

基于 iGPS 的复杂曲面三维点云拼接技术

马国庆^{1*}, 刘丽¹, 于正林¹, 曹国华¹, 王强²

¹ 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出了基于 iGPS(indoor Global Positioning System)世界坐标系进行点云拼接的方法,建立了点云拼接数学模型,并求解拼接模型中的坐标转换关系。基于标准球测量实验,分别实现了基于机器人基坐标系的点云拼接和基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接。研究表明,基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接方法不受机器人定位精度的影响,拼接精度更高。

关键词 测量; 机器人; 点云拼接; 拼接精度

中图分类号 TP183

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204003

Three-Dimensional Point Cloud Splicing Technology of Complex Surfaces Based on iGPS

Ma Guoqing^{1*}, Liu Li¹, Yu Zhenglin¹, Cao Guohua¹, Wang Qiang²

¹College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A method of point cloud splicing is proposed based on the iGPS (indoor Global Positioning System) world coordinate system. A point cloud splicing mathematical model is established and the coordinate transformation relationship in this splicing model is solved. Based on the standard ball measurement experiment, the point cloud splicing based on the robot base coordinate system and that based on the iGPS coordinate system are realized, respectively. The research results show that the point cloud splicing method based on the iGPS world coordinate system is not affected by the positioning accuracy of robots, and moreover the splicing precision is high.

Key words measurement; robot; point cloud splicing; splicing precision

OCIS codes 120.4640; 120.4880; 120.5800

1 引 言

由于投影仪投射范围和摄像机视场范围有限以及物体自身的遮挡等因素的存在,三维形貌扫描仪一次采样只能获得被测物体一个侧面的信息。所以对于大型物体的测量,往往需要从不同的角度进行多次采样,然后通过多视点云拼接与融合,形成整体的三维点云。不同角度的采样结果,因各基准坐标系不

同,即使测量物体上同一点,其对应的坐标值也不相同^[1]。因此三维点云多视拼接的关键是坐标系的建立和坐标转换。在传统以工业机器人和三维形貌扫描仪组成的形貌测量系统中,工业机器人既是运动的载体,也是精度链中的重要环节,故工业机器人相对较低的定位精度势必会对测量精度产生一定的影响。

本文以“室内全局定位系统 iGPS-工业机器人-形貌传感器”为核心,在传统机器人形貌测量系统的

收稿日期: 2018-09-03; **修回日期:** 2018-10-17; **录用日期:** 2018-10-24

基金项目: 吉林省科技发展计划(20160204016GX, 20180623031TC)、吉林省省级产业创新专项资金(2016C088, 2017C045-2)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2016-04, XQNJJ-2017-11)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20170626KJ)

* **E-mail:** magq@cust.edu.cn

基础上引入 iGPS 定位跟踪系统。利用 iGPS 来实现位置的定位和跟踪,并基于该位置实现点云的多视拼接。该方法以 iGPS 世界坐标系作为点云拼接坐标系,机器人仅作为移动载体,不再作为测量精度链中的一环,避免了机器人定位精度低对系统点云拼接精度的影响。

2 点云拼接技术

点云拼接是指通过某种变换将两组不同区域中的点云数据对齐,使不同区域的点云能够正确地匹配和搭接^[2]。受工作原理和测量范围的限制,需要对形貌传感器在不同站位所测量的点云进行拼接处理,通过刚性坐标变换将点云合并成一块完整的点云。常见的点云拼接策略主要分为序列拼接和全局拼接两类^[3]。其中,序列拼接主要是先将点云数据进行预处理,再依据相邻点云之间公共部分的法向、曲率等特点找到对应点组进行拼接^[4]。这种拼接方法操作方便、容易实现;但是当拼接的点云邻域数据较多时,误差的累积传递会导致拼接误差逐渐增大。全局拼接主要是在测量域内设置一个固定的全局坐标系,将各测量站位的测量数据全部统一到全局坐标系之下再进行点云的后续处理^[5],这种拼接策略可以将误差进行全局优化并平均分配给各拼接邻域,因此可以获得较高的拼接精度。采用全局拼接策略进行点云拼接

的系统主要可以由基于标记点的拼接方法、采用旋转工作台的拼接方法和辅助靶标拼接法等^[6]方法实现。

iGPS 定位跟踪测量系统是工作范围在 10 m 左右测量精度最高的坐标测量系统^[7]。该测量系统采用全局拼接策略(该策略具有误差分布较均匀、拼接精度较高的特点),将各测量站位下获取的点云数据统一转换到 iGPS 世界坐标系下完成拼接,能够保证测量范围足够大且测量过程中无需粘贴标记点和靶标点,自动化程度高。只要在室内环境下被测物体的尺寸在机器人臂展的范围内,均可利用本测量系统实现测量和点云拼接。

3 点云拼接模型建立

3.1 测量系统总体构成

三维形貌测量系统主要由控制计算机、工业机器人、形貌测量传感器、iGPS 定位跟踪测量系统(位置解算器、iGPS 发射器、iGPS 接收器)及机器人控制系统等构成。控制计算与 iGPS 定位跟踪测量系统、工业机器人通过 ethernet 网络实现通信,与形貌测量传感器通过通用串行总线(USB)实现通信,如图 1 所示。根据固定安装在三维形貌传感器上的 iGPS 接收器实时获取的点云进行基于 iGPS 测量坐标系的多视点云拼接,以消除工业机器人定位精度对点云拼接的影响。

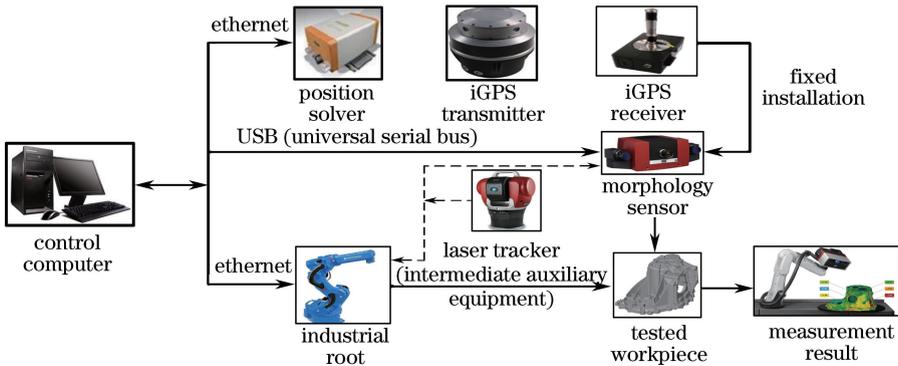


图 1 三维形貌测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of three-dimensional profile measurement system

3.2 点云拼接数学模型

基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接模型主要包含三个坐标系:形貌传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 、与形貌传感器刚性连接的 4 个 iGPS 接收器所构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 和 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。三个坐标系之间存在两组坐标系转换关系 w_fA 和 s_fA ,其中 w_fA 为与形貌传感器刚性连接的 4 个 iGPS 接收器所构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$

到 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的变换矩阵, s_fA 为形貌传感器测量坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 到 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 的变换矩阵,基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接模型如图 2 所示,其中包括 m 个站位,下标 f_m 代表第 m 个站位时的 Frame 坐标系 $O_{f_m}-X_{f_m}Y_{f_m}Z_{f_m}$,下标 s_m 代表第 m 个站位时形貌传感器的坐标系 $O_{s_m}-X_{s_m}Y_{s_m}Z_{s_m}$ 。

设点 P 为测量范围内任意一点,该点在形貌传

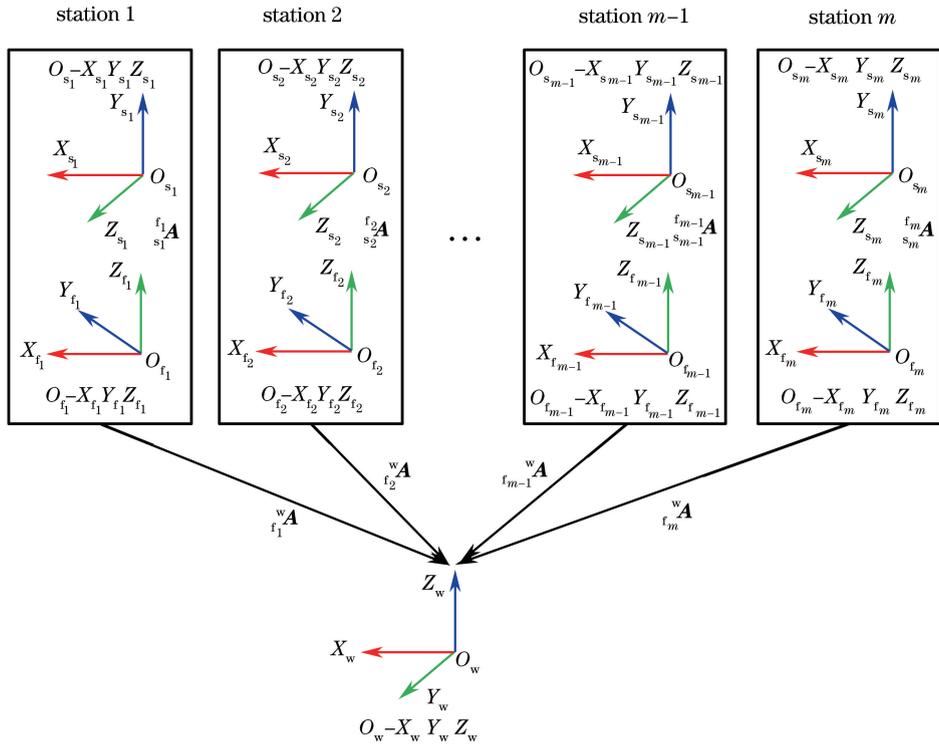


图 2 基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接模型

Fig. 2 Point cloud splicing model based on iGPS world coordinate system

传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 下的坐标为 P_s , 根据转换关系 ${}^f_s\mathbf{A}$, 可将 $O_s-X_sY_sZ_s$ 坐标系下的点云测量数据转换到与形貌传感器刚性连接的 4 个 iGPS 接收器所构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 下; 再根据 iGPS 实时定位跟踪系统中接收传感器的坐标信息获得转换关系 ${}^w_f\mathbf{A}$, 便可将 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 下的点云测量数据转换到 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下, 从而完成基于 iGPS 世界坐标系的点云自动拼接。设在 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下点 P 坐标为 P_w , 则存在如下的对应关系:

$$\mathbf{P}_w = {}^w_f\mathbf{A} \cdot {}^f_s\mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_s. \quad (1)$$

由(1)式可知, 机器人带动形貌传感器在不同测量站点上获取的点云数据最终会转换到 iGPS 世界坐标系下, 而 iGPS 世界坐标系建立在 iGPS 激光发射器上。发射器在测量时位置始终保持不变, 这就保证了即使形貌传感器在测量时按照机器人预先编程设定的轨迹更换不同的站点进行测量, 测量得到的三维点云数据也会始终按照全局拼接策略自动拼接在 iGPS 世界坐标系下。因此对于基于 iGPS 世界坐标系的多站点点云拼接模型的关键问题是求解两组坐标转换关系 ${}^f_s\mathbf{A}$ 和 ${}^w_f\mathbf{A}$ 。

3.3 转化关系求解方法

为求解三组坐标系中的两组坐标转换关系 ${}^f_s\mathbf{A}$ 和 ${}^w_f\mathbf{A}$, 引入激光跟踪仪作为中间辅助装置。设激光跟踪仪坐标系为 $O_l-X_lY_lZ_l$, 其中下标 l 代表激光跟踪仪。在求解形貌传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 到与形貌传感器刚性连接的 4 个 iGPS 接收器所构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 的转换关系 ${}^f_s\mathbf{A}$ 时, 首先需要建立形貌传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 和激光跟踪仪坐标系 $O_l-X_lY_lZ_l$ 下的一组公共特征点, 可得到由形貌传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 到激光跟踪仪坐标系 $O_l-X_lY_lZ_l$ 的转换关系 ${}^l_s\mathbf{A}$ 。然后使用激光跟踪仪对形貌传感器上的 4 个 iGPS 接收传感器进行测量, 按照 iGPS 定位跟踪系统中坐标系建立原则建立 Frame 坐标系, 并得到激光跟踪仪坐标系 $O_l-X_lY_lZ_l$ 到 iGPS 接收传感器构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 的转换关系 ${}^f_l\mathbf{A}$, 转换关系示意图如图 3 所示。对于与形貌传感器刚性连接的 4 个 iGPS 接收器所构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 到 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的变换矩阵 ${}^w_f\mathbf{A}$, 可以根据 iGPS 实时定位跟踪系统中接收传感器的坐标信息获得。

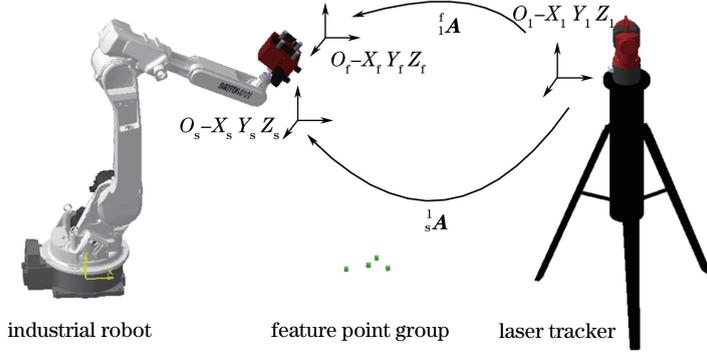


图 3 转换关系示意图

Fig. 3 Schematic of transformation relationship

1) 转换关系 ${}^s_f \mathbf{A}$ 的求解

形貌传感器坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 到与形貌传感器刚性连接的 4 个 iGPS 接收器所构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_f Y_f Z_f$ 的转换关系 ${}^s_f \mathbf{A}$ 满足:

$${}^s_f \mathbf{A} = \mathbf{A} \cdot {}^l_s \mathbf{A}. \quad (2)$$

根据布尔-沙七参数转换模型^[8-9], 对空间可测量范围内的特征点 P 在形貌传感器坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 下的坐标为 $(X \ Y \ Z)^T$, 点 P 在激光跟踪仪坐标系 $O_l-X_l Y_l Z_l$ 下的坐标为 $(x \ y \ z)^T$, 则两坐标系间的转换关系满足:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = s \mathbf{R}_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \mathbf{T}_1, \quad (3)$$

式中: s 为比例因子; \mathbf{R}_1 为由形貌传感器坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 到激光跟踪仪坐标系 $O_l-X_l Y_l Z_l$ 的旋转矩阵; \mathbf{T}_1 表示两坐标系之间的平移向量。则(2)式可以表示为

$${}^s_f \mathbf{A} = \begin{pmatrix} s \mathbf{R}_1 & \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{T}_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_s & s \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_s 、 \mathbf{T}_s 分别为激光跟踪仪坐标系 $O_l-X_l Y_l Z_l$ 到 Frame 坐标系 $O_f-X_f Y_f Z_f$ 的旋转矩阵和平移向量。

为计算方便, 将特征点坐标均化为以重心为原点的重心化坐标。特征点在两坐标系下的坐标分别为 $(X_i \ Y_i \ Z_i)^T$ 和 $(x_i \ y_i \ z_i)^T, i=1, 2, \dots, n$, n 为公共点个数, 两个坐标系下的重心坐标分别为 $(X_g \ Y_g \ Z_g)^T$ 和 $(x_g \ y_g \ z_g)^T$, g 代表重心。即

$$\begin{cases} (X_g \ Y_g \ Z_g)^T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i \ Y_i \ Z_i)^T \\ (x_g \ y_g \ z_g)^T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i \ y_i \ z_i)^T \end{cases} \quad (5)$$

经重心化后两坐标系下的特征点坐标分别为

$$(\bar{X}_i \ \bar{Y}_i \ \bar{Z}_i)^T \text{ 和 } (\bar{x}_i \ \bar{y}_i \ \bar{z}_i)^T, \text{ 则有}$$

$$\begin{cases} (\bar{X}_i \ \bar{Y}_i \ \bar{Z}_i)^T = (X_i \ Y_i \ Z_i)^T - (X_g \ Y_g \ Z_g)^T \\ (\bar{x}_i \ \bar{y}_i \ \bar{z}_i)^T = (x_i \ y_i \ z_i)^T - (x_g \ y_g \ z_g)^T \end{cases} \quad (6)$$

将(5)、(6)式代入(3)式可得

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z}_i \end{pmatrix} = s \mathbf{R}_1 \begin{pmatrix} \bar{X}_i \\ \bar{Y}_i \\ \bar{Z}_i \end{pmatrix}. \quad (7)$$

对于 n 个公共点, 可得 s 的最小均方估计为

$$s' = \frac{\sum_{i=1}^n [\| (\bar{x}_i \ \bar{y}_i \ \bar{z}_i)^T \| \cdot \| (\bar{X}_i \ \bar{Y}_i \ \bar{Z}_i)^T \|]}{\sum_{i=1}^n \| (\bar{X}_i \ \bar{Y}_i \ \bar{Z}_i)^T \|^2}, \quad (8)$$

式中 $\| \cdot \|$ 为范数。

采用基于罗德里格矩阵的最小二乘法进行旋转矩阵 \mathbf{R}_1 的求解。罗德里格矩阵是一个具有 3 个独立元素的反对称矩阵, 即

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: a 、 b 、 c 为罗德里格参数。则 \mathbf{R}_1 可表示为

$$\mathbf{R}_1 = \frac{1}{1 + a^2 + b^2 + c^2} \times \begin{pmatrix} 1 + a^2 - b^2 - c^2 & -2c - 2ab & -2b + 2ac \\ 2c - 2ab & 1 - a^2 + b^2 - c^2 & -2a - 2bc \\ 2b + 2ac & 2a - 2bc & 1 - a^2 - b^2 + c^2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

(5) 求得平移向量 \mathbf{T}_1 为

$$\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - s\mathbf{R}_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (11)$$

综合激光跟踪仪建立 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 与激光跟踪仪坐标系的转换关系 \mathbf{A} ,根据(2)式即可完成转换关系 \mathbf{A} 的求解。

2)转换关系 \mathbf{A} 的求解

设点 P 在 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 下的坐标向量为 \mathbf{P}_f ,在 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下的坐标向量为 \mathbf{P}_w ,则 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 到世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的转换关系 \mathbf{A} 满足

$$\mathbf{P}_w = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_f. \quad (12)$$

Frame 坐标系由 4 个 iGPS 接收传感器组成,4 个 iGPS 接收传感器的相对位置关系始终保持不变,虽然 Frame 坐标系在测量过程中随测量站位的改变而变化,但是其坐标系各轴的方位是稳定不变的。iGPS 跟踪定位系统可实时跟踪 4 个 iGPS 接收传感器的空间坐标,根据 iGPS 定位跟踪系统的位置解算器可获得转换关系 \mathbf{A} ,进而将 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 下的点云测量数据转换到 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下,其精度依赖于 iGPS 系统的定位精度,不受机器人定位精度的影响。

4 点云拼接实验

目前国内外学者对机器人形貌测量中的点云拼接多以机器人基坐标系为基准^[10],首先通过基于标准球的不同坐标系拼接对比实验,对测量域内同一标准球进行测量;然后对两种基坐标下的点云拼接精度进行分析对比,以验证基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接方法具有更好的拼接精度;最后通过圆柱和航空叶片测量实验,验证基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接精度能够满足测量需求。

4.1 标准球点云拼接对比实验

采用不同的站位对标准球进行测量,如图 4 所



图 4 标准球的测量

Fig. 4 Measurement of standard ball

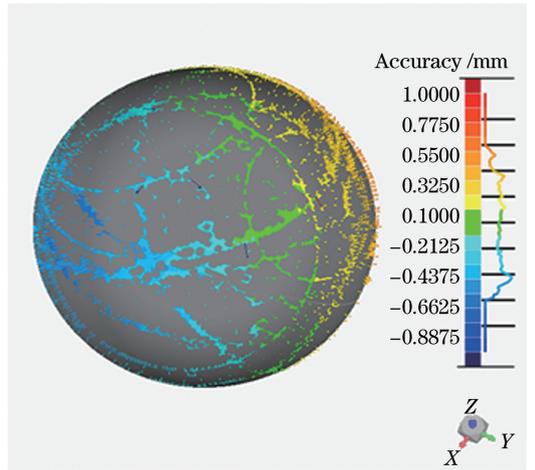


图 5 基坐标下的拼接偏差

Fig. 5 Splicing error in base coordinate system

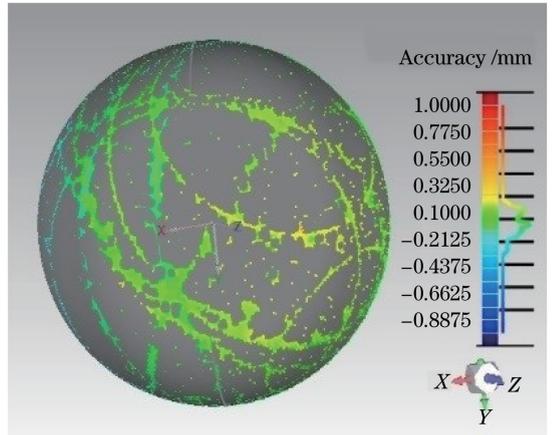


图 6 iGPS 坐标系下的拼接偏差

Fig. 6 Splicing error in iGPS coordinate system

示,将测量点云拼接在机器人基坐标系下,然后与标准球的理论数模进行最佳拟合对齐,3D 偏差分析结果如图 5 所示。将测量点云拼接在 iGPS 世界坐标系下,然后与标准球的理论数模进行最佳拟合对齐,3D 偏差分析结果如图 6 所示。右侧彩色偏差分布条形图数值表示拼接精度,单位为 mm(绿色代表在公差范围内,红色代表正偏差,蓝色代表负偏差),图 5 显示点云拼接精度在 ± 0.6625 mm 之内,图 6 显示点云拼接精度在 ± 0.0905 mm 之内。两次基于不同坐标系的点云拼接实验除 iGPS 定位跟踪系统外,使用了相同的设备、测量站位与测量顺序,所以其拼接精度的差异基本源自于机器人和 iGPS 的定位精度。机器人装配误差和日常使用磨损导致基于机器人基坐标系的点云拼接精度较差,而 iGPS 跟踪定位系统中机器人仅是一个执行机构,不再作为精度链的组成环,其定位精度对拼接精度无影响。所以相对而言,基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接精度

较好,拼接结果更为可靠。

4.2 圆柱侧面点云拼接精度验证实验

为直观地观察点云拼接的效果,实验采用从 5 个测量站位对一个直径为 60.0123 mm、高度为 200.0123 mm、圆柱度为 0.0212 mm 的标准圆柱体的侧面进行形貌测量,并放大观察每一处点云重叠区域的拼接误差,其示意图如图 7 所示。图 7 (a)中编号 1~5 分别表示测量站位 1~5 测量的点云数据,黑色为不同测量站位下点云拼接时的重叠区域,定义测量站位 1 和测量站位 2 的重叠区域

为 A_{12} ,以此类推,测量站位 5 和测量站位 1 的重叠区域为 A_{51} ;图 7(b)中拼接误差 d 代表相邻点云重叠区域的径向距离的平均值。实验开始前,首先要对工业机器人的测量路径进行规划,为了确保在各测量站位上获取的点云数据的面积大小相近,重叠区域分布较为均匀,采用工业机器人围绕被测标准圆柱的轴线每隔 72° 建立一个测量站位,并且各测量站位在测量域内高度一致,形貌传感器的测量头主光轴方向指向轴线。标准圆柱拼接结果如图 8 所示。

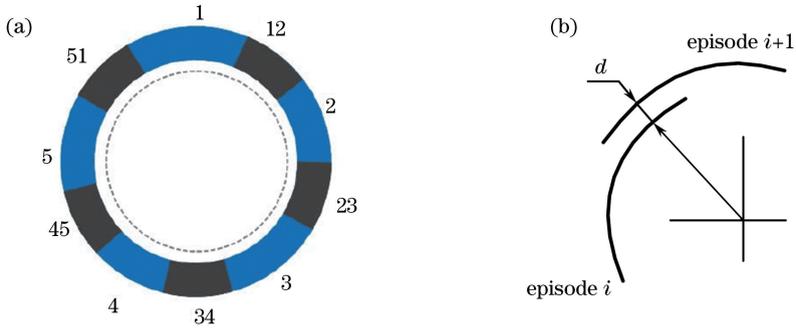


图 7 圆柱拼接原理示意图。(a)重叠区域;(b)拼接误差

Fig. 7 Schematic of cylindrical splicing principle. (a) Overlap region; (b) splicing error

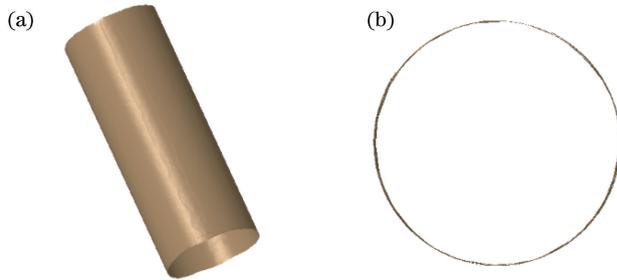


图 8 圆柱拼接结果。(a)轴侧视图;(b)俯视图

Fig. 8 Cylindrical splicing results. (a) Isometric view; (b) top view

由于各测量站位获取的点云都处在 iGPS 世界坐标系下,所以可以对相邻点云数据的重叠区域进行偏差分析,分析得到的各测量站位重叠区域的拼接误差如表 1 所示。

0.0527 mm,误差主要来源于 iGPS 跟踪定位系统的跟踪定位的精度和拼接处理过程中的误差。该误差远小于机器人的定位误差。由表 1 数据可知,基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接方法合理有效,系统的点云拼接精度满足测量需求。

4.3 航空叶片点云拼接验证实验

以航空叶片为例进行三维形貌测量系统的曲面测量实验,通过机器人带动形貌传感器运动来采集叶片的三维数据,数据拼接在 iGPS 世界坐标系下,将点云拼接数据与原始数模拟合数据在软件中进行对比,从叶片不同位置测试点中标定的 22 个点 CMP 1~CMP 22 的坐标偏差如表 2 所示。

表 1 数据表明各重叠区域中最大的拼接误差为

表 1 各重叠区域的拼接误差

Table 1 Splicing error of each overlap region

Overlap region	d /mm
A_{12}	0.0331
A_{23}	0.0446
A_{34}	0.0434
A_{45}	0.0527
A_{51}	0.0335

表 2 测试点的偏差
Table 2 Deviation of test points

mm

Serial number	Reference position			Measurement position			Deviation
	X	Y	Z	X	Y	Z	
CMP 1	-5.0000	-2.6959	-13.0000	-4.9999	-2.6964	-13.0000	0.0005
CMP 2	-5.0000	-2.9161	-19.0000	-5.0001	-2.9161	-19.0000	-0.0001
CMP 3	-5.0001	-3.2055	-27.0000	-5.0003	-3.2047	-27.0000	-0.0008
CMP 4	-5.0000	-3.5267	-36.0000	-5.0005	-3.5251	-36.0001	-0.0017
CMP 5	-5.0001	-3.8079	-44.0000	-5.0009	-3.8056	-44.0001	-0.0024
CMP 6	-5.0002	-4.0519	-51.0000	-5.0012	-4.0491	-51.0001	-0.0030
CMP 7	-1.0003	-2.0287	-52.0000	-1.0019	-2.0263	-52.0000	-0.0029
CMP 8	-0.0003	-1.2991	-44.0000	-0.0016	-1.2972	-44.0000	-0.0023
CMP 9	-0.0002	-1.2734	-37.0000	-0.0011	-1.2719	-37.0000	-0.0018
CMP 10	0.0000	-1.2475	-30.0000	-0.0006	-1.2465	-30.0000	-0.0012
CMP 11	0.9999	-0.6493	-24.0000	0.9995	-0.6486	-24.0000	-0.0008
CMP 12	-0.0002	-1.1924	-15.0000	-0.0002	-1.1924	-15.0000	0.0000
CMP 13	0.9998	-0.7074	-10.0000	1.0000	-0.7078	-10.0000	0.0004
CMP 14	5.0000	2.3120	-8.0000	5.0002	2.3119	-8.0000	0.0002
CMP 15	4.9994	2.5889	-14.0000	4.9993	2.5890	-14.0000	-0.0001
CMP 16	4.9994	2.9295	-21.0000	4.9990	2.9299	-21.0000	-0.0005
CMP 17	4.9999	3.2398	-27.0000	4.9992	3.2402	-27.0000	-0.0008
CMP 18	4.9994	3.5142	-32.0000	4.9985	3.5148	-31.9999	-0.0010
CMP 19	4.9995	3.9864	-40.0000	4.9983	3.9871	-39.9999	-0.0013
CMP 20	4.9995	4.4391	-47.0000	4.9982	4.4398	-46.9999	-0.0015
CMP 21	-2.0000	-2.5000	-2.0000	-2.0000	-2.5013	-2.0000	0.0013
CMP 22	2.0000	-2.5000	-2.0000	2.0000	-2.5009	-2.0000	0.0009

表 2 中包含了测量位置的理论位置 and 实际位置坐标信息,通过对 CMP 1~CMP 22 共计 22 个点的坐标偏差进行分析,得到最大偏差小于 0.01mm、偏差分布较为均匀、测量精度较高的结论。

5 结 论

针对基于机器人基坐标系点云拼接精度较低的问题,提出了以 iGPS 世界坐标系替代机器人基坐标系作为拼接坐标系的方法。建立了基于 iGPS 世界坐标系进行点云拼接的数学模型,并对拼接模型中的坐标转换关系求解进行研究;基于标准球测量实验分别实现了基于机器人基坐标系的点云拼接和基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接,实验结果表明基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接具有更好的拼接精度。通过圆柱侧面点云拼接实验和航空叶片点云拼接实验验证了基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接方法不受机器人定位精度的影响,系统拼接精度更高。

参 考 文 献

[1] Chen M L, Lu W X, Wan Y C, *et al.* Automatic

registration of terrestrial point clouds without additional information[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0414003.

陈茂霖, 卢维欣, 万幼川, 等. 无附加信息的地面激光点云自动拼接方法[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0414003.

[2] Yang F, Bai B X, Zhang Z P, *et al.* Research on clouds registration algorithm based on multi-view point[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(3): 124-127.

杨帆, 白宝兴, 张振普, 等. 基于多视点云拼接算法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 124-127.

[3] Huang Y, Da F P, Tao H J. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308002.

黄源, 达飞鹏, 陶海跻. 一种基于特征提取的点云自动配准算法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308002.

[4] Wu M Q, Li Z W, Zhong K, *et al.* Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0215002.

- 伍梦琦, 李中伟, 钟凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0215002.
- [5] Lu W L, Jiang K Y, Lin J Y. Multi-view 3D data registration based on global control codeless points [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(5): 57-62.
卢炜良, 江开勇, 林俊义. 无编码全局控制点多视角三维数据拼接[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 57-62.
- [6] Zhang M, Sui Y X, Yang H J. Subaperture stitching interferometry based on detection of marker center [J]. Chinese Optics, 2014, 7(5): 830-836.
张敏, 隋永新, 杨怀江. 提取标记点中心在子孔径拼接检测中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 830-836.
- [7] Sun F L, Zhao G, Wang W, *et al.* Analysis method of iGPS measurement uncertainty spatial distribution [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 174-180.
孙涪龙, 赵罡, 王伟, 等. iGPS 测量不确定度空间分布分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 174-180.
- [8] Gu Y X, Ma J S. Research on an algorithm about 3D profile measurement based on laser feedback [J]. Optical Instruments, 2015, 37(1): 1-3, 8.
谷亚先, 马军山. 利用激光反馈测量物体三维形貌[J]. 光学仪器, 2015, 37(1): 1-3, 8.
- [9] Hou M S, Wang Q, Ma G Q, *et al.* Calibration and verification method for 3D shape flexible measurement system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3): 385-391.
侯茂盛, 王强, 马国庆, 等. 三维形貌柔性测量系统标定方法及验证[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 385-391.
- [10] Huang J, Zhu J G, Wang Y. Calibration for 3D profile measurement robot with laser line-scan sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(1): 62-66.
黄佳, 郝继贵, 王一. 激光线扫式形貌测量机器人的标定研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(1): 62-66.