

# 基于 T-Scan 的三维激光扫描系统测量误差分析

林 晶<sup>1</sup>, 李泂杲<sup>1</sup>, 黄 翔<sup>1</sup>, 江一帆<sup>1</sup>, 赵子越<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**[摘要]** 三维激光自动扫描系统可以快速获取零件表面信息, 提高扫描系统的测量精度可以进一步提高系统性能。针对扫描精度问题, 对扫描系统的测量误差进行了分析和评估, 在试验中使用的扫描系统由机器人和商业三维激光扫描仪 T-Scan 组成, 这种商业三维激光扫描仪的基本原理是激光三角法, 测量误差受到扫描位姿的影响。将 T-Scan 的扫描位姿分解为扫描深度、俯仰角和偏转角, 通过控制变量试验研究了扫描位姿对随机误差和系统误差的影响。试验结果显示, 扫描结果的随机误差远小于系统误差, 系统误差与扫描深度和俯仰角呈双线性关系。根据试验结果建立了系统误差的预测模型, 通过模型预测的系统误差与实际试验结果的偏差最大为 26 $\mu\text{m}$ , 该预测模型是优化扫描轨迹从而提高测量精度的前提条件。

**关键词:** 激光扫描; 误差分析; 扫描位姿; 预测模型; 评估

## Analysis of Detecting Error of Laser Scanning System Based on T-Scan

LIN Jing<sup>1</sup>, LI Shuanggao<sup>1</sup>, HUANG Xiang<sup>1</sup>, JIANG Yifan<sup>1</sup>, ZHAO Ziyue<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

**[ABSTRACT]** The 3D laser scanning system mounted on an industrial robot is capable of detecting the surface information of parts quickly, and can enhance the system capability by improving the accuracy of measurement. In this paper, the measurement error of scanning system is analyzed and evaluated. The scanning system used in this experiment consists of an industrial robot and a commercial 3D laser scanner T-Scan. The basic principle of this commercial 3D laser scanner is laser triangulation, as a result, its measuring error is affected by scanning posture. In this experiment scanning posture is decomposed into scan depth, pitching angle and yawing angle. And the influence of scanning posture on random error and systematic error is studied by a series of experiments which control the variation of three parameters in sequence. Experiment result shows that the random error of the measurement is small compared with systematic error. And the systematic error shows a bilinear relationship with the scan depth and the pitching angle. A prediction model is developed and the maximum deviation between the model and the experimental results is only 26mm. The prediction model is a precondition to optimize the scanning trajectory and improve the measurement accuracy.

**Keywords:** Laser Scanning; Error analysis; Measuring posture; Prediction model; Evaluation

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.095

近年来, 三维激光扫描技术被广泛应用于自由曲面的三维点云信息采集。该技术采用非接触式测量, 具有点位测量精度高、空间点采集密度大、速度快以及可以进行柔性测量等特点, 相比于三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 优势明显<sup>[1]</sup>。国内外大量研究将商业激光扫描仪安装在计算机控制的机床、机器人或者坐标测量机末端, 组成自动测量系统<sup>[2-6]</sup>。

对于这些自动测量系统, 测量轨迹规划是其共性问题之一。

但是目前绝大部分自动测量系统的轨迹规划仅停留于满足扫描约束和提高扫描效率。艾小祥<sup>[7]</sup>在机翼扫描系统扫描轨迹规划中, 通过遗传算法生成了满足扫描约束且时间最短的扫描轨迹。考虑到激光扫描仪的基本原理是三角测量法, 即使满足了扫描约束条件, 扫描仪相对于待测平面的不同位姿也会导致测量误差变化。同时商用激光扫描仪器的扫描精度通常比触发式探头的测量精度低一个数量等级, 提高激光扫描的

扫描精度可以提高测量结果的可靠性。因此研究激光扫描仪的误差变化规律,并将该规律应用到扫描系统的轨迹规划中以提升扫描系统精度具有重要意义。

目前,国内外对激光扫描误差的研究很多。Harding<sup>[8]</sup>分析了基于激光三角测距法的三维测量系统的误差影响因素,并针对各个因素提出了相应的系统校正方法。郑德华等<sup>[9]</sup>从仪器误差、与目标物体反射面有关的误差和外界环境条件影响3个方面分析了三维激光扫描系统误差。Gerbrino等<sup>[10]</sup>测试了扫描器到对象的相对方向和环境照明以及内部扫描器等参数变化、扫描结果的误差分布。Blanco等<sup>[11]</sup>评估了三维激光扫描仪在不同材质上的扫描表现。Cuesta等<sup>[12]</sup>研究了扫描表面粗糙度对扫描精度的影响。上述研究对激光扫描误差的分析广泛而深入,但是对优化扫描轨迹意义不大。扫描轨迹是由一系列扫描位姿组成的,优化扫描轨迹需要研究扫描位姿变化对扫描误差的影响。

根据所使用工具的特点或者误差调整工具轨迹是工程中的常用手段<sup>[13-14]</sup>。目前国内外对激光扫描仪的扫描位姿对扫描误差影响的研究较少。Gestel等<sup>[15]</sup>对安装在CMM上的商用三维激光扫描仪进行了性能评估,评估了单个位姿参数变化如扫描深度和扫描角度对测量误差的影响。Wang等<sup>[16]</sup>分析了商用三维激光扫描仪扫描过程中扫描边缘特征时噪点的产生原因,并通过调整扫描方向和扫描角度有效降低了边缘特征扫描结果的噪点。与上述研究不同,本文的研究对象主要是曲率变化不大的光滑曲面,曲面任意一条扫描线处的曲面附近都可以简化为平面,扫描误差与扫描方向无关,同时扫描误差分析需要进行扫描深度和扫描角度的正交试验,而不是单个参数的试验。

本研究将三维扫描仪Leica T-Scan5(以下简称T-Scan)安装在工业机器人末端,并将与T-Scan配套的激光跟踪仪放置在测量场中,组成了一套与机器人定位精度无关的自动扫描测量系统。该自动化扫描系统主要应用于飞机数字化测量,可以实现对飞机壁板和蒙皮等曲面零件的扫描,而提高扫描的精度可以有效满足各种测量需求并扩大自动化扫描系统的适用范围。本文试图分析扫描过程中T-Scan扫描位姿对商业三维激光扫描仪测量误差影响,并建立预测测量误差的数学模型。

## 1 T-Scan 扫描原理与约束

### 1.1 T-Scan扫描原理

T-Scan(图1中虚线框内)表面分布有9个LED红外指示灯和4个激光反射镜。激光跟踪仪发射激光束到T-Scan的反射镜,控制器根据激光测距原理和激

光跟踪仪运动参数确定T-Scan在测量坐标系中的位置参数,激光跟踪仪上的T-Cam通过捕捉T-Scan上LED红外指示灯的图像确定T-Scan在测量坐标系中的姿态参数,位置参数和姿态参数共同确定了T-Scan在测量坐标系下的位姿,如图1所示。

T-Scan扫描的基本原理是三角测距法:T-Scan通过均匀旋转的棱镜将激光发生器产生的激光束打散,在被测物体表面形成线激光。单个激光束在被测物体表面产生理想的点光斑,点光斑的反射光束经过透镜成像在CCD线阵上成像,投射点到激光源的距离与该点的点光斑的成像位置是对应关系。通过控制器解算CCD线阵信号,获得线激光上所有点在T-Scan坐标系下的二维坐标。

控制器把线激光上点的二维坐标结合T-Scan空间位姿转化到测量坐标系下,便获得了被测物体线激光处所有点在测量坐标系下的空间坐标。

### 1.2 T-Scan扫描约束

受到测量原理和硬件性能限制,T-Scan扫描时需要满足一些约束,主要是扫描仪位姿约束。

为了顺利获得曲面上点的坐标,扫描仪位姿需要满足倾角( $\theta$ )、景宽(Field of View, FOV)和景深(Depth of View, DOV)如图2所示,具体约束如下:

图2中 $P_i$ 表示待测平面上一点; $N_i$ 表示该点在曲面上的法向方向; $T$ 表示激光扫描仪扫描镜中心点; $l_{DOV}$ 表示景深角平分线; $l_1$ 和 $l_{DOV}$ 是激光扫描仪的景深范围,是激光扫描仪的固定参数。

(1)测量倾角:曲面点处的法向矢量与入射激光扫描线的夹角 $\theta$ 。一般情况,入射激光线与测量点法向矢量共线是三角测量原理的重要条件。实际测量时,两者之间往往存在一个角度,但是角度 $\theta$ 不能超过限定阈值 $\eta$ ,即 $\theta \leq \eta$ 。

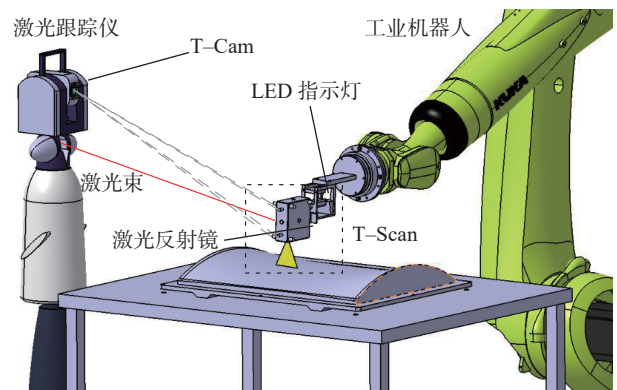


图1 扫描系统工作原理  
Fig.1 Working principles of scanning system

(2) 测量景宽: 曲面测量点应在景宽角边界线以内, 直线  $TP_i$  与  $B_i$  的夹角  $\omega < \omega/2$ 。

(3) 测量景深: 曲面测量点到 T-Scan 扫描头的距离在固定范围内。

(4) 其他约束: 激光跟踪仪与 T-Scan 之间的激光束连接不被其他物体遮挡及 T-Scan 扫描头到被测表面的点不被其他物体遮挡。

扫描约束限制了 T-Scan 的扫描位姿, 被测物体必须处于扫描窗口之内, 如图 2 所示, 红色区域内为扫描窗口, T-Scan 的扫描窗口近似是一个等腰梯形。

## 2 T-Scan 扫描误差分析

三维激光扫描测量误差的影响因素较多, 大致可分为 3 类: 仪器误差、与目标物体反射面有关的误差及外界环境条件<sup>[9]</sup>。与目标物体反射面有关的误差主要与反射面的曲率、反射面的材料和反射面的表面粗糙度有关。外界环境条件主要包括温度、气压和光照条件等因素。

在目标物体和外界环境不变的情况下, 仪器误差可以分为随机误差和系统误差。本文研究 T-Scan 扫描位姿对随机误差和系统误差的影响。

### 2.1 随机误差

激光扫描数据中的随机误差有多个来源, 难以控制。对于基于三角测距法的激光扫描仪而言, 由 CCD 上的光波总和引起的斑点噪声是造成随机误差的主要原因之一<sup>[17]</sup>。光波总和往往涉及随机相量。这些相量可能相互抵消或相互加强, 分别导致黑暗或明亮的斑点, 这一随机过程导致了数字化坐标计算的不确定性。

### 2.2 系统误差

激光扫描数据中的系统误差是数字化误差中的可重复部分。三维扫描系统以相同位姿扫描被测物体时, 系统误差始终具有相同的值。这就意味着如果可以获得系统误差相对于扫描位姿的变化规律, 就可以根据该

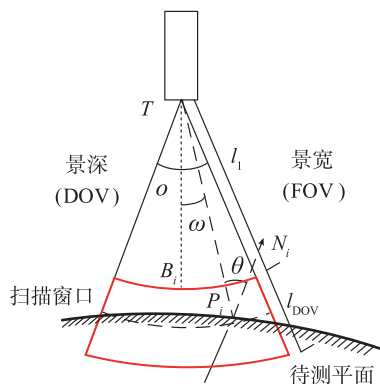


图2 T-Scan扫描约束  
Fig.2 Scan constraints of T-Scan

规律优化扫描轨迹, 在满足约束条件的情况下获得测量误差最低的扫描轨迹。如图 3 所示, 在 T-Scan 扫描头处建立坐标系, 那么 T-Scan 相对于待测平面上一条线的位姿变化可以分解为扫描深度  $d$ 、俯仰角  $\beta$  及偏转角  $\gamma$ 。扫描深度、俯仰角及偏转角直接影响了 CCD 激光图像特性。

## 3 试验设置

### 3.1 试验装置

本文研究的试验装置由机器人扫描系统、标准平面件、靶球及靶球座组成, 如图 4 所示。激光跟踪仪型号为 Leica AT901-MR, 将与激光跟踪仪配套的激光扫描仪 Leica T-Scan5 安装在机器人末端, 组成机器人扫描系统。靶球安放在靶球座上, 靶球座固定在标准平面件上, 靶球与标准平面件的距离为  $D$  通过 T-Probe 测量确定。在标准条件下, T-Scan 扫描球体半径的测量不确定度 ( $2\sigma$ ) 为  $\pm 50\text{mm}$ , 平面表面的测量不确定度 ( $2\sigma$ ) 为  $\pm 80\text{mm}$ 。试验采用的工业机器人型号为 KUKA

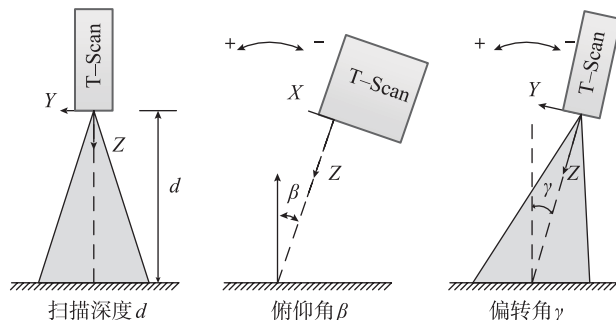


图3 扫描参数: 扫描深度、俯仰角和偏转角  
Fig.3 Scanning parameters: scan depth, pitching angle and yawing angle

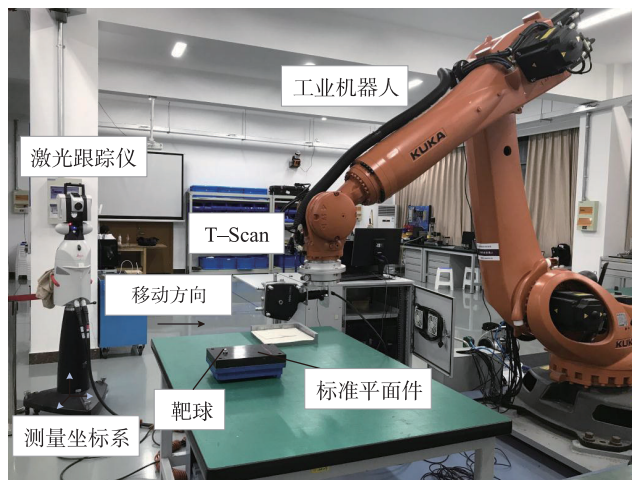


图4 试验装置示意图  
Fig.4 Schematic diagram of experimental device

KR90R3100extra 其重复定位精度为 0.060mm, 机器人定位误差引起的 T-Scan 位置误差 <0.1mm, 远小于试验设置的 10mm 扫描深度增量, 这种幅度的位置变化导致的试验结果偏差可以忽略不计。

### 3.2 试验方法

通过机器人扫描系统以不同的扫描深度、俯仰角和偏转角扫描标准平面件的正交试验, 研究 3 个位姿参数对测量精度的影响。每次扫描测试 T-Scan 都相对于标准平面件做平行运动, 以保持扫描过程中位姿不变。扫描试验示意图如图 5 所示。

根据 T-Scan 和日常使用经验, 确定扫描深度和俯仰角的取值范围如表 1 所示。

偏转角的取值范围与扫描深度相关, 由扫描约束可知当扫描深度接近 120mm 或者 180mm 时, 偏转角的细微变化会导致待测面超出扫描窗口。实际测量过程中发现, 这种情况下扫描结果边缘出现大面积的点云缺失。因此本试验只单独对偏转角的影响进行了评估, 将试验分为两个部分:

第 1 部分试验保持偏转角不变, 取扫描深度的增量为 5mm, 即同一俯仰角下有 13 个扫描深度。取俯仰角的增量为 10°, 共有 10 个俯仰角, 该部分共 130 组试验。

第 2 部分保持扫描深度和俯仰角不变, 取偏转角的增量为 5°, 该部分共 13 组试验。

试验通过机器人扫描控制软件调整每次试验的位姿参数。试验时, 先测量靶球坐标, 然后控制机器人按照调整后的轨迹进行扫描运动, 即可获得一组试验结果。

使用最佳拟合将点云拟合为平面, 假设最佳拟合平面为  $z = Ax + By + C$ , 第  $i$  个测量点坐标为  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , 使所有测量点对最佳拟合平面的  $z$  轴偏差  $\Delta z_i$  的平方和  $S$  最小:

$$S = \sum_{i=0}^n \Delta z_i^2 \quad (1)$$

其中,  $\Delta z_i = z_i - (Ax_i + By_i + C)$ 。

令  $S$  最小, 即令  $\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \frac{\partial S}{\partial C} = 0$ , 可以得到平面参数, 即:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \sum x_i^2 & \sum \sum x_i y_i & \sum \sum x_i \\ \sum \sum x_i y_i & \sum \sum y_i^2 & \sum \sum y_i \\ \sum \sum x_i & \sum \sum y_i & \sum \sum 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum \sum z_i x_i \\ \sum \sum z_i y_i \\ \sum \sum z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

求解公式即可获得最佳拟合平面, 根据求得的  $S$  求解最佳拟合平面的标准差  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{S}{n} \quad (3)$$

试验中一组扫描的结果示意图如图 6 所示。

点云在该平面周围的不规则分布主要是由随机误差导致的, 本试验用平面拟合的标准差  $3\sigma$  衡量扫描随机误差。

计算靶球坐标与拟合平面之间的距离  $D$ 。拟合平

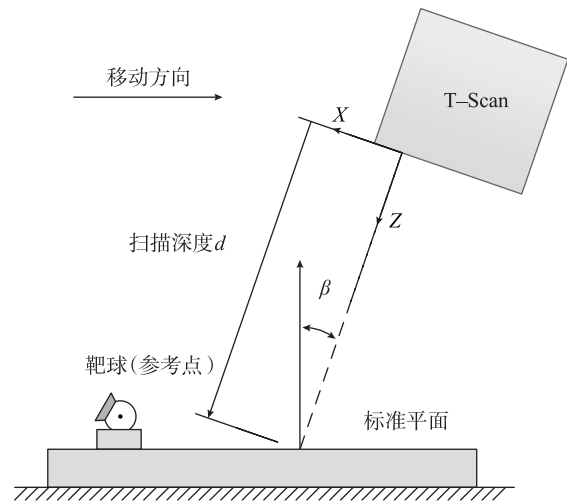


图5 扫描示意图

Fig.5 Schematic diagram of scanning experiment

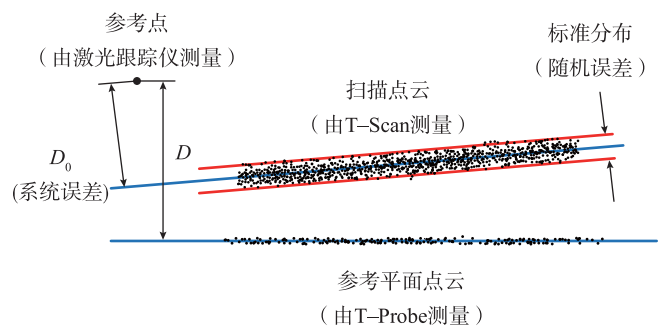


图6 扫描结果示意图

Fig.6 Schematic diagram of scanning result

表1 扫描参数的取值范围和增量

Table 1 Range and increment of scan parameters

扫描参数	第 1 部分		第 2 部分
	扫描深度 /mm	俯仰角 / (°)	偏转角 / (°)
取值范围	120~180	-40~50	-30~30
增量	10	10	5

面与参考平面的位置误差主要由系统误差导致,因此以  $E$  评估系统误差:

$$E = D_0 - D \quad (4)$$

式中,  $D_0$  是参考点到参考平面的距离;  $D$  是参考点到拟合平面的距离。

## 4 试验结果与分析

所有试验均在实验室中完成,环境温度为 20~21℃。扫描测量及机器人运动均由主控软件控制。

### 4.1 扫描深度与俯仰角

在不同的扫描深度和俯仰角下共进行了 130 组试验,试验数据如图 7 和 8 所示。

$3\sigma$  的数值比  $E$  低一个数量等级,说明扫描的随机误差较小。随机误差在俯仰角为 15° 时达到最大值,这是由于当俯仰角为 15° 时,激光束入射角与反射角相等,

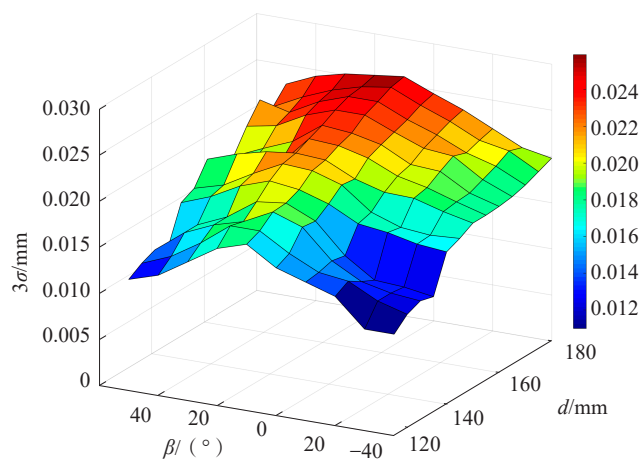


图7 随机误差

Fig.7 Random error of scanned data

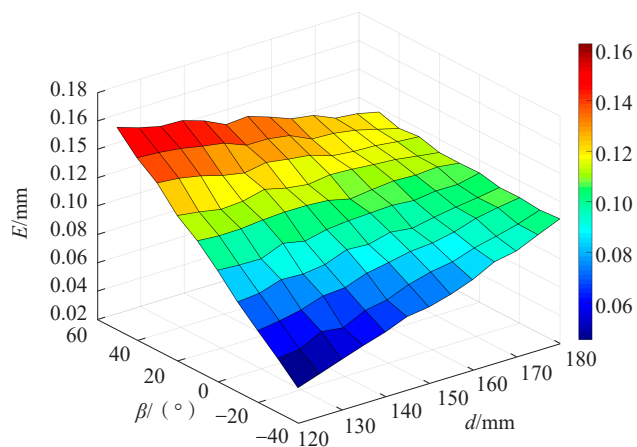


图8 系统误差

Fig.8 Systematic error of scanned data

会发生全反射。在这种情况下,会有过多的光返回接收器的光学元件。测量镜头会透射光,无法正确地检测位置和距离,导致随机误差增大。

图 8 显示了扫描数据在不同扫描深度和俯仰角下的系统误差。系统误差的最大值为 162μm,随着俯仰角的增加,特定扫描深度的系统误差一般会增加。扫描深度越大,俯仰角对系统误差的影响越小。可以看出系统误差随着投影角度线性变化,随着扫描深度增加,线性趋势的斜率减小。系统误差近似与扫描深度和投影角度之间呈双线性关系,建立数学模型:

$$E = c_0 \cdot (d + c_1) \cdot (\beta + c_2) + E_0 \quad (5)$$

其中,  $c_0$ 、 $c_1$  和  $c_2$  是模型系数;  $E_0$  是误差常数。根据试验数据拟合,得到以下模型:

$$E = 2 \times 10^{-5} \cdot (185.6 - d) \cdot (\beta - 10.3) + 0.091 \quad (6)$$

其中,  $d$  的取值范围为 120~180mm,  $\beta$  的取值范围为 -40°~50°。

### 4.2 偏转角

在不同的偏转角下进行了 13 组试验,试验结果如图 9 和 10 所示。相较于俯仰角和扫描深度的数据,偏转角改变时随机误差和系统误差的变化幅度较小。当偏转角为零时,随机误差与系统误差最小。

## 5 结论

本文通过一系列试验研究分析了三维激光扫描仪 T-Scan 的扫描位姿对机器人扫描系统测量误差的影响。试验表明,尽管测量系统的随机误差也会随着扫描位姿而改变,但变化幅度相对较小,且其数值远小于系统误差。系统误差的数值最大可以达到 162μm,并且系统误差相对于扫描位姿变化比较明显。根据试验结果建立了系统误差相对于扫描深度和俯仰角的双线性数学模型。通过该预测模型计算 130 组

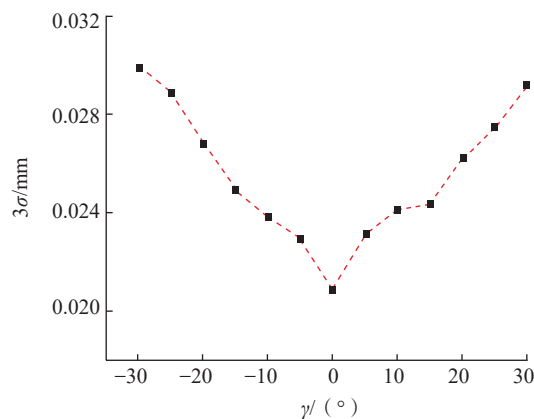


图9 偏转角随机误差

Fig.9 Random error of yawing angle

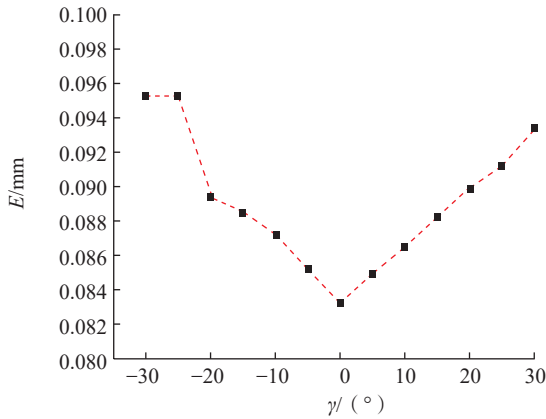


图10 偏转角系统误差  
Fig.10 Systematic error of yawing angle

扫描深度和俯仰角下的系统误差,对比后发现,该预测模型的计算数值与实际试验结果间的最大偏差为 $26\mu\text{m}$ 。最后本试验评估了偏转角对随机误差和系统误差的影响。

本文获得的系统误差预测模型是优化轨迹进而提高扫描精度的前提条件,在机器人扫描系统的轨迹优化过程中,依据本文建立的系统误差预测模型对轨迹进行调整,通过调整轨迹上每一处控制点的扫描姿态提高整体的扫描精度,优化时综合考虑扫描精度和扫描效率,可以有效满足各种工程的测量需求。

### 参考文献

[1] 马素文. 三维激光扫描在测量中的应用现状[J]. 山西建筑, 2011, 37(9): 207-208.  
 MA Suwen. Application status of 3D laser scanner in the measurement[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(9): 207-208.  
 [2] SHARIFZADEH S, BIRO I, LOHSE N, et al. Abnormality detection strategies for surface inspection using robot mounted laser scanners [J]. Mechatronics, 2018, 51: 59-74.  
 [3] DESHMUKH K, RICKLI J L, DJURIC A. Kinematic modeling of an automated laser line point cloud scanning system[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 1075-1091.  
 [4] KJELLANDER J A P, RAHAYEM M. Planar segmentation of data from a laser profile scanner mounted on an industrial robot[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(1-2): 181-190.  
 [5] REINHART G, TEKOUO W. Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 25-28.  
 [6] 周森, 徐健, 陶磊, 等. 基于三维激光扫描的倾斜圆面直径测量系统[J]. 光电子·激光, 2017, 28(6): 630-638.  
 ZHOU Sen, XU Jian, TAO Lei, et al. Development of a

diameter measuring system for inclined circular plane based on 3D laser scanning[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(6): 630-638.

[7] 艾小祥. 飞机机翼装配中的扫描路径规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
 AI Xiaoxiang. Research on path planning of scanning in aircraft wing assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.  
 [8] HARDING K G. Calibration methods for 3D measurement systems[C]//Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology. Boston: The International Society of Optics and Photonics, 2001.  
 [9] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32-34.  
 ZHENG Dehua, SHEN Yunzhong, LIU Chun. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(2): 32-34.  
 [10] GERBINO S, GIUDICE D M D, STAIANO G, et al. On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9-12): 1787-1799.  
 [11] BLANCO D, FERNANDEZ P, CUESTA E, et al. Influence of surface material on the quality of laser triangulation digitized point clouds for reverse engineering tasks[C]// 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Mallorca: IEEE Press, 2009.  
 [12] CUESTA E, RICO J C, FERNANDEZ P, et al. Influence of roughness on surface scanning by means of a laser stripe system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(11-12): 1157-1166.  
 [13] 刘涛, 王伯雄, 崔园园, 等. 水平定向钻进的轨迹误差分析与优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011(5): 592-596.  
 LIU Tao, WANG Boxiong, CUI Yuanyuan, et al. Trajectory error analysis and optimization in horizontal directional drilling[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011(5): 592-596.  
 [14] 赵德安, 陈伟, 汤养. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2007, 28(5): 425-429.  
 ZHAO Dean, CHEN Wei, TANG Yang. Trajectory optimization of robotic spray painting for complex curved surfaces[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2007, 28(5): 425-429.  
 [15] GESTEL N V, CUYPERS S, BLEYS P, et al. A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009, 47(3-4): 336-342.  
 [16] WANG Y, FENG H Y. A rotating scan scheme for automatic outlier removal in laser scanning of reflective surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 705-716.  
 [17] SMITH K B, ZHENG Y F. Accuracy analysis of point laser triangulation probes using simulation[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1998, 120(4): 736-745.

通讯作者: 李泷昊, 副教授, 研究方向为飞机数字化装配技术与装备, E-mail: lishuanggao@nuaa.edu.cn.

(责编 古京)