确匹配的特征点在姿态解算中的权重,在 SoftPOSIT 算法匹配结束后,对 m_{ij} 进行再优化。分以下两种情况讨论:

当 m_{ij} 所在行和列的其他元素值均为0时,认为 m_{ij} 所对应的特征点匹配正确,将 m_{ij} 赋值为1。

当 m_{ij} 所在行和列的其他元素值存在非0值

时,参照 Leaky RuLU 函数^[22]对 m_{ij} 所在行和列的元素进行如下变换:

$$m_{lk} = \begin{cases} m_{lk}, & m_{lk} \geq \alpha \\ \gamma m_{lk}, & m_{lk} < \alpha \end{cases}, \quad (11)$$

其中: α 为概率阈值, γ 为惩罚因子。依照实验分析, $\alpha = 0.55, \gamma = 0.5$ 。

3.2.3 算法流程

由于工业检测现场环境复杂,可能存在使 SoftPOSIT 算法陷入局部最优解的情况,且当解算结果出现异常值时该算法并不具备自动校正功能,因此,EPnP算法与 SoftPOSIT 算法简单的串行应用并不能实现高精度自动姿态测量。本文针对这一缺陷,提出了一种自动监测纠错机制,实现全自动姿态测量。

如图5所示,电动调焦镜头依据测距信息实时调整状态,保证单目视觉模块能够实时清晰成像。待电动调焦镜头调整稳定后,相机捕获图像,进行姿态解算。由 SoftPOSIT 算法精确解算位姿信息后,系统将解算的坐标信息与测距信息进行对比,若差值大于异常值阈值,则触发初始信息校正;若小于,则输出解算信息。

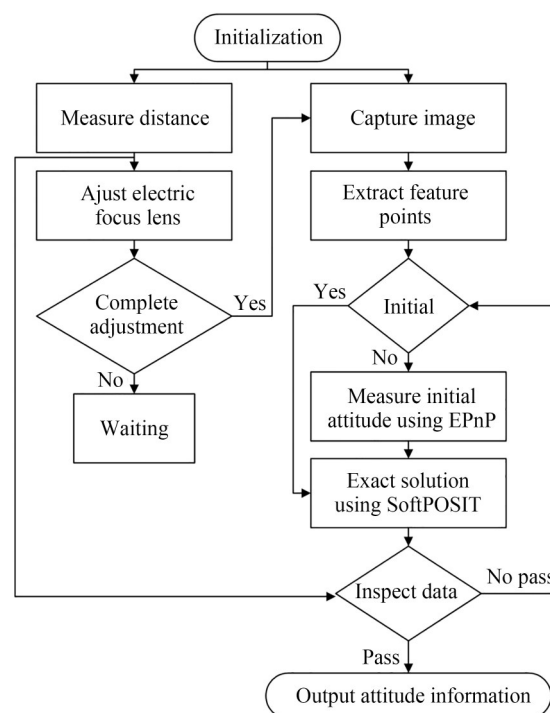


图5 姿态测量算法流程

Fig. 5 Flow chart of attitude measurement algorithm

4 测量实验与结果

为验证方案的可行性与测量精度,构建实验装置如图 6 所示。单目视觉测量模块与空间坐标测量模块集成在仪器主机内部,合作靶标安装于姿态测量转台上,转台为角度发生装置。单目视觉测量模块内,相机为 HIKROBOT MV-CH050-10CM,分辨率为 $2\,432 \times 2\,048$,电动调焦镜头焦距为 50 mm。本系统在精度测试前已完成相机坐标系与激光跟踪测量系统坐标系的标定,因此,本实验的精度评价数据均为激光跟踪测量系统坐标系下的测量数据。测试用转台为精密二维转台,该转台的最大角定位误差为 $7.9''$,重复定位精度为 $1.8''$ 。

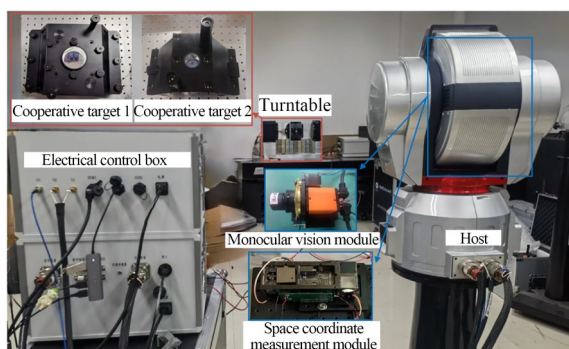


图 6 姿态测量精度测试实验装置

Fig. 6 Attitude measurement accuracy experimental equipment

为验证方案的通用性,共搭配两种规格的合作靶标进行实验。合作靶标 1 安装有 14 个红外 LED,LED 布局如图 2 所示。合作靶标 2 安装有 10 个红外 LED,LED 布局为“2-4-4”。与合作靶标 1 相比,合作靶标 2 减小了体积与 LED 个数。

转台与合作靶标间使用机械件转接,依靠机械加工保证二者为刚性连接。在精度测量开始前,开启激光跟踪测量系统跟踪功能,令主机出射光始终跟随合作靶标。将合作靶标安装到转台上,之后开启激光跟踪测量系统姿态测量功能,上位机自动接收测量结果,参照姿态角解析结果调整转台转角直至激光跟踪测量系统三维姿态角测量值均近似为 0° ,此时三者坐标系近似

平行。该转台为二维转台,具有俯仰轴与滚动轴,因此在进行方位角测量时,调整转台滚动轴旋转 90° ,使转台俯仰轴与合作靶标方位轴近似平行,此时,转台俯仰轴的转动量等效为激光跟踪测量系统测量的方位轴转动量。由于转台与合作靶标的坐标系无法做到完全平行,为减小这一因素引入的精度误差,本实验的单步姿态角测量精度评价公式为:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_i = (\alpha_i - \alpha_{i-1}) - (\theta_i - \theta_{i-1}) \\ \Delta\beta_j = (\beta_j - \beta_{j-1}) - (\theta_j - \theta_{j-1}) \\ \Delta\gamma_k = (\gamma_k - \gamma_{k-1}) - (\theta_k - \theta_{k-1}) \end{cases}, \quad (12)$$

其中: $\Delta\alpha_i$ 为第 i 次测量的俯仰角误差, α_i 为第 i 次激光跟踪测量系统测量的俯仰角, θ_i 为第 i 次转台转动俯仰角,同理 β 表示方位角, γ 表示滚动角, $i, j, k = 1, 2, 3, \dots$ 。

同一距离下姿态角测量精度的评价公式为:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \max(|\Delta\alpha_i|) \\ \Delta\beta = \max(|\Delta\beta_j|) \\ \Delta\gamma = \max(|\Delta\gamma_k|) \end{cases}, \quad (13)$$

其中: $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 分别为俯仰角、方位角和滚动角的最大绝对误差。

为方便数据比较,本实验分别在仪器主机与合作靶标距离 3, 10 m 处进行了实验。测量精度的评价范围如下:俯仰角、方位角测量为 $\pm 30^\circ$,测角步长为 5° ;滚动角测量范围为 $\pm 180^\circ$,测角步长为 30° 。将各坐标系调整至近似平行后,将转台转角清零,记录此刻转台的角度值与激光跟踪测量系统测量值为各自零位。而后按照测角步长转动转台,待转台转角稳定后,记录此刻转台角度值与激光跟踪测量系统测量值为该步长对应的数值。

4.1 合作靶标 1 测试结果

图 7 详细展示了 3, 10 m 处合作靶标 1 的单步姿态角测量误差。其中,每次测量的起始点为激光跟踪测量系统测量值的零位。表 1 汇总了合作靶标 1 的测量精度,10 m 内可实现三维姿态角的连续自动测量,姿态测量精度优于 0.049° 。

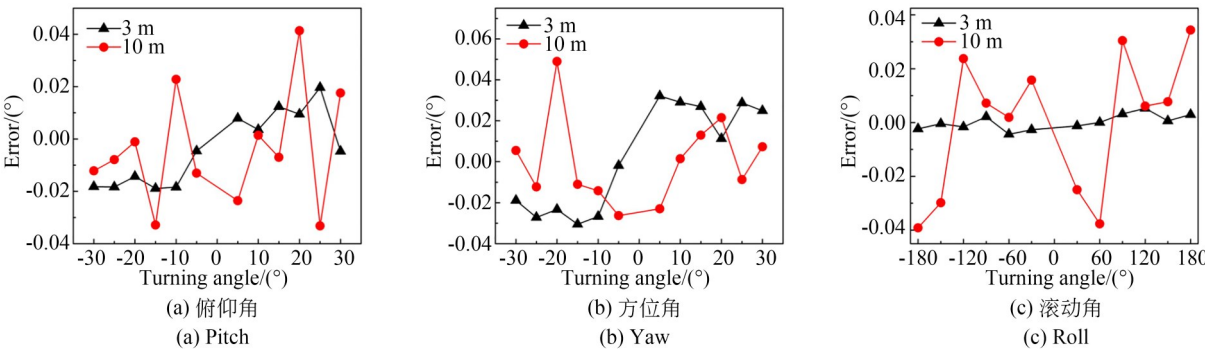


图 7 合作靶标 1 姿态角测量误差
Fig. 7 Attitude measurement error with cooperative target 1

表 1 合作靶标 1 姿态角测量结果
Tab. 1 Result of attitude measurement with cooperative target 1

Distance/m	$\Delta\alpha/(^{\circ})$	$\Delta\beta/(^{\circ})$	$\Delta\gamma/(^{\circ})$
3	0.020	0.032	0.005
10	0.041	0.049	0.039

4.2 合作靶标 2 测试结果

图 8 详细展示了 3, 10 m 处合作靶标 2 的单

步姿态角测量误差。表 2 汇总了合作靶标 2 的测量精度, 10 m 内姿态角测量精度优于 0.065°。

表 2 合作靶标 2 姿态角测量结果
Tab. 2 Result of attitude measurement with cooperative target 2

Distance/m	$\Delta\alpha/(^{\circ})$	$\Delta\beta/(^{\circ})$	$\Delta\gamma/(^{\circ})$
3	0.026	0.026	0.017
10	0.057	0.036	0.065

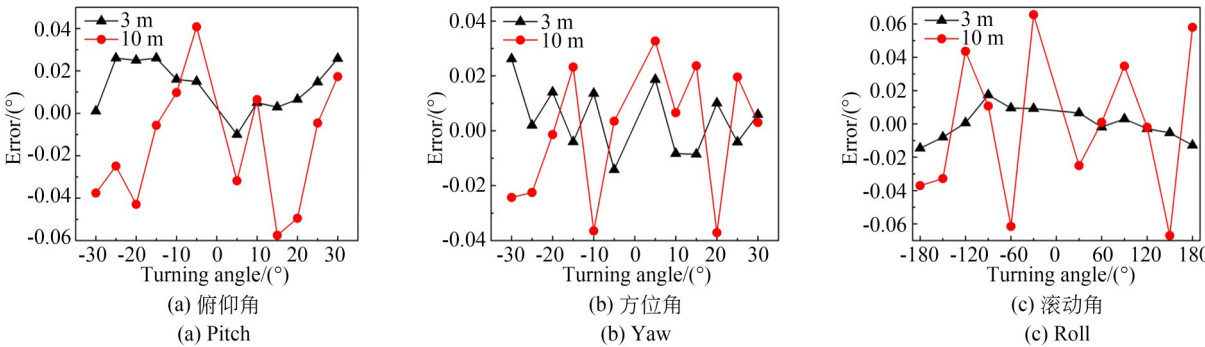


图 8 合作靶标 2 姿态角测量误差
Fig. 8 Attitude measurement error with cooperative target 2

综合作靶标 1、合作靶标 2 的测量数据可以发现,对于同一合作靶标,使用定焦镜头作为成像元件,随着工作距离的增加,激光跟踪测量系统的姿态角测量精度会逐渐下降;对于不同合作靶标,使用同一套测量硬件与测量方法,随着特征点个数的增加,激光跟踪测量系统的姿态角测量精度会有所提升。

表 3 对比了近几年面向激光跟踪测量的姿态测量方法的测量范围与测量精度。其中,视

觉+激光准直^[1]采用最大绝对误差值作为评价指标,测量距离为 2.5 m,测量角度是(±30°, ±30°, ±180°);POSIT^[2]与 WAOI^[2]采用均方根误差作为评价指标,测量距离为 15 m,测量角度是(±20°, ±20°);加权融合法^[18]采用最大绝对误差值作为评价指标,测量距离为 8 m,测量方位角是±30°。相较于上述方法,本文实现了 10 m 内三维姿态角的全自动测量,角度覆盖(±30°, ±30°, ±180°),匹配两种不同的合作靶

标,测量精度分别可达到 0.049° , 0.065° , 具有明显的优势。由图 7 和图 8 可知,测量数据包含一定的系统误差,可能是由于转台与合作靶标间

的坐标系不完全平行引入的,尚无较优的解决方案,因此本文的实际测量精度应优于 0.065° 。

表 3 面向激光跟踪测量的姿态测量方法精度对比

Tab. 3 Comparison of attitude measurement accuracy for laser tracking measurement

Method	Distance range/m	Pitch range/ $(^\circ)$	Yaw range/ $(^\circ)$	Roll range/ $(^\circ)$	$\Delta\alpha/(^\circ)$	$\Delta\beta/(^\circ)$	$\Delta\gamma/(^\circ)$
Vision and laser alignment ^[1]	2.5	± 30	± 30	± 180	0.83	1.21	1.54
POSIT ^[2]	9	± 20	± 20	—	1.03	0.99	—
POSIT ^[2]	15	± 20	± 20	—	1.11	1.15	—
WAOI ^[2]	9	± 20	± 20	—	0.08	0.07	—
WAOI ^[2]	15	± 20	± 20	—	0.26	0.11	—
Weighted fusion method ^[18]	8	—	± 30	—	—	1.76	—
Our cooperative target 1	10	± 30	± 30	± 180	0.041	0.049	0.039
Our cooperative target 2	10	± 30	± 30	± 180	0.057	0.036	0.065

测量过程中,合作靶标可以安装在被测物表面或者手持自由移动,视觉模块可自适应实时清晰成像,完成动态姿态测量,单次姿态测量耗时为 60~90 ms。依靠改进的 EPnP 算法与 Soft-POSIT 算法的结合方案,合作靶标可以在任意位置自动开启姿态测量功能与自动纠错功能,若合作靶标脱靶并重新连接,也可以自动恢复姿态测量功能。

5 结 论

本文面向精密激光跟踪测量的精度需求,提出一种基于自适应视觉单元的姿态测量方法,实现了激光跟踪测量系统的大范围全自动姿态测量。设计了激光跟踪测量的姿态测量系统,建立了数学模型,明确三维姿态测量的定义。结合光

学成像特性与张正友标定法,建立了实时相机成像模型、动态校正特征点质心像素坐标提取;约束合作靶标上特征点布局的几何特性,基于 EPnP 算法与 SoftPOSIT 算法优化姿态解算流程,实现全自动姿态测量。实验数据表明,在方位角/俯仰角为 $\pm 30^\circ$ 、滚动角为 $\pm 180^\circ$,测量距离 10 m 内,配合安装 14 个 LED 的合作靶标,三维姿态角的测量精度优于 0.049° ;配合安装 10 个 LED 的合作靶标,三维姿态角的测量精度优于 0.065° 。相较于已有方法,本方法在测量范围与测量精度上均具有明显的测量优势。由于定焦镜头成像的局限性,要保证姿态测量精度不随工作距离的增加而降低,可将成像镜头替换为高分辨率变焦镜头,从而保证合作靶标的图像在工作距离内等倍变化。

参考文献:

- [1] 张刘港. 基于多源信息融合的激光自动跟踪姿态测量方法[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
ZHANG L G. *Laser Automatic Tracking Attitude Measurement Method based on Multi-Source Information Fusion* [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [2] 伍楚奇, 熊芝, 许航, 等. 基于视觉正交迭代法改

- 进的激光跟踪姿态测量[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 63-71.
WU CH Q, XIONG ZH, XU H, *et al.* Laser tracking attitude measurement based on improved visual orthogonal iterative method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7): 63-71. (in Chinese)
- [3] LIU F L, WEI Z Z, ZHANG G J. An off-board vision system for relative attitude measurement of air-

- craft[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 4225-4233.
- [4] 薛伟,陈志明,吴云华,等. 基于单目视觉的三轴气浮台姿态测量方法[J]. *光学技术*, 2021, 47(6): 658-665.
- XUE W, CHEN ZH M, WU Y H, *et al.* Attitude measurement method of the three-axis air bearing table based on monocular vision[J]. *Optical Technique*, 2021, 47(6): 658-665. (in Chinese)
- [5] 徐洋,陈磊,许晓斌,等. 高超声速风洞下的双目视觉测量技术研究[J]. *电光与控制*, 2022, 29(2): 72-75, 92.
- XU Y, CHEN L, XU X B, *et al.* Binocular vision measurement technology in hypersonic wind tunnel[J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, 29(2): 72-75, 92. (in Chinese)
- [6] ZENG Q L, XU W Q, GAO K D. Measurement method and experiment of hydraulic support group attitude and straightness based on binocular vision[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-14.
- [7] WANG Q, ZHANG G. Dynamic attitude measurement taken by monocular line scan vision[J]. *Appl Opt*, 2023, 62(5): 1130-1135.
- [8] YANG J C, LEI Y T, TIAN Y, *et al.* Deep learning based six-dimensional pose estimation in virtual reality[J]. *Computational Intelligence*, 2022, 38(1): 187-204.
- [9] LI Z X, PEI Y C, QU C, *et al.* A position and attitude measurement method based on laser displacement sensor and infrared vision camera[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-9.
- [10] WAN J C, ZHANG X H, ZHANG C, *et al.* Vision and inertial navigation combined-based pose measurement method of cantilever roadheader[J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4018.
- [11] 陈平,雷学军,李灿,等. 3D位姿估计结合阻抗控制的沉孔装配[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(22): 2889-2900.
- CHEN P, LEI X J, LI C, *et al.* Assembly of countersunk-hole parts based on 3D pose estimation and impedance control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(22): 2889-2900. (in Chinese)
- [12] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.
- [13] DAVID P, DEMENTHON D, DURAISWAMI R, *et al.* SoftPOSIT: simultaneous pose and correspondence determination[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59(3): 259-284.
- [14] DIMA M, FRANCU C. Modelling and precision of the localization of the robotic mobile platforms for constructions with laser tracker and SmartTrack sensor[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 147: 012077.
- [15] 高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- GAO Y. *Research on 6-DOF Measurement in Large-scale Precision Engineering* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [16] 劳达宝,张慧娟,熊芝,等. 基于单目视觉的姿态自动测量方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(3): 0315001.
- LAO D B, ZHANG H J, XIONG ZH, *et al.* Automatic measurement method of attitude based on monocular vision[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0315001. (in Chinese)
- [17] 闫坤. 基于PSD与单目视觉的激光跟踪姿态测量方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- YAN K. *Research on Laser Tracking Attitude Measurement Method Based on PSD and Monocular Vision* [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 许航,熊芝,张刘港,等. 基于加权最小二乘的激光跟踪姿态角测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 3788/IRLA20210675.
- XU H, XIONG ZH, ZHANG L G, *et al.* Laser tracking attitude angle measurement method based on weighted least squares[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 3788/IRLA20210675. (in Chinese)
- [19] 周道德,高豆豆,董登峰,等. 基于深度学习和PnP模型的激光跟踪仪自动姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(9): 1047-1057.
- ZHOU D D, GAO D D, DONG D F, *et al.* Automatic attitude measurement of laser tracker based on deep learning and PnP model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(9): 1047-1057. (in Chinese)
- [20] MENG X X, SUN S W, YAN X T, *et al.* Six-degree-of-freedom posture measurement technologies using position sensitive detectors (PSDs): state of

- the art[J]. *Micromachines*, 2022, 13(11): 1903.
- [21] DONG H, SUN C K, ZHANG B S, *et al.* Simultaneous pose and correspondence determination combining softassign and orthogonal iteration [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 137720-137730.
- [22] MAAS A L, HANNUN A Y, NG A Y. Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models[C]. *Proc. ICML*, 2013, 30(1): 3.

作者简介:



高豆豆(1994—),女,河北衡水人,博士研究生,工程师,2016年、2019年于北京航空航天大学分别获得学士和硕士学位,主要从事精密测量及机器视觉的研究。E-mail: gaodoudou@ime.ac.cn

通讯作者:



董登峰(1981—),男,河南商丘人,博士,研究员,硕士生导师,2004年于郑州大学获得学士学位,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事光学精密测量、AI识别方法、智能跟踪控制、视觉伺服控制系统等方面的研究。E-mail: dongdengfeng@ime.ac.cn