

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209575

# 基于视觉正交迭代法改进的激光跟踪姿态测量\*

伍楚奇<sup>1,2</sup>, 熊芝<sup>1,2</sup>, 许航<sup>1,2</sup>, 翟中生<sup>1,2</sup>, 周维虎<sup>1,3</sup>

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 湖北省现代制造质量工程重点实验室 武汉 430068;  
3. 中国科学院微电子所 北京 100029)

**摘要:**针对航空航天、汽车船舶以及机器人应用等领域对姿态精准测量的需求,研究了一种基于视觉加权加速正交迭代(WAOI)的激光跟踪姿态角测量方法。首先阐述了测量系统组成、建立了数学测量模型,并分析了系统的主要误差源;其次在正交迭代(OI)的基础上,通过物方重投影误差设置参考点权重系数,引入常系数矩阵整合迭代过程中的冗余计算,提出了一种WAOI算法,并通过实验验证了算法的性能;最后搭建实验平台,利用精密二维转台对基于WAOI的姿态角测量进行精度评定。结果表明,在 $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 角度范围内,3~15 m测量范围内,方位角精度可达 $0.11^{\circ}$ ,俯仰角精度可达 $0.26^{\circ}$ 。相较于比例正交投影迭代变化(POSIT),方位角和俯仰角测角精度均提升75%以上。本文提出的WAOI算法有效提升了激光跟踪姿态测量系统的精度。

**关键词:**姿态测量;加权加速正交迭代;视觉测量;激光跟踪

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Laser tracking attitude measurement based on improved visual orthogonal iterative method

Wu Chuqi<sup>1,2</sup>, Xiong Zhi<sup>1,2</sup>, Xu Hang<sup>1,2</sup>, Zhai Zhongsheng<sup>1,2</sup>, Zhou Weihu<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;  
2. Hubei Key Lab of Manufacture Quality Engineering, Wuhan 430068, China; 3. Institute of  
Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the requirement of precise attitude measurement in the fields of aerospace, automobile and ship, and robot application, a laser tracking attitude angle measurement method based on visual weighted accelerated orthogonal iteration (WAOI) is studied. Firstly, the composition of system is described, the mathematical measurement model is established, and the main error sources of system are analyzed. Secondly, on the basis of orthogonal iteration (OI), the weight coefficient of reference point was set by the object square reprojection error, and a WAOI algorithm was proposed to integrate the redundant calculation in the iterative process by introducing constant coefficient matrix, and the performance of the algorithm was verified by experiment. Finally, an experimental platform is built, and a precision two-dimensional turntable is used to evaluate the accuracy of the attitude angle measurement based on WAOI. The results show that within the angle range of  $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$  and within the measurement range of 3~15 m, the azimuth accuracy can reach  $0.11^{\circ}$  and the pitching accuracy can reach  $0.26^{\circ}$ . Compared with the proportional orthogonal projection iterative change (POSIT), the accuracy of azimuth and pitch angle is improved by more than 75%. The WAOI algorithm proposed in this paper effectively improves the accuracy of laser tracking attitude measurement system.

**Keywords:** attitude measurement; weighted accelerated orthogonal iteration; visual measurement; laser tracking

## 0 引言

随着国民经济的发展,航空航天、轨道交通、汽车船舶以及机器人应用等领域对姿态精准测量提出了迫切需求。激光跟踪测量技术作为一种空间信息获取手段,具有精度高、速度快、量程大、跟踪测量等优点,在姿态测量领域具有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

国外对激光跟踪测量系统的研究较早,商业应用成熟的生产商主要有美国的 API 和瑞士的 Leica。API 和 Leica 均开发了以激光跟踪仪为基站的姿态测量系统,通过激光跟踪仪配合相应的合作靶标实现姿态测量。Leica 公司的姿态测量系统是通过激光跟踪仪及高速相机识别 T-Mac 靶标上的发光 LED 实现三维姿态测量,其测角精度达到 $\pm 0.01^\circ$ 。API 公司的 SmartTrack 靶标由倾角传感器、反射棱镜和光电位置传感器(position sensitive detector, PSD)构成,通过 PSD 获取激光成像位置解算得到方位角和俯仰角,倾角传感器测得自身相对水平面的倾角得到横滚角<sup>[3]</sup>。国内对激光跟踪测量系统的研究相对较晚,与国外相比仍有一定的差距。天津大学、华中科技大学、上海交通大学等科研机构基于盾构机自动导向过程中的姿态测量,设计了以全站仪为基站,倾角传感器、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、工业相机组合的姿态测量系统,通过将各传感器的数据与激光靶标的数据融合,系统姿态角测量误差在 3 m 处优于 $0.2^\circ$ <sup>[4-6]</sup>。湖北工业大学闫坤<sup>[7]</sup>提出一种以全站仪为基站,单目相机配合 PSD 的姿态测量方法,该方法可实现姿态角测量误差绝对值在 2.5 m 处控制在 $2^\circ$ 以内,但系统精度容易受 PSD 非线性误差的影响且在目标点异面情况下无法对横滚角进行解算。张慧娟等<sup>[8]</sup>将求解相机位姿估计的有效率的 PnP (efficiency PnP, EPnP) 算法应用于单目视觉姿态测量,该方法充分利用视觉姿态测量的冗余信息,利用目标点空间位姿约束进行姿态角解算,在 3 m 内各姿态角的测量标准差优于 $0.28^\circ$ ,但该算法随着距离增大,姿态解算精度降低。EPnP、高斯-牛顿迭代鲁棒 PnP (single gaussian-newton robust PnP, SRPnP)<sup>[9]</sup>等算法通过线性求解位姿信息,没有考虑到参考点和图像坐标之间的非线性约束关系,在空间目标点较少或距离较远时,求解精度低、抗噪能力差。因此有研究者提出基于迭代方式求解位姿信息。比例正交投影迭代变化(pose from orthography and scaling with iterations, POSIT)<sup>[10-11]</sup>基于弱透视模型迭代求解目标的位姿参数,该方法在初值良好的情况下,具有较高的精度,但忽略了三维目标点的深度变化,对噪声敏感。相较于 POSIT 算法,正交迭代(orthography iterative, OI)算法<sup>[12]</sup>基于正交投影迭代求解目标的位姿参数,满足正交性约束,在初值不准确的情况

下收敛求解结果依然不错。近年来,许多学者对其进行了改进。周润等<sup>[13]</sup>提出了加权形式的正交迭代算法,根据空间共线性误差确定权重系数,有效地提高了解算精度,但该方法未考虑到目标点中含有异常值。陈紫强等<sup>[14]</sup>为解决正交迭代法在实际应用中目标点的错误匹配,将异常值的权重系数设为 0,提高了正交迭代法的抗异常值能力。正交迭代算法虽然相比其他迭代算法,精度较高,但在实际应用中,除了精度要求外,计算时间也有要求。李鑫等<sup>[15]</sup>提出了一种加速正交迭代算法,该算法通过规整正交迭代算法中计算过程,减少了算法运行时间。

基于上述分析,为提高激光跟踪姿态测量系统的精度,在 OI 算法的基础上提出一种加权加速正交迭代算法,通过物方重投影误差设置权重系数以降低异常值对精度的影响,通过对迭代过程中冗余计算的整合,减少迭代过程的计算量,提升了视觉解算效率。本文在算法性能评估的基础上,通过激光跟踪姿态测量实验验证了该算法对系统精度提升的有效性。

## 1 激光跟踪姿态测量系统

### 1.1 系统组成

激光跟踪姿态测量系统以激光跟踪设备为基站,配合相机和合作靶标完成姿态测量,如图 1 所示。

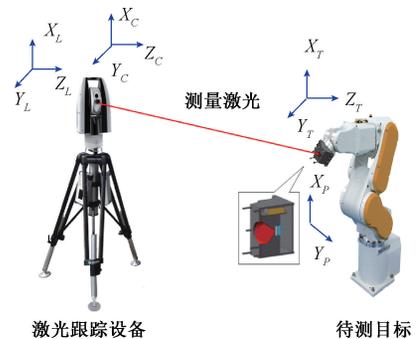


图 1 激光跟踪姿态测量系统

Fig. 1 Laser tracking attitude measurement system

激光跟踪设备与相机位置相对固定,激光跟踪设备坐标系  $O_L-X_L Y_L Z_L$  原点位于激光跟踪设备激光头, $X_L$  轴、 $Y_L$  轴分别与水平、竖直码盘垂直,相机坐标系  $O_C-X_C Y_C Z_C$  原点位于相机光心, $X_C$  轴、 $Y_C$  轴、 $Z_C$  轴分别与激光跟踪设备三轴平行。合作靶标与待测目标固定,靶标坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$  原点位于角锥棱镜切口中心,定义垂直切面为  $Z_T$  轴方向, $X_T$  轴和  $Y_T$  轴由右手定则确定。PSD 坐标系  $O_p-X_p Y_p$  原点位于感光面正中心, $X_p$  轴、 $Y_p$  轴与靶标坐标系  $X_T$  轴、 $Y_T$  轴平行,棱镜切口与二

维 PSD 间隔的长度为  $h$ 。

1.2 测量模型

设相机与合作靶标之间的旋转矩阵为  $R_T^C$ , 相机与激光跟踪设备之间的旋转矩阵为  $R_L^C$ , 激光跟踪设备坐标系下光束向量为  $\vec{L}_{o_L}$ , 靶标坐标系下光束向量为  $\vec{L}_{o_T}$ , 则存在关系:

$$R_T^C \cdot \frac{\vec{L}_{o_T}}{\|\vec{L}_{o_T}\|} = R_L^C \cdot \frac{\vec{L}_{o_L}}{\|\vec{L}_{o_L}\|} \quad (1)$$

$R_T^C$  可由单目视觉解算获得,  $R_L^C$  由激光跟踪设备和相机的视觉标定得到。通过激光跟踪设备测量角锥棱镜顶点可得  $\vec{L}_{o_L}$ ,  $\vec{L}_{o_T}$  由通过角锥棱镜射在 PSD 上的光斑获取。由以上参数可得靶标坐标系到激光跟踪设备坐标系的旋转矩阵:

$$R_T^L = (R_L^C)^{-1} \cdot R_T^C \quad (2)$$

由旋转矩阵和欧拉角的关系可求激光跟踪设备下靶标的方位角、俯仰角及横滚角。

1.3 误差分析

激光跟踪姿态测量系统输入数据有激光跟踪设备测点、相机像素坐标、PSD 测点、目标点在靶标坐标系下的坐标, 系统结构复杂, 无法获取误差传递函数, 选用基于数理统计的误差分析法对激光跟踪姿态测量系统进行误差分析。

由激光跟踪姿态测量系统数学模型可将输入数据划分为 4 类, 单目视觉解算误差, 旋转矩阵角度误差, PSD 测点误差, 激光跟踪设备测点误差, 并根据实际姿态测量中的误差设定误差范围。各参数的概率生成随机序列长度为 1 000 的随机数序列, 进行误差仿真分析, 如表 1 所示。

表 1 误差项定义及其对应值

Table 1 Error term definition and corresponding value

序号	误差名称	误差分布	范围
1	单目视觉解算误差/(°)	正态分布	0~1
2	旋转矩阵角度误差/(°)	正态分布	0~1
3	PSD 测点误差/mm	正态分布	0~0.01
4	激光跟踪设备测点误差/mm	正态分布	0~0.6

为研究误差相互作用对激光跟踪姿态测量系统精度的影响, 从表 1 中任意选取一个误差作为目标误差源, 将其余 3 个误差变量对应的误差范围设为最大值, 通过改变目标误差源的数值, 仿真得到不同目标误差源对姿态测量精度的影响。利用 Pearson 相关系数判断变量之间的相关程度, 相关系数的绝对值范围如表 2 所示。

表 2 相关系数与对应相关程度

Table 2 Correlation coefficient and corresponding correlation degree

相关系数绝对值范围	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
相关程度	极弱相关或无相关	弱相关	中等程度相关	强相关	极强相关

假设变量为  $X, Y$ , 则两变量之间的相关系数为:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3)$$

式中:  $X$  为姿态角,  $Y$  为目标误差源,  $\text{cov}(X, Y)$  为  $X, Y$  之间的协方差,  $\sigma_X, \sigma_Y$  分别为变量  $X, Y$  的标准差。

计算各输入误差姿态角误差之间的相关系数, 数据如表 3 所示。

表 3 姿态角误差与输入误差的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between attitude angle error and input error corresponding (°)

相关系数	单目视觉解算误差	旋转矩阵角度误差	PSD 测点误差	激光跟踪设备测点误差
方位角	0.800 6	0.813 7	0.003 0	0.047 8
俯仰角	0.735 8	0.916 8	0.036 7	0.085 8
横滚角	0.745 3	0.874 4	0.044 4	0.319 9

结合表 2、3 可以看出姿态角与 PSD 测点误差和激光跟踪设备测点误差相关性较弱, 与单目视觉解算误差和旋转矩阵角度误差较强相关。

为避免强相关的结果可能是偶然因素导致的, 将单目视觉解算误差和旋转矩阵在误差分布范围内均匀分为 3 个水平, 在 Minitab 中生成  $L_9(3^4)$  标准正交表, 对实验结果进行方差分析得到显著性水平如表 4 所示。

表 4 输入误差对姿态角误差的显著性水平

Table 4 The significance level of the input error to the attitude angle error (°)

误差来源	显著性水平		
	方位角	俯仰角	横滚角
单目视觉姿态角误差	0.045	0.042	0.018
旋转矩阵角度误差	0.093	0.020	0.010

结合表 3、4 可以看出姿态角与单目视觉解算误差和旋转矩阵误差的显著性水平小于 0.1 且相关系数大, 姿态角误差与单目视觉解算误差和旋转矩阵误差显著相关。因此, 进一步提高视觉解算精度是保证激光跟踪姿态测量系统精准测量的前提。

## 2 基于加权加速正交迭代法的姿态解算

### 2.1 加权加速正交迭代法

经典正交迭代算法<sup>[12]</sup>以物方残差作为目标函数,物方残差目标函数为:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(I - V_i)(\mathbf{R}P_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (4)$$

式中:  $I$  为单位矩阵,  $V_i = \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T}{\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i}$  为视线投影矩阵,  $\mathbf{v}_i$  为第  $i$  个

目标点在归一化像平面上的投影坐标,  $P_i$  为目标点在世界坐标系下的空间坐标,  $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  为目标点在相机坐标系下的位姿信息。

在实际应用相机进行视觉解算的过程中,目标点的测点误差和图片定位误差会影响真实坐标数据,使得式(4)迭代求解的结果与真值之间产生较大的偏差。

为此,在正交迭代算法的基础上通过改进型 Huber 函数设置权重系数来降低异常值的影响,从而提高视觉解算精度。

设置权值后的目标函数为:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n \omega_i \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i \|(I - V_i)(\mathbf{R}P_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (5)$$

式中: 第  $i$  个目标点的权值为  $\omega_i$ 。设  $\mathbf{R}$  的初值为  $\mathbf{R}^{(0)}$ , 经  $k$  次迭代后为  $\mathbf{R}^{(k)}$ , 目标点的权值为  $\omega_i^{(k)}$ 。

改进型 Huber 函数的表达式为:

$$\omega_i^{(k+1)} = \begin{cases} \omega_i^{(k)}, & \varepsilon_i^{(k)} \leq \varepsilon \\ (\varepsilon / (\varepsilon_i^{(k)})^2) \omega_i^{(k)}, & \varepsilon_i^{(k)} > \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{(k)}$ ,  $\varepsilon_i^{(k)} = \|\mathbf{R}^{(k)} P_i - \mathbf{q}_i^{(k)}\|$  为各目标点的物方投影误差。各目标点初始权值均设为  $1/n$ ,  $n$  为目标点个数, 经  $k$  次迭代后目标点的权值为  $\omega_i^{(k)}$ 。由式(5)可知, 目标函数为  $t$  的二次函数, 确定  $\mathbf{R}^{(k)}$  和  $\omega_i^{(k)}$  后,  $t^{(k)}$  的线性最优解经  $k$  次迭代可得:

$$\mathbf{t}^{(k)} = \left( I - \sum_{i=1}^n \omega_i^{(k)} V_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \omega_i^{(k)} (V_i - I) \mathbf{R}^{(k)} P_i \quad (7)$$

则对应目标点的视线投影向量  $\mathbf{q}_i^{(k)}$ :

$$\mathbf{q}_i^{(k)} = V_i (\mathbf{R}^{(k)} P_i + \mathbf{t}^{(k)}) \quad (8)$$

求解式(9)的绝对定向问题得到  $\mathbf{R}^{(k+1)}$ :

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \omega_i^{(k)} \|\mathbf{R}^{(k)} P_i + \mathbf{t}^{(k)} - \mathbf{q}_i^{(k)}\|^2 \quad (9)$$

$\mathbf{R}^{(k+1)}$  的求解过程如下: 设  $\bar{P} = \sum_{i=1}^n \omega_i^{(k)} P_i, \bar{q} =$

$\sum_{i=1}^n \omega_i^{(k)} \mathbf{q}_i^{(k)}, \bar{P}, \bar{q}$  为目标点坐标值的加权平均值, 则目标

点坐标值与加权均值之差为:

$$P_i' = P_i - \bar{P} \quad (10)$$

$$q_i^{(k)'} = q_i^{(k)} - \bar{q} \quad (11)$$

定义  $M = \sum_{i=1}^n \omega_i^{(k)} q_i^{(k)'} P_i'^T$ , 对  $M$  采用矩阵奇异值分解(SVD)进行分解, 则有:

$$M = U D V^T \quad (12)$$

当  $\mathbf{R}^{(k+1)} = U V^T$  时, 式(9)取得最小值, 此时物方残差和最小, 因此可以得到  $\mathbf{R}^{(k+1)}$ 。重复上述过程, 直至  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  满足收敛条件。

上述过程每一次迭代都需要分别计算一次  $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ 、投影点以及目标函数, 耗费时间较长, 为加快算法计算效率将权值收敛后设为定值, 通过常系数矩阵整合计算过程中的冗余步骤, 具体过程如下:

为了后续推导, 引入公式:

$$\text{vec}(\mathbf{ABC}) = (\mathbf{C}^T \otimes \mathbf{A}) \text{vec}(\mathbf{B}) \quad (13)$$

式中:  $\text{vec}(\cdot)$  表示将矩阵的每列按列组成一个列向量,  $\otimes$  表示 Kronecker 积。

对目标点进行零均值化,  $P_i' = P_i - \bar{P}, \bar{P} = \sum_{i=1}^n \omega_i P_i$ ,

根据式(7)和(13), 则有:

$$\mathbf{t}^{(k)} = \mathbf{H}_{3 \times 9} \mathbf{r}^{(k)} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{r}^{(k)} = \text{vec}(\mathbf{R}^{(k)})$ ,

$$\mathbf{H} = \left( I - \sum_{i=1}^n \omega_i V_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \omega_i P_i^T \otimes (V_i - I) =$$

$$\left( I - \sum_{i=1}^n \omega_i V_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \omega_i P_i^T \otimes V_i \quad (15)$$

则第  $i$  个投影点坐标为:

$$\mathbf{q}_i^k = V_i (\mathbf{R}^{(k)} P_i + \mathbf{t}^{(k)}) = (P_i^T \otimes V_i + V_i \mathbf{H}) \mathbf{r}^{(k)} = \mathbf{K}_i \mathbf{r}^{(k)} \quad (16)$$

则每一次迭代过程中的计算矩阵  $M$  为:

$$M^{(k)} = \sum_{i=1}^n \omega_i (q_i^k - \bar{q}^k) P_i^T = \sum_{i=1}^n \omega_i \mathbf{K}_i \mathbf{r}^{(k)} P_i^T \quad (17)$$

式中:  $\bar{q}^k$  为第  $k$  次迭代时所有投影点的平均值, 令  $\mathbf{m}^{(k)} = \text{vec}(M^{(k)})$ , 则有:

$$\mathbf{m}^{(k)} = \sum_{i=1}^n \omega_i (P_i \otimes K_i) \mathbf{r}^{(k)} = \mathbf{B}_{9 \times 9} \mathbf{r}^{(k)} \quad (18)$$

式中:

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \omega_i (P_i \otimes K_i) =$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i (P_i \otimes P_i^T \otimes V_i) + \sum_{i=1}^n \omega_i (P_i \otimes (V_i \mathbf{H})) = \sum_{i=1}^n \omega_i (P_i \otimes P_i^T \otimes V_i) + \sum_{i=1}^n \omega_i (P_i \otimes V_i) (\mathbf{H}) \quad (19)$$

对  $M^k$  进行奇异值分解  $M^{(k)} = U \Sigma V^T$ , 则得到更新  $\mathbf{R}$  的表达式  $\mathbf{R}^{(k+1)} = U V^T$ 。

对于目标函数:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n \omega_i \| (\mathbf{I} - \mathbf{V}_i) (\mathbf{R} \mathbf{P}_i + \mathbf{t}) \|^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i \| (\mathbf{I} - \mathbf{V}_i) (\mathbf{P}_i^T \otimes \mathbf{I} + \mathbf{H}) \mathbf{r} \|^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{F}_{9 \times 9} \mathbf{r} \quad (20)$$

其中,

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \omega_i (\mathbf{P}_i \otimes \mathbf{I} + \mathbf{H}^T) (\mathbf{I} - \mathbf{V}_i) (\mathbf{P}_i^T \otimes \mathbf{I} + \mathbf{H}) \quad (21)$$

经过上述计算过程的规整可知, 迭代过程中仅仅使用  $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{F}$  矩阵, 且每一次迭代过程的计算复杂度为  $O(1)$ , 且  $\mathbf{H}$  矩阵只需在迭代开始前计算,  $n$  次迭代后  $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{F}$  的计算复杂度均为  $O(n)$ , 整个过程大大减少了计算量。

结合视觉标定所得的相机与激光跟踪设备的旋转矩阵  $\mathbf{R}_r^c$  可求得激光跟踪设备与靶标的旋转矩阵  $\mathbf{R}_L^c$ , 再根据欧拉角与旋转矩阵的转换关系, 进而求得靶标的方位角、俯仰角以及横滚角。

### 2.2 算法性能评估

为评估上述姿态测量算法, 将应用广泛的 EPnP 算法作为迭代初值, 通过重投影实验比较 POSIT 与该算法来测试算法的性能。在光学平台上利用工业相机、图像采集软件、测量目标板搭建如图 2 所示的大视场范围位姿测量实验环境。



图 2 重投影实验验证装置

Fig. 2 Reprojection experiment verification device

图像采集软件为 Pylon Viewer, 图像采集设备为德国 balsler acA 2 500~20 gm, 配套镜头选用奥普特的 OPT-C7528-10M 的 75 mm 定焦镜头, 光圈范围为 F2.8~F32, 畸变  $< 0.1\%$ , 相机内参标定采用张氏标定法<sup>[16]</sup>。测量目标板如图 3 所示, 每个目标点设置 20 mm×20 mm 反射片。

为了量化各算法的求解精度, 定义精度性能指标为:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\mu'_i - \mu_i)^2 + (\nu'_i - \nu_i)^2}}{n} \quad (22)$$

其中,  $\mu_i, \nu_i$  为相机提取的像点坐标,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  为所取点的个数,  $\mu'_i, \nu'_i$  为姿态测量算法计算的坐标值。

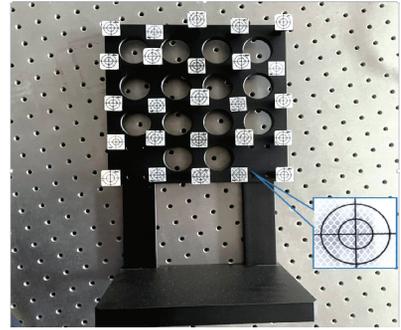


图 3 测量目标板

Fig. 3 Measuring target plate

算法越准确, 则重投影到图像平面上的质心和相机提取目标板特征点质心坐标点距离越小, 即  $\bar{\varepsilon}$  越小。实验设计如下:

- 1) 相机提取目标板上特征点的质心坐标并标号, 得到  $\mu_i, \nu_i$ 。
- 2) 利用步骤 1) 点所对应的世界坐标和图像坐标求解相机和靶标之间旋转矩阵和平移向量。
- 3) 利用求解得到的旋转矩阵和平移向量将目标板上所有特征点对应的世界坐标重投影到相机像平面上, 求得  $\mu'_i, \nu'_i$ 。
- 4) 重复以上实验 1 000 次, 取均值, 得单个点像素误差和各算法运行时间分别如表 5 所示。

表 5 算法重投影误差和耗时

Table 5 Algorithm reprojection error and time consuming		
算法	单个点像素误差/pixel	单次解算耗时/ms
OI	2.417	0.056
WAOI	2.342	0.014
POSIT	4.478	0.017

由表 5 可知, 在迭代初值相同的情况下, WAOI 算法无论在单个像素误差和单次解算耗时上较 OI 算法均有提升。且与 POSIT 相比单个像素误差降低 47.6%, 单次解算耗时降低 3.1%。综合而言, 本文提出的 WAOI 算法能更好地满足激光跟踪姿态测量系统的高精度测量要求。下面将 WAOI 算法应用于激光跟踪测量系统, 并对系统姿态角测量重复性及精度进行评定。

## 3 系统搭建及实验

### 3.1 实验装置及步骤

搭建基于全站仪的姿态测量系统如图 4 所示。利用二维精密转台旋转角度作为角度基准对激光跟踪姿态测量精度进行评定。二维精密转台方位角测量范围为

30°~330°,俯仰角测量范围为40°~150°,角度测量精度为2"。由于二维精密转台只能在方位角和俯仰角方向上转动,且受限于靶标安装位置和相机视场,实验测量范围为3~15 m, -20°~20°的方位角和俯仰角。



图4 激光跟踪姿态测量系统实验验证装置

Fig. 4 Experimental verification device for laser tracking attitude measurement system

具体实验步骤为:

1) 搭建如图4所示的姿态测量系统硬件平台,全站仪与相机相对固定安装在预设位置,靶标安装在二维精密转台上;

2) 转台坐标系和靶标坐标系配准,相机内参标定,全站仪坐标系与相机坐标系标定;

3) 在某一距离处选取5个位置,每个位置循环测量 $n$ 次,得到姿态角的测量重复性标准偏差<sup>[17]</sup>;

4) 上位机控制二维精密转台方位和俯仰两个方向转动,转动范围-20°~20°,每次转动2°,将测量结果与转台转动角度值对比,得到角度测量偏差;

5) 改变测量距离,测量距离范围3~15 m,步长为3 m。重复步骤4),得到不同距离下的方位角和俯仰角测量偏差。

### 3.2 结果分析

#### 1) 重复性测量

根据上述实验步骤,在3 m附近随机选取5个位置重复测量30次,将测得的方位角 $\alpha$ 、俯仰角 $\beta$ 、横滚角 $\gamma$ 数据按式(23)处理,得到 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 位置的重复性测量结果如图5所示。

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}, A = \alpha, \beta, \gamma \quad (23)$$

式中: $A$ 为姿态角, $n$ 为单个位置上的测量次数, $\bar{A}$ 为 $n$ 次测量的姿态角平均值, $S_A$ 为姿态角的标准差。

由图5可知, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 位置上的姿态角的重复性测量标准差整体优于0.004°,且5个位置上的横滚角的重复性测量标准差优于方位角和俯仰角的重复性测

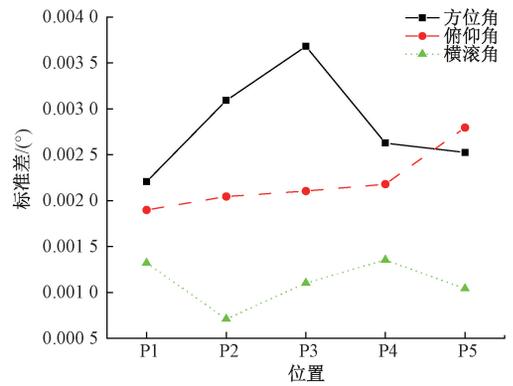


图5 重复性姿态测量实验结果

Fig. 5 Experimental results of repetitive attitude measurement

量标准差。

#### 2) 精度评定

根据步骤3)、4)对姿态测量系统进行精度评定,使用EPnP计算初始位姿,WAOI算法对不同位姿下的靶标姿态进行迭代求解,得到方位角和俯仰角与转台的测量偏差结果如表6~7所示。

表6 不同距离下方位角与转台值偏差

Table 6 Deviation between azimuth and turntable value at different distances (°)

转台值	WAOI 解算方位角测量偏差随距离变化				
	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
20	19.94	19.94	19.95	19.91	19.89
18	17.94	17.93	17.96	17.86	17.80
16	15.95	15.94	15.96	15.85	15.84
14	13.96	13.94	13.95	13.91	13.82
12	11.96	11.94	11.94	11.88	11.85
10	9.96	9.95	9.96	9.93	9.83
8	7.97	7.96	7.98	7.96	7.95
6	5.98	5.96	5.96	5.92	5.89
4	3.98	3.97	3.99	3.96	3.95
2	2.00	1.99	1.98	1.98	1.99
0	0.01	0	0.02	-0.01	-0.04
-2	-1.99	-1.98	-1.99	-1.98	-1.98
-4	-3.98	-3.97	-3.94	-3.96	-3.96
-6	-5.97	-5.96	-5.93	-5.95	-5.97
-8	-7.96	-7.96	-7.91	-7.96	-7.98
-10	-9.91	-9.95	-9.94	-9.99	-9.94
-12	-11.90	-11.87	-11.93	-11.95	-11.91
-14	-13.93	-13.94	-13.85	-13.92	-13.99
-16	-15.92	-15.94	-15.93	-15.90	-16.00
-18	-17.91	-17.93	-17.91	-17.92	-18.01
-20	-19.91	-19.95	-19.90	-19.90	-19.92

表 7 不同距离下俯仰角与转台值偏差

Table 7 Deviation between pitch angle and turntable value at different distances (°)

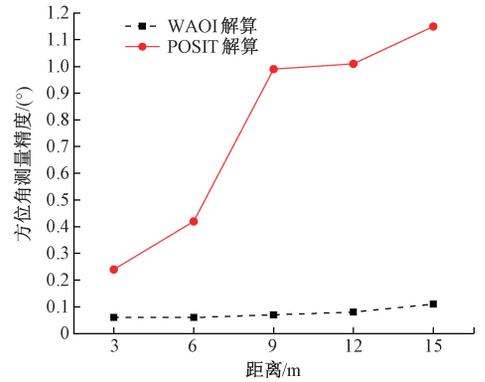
转台值	WAOI 解算俯仰角测量偏差随距离变化				
	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
20	19.88	20.06	19.94	19.58	19.72
18	17.87	17.90	17.92	17.74	17.83
16	15.91	15.92	15.91	15.80	15.86
14	13.93	13.94	13.94	13.83	13.89
12	11.93	11.96	11.96	11.84	11.92
10	9.94	9.99	9.97	9.90	9.93
8	7.94	8.00	7.98	7.91	7.93
6	5.95	6.04	6.01	5.95	5.97
4	3.96	4.03	3.97	3.97	3.96
2	1.97	2.01	1.99	1.98	2.02
0	-0.05	-0.03	-0.06	-0.19	-0.20
-2	-1.99	-2.00	-1.96	-2.09	-2.10
-4	-4.03	-4.01	-4.06	-4.18	-4.15
-6	-6.02	-6.02	-6.07	-6.22	-6.19
-8	-8.02	-8.06	-8.07	-8.27	-8.16
-10	-10.03	-10.06	-10.09	-10.33	-10.27
-12	-12.02	-12.05	-12.07	-12.39	-12.30
-14	-14.02	-14.04	-14.11	-14.28	-14.52
-16	-16.01	-16.03	-16.10	-16.23	-16.49
-18	-18.01	-18.03	-18.10	-18.22	-18.46
-20	-20.02	-20.19	-20.13	-20.06	-20.36

根据上述测量结果,以转台值为真值计算不同距离下激光跟踪姿态测量系统测得的方位角与俯仰角的均方根误差,与文献[18]解算方法(POSIT)对比,得到两种方法的方位角和俯仰角均方根误差如表 8 所示。由于二维转台无法对横滚角进行精度判定,本文从方位角和俯仰角均方根误差来判定激光跟踪姿态测量系统精度,方位角和俯仰角精度如图 6 所示。

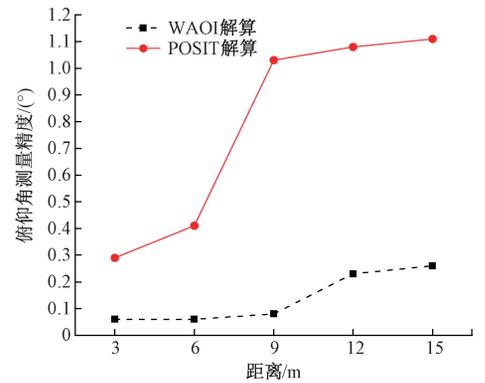
表 8 方位角和俯仰角均方根误差

Table 8 Azimuth and pitch rms error (°)

距离	方位角均方根误差		俯仰角均方根误差	
	WAOI	POSIT	WAOI	POSIT
3 m	0.06	0.24	0.06	0.29
6 m	0.06	0.42	0.06	0.41
9 m	0.07	0.99	0.08	1.03
12 m	0.08	1.01	0.23	1.08
15 m	0.11	1.15	0.26	1.11



(a) 方位角精度对比  
(a) Precision comparison of azimuth angle



(b) 俯仰角精度对比  
(b) Precision comparison of pitch angle

图 6 激光跟踪测量系统精度对比

Fig. 6 Precision comparison of laser tracking measurement system

由图 6 可知,采用加权加速正交迭代法对激光跟踪姿态系统进行视觉解算,系统精度有所提升。实验结果表明,3 m 处方位角精度为 0.06°,俯仰角精度为 0.06°;15 处方位角精度为 0.11°,俯仰角精度为 0.26°。与 POSIT 算法相比,在 3 m 处方位角精度提升 75.0%,俯仰角精度提升 79.3%;在 15 m 处方位角精度提升 90.4%,俯仰角精度提升 76.5%。因此,在测量距离为 3~15 m,姿态角测量范围为-20°~20°时,相较于 POSIT 算法,本文采用的加权加速正交迭代法具有更高的测量精度。

## 4 结 论

本文针对现有激光跟踪姿态系统视觉解算精度提升的需求,提出一种基于加权加速正交迭代法的姿态解算方法。该算法以 OI 算法为核心对激光跟踪姿态测量系统中的视觉测量进行解算,通过自适应权值减少测量误差,引入常系数矩阵整合迭代过程加快迭代算法收敛过程,提高了激光跟踪姿态测量系统精度。实验结果表明:在-20°~20°的角度测量范围内,测量距离为 3~15 m,采

用 WAOI 算法的激光跟踪测量系统方位角和俯仰角的精度可优于  $0.26^\circ$ 。相较于 POSIT 算法,方位角和俯仰角均精度提升 75% 以上。本文提出的算法有效提升了激光跟踪姿态测量系统的精度。

### 参考文献

- [ 1 ] 张刘港,熊芝,冯维,等. 基于视觉与激光准直的激光跟踪姿态角测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 30-36.
- ZHANG L G, XIONG ZH, FENG W, et al. Laser tracking attitude angle measurement method based on vision and laser collimation [J]. Chines Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 30-36.
- [ 2 ] 董登峰,周维虎,纪荣祚,等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309-318.
- DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, et al. Design of precise tracking system of laser tracker[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 309-318.
- [ 3 ] 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, 2016.
- [ 4 ] 高凯. 基于激光跟踪仪的六自由度动态测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- GAO K. Research on 6-DOF dynamic measurement method based on the maser tracker[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [ 5 ] 肖涛. 盾构姿态测量中倾角仪和陀螺仪的组合应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- XIAO T. Research on pose measurement system of shield using the combination of inclinometer and gyroscope[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [ 6 ] 毕小伟. 盾构机位姿测量系统的关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
- BI X W. Research on key technology for measuring shield machine's position and orientation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 张慧娟,熊芝,劳达宝,等. 基于 EPNP 算法的单目视觉测量系统研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 190-195.
- ZHANG H J, XIONG ZH, LAO D B, et al. Monocular vision measurement system based on EPNP algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 190-195.
- [ 9 ] WANG P, XU G, CHENG Y, et al. A simple, robust and fast method for the perspective-n-point problem[J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 108(6): 31-37.
- [ 10 ] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M, HAUCK M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
- [ 11 ] 王粟,朱飞. 采用 POSIT 算法的中餐宴会台面的测距方法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(19): 139-143, 148.
- WANG S, ZHU F. Method for distance measurement between Chinese food banquet tables using POSIT algorithm [J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(19): 139-143, 148.
- [ 12 ] LU C P, HAGER G D, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.
- [ 13 ] 周润,张征宇,黄叙辉. 相机位姿估计的加权正交迭代算法[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 193-199.
- ZHOU R, ZHANG ZH Y, HUANG X H. Weighted orthogonal iterative algorithm for camera pose estimation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 193-199.
- [ 14 ] 陈紫强,周秉毅,刘庆华,等. 二值加权正交迭代相机位姿估计算法[J]. 半导体光电, 2020, 41(5): 743-748.
- CHEN Z Q, ZHOU B Y, LIU Q H. A binary weighted orthogonal iterative camera pose estimation algorithm [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020,

41(5):743-748.

- [15] 李鑫, 龙古灿, 刘进博, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 266-273.  
LI X, LONG G C, LIU J B, et al. Accelerated orthogonal iterative algorithm for camera pose estimation [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 266-273.
- [16] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] 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.
- [18] 张慧娟. 单目视觉姿态自动测量方法研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2019.  
ZHANG H J. Research on automatic measurement method of monocular visual attitude[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.

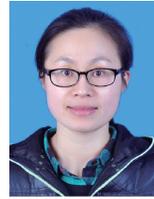
## 作者简介



**伍楚奇**, 2020年于吉首大学获得学士学位, 现为湖北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为光电大尺寸测量。

E-mail: 102010112@hbut.edu.cn

**Wu Chuqi** received his B. Sc. degree in 2020 from Jishou University, now he is studying for master degree in Hubei University of Technology. His main research interest is photoelectric large-scale measurement.



**熊芝**(通信作者), 分别在2007年、2009年和2012年于天津大学获得学士、硕士和博士学位, 现为湖北工业大学副教授, 主要研究方向是工业大尺寸测量和光电检测技术。

E-mail: xiongzhi0611@163.com

**Xiong Zhi** (Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees from Tianjin University in 2007, 2009 and 2012 respectively. Now she is an associate professor in Hubei University of Technology. Her main research interest is industrial large-scale measurement and photoelectric detection technology.