

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210024

基于空间距离约束的姿态角现场精度评定方法*

刘宁桐^{1,2}, 熊芝^{1,2}, 何静^{1,2}, 翟中生^{1,2}, 周维虎^{1,3}

(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:针对大型精密工程现场姿态测量精度评定的需求,提出了一种利用长度计量基准溯源姿态测量结果的姿态角现场精度评定方法。首先,介绍了激光跟踪姿态测量系统的基本组成及测量原理;其次,基于六自由度并联机构的正向运动学研究,建立了空间距离与靶标姿态之间的数学模型,并通过蒙特卡洛法仿真分析距离约束测量精度、控制场布局以及系统工作距离等因素对评定模型精度的影响;最后,搭建实验平台,利用精密转台的相对转动量作为角度基准,对本文研究方法的可行性进行了验证。结果表明:当距离约束测量精度为0.038 mm,控制场大小为1 400 mm×1 400 mm时,在-20°~20°的姿态角变化范围内,评定模型方位角精度为0.055°,俯仰角精度为0.058°。本文研究方法避免了基于角度基准评定方法中较为严格的坐标系配准要求,能综合反映测量系统现场使用状态,可为六自由度激光跟踪测量系统中姿态角现场精度评定方法提供参考。

关键词:姿态测量;现场精度评定;齐次坐标变换;距离约束;六自由度并联机构;蒙特卡洛法

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

Attitude angle field accuracy evaluation method based on space distance constraints

Liu Ningtong^{1,2}, Xiong Zhi^{1,2}, He Jing^{1,2}, Zhai Zhongsheng^{1,2}, Zhou Weihu^{1,3}

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

Abstract: To meet the requirements of field attitude measurement accuracy evaluation of large-scale precision engineering, a method of attitude angle field accuracy evaluation is proposed by tracing the measurement results of attitude angle to the length measuring standards. Firstly, the basic composition and measurement principle of the laser tracking attitude measurement system are introduced. Secondly, the mathematical model between space distance and target attitude is formulated, which is based on the forward kinematics research of six-degree-of-freedom (6-DOF) parallel mechanism. The Monte Carlo method is used to simulate and analyze the effect of distance constraint measurement accuracy, control field layout and the working distance of the system on the evaluation model accuracy. Finally, an experimental platform is established, and the relative rotation of the precision turntable is used as the angle benchmark to evaluate the feasibility of the research method. Results show that the azimuth accuracy of the model is 0.055° and the pitch accuracy is 0.058° within the angle range of -20°~20°, when the distance constraint measurement accuracy is 0.038 mm and the size of the control field is 1 400 mm×1 400 mm. In conclusion, the research method in this article avoids the strict requirements of the coordinate system registration in the evaluation method based on angle benchmark. It could comprehensively reflect the field use state of the measurement system, which can provide a reference for the attitude angle field accuracy evaluation method in the 6-DOF laser tracking measurement system.

Keywords: attitude measurement; field accuracy evaluation; homogeneous coordinate transformation; distance constraint; 6-DOF parallel mechanism; Monte Carlo method

0 引言

随着航空航天、船舶舰艇、轨道交通等现代大型装备制造制造业的高速发展,以激光跟踪设备为基站的六自由度姿态测量系统因其测量精度高、适应性强以及操作简便等优点为大尺寸工业测量提供了一个很好的解决方案^[1-4]。为了保证姿态测量结果的准确性,需要建立合理的姿态测量系统精度评定体系。姿态角测量精度是六自由度激光跟踪姿态测量系统的关键指标之一,对应用于大型精密工程现场的姿态测量精度评定方法进行研究具有十分重要的理论及应用价值。

现有的角度评定常用方法有基于角度基准的精密转台法^[5-9]、多面体棱镜与光电自准直法^[10-12]。针对激光跟踪姿态测量系统,目前采用的精度评定方法是基于角度基准的标准件对比法。Gao 等^[5]将精密三轴转台作为角度基准来评价六自由度测量系统的姿态测量精度。张帅等^[6]、郑继辉^[7]利用分辨率为 0.1" 的高精度转台的角度值作为标准值,与多路激光多边形法系统测得姿态角对比进行姿态角精度验证。许航等^[8]、张刘港^[9]将二维精密转台旋转角作为角度基准来评定姿态测量系统的方位角和俯仰角精度。文献[13-14]以水平调校过的多齿分度台为角度基准来评价标靶方位角测量精度。马一心等^[15]利用经过检校后的钢钢四面体提供角度基准,实现多台激光跟踪仪动态位姿测量精度的评定。

以上方法虽然量值传递清晰,但对坐标系配准要求较高,且溯源环境和现场环境的不一致性易引入较大的环境误差^[16]。这些缺点限制了其应用范围,因此研究工业现场条件下高精度、高效率、高适应性的姿态角现场精度评定方法具有尤为重要的意义。

并联机构因其结构稳定、刚性好、承载能力强、误差累积小等优点,受到了机器人研究者的密切关注^[17-18]。本文提出的姿态角现场精度评定方法受并联机构运动学研究的启发,通过控制点与靶标测量点间位移量来求解靶标位姿,将姿态角的测量结果溯源至长度计量基准,以期姿态角的现场精度评定提供有效可行的方法。

1 激光跟踪姿态测量系统组成及原理

激光跟踪姿态测量系统主要由激光跟踪设备、相机与靶标组成,其中靶标由开孔角锥棱镜、光电位置传感器(position sensitive detector, PSD)等组成。如图 1 所示为激光跟踪姿态测量系统示意图。

以激光跟踪头中心为原点建立激光跟踪设备坐标系 $O_L - X_L Y_L Z_L$, X_L 方向垂直于水平度盘平面向上, Z_L 方向指向水平度盘的零方向, Y_L 方向遵循右手定则;以相机镜

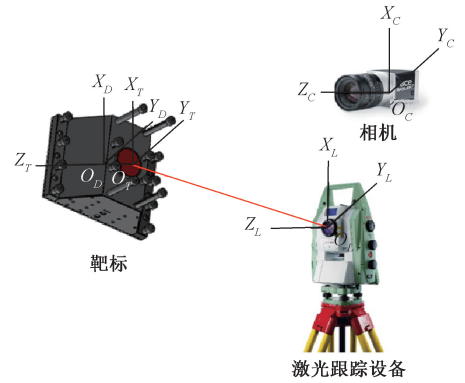


图 1 激光跟踪姿态测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of the laser tracking attitude measurement system

头光心为原点建立相机坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$, Z_C 方向为相机光轴方向, X_C 与 Y_C 方向与像平面平行;以 PSD 感光面中心为原点建立 PSD 坐标系 $O_D - X_D Y_D$, X_D 与 Y_D 方向和内置坐标系 X 轴与 Y 轴方向平行;以角锥棱镜开孔中心为原点建立靶标坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$, Z_T 方向指向 PSD 坐标系原点, X_T 与 Y_T 方向平行于 PSD 坐标系 X_D 与 Y_D 方向。其中,PSD 坐标系原点 O_D 与开孔角锥棱镜中心 O_T 相距距离 h ^[8-9]。

定义绕 X_T 轴旋转方位角 α , 绕 Y_T 轴旋转俯仰角 β , 绕 Z_T 轴旋转横滚角 γ , 根据光束唯一性约束,结合相机对靶标特征点图像的采集、PSD 对激光入射点位置的探测,可获得靶标在激光跟踪设备坐标系下的 3 个姿态角^[8-9]。

2 基于距离约束的姿态角精度评定

2.1 并联机构运动学

并联机构运动学包括正向运动学和反向运动学。当机构工作时,通过改变各驱动杆的长度 L_k 来求解机构动平台在 3 个方向的位移参数 (t_x, t_y, t_z) 以及 3 个方向的角度参数 (α, β, γ) 的过程即为正向运动学分析。如图 2 所示为 Stewart 并联机构示意图,分别在动平台和静平台上建立动坐标系 $O_a - X_a Y_a Z_a$ 及静坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$ 。

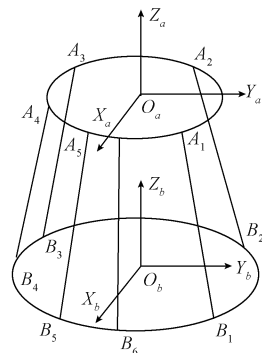


图 2 Stewart 并联机构示意图

Fig. 2 Diagram of Stewart parallel mechanism

动平台铰链点 $A_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 在动坐标系中的坐标向量表示为:

$$\mathbf{A}_k = (A_{kx} \ A_{ky} \ A_{kz} \ 1)^T \quad (1)$$

静平台铰链点 $B_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 在静坐标系中的坐标向量表示为:

$$\mathbf{B}_k = (B_{kx} \ B_{ky} \ B_{kz} \ 1)^T \quad (2)$$

当动平台运动时,基于空间齐次变换矩阵可将任一

铰链点 $A_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 的坐标向量都转换到静坐标系中,并与静平台铰链点 $B_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 构成长度几何关系^[19-21]。

$$L_k = \|\mathbf{T}(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) \times \mathbf{A}_k - \mathbf{B}_k\| \quad (3)$$

式中: $\mathbf{T}(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 为空间齐次变换矩阵,当旋转顺序定义为 ZXY 时表达式为:

$$\mathbf{T}_{ZXY}(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma & \cos\gamma \sin\alpha \sin\beta - \cos\beta \sin\gamma & \cos\alpha \sin\beta & t_x \\ \cos\alpha \sin\gamma & \cos\alpha \cos\gamma & -\sin\alpha & t_y \\ \cos\beta \sin\alpha \sin\gamma - \cos\gamma \sin\beta & \sin\beta \sin\gamma + \cos\beta \cos\gamma \sin\alpha & \cos\alpha \cos\beta & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 数学模型

参考并联机构运动学模型,将动平台固定在靶标上随靶标运动,获取测量点 $A_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 在靶标坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 中坐标向量;将静平台固定在靶标周围建立起控制场,获取控制点 $B_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 在激光跟踪设备坐标系 $O_L - X_L Y_L Z_L$ 中坐标向量。图3为精度评定模型示意图。

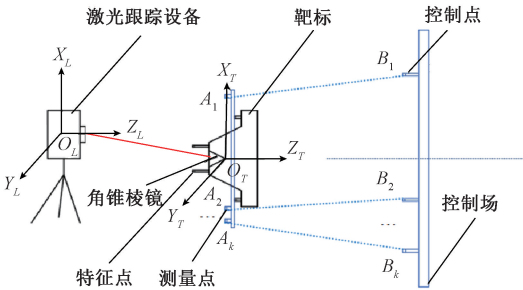


图3 精度评定模型示意图

Fig. 3 Diagram of the accuracy evaluation model

$$\mathbf{J} = 2 \begin{bmatrix} C_1 \mathbf{I}_{11} + D_1 \mathbf{I}_{12} + E_1 \mathbf{I}_{13} & C_1 \mathbf{K}_{11} + D_1 \mathbf{K}_{12} + E_1 \mathbf{K}_{13} & C_1 \mathbf{W}_{11} + D_1 \mathbf{W}_{12} + E_1 \mathbf{W}_{13} & C_1 & D_1 & E_1 \\ C_2 \mathbf{I}_{21} + D_2 \mathbf{I}_{22} + E_2 \mathbf{I}_{23} & C_2 \mathbf{K}_{21} + D_2 \mathbf{K}_{22} + E_2 \mathbf{K}_{23} & C_2 \mathbf{W}_{21} + D_2 \mathbf{W}_{22} + E_2 \mathbf{W}_{23} & C_2 & D_2 & E_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n \mathbf{I}_{n1} + D_n \mathbf{I}_{n2} + E_n \mathbf{I}_{n3} & C_n \mathbf{K}_{n1} + D_n \mathbf{K}_{n2} + E_n \mathbf{K}_{n3} & C_n \mathbf{W}_{n1} + D_n \mathbf{W}_{n2} + E_n \mathbf{W}_{n3} & C_n & D_n & E_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{ij} = \mathbf{V}_{j1} A_{ix} + \mathbf{V}_{j2} A_{iy} + \mathbf{V}_{j3} A_{iz} \\ \mathbf{K}_{ij} = \mathbf{G}_{j1} A_{ix} + \mathbf{G}_{j2} A_{iy} + \mathbf{G}_{j3} A_{iz} \\ \mathbf{W}_{ij} = \mathbf{H}_{j1} A_{ix} + \mathbf{H}_{j2} A_{iy} + \mathbf{H}_{j3} A_{iz} \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{V}_{ij} 、 \mathbf{G}_{ij} 、 \mathbf{H}_{ij} 分别为矩阵 \mathbf{V} 、 \mathbf{G} 、 \mathbf{H} 的第 i 行第 j 列元素; $\mathbf{V} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \alpha}$ 、 $\mathbf{G} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \beta}$ 、 $\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \gamma}$ 。

利用靶标上测量点,分别获得靶标坐标系与激光跟踪设备坐标系下坐标值,通过奇异值分解的方法得到靶标坐标系相对激光跟踪设备坐标系的姿态量作为初始姿态值;利用激光跟踪设备测得棱镜中心坐标作为初始位

姿,建立以位姿 $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 为未知量的非线性方程组数学模型。

$$C(\alpha, \beta, \gamma)_k^2 + D(\alpha, \beta, \gamma)_k^2 + E(\alpha, \beta, \gamma)_k^2 - l_k^2 = 0 \quad (5)$$

式中: l_k 为控制点与靶标测量点间空间距离; $k = 1, 2, \dots, n$ 。

$$\begin{cases} C(\alpha, \beta, \gamma)_k = \mathbf{T}_{11} A_{kx} + \mathbf{T}_{12} A_{ky} + \mathbf{T}_{13} A_{kz} + \mathbf{T}_{14} - B_{kx} \\ D(\alpha, \beta, \gamma)_k = \mathbf{T}_{21} A_{kx} + \mathbf{T}_{22} A_{ky} + \mathbf{T}_{23} A_{kz} + \mathbf{T}_{24} - B_{ky} \\ E(\alpha, \beta, \gamma)_k = \mathbf{T}_{31} A_{kx} + \mathbf{T}_{32} A_{ky} + \mathbf{T}_{33} A_{kz} + \mathbf{T}_{34} - B_{kz} \end{cases} \quad (6)$$

\mathbf{T}_{ij} 为空间齐次变换矩阵 \mathbf{T} 的第 i 行第 j 列元素;令 $X = (\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$, 式(5)进一步整理为:

$$F_k(X, l_k) = 0 (k = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

利用牛顿拉夫逊法逐次迭代求解变量 X 的最优数值解,即靶标的位姿变量。对式(7)进行 $N-1$ 级泰勒展开,并取其线性部分^[22-23],整理得到:

$$F(X^{(N)}, l_k) \approx -\mathbf{J}^{(N)} \Delta X^{(N)} \quad (8)$$

式中: N 为迭代次数; $\Delta X^{(N)} = X^{(N+1)} - X^{(N)}$; \mathbf{J} 为雅克比矩阵。

置值,代入式(4)得到相应的空间齐次变换矩阵 $\mathbf{T}^{(0)}$,按式(8)进行迭代计算。取 $\max |\Delta X| \leq \varepsilon$ 作为算法结束运行条件,获取靶标在激光跟踪设备坐标系下3个姿态角的最优数值解。

3 仿真分析

精度评定模型的精度受多种因素的影响,主要包括距离约束的测量精度、控制场的布局以及系统工作距离。利用 MATLAB 仿真软件对上述方法进行蒙特卡洛仿真分析,也为后续的实验奠定基础。仿真条件如下:激光跟

踪设备测距精度为 $\Delta d = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$, 测角精度为 $\Delta\theta = 0.5''$ 。3个姿态角在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 范围内变化, 步长为 10° , 可产生 1 000 个测量位置, 每个位置重复测量 1 000 次。获得方位角、俯仰角和横滚角在第 r 个位置的第 s 次测量值分别为 α_{rs} 、 β_{rs} 、 γ_{rs} 。以方位角为例, 计算公式如下:

$$\begin{cases} \sigma_{ar} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^M (\alpha_{rs} - \alpha_r)^2}{M}} \\ \Delta_{ar} = \frac{\sum_{s=1}^M \alpha_{rs}}{M} - \alpha_r \end{cases} \quad (11)$$

式中: α_r 为第 r 个位置方位角的理论值; M 为重复测量次数。 Δ_{ar} 为第 r 个位置方位角测量平均值与理论值的偏差, 描述每个位置方位角的系统误差; σ_{ar} 为第 r 个位置方位角的均方根误差, 描述每个位姿方位角的随机误差。评定模型误差由随机误差和系统误差两部分组成, 用所有位置方位角随机误差的标准差 σ_α 来表征模型方位角的随机误差, 所有位置方位角系统误差的标准差 e_α 来表征模型方位角的系统误差。

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^P (\sigma_{ar} - \bar{\sigma}_\alpha)^2}{P-1}} \\ e_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^P (\Delta_{ar} - \bar{\Delta}_\alpha)^2}{P-1}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\bar{\sigma}_\alpha$ 为每个位置方位角均方根的平均值; $\bar{\Delta}_\alpha$ 为每个位置方位角的平均值与真值之间偏差的平均值; P 为测量位置数。根据误差合成公式和 3σ 准则对精度评定模型的系统误差 e 和随机误差 σ 进行合成, 取合成误差 δ 作为评定模型的精度指标。当置信系数 $t = 3$ 时, 置信概率为 99.73%。以方位角为例, 计算公式如下:

$$\delta_\alpha = \pm t \sqrt{e_\alpha^2 + \sigma_\alpha^2} \quad (13)$$

1) 距离约束精度

距离约束精度是指控制点与靶标测量点间空间距离长度的测量精度。在 $0.01 \sim 0.15 \text{ mm}$ 的距离测量精度范围内, 等间隔设置 15 种精度等级, 分析距离测量精度对评定模型精度的影响。仿真结果如图 4 所示, 距离约束测量精度越高, 评定模型精度越高。

2) 控制场布局

控制场的布局包括如下 3 个方面: 控制场布局的远近、比例以及尺寸。

控制场远近是指控制点所在平面与靶标上测量点所在平面间的距离。设控制场布局远近范围为 $0.5 \sim 3.3 \text{ m}$, 等间隔选取 15 组距离值, 分析控制场布局远近对评定模型精度的影响。仿真结果如图 5(a) 所示, 控制场布局越

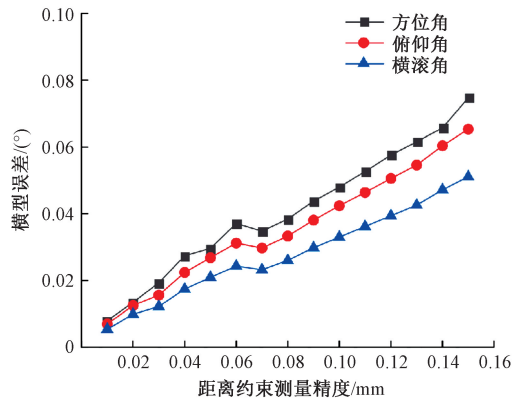
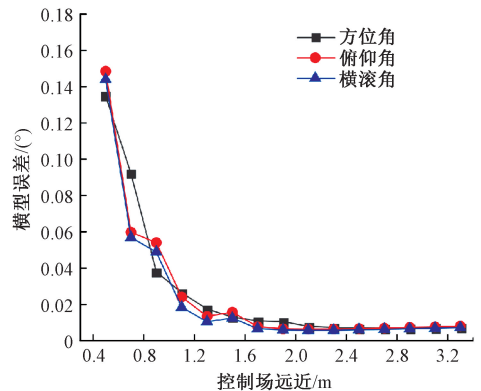


图 4 距离约束精度对模型精度的影响

Fig. 4 The influence of the distance constraint measurement accuracy on the model accuracy

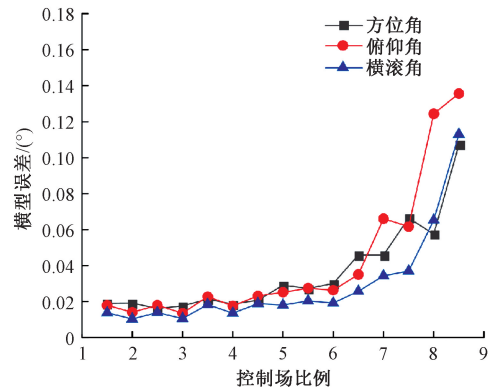
远, 评定模型精度越高。

控制场尺寸是指控制点所在圆平面的半径大小; 测量场尺寸是指靶标上测量点所在圆平面的半径大小; 控制场比例是指控制场尺寸与测量场尺寸的比值。当测量场尺寸大小不变, 设控制场比例范围为 $1.5 \sim 8.5$, 等间隔选取 15 组比例值等比放大控制场尺寸, 分析控制场比例对评定模型精度的影响。仿真结果如图 5(b) 所示, 控制



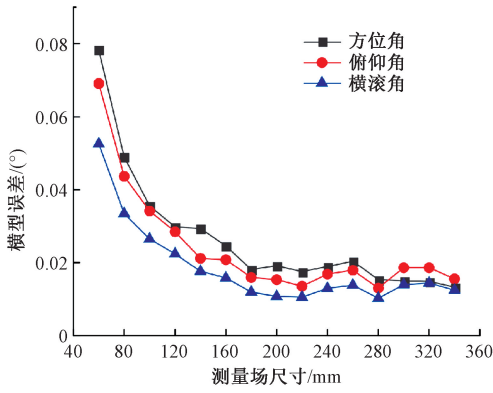
(a) 控制场远近

(a) The distance of the control field



(b) 控制场比例

(b) The multiple of the control field



(c) 测量场尺寸
(c) The size of the measurement field

图5 控制场布局对模型精度的影响

Fig. 5 The influence of the control field distribution on the model accuracy

场比例值越大,评定模型精度越低。当控制场比例为定值,测量场尺寸增大,控制场尺寸随之按比例增大,评定模型精度逐渐提高。仿真结果如图5(c)所示。

3) 系统工作距离

系统工作距离是指激光跟踪设备与靶标间距离,设系统工作距离范围为1~15 m,等间隔选取15组距离值,分析系统工作距离对评定模型精度的影响。仿真结果如图6所示,当其他条件不变时,仅改变姿态测量系统的工作距离,评定模型的精度基本维持在同一水平,不受系统工作距离远近的影响。

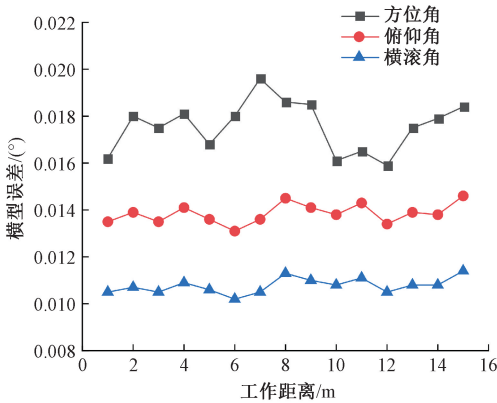


图6 系统工作距离对模型精度的影响

Fig. 6 The influence of the system working distance on the model accuracy

通过以上仿真分析可知,距离约束的测量精度是影响评定模型精度的主要因素,当距离约束测量精度为0.15 mm时,姿态角评定模型精度可达0.08°,随着测距精度的提升,评定模型精度会进一步提高。同时,可根据现场环境灵活合理地调整控制场的布局以满足激光跟踪姿态测量系统现场精度评定的要求。

4 实验验证

为了验证本文方法的可行性和有效性,采用精密二维转台的相对转动量作为角度基准,与本文方法测得的姿态角进行比对分析。

4.1 平台搭建

由于实验条件及设备有限,实验室现有激光跟踪设备为全站仪,其测距精度不能满足评定系统的距离测量精度要求,因此使用实验室现有的较高精度测量设备——绝对关节臂获取控制点与靶标测量点间距离约束信息。搭建实验平台如图7所示。

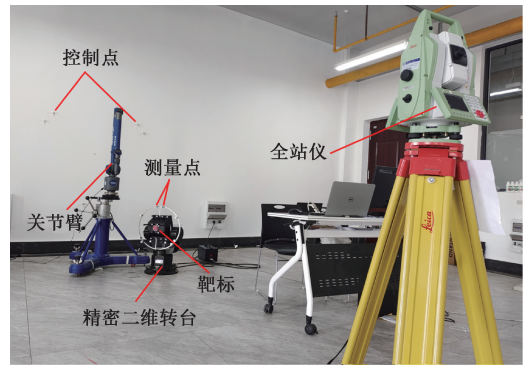


图7 实验平台

Fig. 7 The experimental platform

1) 实验设备

全站仪型号为Leica TM50,配合角锥棱镜测角精度可达0.5",到任意表面测距精度可达2 mm+2 ppm,测距范围1.5~3 500 m;靶标配合全站仪实现姿态测量。控制场大小为1 400 mm×1 400 mm,内布设有6个控制点;靶标上分布有6个测量点,距控制场1.3 m远。

绝对关节臂采用FARO Quantum^M V2移动式柔性测量臂,其单点坐标测量精度可达0.027 mm。假设绝对关节臂测得靶标测量点坐标为 $a_k = (a_{kx}, a_{ky}, a_{kz})$, $k = 1, 2, \dots, n$;控制点坐标为 $b_k = (b_{kx}, b_{ky}, b_{kz})$, $k = 1, 2, \dots, n$;第 k 对测量点与控制点间的距离为 l_k ;对应的距离测量精度为 δ_k ;以靶标测量点 a_k 为例, x, y, z 3个方向的坐标测量精度分别为 $\delta_{a_{kx}}, \delta_{a_{ky}}, \delta_{a_{kz}}$,对应的误差传递系数分别为 $\frac{\partial l_k}{\partial a_{kx}}, \frac{\partial l_k}{\partial a_{ky}}, \frac{\partial l_k}{\partial a_{kz}}$;根据两点间距离公式(14)和误差合成公式(15):

$$l_k = \sqrt{(a_{kx} - b_{kx})^2 + (a_{ky} - b_{ky})^2 + (a_{kz} - b_{kz})^2} \quad (14)$$

$$\delta_k = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial l_k}{\partial a_{kx}}\right)^2 \delta_{a_{kx}}^2 + \left(\frac{\partial l_k}{\partial a_{ky}}\right)^2 \delta_{a_{ky}}^2 + \dots + \left(\frac{\partial l_k}{\partial b_{kz}}\right)^2 \delta_{b_{kz}}^2} \quad (15)$$

可得到控制点与靶标测量点间空间距离测量精度 δ_{ik} 为 0.038 mm。根据仿真分析结论,此时姿态角评定模型精度可优于 0.08°。由文献[8-9]可知,本文研究的激光跟踪姿态测量系统在 3 m 处的方位角和俯仰角精度为 0.28°,因此采用该绝对关节臂获取距离约束信息。

2) 验证设备

精密二维转台,测量精度为 2",方位角转动范围为 50°~330°,俯仰角转动范围为 0°~360°。由于精密二维转台只有方位角和俯仰角两个方向的转动,且由仿真分析可知,横滚角的精度高于方位角和俯仰角,本文仅对方位角和俯仰角进行了实验验证。

4.2 坐标系配准

在实验之前,需标定出靶标坐标系同转台坐标系间转换关系,即完成坐标系配准后,才可将转台的相对转动量作为基准值来评定本文方法的精度。如图 8 所示,转台坐标系 $O_R - X_R Y_R Z_R$ 的原点 O_R 定义为两个旋转轴的交汇点,方位角旋转轴定义为转台坐标系的 X_R 轴,俯仰角旋转轴定义为转台坐标系的 Y_R 轴,由右手定则确定转台坐标系的 Z_R 轴。

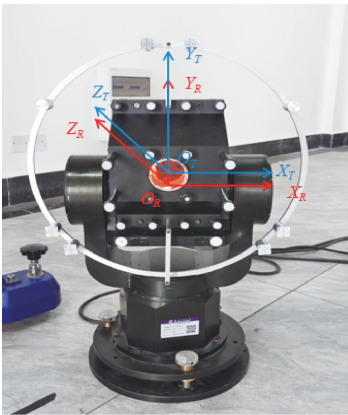


图 8 精密二维转台坐标系定义

Fig. 8 The definition of the precision two-dimensional turntable coordinate system

由各坐标系间的转换关系可得:

$$\mathbf{T}_T^L = \mathbf{T}_R^L \cdot \mathbf{T}_T^R \quad (16)$$

式中: \mathbf{T}_T^L 为激光跟踪设备坐标系与靶标坐标系间齐次变换矩阵; \mathbf{T}_R^L 为激光跟踪设备坐标系与转台坐标系间齐次变换矩阵; \mathbf{T}_T^R 为转台坐标系与靶标坐标系间齐次变换矩阵,坐标系配准后 \mathbf{T}_T^R 为单位矩阵。由于制造、安装和测量等因素的影响,转台与靶标间不可避免的存在一个位姿差量。因此分析转台坐标系与靶标坐标系间配准误差对姿态角评定误差的影响。

1) 配准位移误差对姿态角评定误差的影响。

控制转台坐标系与靶标坐标系间角度误差为定值,

位移误差在 0.1~100 mm 范围内变化。仿真结果如图 9 所示,配准位移误差不会影响姿态角评定误差。

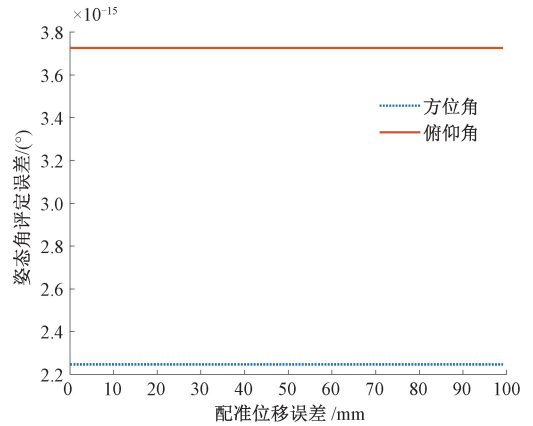


图 9 配准位移误差对姿态角评定精度的影响

Fig. 9 The influence of registration displacement error on the attitude angle evaluation accuracy

2) 配准角度误差对姿态角评定误差的影响。

控制转台坐标系与靶标坐标系间位移误差为定值,角度误差在 0.1°~10°范围内变化。仿真结果如图 10 所示,配准角度误差越大,姿态角评定误差越大。当角度误差达到 10°时,俯仰角评定误差达到 0.17°,因此坐标系角度配准问题是影响精密转台作为标准件进行姿态角精度评定的重要因素。

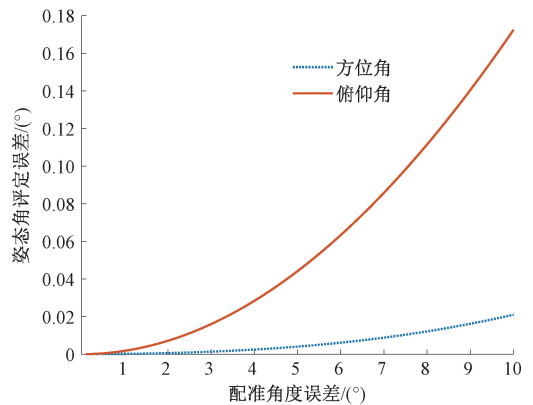


图 10 配准角度误差对姿态角评定精度的影响

Fig. 10 The influence of registration angle error on the attitude angle evaluation accuracy

由于本文所用测量系统靶标结构设计具有对称性,且靶标与转台刚性连接,其基准平面和转台承载面重合,因此转台坐标系与靶标坐标系间角度误差能够得到控制。当配准角度误差控制在 1°以内时,此时姿态角评定误差在 10⁻³ 量级,对评定精度的影响可忽略不计。

4.3 实验步骤

1) 将靶标安装于精密转台上,在距离转台 3 m 处固定全站仪;

2) 布设 1 400 mm×1 400 mm 控制场,距靶标 1.3 m 远;

3) 在靶标附近固定关节臂,每转动一次重新测量控制点与靶标测量点间距离;

4) 控制精密转台俯仰角不动,方位角以 5°为步长,在 -20°~20°范围内转动,将靶标方位角测量结果与转台相对转动量 5°对比,得到方位角测量误差;

5) 改变转动方向,控制精密转台方位角不动,俯仰角以 5°为步长,在 -20°~20°范围内转动,将靶标俯仰角测量结果与转台相对转动量 5°对比,得到俯仰角测量误差。

4.4 结果分析

根据上述实验步骤,得到精度评定模型方位角和俯仰角与转台相对转动量的比对结果,如表 1 和 2 所示。

表 1 方位角比对实验结果

Table 1 Azimuth angle comparison results (°)

测量次数	转台角度值	解算值	相对转动量	误差
1	-20	0.558 1	-	-
2	-15	5.554 7	4.996 7	-0.003 3
3	-10	10.553 4	4.998 6	-0.001 4
4	-5	15.584 2	5.030 8	0.030 8
5	0	20.588 5	5.004 4	0.004 4
6	5	25.613 1	5.024 6	0.024 6
7	10	30.595 0	4.981 9	-0.018 1
8	15	35.567 8	4.972 8	-0.027 2

表 2 俯仰角比对实验结果

Table 2 Pitch angle comparison results (°)

测量次数	转台角度值	解算值	相对转动量	误差
1	-20	-14.371 7	-	-
2	-15	-9.380 4	4.991 3	-0.008 7
3	-10	-4.357 0	5.023 4	0.023 4
4	-5	0.643 2	5.000 2	0.000 2
5	0	5.620 0	4.976 8	-0.023 2
6	5	10.646 7	5.026 7	0.026 7
7	10	15.659 7	5.013 0	0.013 0
8	15	20.699 4	5.039 7	0.039 7

由表 1 和 2 可知,在 -20°~20°的角度测量范围内,姿态测量系统在 3 m 工作距离时,精度评定模型方位角

最大误差绝对值为 0.030 8°,俯仰角最大误差绝对值为 0.039 7°。根据测量数据计算方位角和俯仰角方向的均方根误差 RMSE,计算公式如式(17)所示。

$$RMSE_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\nu_{\alpha i})^2}{M}} \quad (17)$$

式中: M 为测量次数; $\nu_{\alpha i}$ 为方位角第 i 次测量误差, $\nu_{\alpha i} = \alpha_{i+1} - \alpha_i - \varphi$; α_i 为方位角第 i 次解算值; φ 为转台相对转动量 5°。方位角均方根误差为 0.018°,俯仰角均方根误差为 0.019°。根据 3 σ 准则,将 3 倍的均方根误差作为该评定模型精度指标,则在该方法下方位角精度为 0.055°,俯仰角精度为 0.058°。由文献[8-9]可知,本文研究的激光跟踪姿态测量系统在 3 m 处的方位角和俯仰角精度为 0.28°,评定模型精度达到测量系统精度的 1/3 以上,可满足精度评定要求。

5 结 论

本文提出了一种基于空间距离约束的激光跟踪姿态测量系统现场精度评定方法。首先,参考 Stewart 平台的结构在测量靶标周围合理地布设控制场,建立起控制点与靶标测量点间距离约束;其次,利用齐次空间变换矩阵建立空间距离与靶标姿态之间的数学模型,通过将姿态角的测量结果溯源至长度计量基准,最终实现对姿态测量系统的现场精度评定。通过实验验证,本文方法具有良好的可行性,且具备如下优点:

1) 该方法避免了基于角度基准评定方法中较为严格的坐标系配准要求,在现场建立控制场和测量场,利用长度基准溯源姿态角精度,实现对激光跟踪姿态测量系统的现场精度评定。

2) 该方法能够同时评定方位角、俯仰角和横滚角,由于实验设备的限制,目前只验证了该方法方位角精度为 0.055°,俯仰角精度为 0.058°。

3) 该方法操作流程简单、适应性好,能综合反映测量系统在现场使用状态。本文中激光跟踪设备为全站仪,该方法同样适用于以激光跟踪仪为基准的姿态测量系统。由于激光跟踪仪具有高精度的干涉测距性能,后期有望通过激光跟踪仪测距精度来溯源姿态角测量精度,无需额外的精密距离测量装置予以辅助,为我国国产六自由度激光跟踪设备的研制和应用提供有力的技术支撑。

本文从原理上验证了基于并联机构运动学模型的测角精度评定的可行性。随着姿态测量系统精度的不断提高,精度评定模型也需进一步优化改进,提高其精度以及适应性。后续工作将从控制场布局优化、距离约束测量等方面着手,利用激光跟踪仪作为现场溯源设备,对系统姿态测量精度实现现场溯源。

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]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 30-36.
- [2] 翟华,闫梦飞,吕庆洲,等. 组合FPGA光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 50-57.
ZHAI H, YAN M F, LYU Q ZH, et al. Laser attitude measurement system of pipe jacking machine based on fpga photoelectric sensor array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 50-57.
- [3] 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 laser tracker[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [4] YANG J Q, WANG D Y, FAN B X, et al. Online absolute pose compensation and steering control of industrial robot based on six degrees of freedom laser measurement[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 034111.
- [5] GAO Y, LIN J R, YANG L H, et al. Integrated calibration of a 3D attitude sensor in large-scale metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(7): 075105.
- [6] 张帅,缪东晶,李建双,等. 多边形位姿测量系统中跟踪方式对测量精度的影响[J]. 计量学报, 2020, 41(9): 1055-1061.
ZHANG SH, MIAO D J, LI J SH, et al. Influence of tracking mode on measurement accuracy in multi-purpose pose measurement system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(9): 1055-1061.
- [7] 郑继辉. 基于激光多边形的位姿测量系统自标定与位姿解算方法[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
ZHENG J H. Self-calibration and posture solution for posture measurement system based on laser multilateral method[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019.
- [8] 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): 353-358.
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): 353-358.
- [9] 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.
- [10] 路遥环,裘祖荣,尤悦,等. 精密减速器角位移测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 14-20.
LU Y H, QIU Z R, YOU Y, et al. Design of angular displacement measuring system for precision reducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 14-20.
- [11] 裘祖荣,周磊,薛洁,等. 精密减速器检测仪测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2622-2631.
QIU Z R, ZHOU L, XUE J, et al. Angle error compensation of precision reducer tester[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(11): 2622-2631.
- [12] 杨振,沈越,邓勇,等. 基于激光跟踪仪的快速镜面准直与姿态测量方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 310-315.
YANG ZH, SHEN Y, DENG Y, et al. Rapid cubic prism collimation and attitude measurement method based on laser tracker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 310-315.
- [13] 孟祥瑞,杨学友,高扬,等. 激光标靶六自由度测量技术[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 27-33.
MENG X R, YANG X Y, GAO Y, et al. Laser target six-degree-of-freedom measurement technique[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(5): 27-33.
- [14] GAO Y, LIN J R, YANG L H, et al. Development and calibration of an accurate 6-degree-of-freedom measurement system with total station[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12): 125103.
- [15] 马一心,范百兴,黄剑. 多台激光跟踪仪联合动态位姿测量精度评定方法研究[J]. 测绘工程, 2021, 30(2): 55-59.
MA Y X, FAN B X, HUANG J. Research on the evaluation method of the accuracy of combined dynamic position and attitude measurement of multiple laser trackers [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(2): 55-59.
- [16] 张福民,曲兴华,戴建芳,等. 现场大尺寸测量量值溯源[J]. 天津大学学报, 2008(10): 1167-1171.
ZHANG F M, QU X H, DAI J F, et al. Quantity traceability in large-scale measurement in situ [J]. Journal of Tianjin University, 2008(10): 1167-1171.

- [17] 郑祥谱. 基于 Stewart 结构的并联平台及其在姿态稳定中的应用研究[D]. 浙江:浙江大学, 2021.
ZHENG X P. Parallel platform based on Stewart structure and its application in attitude stabilization [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2021.
- [18] FURQAN M, SUHAIB M, AHMAD N. Studies on stewart platform manipulator; A review [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31 (9): 4459-4470.
- [19] 强红宾, 薛大鹏, 冯新宇, 等. 基于无量纲化辨识雅可比矩阵选取测量位姿的 Stewart 并联机构运动学标定[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(7): 1546-1557.
QIANG H B, XUE D P, FENG X Y, et al. Stewart parallel manipulator kinematic calibration based on the normalized identification Jacobian choosing measurement configurations [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(7): 1546-1557.
- [20] WANG W, ZHANG X, HAN L L, et al. Inverse kinematics analysis of 6-DOF Stewart platform based on homogeneous coordinate transformation [J]. Ferroelectrics, 2018, 522(1): 108-121.
- [21] SARIGUL A S, GUNERI B. Some geometric, kinematic, and dynamic considerations on Stewart-Gough platforms with singularity analysis [J]. Robotica, 2014, 32(6): 953-966.
- [22] KRASNANSKY R, VALACH P, SOOS D, et al. Reference trajectory tracking for a multi-DOF robot arm [J]. Archives of Control Sciences, 2015, 25(4): 513-527.
- [23] 刘玉梅, 曹晓宁, 王秀刚, 等. 基于齐次变换矩阵数

值解的 6 自由度并联机构位姿正解解算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(7): 894-898.

LIU Y M, CAO X N, WANG X G, et al. Forward kinematics of the 6-DOF parallel mechanism based on homogeneous transformation matrix numerical solution [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(7): 894-898.

作者简介



刘宁桐, 2020 年于湖北工业大学获得学士学位, 现为湖北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为激光与光电检测。

E-mail: 102010052@hbut.edu.cn

Liu Ningtong received her B. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2020.

She is currently a master student in Hubei University of Technology. Her main research interest is laser and photoelectric detection.



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, 主要研究方向为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 all from Tianjin University in 2007, 2009, and 2012, respectively. She is currently an associate professor in Hubei University of Technology. Her main research interests include industrial large-scale measurement and photoelectric detection technology.