Cooperative Target Design for Laser Tracking Attitude Measurement at Near and Far Distances*

NI Qin[1,2], JIA Xiaodong[1,2], GUO Zhengnan[1,2], ZHANG Hao[1,2], ZENG Shouzhi[3], ZHOU Ronghao[3], XIONG Zhi[1,2]*
(1.School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068, China;
2.Hubei Key Laboratory of Quality Engineering for Modern Manufacturing, Wuhan Hubei 430068, China;
3.Detroit Green Industrial College, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068, China)

Abstract: In order to meet the measurement requirements of the laser tracking attitude measurement system under different positions at near and far distances, firstly, the overall size of the cooperative target is designed according to the size of the imaging field of view of the camera under different measurement distances. Secondly, the infrared LED light tube is designed to expand the illumination range of individual LEDs, and the size of the optical aperture is controlled in order to satisfy the requirements of the feature points with different imaging sizes under different distances. The heights, numbers and layout of the feature points at near and far distances are simulated and analyzed. Again, the coding of the cooperative target is realized by using different sizes of apertures. Finally, an experimental platform is built to analyze the accuracy of the attitude measurement with the designed cooperative target. Results shows that, within[−30°, 30°] attitude angle range and[3 m, 15 m] distance range, the attitude measurement accuracy is minimally improved by 25.4%. The proposed method is effective and feasible.

Key words: laser tracking; attitude measurement; objectives of cooperation near and far
EEACC: 6135 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.014

激光跟踪姿态测量中的远近距离合作目标设计*

倪 琴[1,2], 贾小东[1,2], 郭政南[1,2], 张 昊[1,2], 曾首智[3], 周镕昊[3], 熊 芝[1,2]*
(1.湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068; 2.湖北省现代制造质量工程重点实验室, 湖北 武汉 430068;
3.湖北工业大学底特律绿色工业学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 为满足激光跟踪姿态测量系统远近距离不同位置下的测量要求, 首先根据相机在不同测量距离下成像视场大小设计合作目标整体大小; 其次设计红外 LED 光管扩大单个 LED 照亮范围, 通过控制通光孔径大小以满足不同距离下特征点成像大小不同的要求; 随后分别对远近距离的特征点高度、个数、布局进行仿真分析; 再次通过使用不同大小的通光孔径实现合作目标的编码; 最后搭建了实验平台, 对改进前后的姿态角解算精度进行了对比分析, 实验结果表明: 设计的远近距离合作目标较于改进前合作目标测角范围更广、测量精度更高, 在[−30°, 30°]姿态角范围, 距离合作目标[3 m, 15 m]时, 姿态测量精度最小提升 25.4%。研究方法有效可行。

关键词: 激光跟踪; 姿态测量; 远近合作目标
中图分类号: TH702 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0573-08

在“工业 4.0”智能化时代以及“中国制造 2025”战略背景下, 现代工业正朝着信息化、智能化的方向快速发展。在大型装备制造业中, 高精度的设计、制造和检测是保证产品质量的关键因素, 而姿态测量是其中的一个关键环节[1-3]。

基于相机和激光跟踪设备的姿态组合测量方法, 可以充分利用相机高分辨率实现姿态角的动态解算, 如 Leica T-Mac 自动化跟踪控制探测系统以激光跟踪仪为基站, 配置高速变焦相机, 测量距离最远可达 30 m, 方位角和俯仰角测量范围为−45°~45°, 横滚角的测量范围为 0°~360°, 测点精度为 60 μm/15 m, 测角精度达到 0.01°。但存在高速变焦相机工艺复杂且制造难度大的问题[4-5]。

国内基于激光跟踪设备的姿态测量尚处于研究

项目来源: 国家重点研发计划“制造基础技术与关键部件”重点专项项目(2019YFB2006100)
收稿日期: 2024-03-14 **修改日期**: 2024-04-03

阶段,主要集中在华中科技大学、天津大学、中科院微电子研究所和湖北工业大学等高校及研究所。华中科技大学[6]研究了由全站仪、角锥棱镜、CCD 相机和倾角仪组合的盾构导向系统,如图 1 所示,该系统合作目标由角锥棱镜、CCD 相机和倾角仪组成,测量精度在 0.3 mrad 内。天津大学[7-8]研究了由激光跟踪仪、角锥棱镜、CCD 相机和 IMU 组合的姿态测量方法,如图 2 所示,姿态角测量误差在 0.2°以内。上述测量系统中,通过倾角仪获得合作目标的姿态角信息时,传感器的响应速率和测量范围容易受到限制,而采用 IMU 获得合作目标的姿态角信息容易产生累积误差,需实时校准。

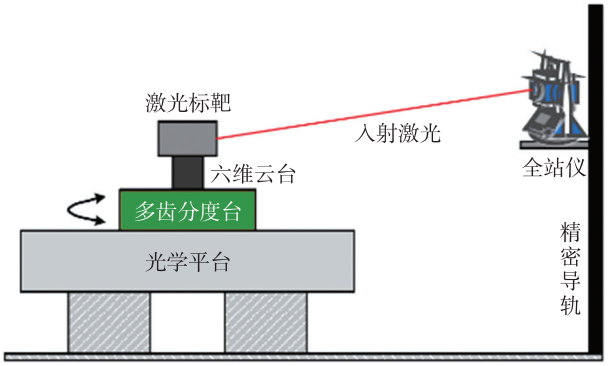


图 1 盾构导向系统

图 2 基于 IMU 姿态测量系统

中国科学院微电子研究所和湖北工业大学[9-11]研究了六自由度激光跟踪姿态测量系统,如图 3 所示。

该系统由激光跟踪设备、CCD 相机和合作目标组成,合作目标由红外 LED、角锥棱镜和 PSD 构成,测量距离为 3 m~15 m,姿态角测量精度在 0.22°内。但该系统采用定焦相机进行测量,近距离测量时,特征点光斑成像过大,镜头畸变严重;远距离测量时特征点光斑成像过小,图像处理误差增大。本文针对该问题,设计了适用于远近距离的合作目标,根据视觉传感参数和系统测量范围设计了远场和近场靶标尺寸、优化了 LED 通光孔径的大小;通过仿真分析设计了特征点布局,并研究了特征点编码方式。

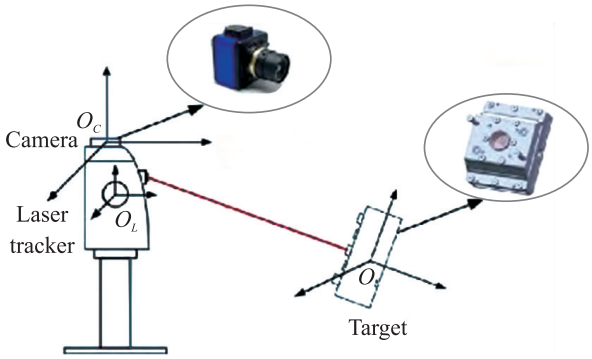


图 3 激光跟踪姿态测量系统

1 激光跟踪姿态测量系统组成及原理

姿态测量系统的硬件设备包括激光跟踪设备、单目相机以及合作目标组成,其中合作目标中又包括开孔角锥棱镜以及 PSD,姿态测量系统如图 4 所示。

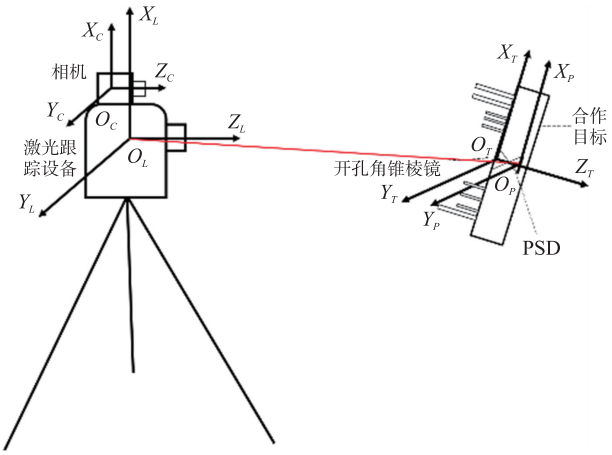


图 4 姿态测量系统组成示意图

姿态测量系统获得最终姿态角结果,解算方法如图 5 所示。

通过相机拍摄合作目标 LED 特征点解算得到方位角 φ_1、俯仰角 θ_1、横滚角 ϕ_1,根据光束向量在相机坐标系下的唯一性,将单目视觉中得到的横滚角 ϕ_1 代入,可获得光束向量解算的方位角 φ_2、俯仰角 θ_2,获得两组方位角和俯仰角数据,因此根据不同距离的测量精度采用加权最小二乘法,对姿态角进行数据融合以获得更高精度的姿态角[12-13]。

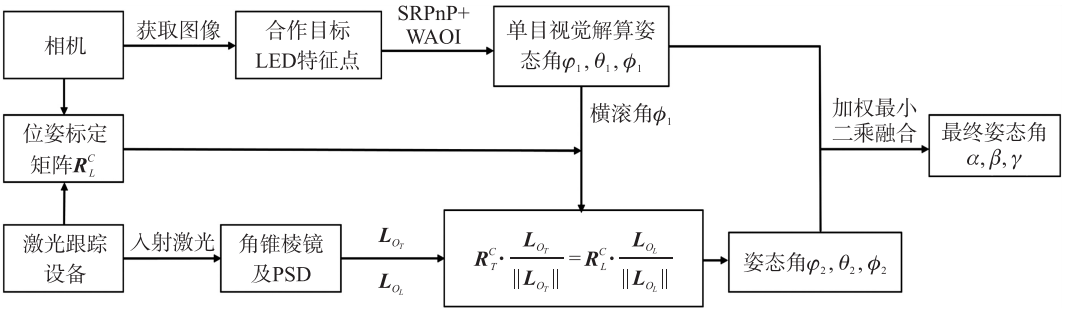


图 5　姿态测量系统姿态角解算方法

2　远近合作距离目标设计

2.1　合作目标尺寸设计

本文测量系统选用相机型号为德国 Balser ace acA2500~20 gm,配套镜头为日本 Kowa 公司型号为 LM75HC 的 75 mm 定焦镜头。

设计远场合作目标所占相机视场比例应在 8%~35%之间,满足 8 m~15 m 的测量要求,且为了配合姿态测量评定使用的二维精密转台,设计远场靶标尺寸为 210 mm×180 mm,相机在 8 m~15 m 的视场对应物理尺寸及靶标所占视场比如表 1 所示,其中 H_x 为相机成像 X 轴上的物理尺寸大小,H_y 为相机成像 Y 轴上的物理尺寸大小。

表 1　相机视场及合作目标视场占比

测量距离/mm	拍摄视场	靶标占比/%
远距离合作目标:尺寸 210 mm×180 mm		
8 000	H_x/mm:1 327	16
	H_y/mm:1 049	20
9 000	H_x/mm:1 493	14
	H_y/mm:1 180	18
10 000	H_x/mm:1 659	13
	H_y/mm:1 311	16
11 000	H_x/mm:1 825	12
	H_y/mm:1 442	15
12 000	H_x/mm:1 991	11
	H_y/mm:1 573	14
13 000	H_x/mm:2 156	10
	H_y/mm:1 704	13
14 000	H_x/mm:2 322	9
	H_y/mm:1 835	11
15 000	H_x/mm:2 488	8
	H_y/mm:1 966	10

2.2　特征点类型

使用视觉进行精密测量,为提高测量的精度和可靠性,设计红外 LED 光管。通过透镜及镜管放大一个红外 LED 所能点亮的区域,设计光管如图 6 所示。

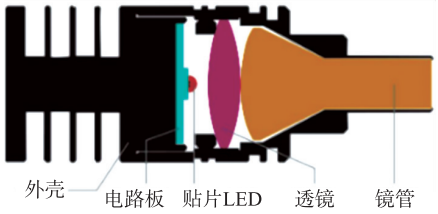


图 6　红外 LED 光管剖面结构

电路板中间为红外 LED,通常需要特征点在相机成像光斑直径大于 10 pixel,根据小孔成像原理,在 3 m~7 m 内近距离测量合作目标姿态角时,通光孔直径应大于 2.5 mm,在 8 m~15 m 内远距离测量合作目标姿态角时,通光孔径直径应大于 10 mm。

2.3　特征点布局仿真

分别从近距离测量最远距离(7 m)与远距离测量最远距离(15 m)仿真分析合作目标特征点不同分布情况对姿态解算结果的影响。每组实验添加 0.1 pixel 的图像处理误差,每次仿真重复 1 000 次,计算 1 000 次的姿态角标准差值,定义为姿态角解算精度。

2.3.1　平面合作目标分析

如图 7、图 8 所示,将各特征点设置为同一平面时,相机解算姿态测量结果精度低,无法达到远近距离单目视觉姿态测量精度达到 0.1°的要求。

2.3.2　立体合作目标分析

将特征点分布在不同平面上,增加特征点在 Z

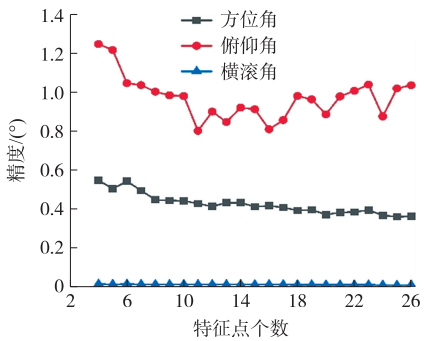


图 7　7 m 特征点个数解算精度

轴方向的距离,仿真实验分别分析了高低梯度特征点个数不平均和高低梯度特征点个数平均的情况,如表 2 所示。

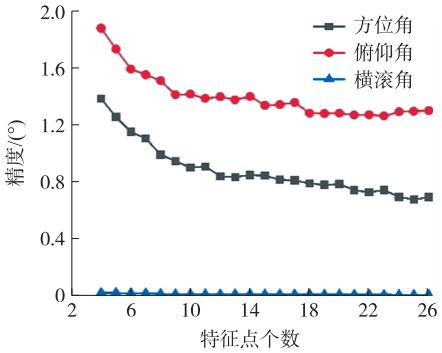


图 8 15 m 特征点个数解算精度

表 2 高低梯度特征点个数组合情况

组别	高梯度特征点个数/个	低梯度特征点个数/个
Set1	1	7
Set2	2	6
Set3	3	5
Set4	4	4
Set5	5	3
Set6	6	2
Set7	7	1

仿真特征点高度差范围为 20 mm~150 mm,步长为 10 mm,仿真结果如图 9 和图 10 所示,Set5~Set7 特征点布局与 Set3~Set1 相似,仿真结果也相似,因此仅展示 Set1~Set4 的仿真结果。

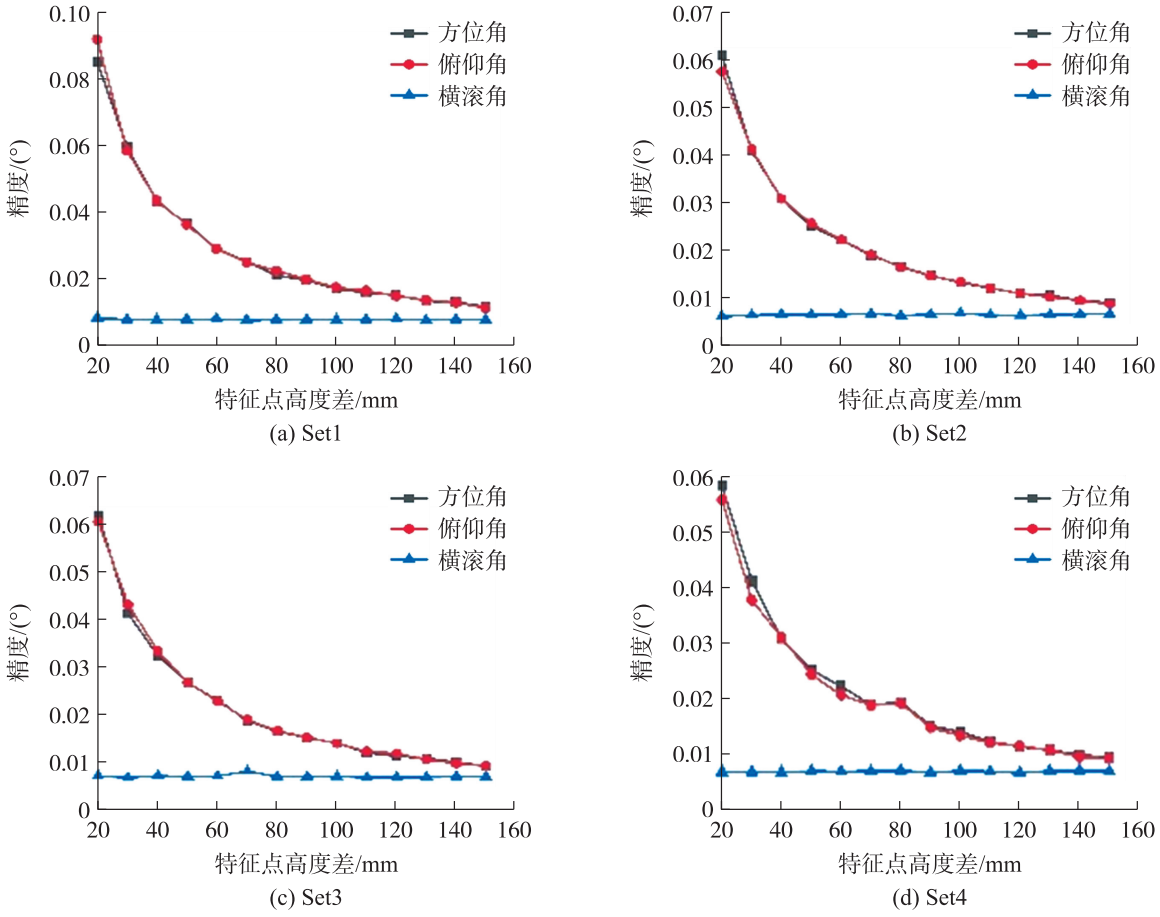


图 9 测量距离 7 m 不同高梯度特征点个数对姿态测量结果的影响

由图 9 和图 10 仿真分析可知,特征点之间增加高度差后,方位角和俯仰角的解算精度曲线趋于一致,随着特征点之间高度差的增大,姿态解算精度提高。当高低梯度征点个数均大于 2 个时,姿态解算精度高于只有一个高或低梯度特征点的情况。高梯度特征点为 20 mm,测量距离为 7 m 和 15 m,不同高梯度特征点个数的姿态解算精度如表 3 和表 4 所示。

表 3 7 m 测量距离 20 mm 梯度特征点不同个数的姿态解算精度

高(低)梯度特征点个数/个	方位角/(°)	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
1	0.085	0.092	0.008
2	0.061	0.057	0.006
3	0.062	0.060	0.007
4	0.058	0.056	0.007

表 4　15 m 测量距离 20 mm 梯度特征点不同个数的姿态解算精度

高(低)梯度特征点个数/个	方位角/(°)	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
1	0.183	0.177	0.016
2	0.128	0.122	0.014
3	0.131	0.131	0.014
4	0.124	0.126	0.014

由表 3 和表 4 可知,20 mm 的高梯度特征点能够满足近距离(3 m~7 m)姿态测量精度要求,但是无法满足远距离(8 m~15 m)姿态测量精度要求。

综上所述,高低梯度特征点个数均大于 2 个时有较好的测量结果,为了尽可能增加特征点之间的高度差以提高在固定大小的合作目标在远近距离的姿态测量精度,并且要求特征点在合作目标方位角和俯仰角±30°范围内转动时无遮挡,因此选择近距离的高梯度特征点高度为 80 mm,远距离的高梯度特征点高度为 100 mm,此时 2 个高梯度在 7 m 和 15 m 测量距离的测量精度为[0.017°,0.016°,0.006°]和[0.028°,0.027°,0.014°],3 个高梯度为[0.016°,0.017°,0.007°]和[0.029°,0.029°,0.015°],均能够满足姿态测量系统高精度角度测量要求。

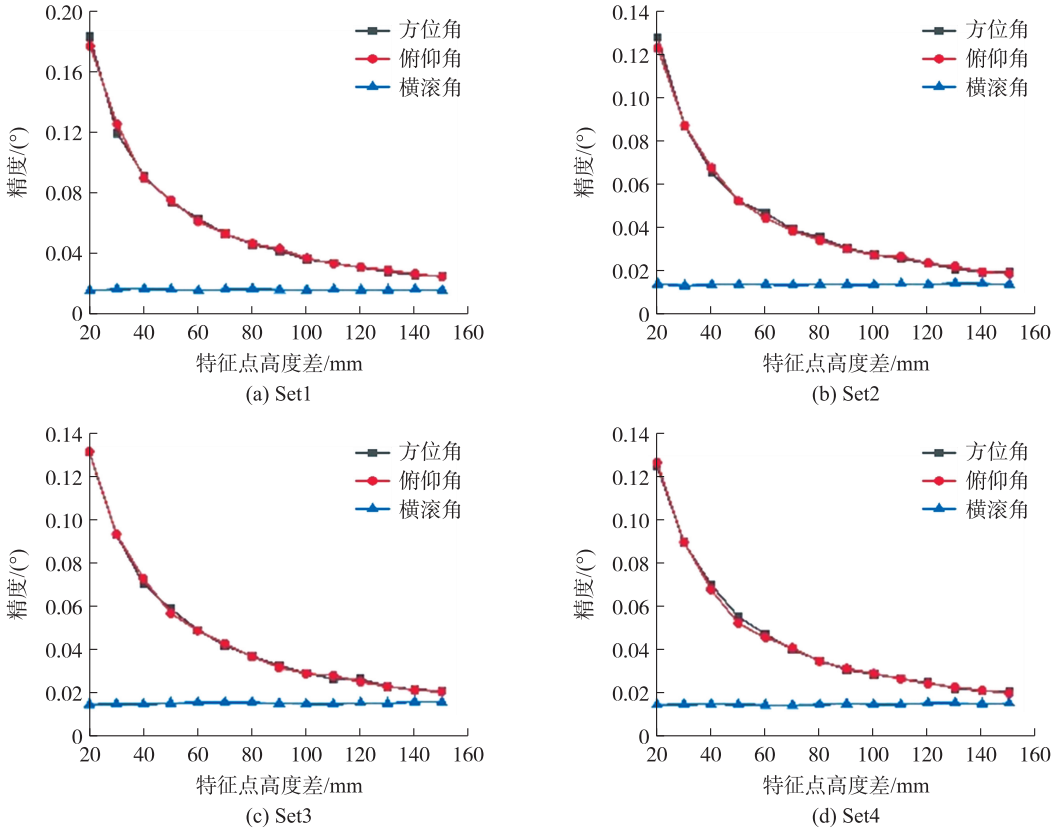


图 10　测量距离 15 m 不同高梯度特征点个数对姿态测量结果的影响

2.3.3　特征点布局分析

由于特征点个数为 10 个时能组合更多的图形且测量结果较稳定,因此仿真时设计特征点个数为 10 个,设计 4 种特征点布局图案(图 11),高梯度特征点设置为 2 个,高度为 80 mm,仿真测量距离为 7 m 的特征点布局与姿态解算精度的关系。

表 5　不同排布方式解算精度

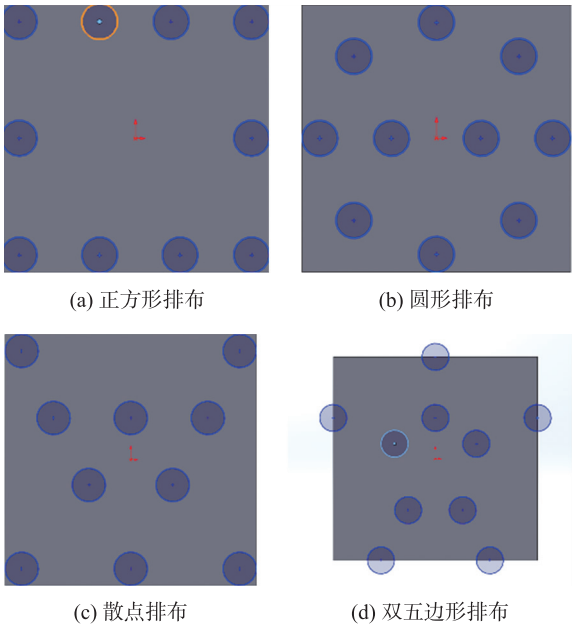
排布方式	方位角/(°)	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
正方形	0.015	0.015	0.007
圆形	0.015	0.015	0.009
散点	0.016	0.016	0.008
双五边形	0.015	0.016	0.008

由表 5 可知,当特征点总个数、高梯度特征点高度和高梯度特征点个数一定时,特征点的摆放方式对姿态角解算精度没有影响。

因此下文将仿真在 7 m 测量和 15 m 测量高梯度特征点高度为 80 mm 和 100 mm 时,特征点个数与姿态解算精度的关系,高梯度特征点个数设置为 2 个,仿真结果如图 12 所示。

由图 12 可知,测量距离为 7 m,特征点高度差为 80 mm 时,当特征点个数大于 8 个时,姿态解算结果提升较小,近距离测量特征点个数为 8 个时的测量精度为[0.015°,0.015°,0.006°],测量距离为 15 m 时,远距离测量特征点个数为 10 个时的测量

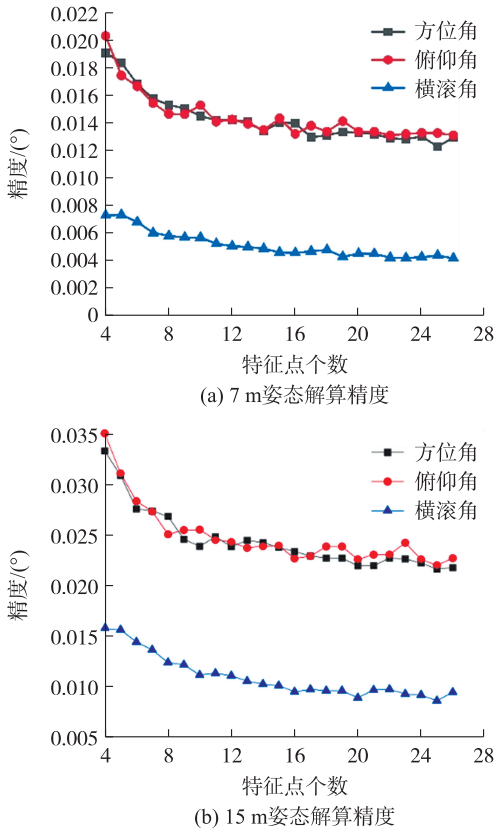
精度为[0.024°,0.025°,0.011°]。



(a) 正方形排布 (b) 圆形排布

(c) 散点排布 (d) 双五边形排布

图 11 特征点的不同排布方式



(a) 7 m姿态解算精度

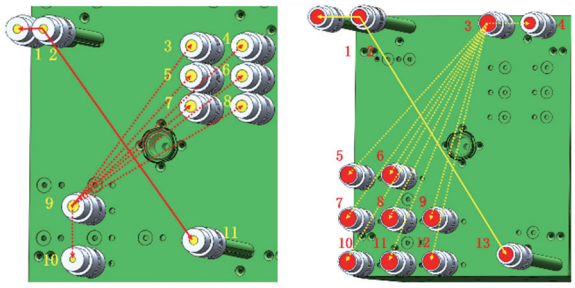
(b) 15 m姿态解算精度

图 12 不同特征点个数在不同测量距离的姿态解算结果

2.4 特征点编码方式

由于特征点排布方式与姿态解算精度无关,因此设计编码合作目标,以识别特征点位置,设计编码合作目标如图 13 所示。

图 13(a)中所示特征点为近距离测量使用的编码合作目标特征点。标号为 1、2、11 的特征点为高梯度特征点,直径为 6 mm;其余特征点为低梯度特征点,其中 10 号特征点直径为 4 mm,用于定向识别,其余特征点直径均为 8 mm。图 13(b)中所示特征点为远距离测量使用的编码合作目标特征点。1、2、13 号特征点为高梯度特征点,直径为 12 mm;4 号特征点直径为 10 mm;其余特征点直径均为 16 mm。此布局的合作目标分别绕自身坐标系旋转±30°后,特征点之间均没有产生遮挡,满足系统测量要求,并根据每个特征点距离与角度之间的约束关系对特征点进行编码以供相机自动识别。



(a) 近距离特征点布局 (b) 远距离特征点布局

图 13 特征识别编码合作目标

通过仿真分析,此合作目标能够完成测量距离为 3 m~15 m、方位角和俯仰角角度在±30°内的测量。近距离测量(3 m~7 m)合作目标特征点高度差为 80 mm,方位角、俯仰角和横滚角测量精度为[0.013°,0.013°,0.007°];远距离测量(8 m~15 m)特征点高度差为 100 mm,方位角、俯仰角和横滚角测量精度为[0.023°,0.023°,0.010°]。

3 姿态测量实验及分析

3.1 实验方法及步骤

为了对比改进前后的合作目标姿态测量精度,设计姿态实验平台。实验室现有的激光跟踪设备为 Leica TM50 全站仪,测量任意表面可测距离为 1.5~1 000 m,测点精度为 2 mm+1 mm/m,配合跟踪棱镜测量时,可测距离为 1.5 m~3 500.0 m,测量跟踪棱镜中心精度为 0.6 mm+1 mm/m。如图 14 所示,实验平台由全站仪、相机和合作目标构成,二维精密转台用于姿态测量结果评定,转台角度测量精度为 2″。

实验中固定相机与全站仪的位置,将合作目标安装二维精密转台上,二维精密转台带动合作目标旋转以改变合作目标坐标系与相机和激光跟踪设备坐标系的位姿关系,并以转台转动值为基准值,测量不同距离下合作目标在±30°的姿态测量结果,具体实验步骤如下:

图 14　姿态测量实验平台

①固定相机与全站仪位置不变,将合作目标安装在二维精密转台上,标定相机与全站仪的相对位姿。

②将合作目标放置在距离相机光轴 3 m 处,控制转台在方位角、俯仰角以 2°的间隔转动,转动区间为[-30°,30°],测量方位角转动时控制俯仰角不动,测量俯仰角转动时控制方位角不动。

③移动合作靶标在相机光轴上的距离为 6、9、12、15 m,重复步骤②。

④将姿态测量结果与转台值进行对比,得到测量结果在方位角和俯仰角上的误差。

3.2　结果及分析

根据方位角和俯仰角的测量数据,以二维精密转台角度值作为基准,计算姿态测量系统在不同距离下方位角和俯仰角测量标准差,结果如表 6 所示。并根据式(1)对方位角和俯仰角的标准差进行合成,作为不同距离处姿态测量精度。

表 6　姿态角误差标准差

姿态角误差标准差	测量距离/m				
	3	6	9	12	15
方位角/(°)	0.013	0.033	0.040	0.053	0.061
俯仰角/(°)	0.018	0.026	0.053	0.066	0.076

$$\Delta_i=\sqrt{\alpha_i^2+\beta_i^2} \tag{1}$$

式中:Δ_i、α_i、β_i 分别表示不同距离姿态测量精度、方位角测量标准差和俯仰角测量标准差,i 表示距离。将本文设计远近距离合作目标与改进前合作目标姿态解算精度作比较,结果如图 15 所示。

由图 15 中可知,本文设计的远近距离合作目标姿态测量系统测量精度 3 m 处为 0.022°,6 m 处为 0.042°,9 m 处为 0.067°,12 m 处为 0.085°,15 m 处为 0.097°。相较于改进前合作目标,本文设计合作目标测量距离为 3 m 精度提升 59.0%,6 m 精度提升 25.4%,9 m 提升 27.4%,12 m 提升 52.7%,15 m 提升 55.7%。综上所述,本文设计的远近距离合作目标相较于改进前合作目标测角范围更广、测量精度更高,姿态测量精度最小提升 25.4%。

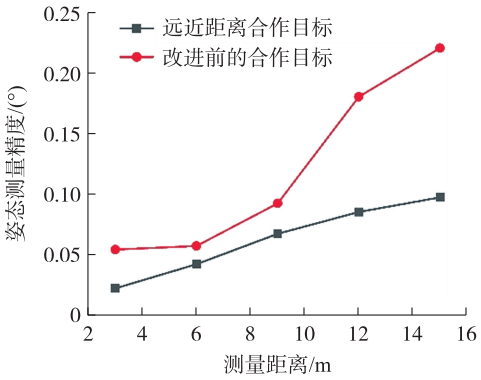


图 15　姿态测量系统精度评定结果

4　总结

本文针对激光跟踪姿态测量系统合作目标设计展开研究。根据合作目标所占相机视场比例应在 8%~35% 之间,3~7 m 内近通光孔直径应大于 2.5 mm,在 8 m~15 m 内远距离通光孔径直径应大于 10 mm。通过仿真分析可知,各特征点设置为同一平面时,无法达到远近距离单目视觉姿态测量精度要求,随着特征点之间高度差的增大,姿态解算精度越高,因此本文设计合作目标近距离的高梯度特征点高度为 80 mm,远距离的高梯度特征点高度为 100 mm。

搭建姿态测量实验平台,实验结果表明,在[-30°,30°]的姿态角范围内,本文姿态测量系统 3 m 处测量精度为 0.022°,15 m 测量精度为 0.097°,相较前版本合作目标,姿态测量精度最小提升 25.4%,最大提升为 59%,本文设计远近距离合作目标有更好的测量精度,满足 0.1°姿态测量要求。

参考文献:

[1] 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.

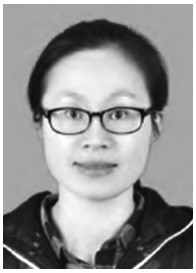
[2] 张欣. 精密测量技术助力智能制造[J]. 现代制造,2021(16):9.

[3] 石琦,李翔. 融合光流与 MARG 传感器的三维姿态测量研究[J]. 电子器件,2023,46(5):1281-1285.

[4] Li G,Zhang F,Fu Y,et al. Kinematic Calibration of Serial Robot Using Dual Quaternions[J]. Industrial Robot,

2019,46(2):247-258.
[5] Fernandez S R,Olabi A,Gibaru O. On-Line Accurate 3D Positioning Solution for Robotic Large-Scale Assembly Using a Vision System and a 6Dof Tracking Unit[C]// 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China,2018:682-688.
[6] 朱国力,陈沛东. 盾构姿态测量中基于边缘检测的中心定位算法[J]. 机械工程与自动化,2014(5):39-41.
[7] 孙长库,徐怀远,张宝尚,等. 基于 IMU 与单目视觉融合的姿态测量方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(3):313-320.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 刘宁桐,熊芝,何静,等. 基于空间距离约束的姿态角现场精度评定方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(9):72-80.
[12] 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.
[13] Xiong Z,He J,Chang L,et al. On-Site Accuracy Evaluation of Laser Tracking Attitude Measurement System[J]. Optics Express,2023,31(22):37212-37228.

倪 琴(2002—),在读本科生,研究方向为工业大尺寸测量和光电检测技术,2740684593@qq.com;



熊 芝(1985—),博士,副教授,主要研究领域是工业大尺寸测量和光电检测技术,xiongzhi0611@163.com。

贾小东(1992—),硕士研究生,主要研究方向为工业大尺寸测量和光电检测技术,137453630@qq.com;