

# 激光与光电子学进展

## 基于组合测量的激光跟踪仪站位规划

熊涛<sup>1</sup>, 李泷杲<sup>1\*</sup>, 李琦<sup>1</sup>, 赵子越<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

<sup>2</sup>航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095

**摘要** 对于由激光跟踪仪 Leica AT901-MR、激光扫描仪 Leica T-Scan5(以下简称“T-Scan”)和工业机器人 KUKA KR90R3100 extra 组成的测量系统,合理规划激光跟踪仪站位来测量变化频繁的 T-Scan 位姿成为关键问题之一。针对该问题,首先构建融合了激光跟踪仪和 T-Scan 测量特性的组合测量约束模型,并提出判断站位可行性的站位评价方法;然后,为了提高测量效率与减小站位数量,基于站位评价方法设计站位规划方法的流程;最后,基于 Open CASCADE 程序实现了站位规划,并设计蒙皮扫描实验进行验证。结果表明:所提方法规划的激光跟踪仪站位的数量比经验法数量少;在规划站位下对蒙皮开展的测量耗时约 5 min,而经验法的测量耗时约 40 min。

**关键词** 测量; 激光扫描仪; 激光跟踪仪; 工业机器人; 组合测量; 站位规划; Open CASCADE

中图分类号 TN249; TP391.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1712001

## Station Planning of Laser Tracker Based on Combination Measurement

Xiong Tao<sup>1</sup>, Li Shuanggao<sup>1\*</sup>, Li Qi<sup>1</sup>, Zhao Ziyue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>2</sup>AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China

**Abstract** For the combination measurement system consisting of the laser tracker Leica AT901-MR, laser scanner Leica T-Scan5 (T-Scan), and industrial robot KUKA KR90R3100 extra, the rational planning of laser tracker stations to measure the frequently changing T-Scan pose is one of the key problems. To solve this problem, first, the construction of a combination measurement constraint model combining laser tracker and T-Scan measurement characteristics and proposing a station evaluation method to examine station viability is required. To improve the measurement efficiency and reduce the number of stations, the station planning method flow is designed based on the station evaluation method. Finally, implementing the station planning method based on Open CASCADE programming and designing a skin-scanning experiment for verification is required. The results show that the number of laser tracker stations planned by this method is less than that of the empirical method. Besides, the measurement of the skin under the planned station takes about 5 min, whereas, the empirical method takes about 40 min.

**Key words** measurement; laser scanner; laser tracker; industrial robot; combination measurement; station planning; Open CASCADE

**OCIS codes** 120.5800; 120.4640; 120.4630

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-21; 录用日期: 2021-01-06

通信作者: \*lishuanggao@nuaa.edu.cn

## 1 引言

三维激光扫描仪已被广泛应用于三维点云采集集中<sup>[1-2]</sup>,为了实现激光扫描仪的自动扫描,刘丽等<sup>[3-5]</sup>通过将激光扫描仪安装在机器人末端来构建组合测量系统。本文是在南京航空航天大学林晶<sup>[6]</sup>研究的自动化测量系统的基础上开展的进一步研究,该系统由激光跟踪仪、激光扫描仪与工业机器人组成,故也叫作组合测量系统。该系统将激光扫描仪 Leica T-Scan5(以下简称“T-Scan”)安装在库卡机器人末端,机器人携带 T-Scan 沿扫描路径运动,且 T-Scan 发出线激光扫描结构件外形,同时激光跟踪仪发出的激光入射到 T-Scan 反射镜并实时跟踪测量 T-Scan 空间位姿。该系统的测量原理<sup>[6]</sup>为:T-Scan 将激光发生器发出的光束用均匀旋转的棱镜打散成线激光,线激光中的单束激光照射在物体表面会产生点光斑,点光斑反射的光束经透镜成像于 CCD 线阵上,利用控制器解算线阵信号,可得到线激光上所有点在 T-Scan 坐标系下的二维坐标;T-Scan 上有 9 个 LED 和 4 个反射镜,跟踪仪发出的激光入射到 T-Scan 反射镜,由激光测距原理可确定 T-Scan 在跟踪仪测量坐标系下的位置,根据跟踪仪上的 T-Cam 捕捉的 LED 红外线可确定 T-Scan 在测量坐标系下的姿态;由 T-Scan 在测量坐标系下的位姿,将线激光上的点在 T-Scan 坐标系下的二维坐标转为测量坐标系下的三维坐标,便实现了对被测结构件外形的测量。

在使用该系统实施测量前需进行测量规划:1) T-Scan 扫描路径规划;2) 激光跟踪仪站位规划。前者是后者以及实施测量的基础,后者为前者提供优化依据。激光跟踪仪站位规划即根据 T-Scan 的扫描路径来规划激光跟踪仪的站位。在扫描测量时,T-Scan 位姿变化频繁,受激光跟踪仪测量范围与 T-Scan 反射镜入射范围的限制,激光跟踪仪与 T-Scan 反射镜之间会出现断光,后续的对光过程十分繁琐,且当前站位规划依赖于工作人员的经验,缺少理论依据和评价方法,易出现站位数量大、转站次数多与测量效率低等问题,故合理规划激光跟踪仪站位对于提高测量效率与改善测量过程具有重要意义。

国内外对数字化测量设备的站位规划进行了许多研究。Franceschini 等<sup>[7]</sup>提出多数字化系统协同构建测量场的方法,基于不同测量系统传感器在

距离和角度测量上的不确定度来确定测量系统位置。Galetto 等<sup>[8]</sup>考虑工作环境限制和测量任务等,按遗传算法及优化目标函数确定测量设备位置。任瑜等<sup>[9]</sup>基于遗传算法优化多激光跟踪仪测量网中跟踪仪的位置与数量,且优化后的测量网布局比经验布局的实用性更好。于浩等<sup>[10]</sup>提出基于柔性测量单元的大尺度产品柔性检测方法,通过 K-means 聚类实现测量站位规划。杨晓辉<sup>[11]</sup>采用 K-means 聚类划分算法,基于测量入射角和测量距离对特征点进行聚类划分,根据聚类结果规划站位。

为合理规划组合测量系统的激光跟踪仪站位,本文先根据测量设备的测量特性建立组合测量约束模型并提出站位评价方法,然后基于站位评价方法设计站位规划方法的流程,最后基于 Open CASCADE 程序实现站位规划。

## 2 组合测量系统的激光跟踪仪站位评价方法

### 2.1 组合测量约束模型

激光跟踪测量系统本质上是一个球坐标测量系统。测量目标点的距离、水平和竖直方向的偏转角,得到以跟踪仪测量中心为原点的目标点三维坐标,其俯仰测量范围为  $-\alpha_{\max} \sim \alpha_{\max}$ 。T-Scan 有 4 个反射镜,用于反射跟踪仪的入射光线,反射镜的入射范围为  $-\beta_{\max} \sim \beta_{\max}$ 。如图 1 所示, $P$  为激光跟踪仪光源位置, $F$  为激光跟踪仪主轴方向,则激光跟踪仪站位为  $S(P, F)$ 。将过  $P$  且垂直于  $F$  的平面记为中平面, $Q$  为 T-Scan 某个反射镜的位置, $f_2$  为此反射镜的单位法向量, $PQ$  为跟踪仪入射光线, $\alpha$  为  $PQ$  与  $F$  的夹角, $\beta$  为入射夹角。根据激

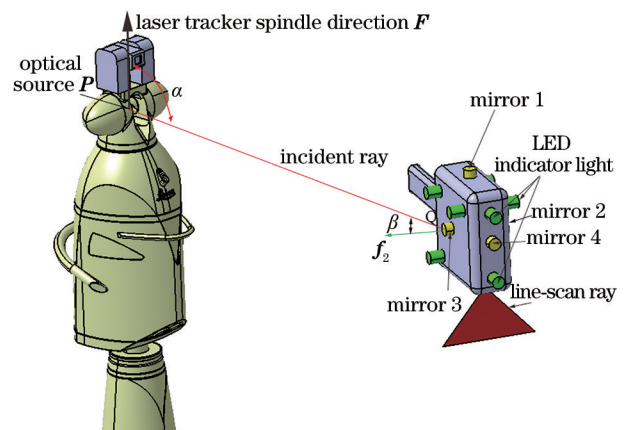


图 1 组合测量约束模型

Fig. 1 Combination measurement constraint model

光跟踪仪和 T-Scan 的测量特点, 所构建的组合测量约束模型如下:

1) 入射约束。入射光线  $PQ$  必须在 T-Scan 反射镜的允许入射范围内, 即

$$\frac{QP \cdot f_2}{|QP| \cdot |f_2|} = \cos \beta > \cos \beta_{\max} \quad (1)$$

2) 俯仰约束。反射镜必须在激光跟踪仪的俯仰测量范围之内, 即

$$\cos(\pi/2 + \alpha_{\max}) < \frac{PQ \cdot F}{|PQ| \cdot |F|} = \cos \alpha < \cos(\pi/2 - \alpha_{\max}) \quad (2)$$

3) 距离约束。 $P$  与  $Q$  在平行于中平面上的距离有限制, 即

$$l_{\min} < PQ \cdot \sin(\pi - \alpha) < l_{\max} \quad (3)$$

4) 干涉约束。激光束在到达 T-Scan 反射镜前不能被机器人或其他障碍物挡住。

## 2.2 站位评价方法

T-Scan 被夹持固定在机器人末端, 机器人坐标

系位于机器人足部, 将其视为全局坐标系, 机器人末端坐标系位于机器人末端上。输入测量系统的 T-Scan 扫描路径由按顺序排列的扫描参数值组成, 形式为  $\{x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\}$ , 含义为机器人末端坐标系沿机器人坐标系的移动量与绕机器人坐标系的转动角度, 则机器人坐标系与机器人末端坐标系的转换关系  $T$  可表示为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

若此时空间某点  $W$  在机器人坐标系与机器人末端坐标系下的坐标分别为  $W_1(W_{1x}, W_{1y}, W_{1z})$  与  $W_2(W_{2x}, W_{2y}, W_{2z})$ , 则二者间的关系为

$$\begin{bmatrix} W_{1x} \\ W_{1y} \\ W_{1z} \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} W_{2x} \\ W_{2y} \\ W_{2z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

机器人携带 T-Scan 按照给定的扫描参数运动并扫描结构件外形, 设扫描路径由  $n$  个扫描参数值按顺序表示, 以  $\{x_i, y_i, z_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}\}$  表示第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 个扫描参数值, 与该扫描参数值对应的

转换关系  $T_i$  可按照 (4) 式求出,  $T_i$  即为 T-Scan 的扫描位姿点, 图 1 中 T-Scan 位于某一位姿点。由于 T-Scan 固定在机器人末端, 则 T-Scan 反射镜  $j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 的位置与单位法向量在机器人末端坐标系中为定值, 分别记为  $P_{6j}(P_{6j,x}, P_{6j,y}, P_{6j,z})$  与  $F_{6j}(F_{6j,x}, F_{6j,y}, F_{6j,z})$ 。当 T-Scan 运动至位姿点  $T_i$  时, 将此刻反射镜  $j$  的位置和单位法向量在机器人坐标系的值分别记为  $P_{0j,i}(P_{0j,i,x}, P_{0j,i,y}, P_{0j,i,z})$  与  $F_{0j,i}(F_{0j,i,x}, F_{0j,i,y}, F_{0j,i,z})$ , 并将二者记为反射镜  $j$  在扫描路径上的位姿  $V_{j,i}(P_{0j,i}, F_{0j,i})$ , 即当机器人携带 T-Scan 运动至位姿点  $T_i$  时, 4 个反射镜的位姿分别为  $V_{1,i}, V_{2,i}, V_{3,i}$  和  $V_{4,i}$ , 如表 1 所示。

表 1 扫描路径位姿点与反射镜位姿

Table 1 Scanning path pose points and mirror poses

Order	Scanning parameter value	Scanning pose point	Pose of mirror 1	Pose of mirror 2	Pose of mirror 3	Pose of mirror 4
1	$\{x_1, y_1, z_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}\}$	$T_1$	$V_{1,1}$	$V_{2,1}$	$V_{3,1}$	$V_{4,1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$i$	$\{x_i, y_i, z_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}\}$	$T_i$	$V_{1,i}$	$V_{2,i}$	$V_{3,i}$	$V_{4,i}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$n$	$\{x_n, y_n, z_n, \theta_{xn}, \theta_{yn}, \theta_{zn}\}$	$T_n$	$V_{1,n}$	$V_{2,n}$	$V_{3,n}$	$V_{4,n}$

基于(5)式,可由  $T_i$ 、 $P_{6,j}$  和  $F_{6,j}$  求得  $P_{0,j,i}$  和  $F_{0,j,i}$ , 求解方式如下:

$$\begin{bmatrix} P_{0,j,i,x} \\ P_{0,j,i,y} \\ P_{0,j,i,z} \\ 1 \end{bmatrix} = T_i \begin{bmatrix} P_{6,j,x} \\ P_{6,j,y} \\ P_{6,j,z} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} F_{0,j,i,x} \\ F_{0,j,i,y} \\ F_{0,j,i,z} \\ 0 \end{bmatrix} = T_i \cdot \begin{bmatrix} P_{6,j,x} + F_{6,j,x} \\ P_{6,j,y} + F_{6,j,y} \\ P_{6,j,z} + F_{6,j,z} \\ 1 \end{bmatrix} - T_i \cdot \begin{bmatrix} P_{6,j,x} \\ P_{6,j,y} \\ P_{6,j,z} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据组合测量约束模型,记站位  $S(P, F)$  在测量单个位姿  $V_{j,i}(P_{0,j,i}, F_{0,j,i})$  时的评价值为

$$\begin{aligned} f[S(P, F), V_{j,i}(P_{0,j,i}, F_{0,j,i})] &= (A_{j,i}, B_{j,i}, C_{j,i}, D_{j,i}), \\ \text{s.t. } A_{j,i} &= \begin{cases} 0, & \frac{P_{0,j,i} \cdot P \cdot F_{0,j,i}}{|P_{0,j,i} P| \cdot |F_{0,j,i}|} > \cos \beta_{\max} \\ 1, & \frac{P_{0,j,i} \cdot P \cdot F_{0,j,i}}{|P_{0,j,i} P| \cdot |F_{0,j,i}|} \leq \cos \beta_{\max} \end{cases}, \\ B_{j,i} &= \begin{cases} 0, & \cos(\pi/2 + \alpha_{\max}) < \frac{PP_{0,j,i} \cdot F}{|PP_{0,j,i}| \cdot |F|} = \cos \alpha < \cos(\pi/2 - \alpha_{\max}) \\ 1, & \frac{PP_{0,j,i} \cdot F}{|PP_{0,j,i}| \cdot |F|} \leq \cos(\pi/2 + \alpha_{\max}) \text{ or } \frac{PP_{0,j,i} \cdot F}{|PP_{0,j,i}| \cdot |F|} \geq \cos(\pi/2 - \alpha_{\max}) \end{cases}, \\ C_{j,i} &= \begin{cases} 0, & l_{\min} < |PP_{0,j,i}| \cdot \sin(\pi - \alpha) < l_{\max} \\ 1, & |PP_{0,j,i}| \cdot \sin(\pi - \alpha) \leq l_{\min} \text{ or } |PP_{0,j,i}| \cdot \sin(\pi - \alpha) \geq l_{\max} \end{cases}, \\ D_{j,i} &= \begin{cases} 0, & \text{noninterference} \\ 1, & \text{interference} \end{cases}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $A_{j,i}=0$  表示满足入射约束,  $A_{j,i}=1$  表示不满足入射约束;  $B_{j,i}=0$  表示满足俯仰约束,  $B_{j,i}=1$  表示不满足俯仰约束;  $C_{j,i}=0$  表示满足距离约束,  $C_{j,i}=1$  表示不满足距离约束;  $D_{j,i}=0$  表示满足干涉约束,  $D_{j,i}=1$  表示不满足干涉约束。其中, 激光干涉检查采用体干涉求交法, 步骤为: 1) 如图 1 所示, 先将激光束  $PP_{0,j,i}$  视为小圆柱; 2) 由于该系统的 KUKA KR90R3100 extra 机器人满足机器人运动学的 Piper 准则, 故再根据位姿点  $T_i$  的值, 运用逆运动学求解法<sup>[12]</sup> 求出机器人 6 个轴的转角; 3) 根据求得的转角值将机器人模型各

部件旋转至对应的位姿; 4) 使用布尔运算, 将光线圆柱依次与转动后的机器人模型各部件及被扫描结构件等可能障碍物求交, 以此判断是否满足干涉约束。

激光跟踪仪在一个站位下通常能测得 T-Scan 的多个连续位姿, 在测量 T-Scan 某个位姿时, 需要跟踪仪的激光能入射 T-Scan 处于此位姿时的某一个反射镜。记站位  $S$  测量位姿点  $T_i$  时所用的反射镜为  $j_i$  ( $j_i$  的取值为 1, 2, 3, 4), 基于(8)式, 可得到站位  $S$  在测量连续的反射镜位姿  $V_{j,i}(P_{0,j,i}, F_{0,j,i}) (1 \leq p \leq i \leq q \leq n)$  时的评价值

$$\begin{aligned} f(S, V_{j_p,p}, \dots, V_{j_i,i}, \dots, V_{j_q,q}) &= (A, B, C, D), \\ \text{s.t. } A &= \sum_{i=p}^q A_{j_i,i}, \quad B = \sum_{i=p}^q B_{j_i,i}, \quad C = \sum_{i=p}^q C_{j_i,i}, \quad D = \sum_{i=p}^q D_{j_i,i}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  分别为  $A_{j_i,i}$ 、 $B_{j_i,i}$ 、 $C_{j_i,i}$  和  $D_{j_i,i}$  的累加值。

结合(9)式提出站位评价方法: 当  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  均为 0 时, 则  $S$  能测得  $p \leq i \leq q$  间反射镜  $j_i$  的全部位姿  $V_{j_i,i}$ , 为可行站位; 否则  $S$  为不可行站位。

### 3 激光跟踪仪站位规划方法

激光跟踪仪在测量 T-Scan 位姿时, 只需激光束

能入射到 T-Scan 的某一反射镜即可, T-Scan 共有 4 个反射镜, 故在测量一个位姿点时有 4 种选择, 在测量  $n$  个位姿点时便有  $4^n$  种选择, 但由于频繁更换反射镜会降低测量效率, 因此测量时应该尽量少地更换反射镜, 且测量 T-Scan 相邻两个位姿时应尽量使用相同的反射镜。另外, 考虑到机器人携带 T-Scan 按照位姿点的顺序依次扫描结构件外形, 则一个跟踪仪站位应当测量尽量多的 T-Scan 位姿, 且

所测的位姿应当连续,以减少站位数量与转站次数。

根据上述分析,以图 2 为例阐述站位规划与反射镜更换的大致思路:T-Scan 从  $T_1$  运动至  $T_4$ ,若以  $V_{3,1}$  为初始待测位姿,则存在站位  $L$  能测量  $V_{3,1}$ ;为了尽量少地更换反射镜,则仍选反射镜 3,再找寻能测量  $V_{3,1}$  与  $V_{3,2}$  的公共可行站位,即  $M$ ;由于  $V_{3,1}$ 、 $V_{3,2}$  与  $V_{3,3}$  无公共可行站位,这时需要更换反射镜,先求出  $V_{3,1}$  与  $V_{3,2}$  的法向向量的平均向量值,再分别求该平均向量与  $V_{1,3}$ 、 $V_{2,3}$  与  $V_{4,3}$  的夹角,选择夹角最小的镜子,在此例中平均向量与反射镜 4 的夹角最小,则将  $V_{3,3}$  更换为  $V_{4,3}$ ,即反射镜由 3 号换为 4 号,这时  $V_{3,1}$ 、 $V_{3,2}$  与  $V_{4,3}$  有公共可行站位  $N$ ;不更换反射镜,即仍选 4 号镜, $N$  为  $V_{3,1}$ 、 $V_{3,2}$ 、 $V_{4,3}$  与  $V_{4,4}$  的公共可行站位。此为以  $V_{3,1}$  为初始待测位姿并按顺序进行规划所得的站位结果,当分别以  $V_{1,1}$ 、 $V_{2,1}$  或  $V_{4,1}$  为初始待测位姿并按顺序进行规划时,可以得到另外三组规划结果。按照此思路进行站位规划,则单个站位能测量尽量多的连续位姿,使得站位数量与转站次数最少,且在保证单个站位能测到尽量多的连续位姿点的情况下,将反射镜更换次数降到最低,从而提高了测量效率。

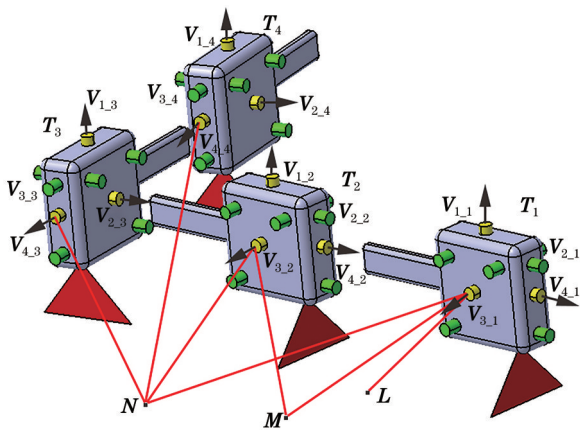


图 2 站位规划与反射镜更换思路

Fig. 2 Idea of station planning and mirror replacement

根据上述思路,基于站位评价方法设计站位规划方法的流程,该方法分别以  $V_{1,1}$ 、 $V_{2,1}$ 、 $V_{3,1}$  和  $V_{4,1}$  为初始待测位姿,沿位姿点顺序进行 4 次站位规划,得 4 组规划结果,最后选择最优的一组站位规划结果即可。站位规划方法的流程如下:

1) 记  $U$  为机器人坐标系下激光跟踪仪的可放置空间(即跟踪仪光源  $P$  可选择的区域,  $P \in U$ ),将  $U$  沿机器人坐标系的坐标轴方向等间距离散为一堆空间点,用球坐标系搜索法给每个点赋予主轴方向

$(\sin \mu \cos \eta, \sin \mu \sin \eta, \cos \mu)$  ( $0 \leq \mu \leq \pi, 0 \leq \eta \leq 2\pi$ ),因一个点不止一个主轴方向,则将  $\mu$  在 0 到  $\pi$  等间距取值,将  $\eta$  在 0 到  $2\pi$  等间距取值,若  $\mu$  与  $\eta$  各有  $t_\mu$  与  $t_\eta$  种取值,则一个点有  $t_\mu t_\eta$  种主轴方向,即在一个点有  $t_\mu t_\eta$  种站位,然后将所有离散点坐标与方向按站位  $S(P, F)$  的形式存入集合  $R$ 。

2) T-Scan 扫描路径由  $n$  个离散位姿点  $T_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 组成,先计算出与  $T_i$  对应的 4 个反射镜的位姿  $V_{j,i}$  ( $1 \leq j \leq 4, 1 \leq i \leq n$ );初始化  $j=1, i=1, k=1$ ,令  $j_i=j$ ,集合  $Z_1$  和集合  $J$  初始化为空集,将  $R$  中所有点的坐标值存入集合  $Z_2$ 。

3) 将位姿  $V_{j,i}(P_{0,j,i}, F_{0,j,i})$  存入集合  $Z_1$ 。

4) 用站位评价方法逐个判断  $Z_2$  中的站位对于  $Z_1$  中的反射镜位姿是否为可行站位,若为可行站位,则将该站位存入  $J$ ,  $J$  用于临时存储可行站位。

5) 判断  $J$  是否为空集,若  $J$  为空集(表示无可行站位),则判断  $k$  是否等于  $i$ 。若  $k$  等于  $i$ (表示  $Z_1$  中只有一个反射镜位姿数据),则记录下该位姿无法用反射镜  $j_i$  测得,再令  $k=k+1, i=i+1$ ,保持镜号不变并转至 3);若  $k$  不等于  $i$ (表示  $Z_1$  中不止一个反射镜位姿数据),则转至 8)。若  $J$  不为空集(表示有可行站位),则用  $J$  中的所有站位取代  $Z_2$  中站位,再清空  $J$ ,转至 6)。

6) 令  $i=i+1$ ,再判断  $i$  是否大于  $n$ (即判断  $n$  个位姿点是否已经按顺序规划完毕)。若  $i$  大于  $n$ ,则逐一记录第  $k$  个至第  $i$  个位姿点的站位,记录方式为  $(t, j_i, Z_2)$ ,其中  $t$  为位姿点序号且  $k \leq t \leq n, j_i$  为激光束入射的反射镜号,  $Z_2$  为可行站位的集合,即机器人携带 T-Scan 运动至位姿点  $T_i$  时,  $Z_2$  中的任意一个站位可测得此时的反射镜  $j_i$ ,再清空  $Z_1$ ,转至 7);若  $i$  不大于  $n$ ,则保持镜号不变并转至 3)。

7) 令  $j=j+1$ ,再判断  $j$  是否大于 4。若  $j$  大于 4 则结束;若  $j$  不大于 4,则令  $i=1, k=1, j_i=j$ ,再转至 3)。

8) 根据上述反射镜更换思路更换反射镜  $j_i$ ,并将  $Z_1$  中第  $i$  个反射镜位姿更换为新的反射镜位姿,用站位评价方法逐个判断集合  $Z_2$  中的站位对于集合  $Z_1$  中的反射镜位置与法向是否存在可行站位。若仍无可行站位,则记录下测量第  $k$  个至第  $i-1$  个位姿的可行站位,记录方式同 6),再令  $k=i, j_i=j$ ,清空集合  $Z_1$ ,再将  $R$  中的站位替换  $Z_2$  中站位,转至 3);

若存在可行站位, 则将所有可行站位存入集合  $J$ ,  $j_i$  值保持为更换后的镜号, 并用  $J$  中站位替换  $Z_2$  中

的站位, 再清空  $J$ , 转至 6)。本文算法的流程如图 3 所示。

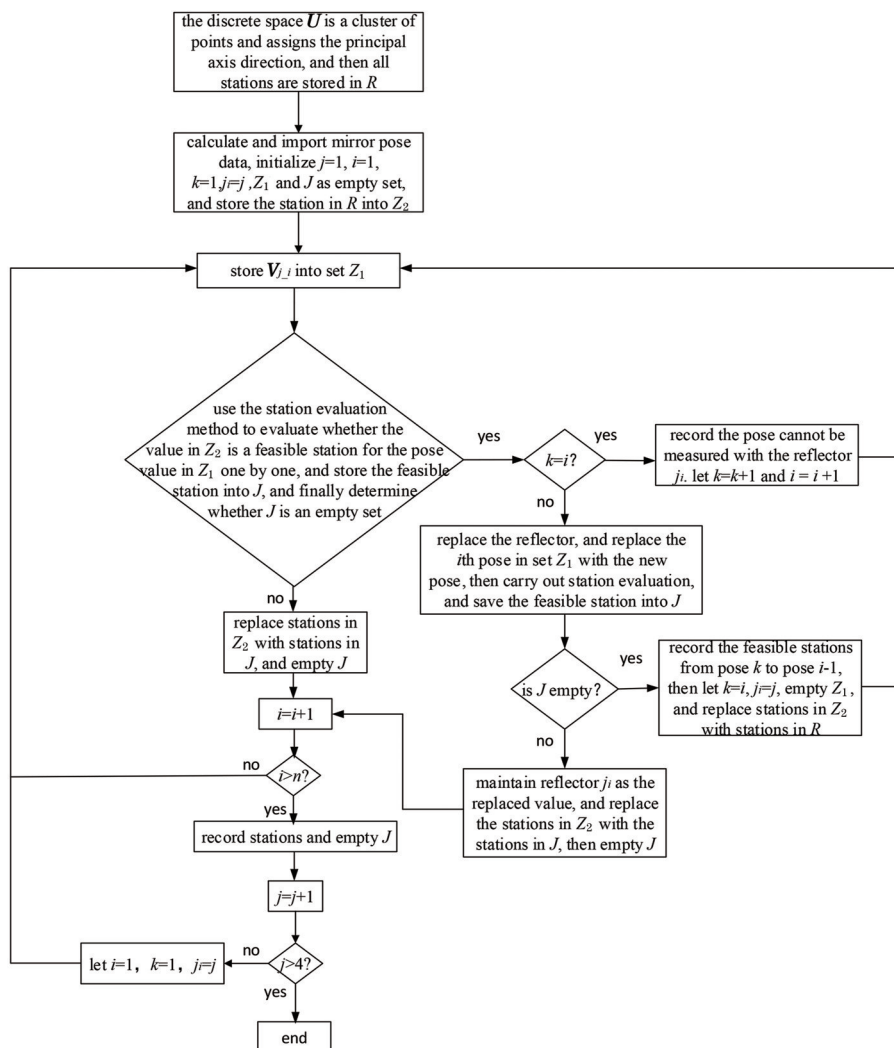


图 3 站位规划方法的流程

Fig. 3 Flow of station planning method

### 4 实验验证

实验设备包括库卡机器人(型号为 KUKA KR90R3100 extra)、激光扫描仪 T-Scan(型号为 Leica T-Scan5)与激光跟踪仪(型号为 Leica AT901-MR), 扫描对象为固定在模拟件实验平台支架上的锯齿蒙皮, 如图 4 所示。本实验中, 机器人坐标系的 XOY 平面与地面平行且高于地面 390 mm, 激光跟踪仪在地面平行移动且其光源 P 高于地面 1500 mm, 则跟踪仪的站位区域为机器人坐标系下的  $Z=1110$  mm 的平面内, 考虑到实验室空间限制, 特将跟踪仪站位限制在以  $(-5000, -5000, 1110)$ 、 $(5000, -5000, 1110)$ 、 $(-5000, 5000,$

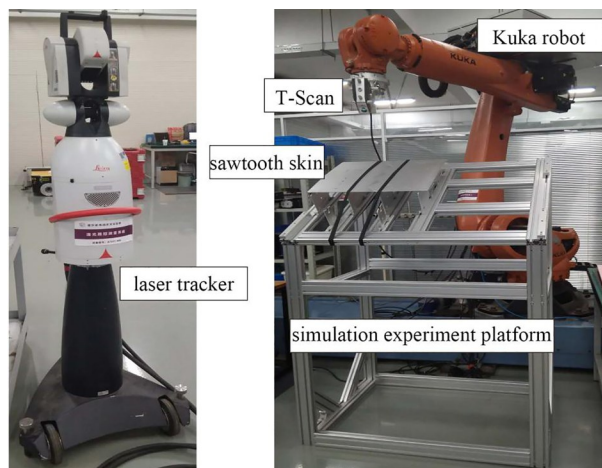


图 4 实验设备与平台

Fig. 4 Experiment device and platform

1110)与(5000,5000,1110)为顶点的矩形区域内。另外,T-Scan 反射镜的入射范围为 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,激光跟踪仪的俯仰范围为 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,约束模型中的距离约束设定为2~5 m。

使用 Open CASCADE 开发测量仿真软件<sup>[13]</sup>,

软件包含测量场景构建、机器人运动仿真、激光束干涉检测等功能,并程序化实现了站位规划。图5所示为软件操作界面与显示窗口,以及导入机器人、T-Scan、激光跟踪仪、锯齿蒙皮及其实验平台数模所构建的测量场景。

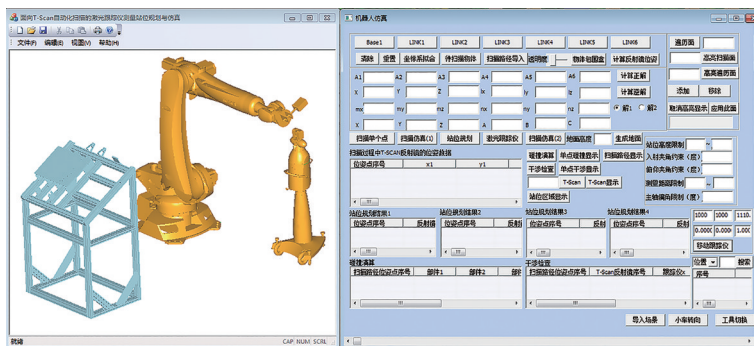


图5 仿真软件界面与显示窗口

Fig. 5 Simulation software interface and display window

由测量系统的控制软件生成测量蒙皮外形的 T-Scan 扫描路径,将扫描路径位姿点数据导入仿真软件,导入之后的扫描路径位姿点如图6所示,该路径由5条子路径组成,共73个离散位姿点,沿着路径1至路径5的顺序进行扫描,每条子路径的扫描顺序如图6箭头所示,前4条路径扫描蒙皮边缘,第5条路径扫描蒙皮锯齿对缝。接下来需要根据扫

描路径来布置激光跟踪仪的站位。

若凭经验法逐个测试来找寻可行站位,需要在布设的站位下使用激光跟踪仪依次对每一个 T-Scan 位姿进行试测,如果当前站位测不到,则移动激光跟踪仪继续试测,直到可以测量为止,这个过程会消耗大量的时间,而且无法确定最终所布设的站位数量。表2为本实验中使用经验法所布设的站位结果,共需要3个站位才可以完成 T-Scan 全部位姿的测量,包括试测在内共耗时约40 min。以测量第28、45与73个 T-Scan 位姿为例,其实测位姿分别如图7(a)~(c)所示。

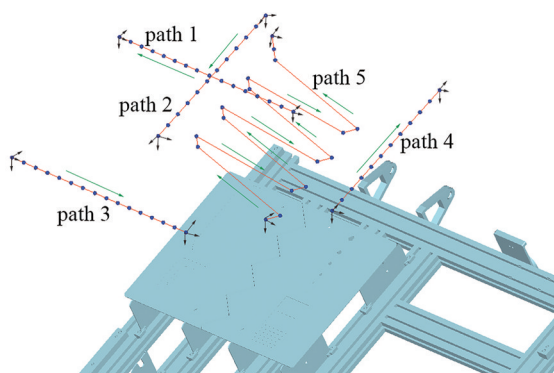


图6 扫描路径

使用所设计的站位规划方法进行规划。利用仿真软件的站位规划模块,由 T-Scan 的扫描路径规划激光跟踪仪的站位,4组规划结果分别为:第1组无可行站位;第2组需要2个站位才能测量 T-Scan 所有位姿,激光跟踪仪在测量时需要中途转站;第3与第4组需1个站位就可测量 T-Scan 全部位姿。由于第3与第4组的规划结果只需要布设1个站位,故



图7 经验法布设站位。(a)第28个 T-Scan 位姿;(b)第45个 T-Scan 位姿;(c)第73个 T-Scan 位姿  
Fig. 7 Station setting by the empirical method. (a) The 28th T-Scan pose; (b) the 45th T-Scan pose; (c) the 73rd T-Scan pose

表 2 经验法布站结果  
Table 2 Station results by empirical method

Order of $T_i$	T-Scan mirror number	Laser tracker light source position coordinate	Laser tracker spindle direction
1 to 16	4	(2000, -1000, 1110)	(0, 0, 1)
17 to 28	2		
29 to 44	3	(0, -4000, 1110)	(0, 0, 1)
45 to 56	4		
57 to 58	2	(1000, -4000, 1110)	(0, 0, 1)
59 to 60	4		
61 to 62	2		
63 to 64	4		
65 to 66	2	(1000, -4000, 1110)	(0, 0, 1)
67 to 68	4		
69 to 70	2		
71 to 73	4		

用第 3 组或第 4 组规划结果中的可行站位区域内较好的一个站位点作为激光跟踪仪的测量站位。第 3 组规划结果见表 3, 在测量 T-Scan 第 45 个位姿时的仿真图与实测图分别见图 8(a)、(b); 第 4 组规划结果见表 4, 在测量 T-Scan 第 45 个位姿时的仿真图与

实测图分别见图 9(a)、(b)。由表 3 与表 4 可知, 在第 3 组与第 4 组规划结果中, 激光跟踪仪的站位不同, 所用的 T-Scan 反射镜也不同。采用站位规划方法来规划站位, 所布设的站位数量比经验法布设的站位数量少, 且测量总耗时约 5 min。

表 3 第 3 组规划结果  
Table 3 The 3rd planning result

Order of $T_i$	T-Scan mirror number	Laser tracker light source position coordinate	Laser tracker spindle direction
1 to 16	3	(-1365.240642, -4475.935829, 1110)	(0, 0, 1)
17 to 28	4		
29 to 44	3		
45 to 58	4		
59 to 60	3		
61 to 62	4		
63 to 64	3		
65 to 66	4		
67 to 68	3		
69 to 70	4		
71 to 73	3		

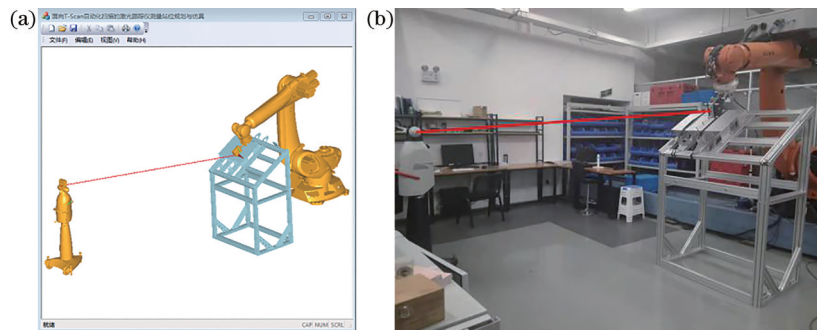


图 8 第 3 组规划结果的仿真图与实测图。(a) 仿真图; (b) 实测图

Fig. 8 Simulated picture and actual measurement picture of the 3rd planning result. (a) Simulated picture; (b) actual measurement picture



表 4 第 4 组规划结果  
Table 4 The 4th planning result

Order of $T_i$	T-Scan mirror number	Laser tracker light source position coordinate	Laser tracker spindle direction
1 to 16	4		
17 to 28	2		
29 to 44	4		
45 to 58	2		
59 to 60	4		
61 to 62	2	(3164.683301, - 2887.332054, 1110)	(0, 0, 1)
63 to 64	4		
65 to 66	2		
67 to 68	4		
69 to 70	2		
71 to 73	4		

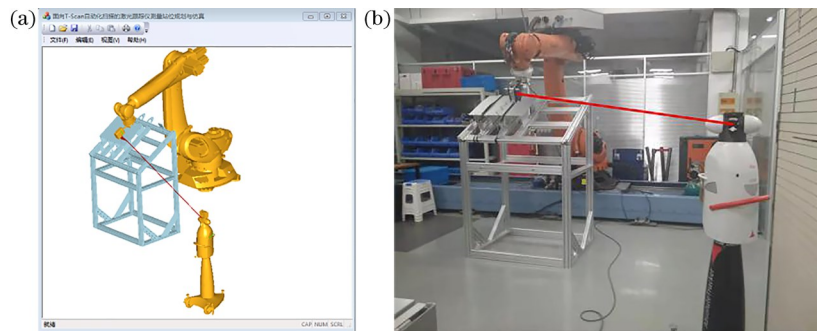


图 9 第 4 组规划结果的仿真图与实测图。(a) 仿真图; (b) 实测图

Fig. 9 Simulated picture and actual measurement picture of the 4th planning result. (a) Simulated picture; (b) actual measurement picture

## 5 结 论

针对由激光跟踪仪、激光扫描仪与机器人组成的组合测量系统在测量时的激光跟踪仪站位规划问题, 首先根据激光跟踪仪的俯仰测量范围、T-Scan 反射镜的入射范围、测量距离约束及激光干涉约束 4 个限制条件构建组合测量约束模型, 然后在该约束模型的基础上, 提出了能评价激光跟踪仪在测量 T-Scan 反射镜单个位姿以及多个连续位姿时的站位可行性的评价方法, 最后基于该评价方法, 以减少站位数量与提高测量效率为目的, 设计站位规划方法的流程, 并基于 Open CASCADE 程序实现该站位规划。

在蒙皮测量实验中, 分别使用经验法与站位规划方法来布设激光跟踪仪的站位。在使用经验法布设站位时需要进行试测, 最终共布设 3 个站位, 测量耗时约 40 min。而使用站位规划方法所布设的站位仅 1 个, 测量时无需挪动激光跟踪仪, 耗时约 5 min。相比于经验法, 所提站位规划方法减少了站位数量, 大幅度提高了测量效率。

## 参 考 文 献

- [1] Long L J, Xia Y H, Huang D, et al. Fast modeling method for substation based on 3D laser scanning point cloud data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 202801.  
龙丽娟, 夏永华, 黄德, 等. 一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 202801.
- [2] Cao G P, Liu X S, Liu N, et al. Segmentation of subway tunnel wall surface objects based on laser 3D point cloud [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2110001.  
曹桂萍, 刘行思, 刘念, 等. 基于激光三维点云分割地铁隧道壁表面物体[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2110001.
- [3] Liu L, Ma G Q, Gao Y, et al. Trajectory planning technology of three-dimensional shape measurement robots [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204005.

- 刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 三维形貌测量机器人的轨迹规划技术[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204005.
- [4] 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.
- [5] Kjellander J A P, Rahayem M. Planar segmentation of data from a laser profile scanner mounted on an industrial robot [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 45(1/2): 181-190.
- [6] Lin J. Research on automatic measurement technology of components based on laser scanning technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.  
林晶. 基于激光扫描的结构件测量轨迹规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [7] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, et al. Combining multiple Large Volume Metrology systems: competitive versus cooperative data fusion [J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 514-524.
- [8] Galetto M, Pralio B. Optimal sensor positioning for large scale metrology applications[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3): 563-577.
- [9] Ren Y, Liu F F, Fu Y X, et al. Placement optimization of laser multilateration network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011201.  
任瑜, 刘芳芳, 傅云霞, 等. 激光多边测量网布局优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 011201.
- [10] Yu H, Du F Z. Flexible inspection technology for large-scale product based on combined measurement [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(5): 1037-1046.  
于浩, 杜福洲. 基于组合测量的大尺度产品柔性检测技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(5): 1037-1046.
- [11] Yang X H. Research on station planning technology of digital measuring metrology for aircraft large component [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.  
杨晓辉. 面向飞机大部件的数字化测量站位规划方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [12] Chen J N. Motion simulation and online control system of Kuka robot [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.  
陈佳楠. 库卡机器人的运动仿真及在线控制系统[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [13] Yang L, Han S J, Chen W, et al. Research and development of 3D model parts software based on Open CASCADE [J]. *Mechanical Engineer*, 2015 (12): 43-45.  
杨乐, 韩升杰, 陈伟, 等. 基于 Open CASCADE 的三维模型软件的开发与研究[J]. 机械工程师, 2015 (12): 43-45.