

激光与光电子学进展

基于 MaxShot-3D 的复杂零件三维形貌柔性测量技术

刘涛, 李丽娟*, 赵小龙

长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 针对传统柔性三维形貌检测系统柔性差和需预先粘贴合作目标点的问题, 提出一种基于光学坐标三维测量系统的多特征复杂零件三维形貌柔性检测系统, 并介绍该检测系统的总体方案, 建立相对应的数学模型, 实现复杂零件三维形貌柔性测量技术的研究。对系统的测量不确定度及重复测量精度进行了实验检定, 实验结果表明, 该柔性检测系统具有较高的可靠性和精度。同时, 对带曲率、异形孔的零件外形尺寸进行免粘贴合作目标的外形测量, 实验结果说明了检测系统的可行性。

关键词 测量; 多特征复杂零件; 三维形貌检测; 基于正态分布变换的迭代最近点算法; 柔性测量; MaxShot-3D
中图分类号 N34 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP202158.0512001

Flexible Measurement Technology of Three-Dimensional Shape of Complex Parts Based on MaxShot-3D

Liu Tao, Li Lijuan*, Zhao Xiaolong

Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the poor flexibility of traditional flexible three-dimensional (3D) morphology measuring system and the need to paste cooperative target points in advance. A multi-feature shape complex surface 3D shape measurement based on optical coordinate 3D measurement system is proposed. The overall design scheme of the proposed measurement system is introduced and mathematical model is established for it. And the research on flexible measurement technology of complex parts 3D morphology is realized. The measurement accuracy and repeatability measurement accuracy of the detection system are experimental verified. The experimental results show that the flexible measuring system has high reliability and precision. At the same time, the outer dimensions of parts with curvature and special-shaped holes are measured for the shape of the non-sticking cooperation target. And the experimental results show the feasibility of the measuring system.

Key words measurement; multi-feature complex parts; three-dimensional shape measurement; iterative closest point algorithm based on normal distribution transformation; flexible measurement; MaxShot-3D

OCIS codes 120.4640; 420.4880; 120.5800

收稿日期: 2020-07-15; 修回日期: 2020-08-06; 录用日期: 2020-08-13

基金项目: 吉林省优秀青年人才基金项目(20190103154JH)、吉林省自然科学基金(20200201229JC)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20200757KJ)

*E-mail: custlilj@163.com

1 引言

免粘贴合作目标多特征复杂零件三维形貌测量要求检测系统具有较高的柔性、检测精度和自动化程度。现有的自动化测量设备中应用最广泛的是将柔性移动平台(工业机器人)与光学非接触测量系统有机结合所搭建的三维形貌柔性检测系统,此系统结合两者的优点。然而,现有的柔性三维形貌检测系统在检测工件时需要预先在零件上粘贴反射合作靶标,驱动机器人按仿真规划路径行走,完成测量工作,要求工件与测量工装具有较高的配合精度^[1-4]。本文在传统机器人三维形貌柔性测量系统的基础上,提出一种多特征复杂零件免贴合作目标的外形检测柔性测量技术,工业机器人和光学非接触测量系统组成的柔性测量系统仅实现各个规划测量站位的三维形貌检测工作。该技术引入MaxShot-3D辅助测量系统,运用基于正态分布变换的迭代最近点(NDT-ICP)算法求解理论坐标系与工装坐标系的转换关系,实现工件任意摆放的自动测量,提高零件测量的效率和柔性程度,并将辅助工装坐标系作为点云拼接坐标系,从而提高测量系统的点云拼接精度。

2 测量系统总体方案

基于MaxShot-3D匹配的复杂零件三维形貌柔性检测系统的总体方案系统框图,如图1所示,该系统主要包括六自由度工业机器人系统、投影光栅测量系统、MaxShot-3D测量辅助系统等。检测系统中,使用MaxShot-3D摄影测量系统测量辅助工装反射目标点位置,并建立辅助工装坐标系;投影光栅测量系统与工业机器人连接组成传统柔性测量系统,实现按规划轨迹测量站位进行逐一测量,获取测量工装反射合作目标位置,计算辅助工装坐标系、投影光栅测量系统与工业机器人基座坐标系之间的转换关系。测量时工件置于测量辅助工装上,传统柔性检测系统在初始位置进行测量,通过NDT-ICP算法实现测量数据与三维数模的匹配,建立理论坐标系与投影光栅测量坐标值之间的转换关系,进而计算理论坐标系与机器人基座坐标系之间的坐标转换关系;通过转换关系将理论坐标系下的测量轨迹站位坐标转换至机器人极坐标系下,运用传统柔性测量系统实现免粘贴合作目标多特征复杂零件三维形貌的自动测量^[5-9]。测量系统总体布局,如图2所示。

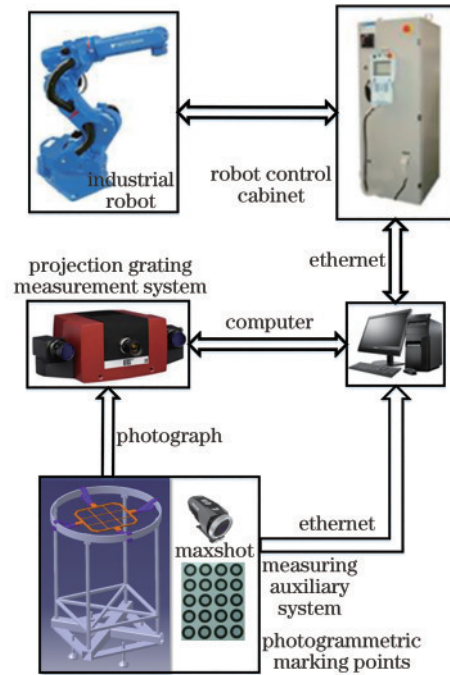


图1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of system composition

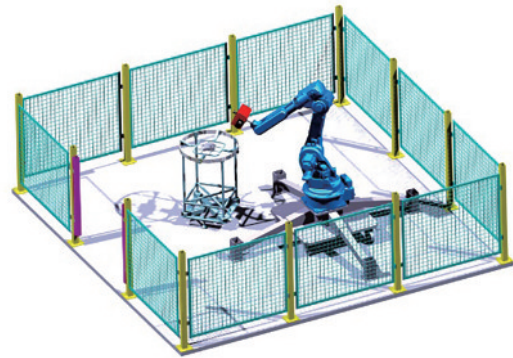


图2 系统总体布局

Fig. 2 System overall layout

2.1 传统柔性测量系统

传统柔性测量系统主要包括工业机器人、投影光栅测量系统、计算机和测量附件等。本节主要介绍投影光栅测量系统,其测量原理如图3所示。图中P点为待测工件表面上任意一点,point1为P点在Camera1上的成像点,point2为P点在Camera2上的成像点。投影光栅测量系统实物如图4所示,其主要包括投影光栅和拍摄相机(即两个CCD相机),在运用激光三角测量法的基础上结合光栅投影法和结构编码法完成测量工作。首先,向待测量工件表面投射空间频率不同的光栅条纹;然后,根据测量原理获取两个CCD(Camera1及Camera2)相机所采集的零

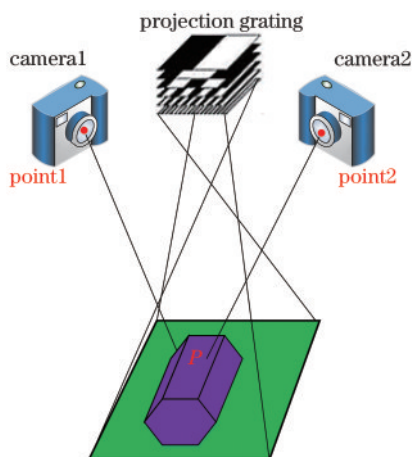


图 3 测量原理图

Fig. 3 Measuring principle



图 4 投影光栅测量系统

Fig. 4 Projection grating measurement system

件表面图像;最后,对采集图像进行处理,获得采集图像中每个像素点的三维坐标^[10]。

2.2 MaxShot-3D 测量辅助系统

MaxShot-3D 测量辅助系统主要由辅助工装、摄影测量标志点和 MaxShot-3D 摄影测量系统等组成,如图 5 所示。辅助工装主要包括辅助托架(即托板、紧固装置和保形支架)和辅助支架(即水平调整机构和保形框架),主要实现稳定的放置待测零件、放置摄影测量标志点、确保测量辅助系统处于水平状态及保持良好的稳定性;摄影测量标志点粘贴于辅助托架之上,用于建立辅助系统坐标系;MaxShot-3D 摄影测量系统是全局照相定位系统,能够实现大体积扫描定位功能,用于获取粘贴于辅助托架上的标志点位置。

MaxShot-3D 测量辅助系统工作原理,如图 6 所示,其中 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_M - X_M Y_M Z_M$ 表示 MaxShot-3D 相机坐标系, $O_T - X_T Y_T Z_T$ 为工装坐标系。首先,在辅助工装上均匀分布粘贴若干个摄影测量标志点;然后,使用 MaxShot-3D 在不同站位对高反光反射目标点进行测量,获取目标点在相机坐标系下的位置,通过不同测量位置拍摄公共区域目标点,实现坐标系的统一工作;最后,通过反射目标点的位

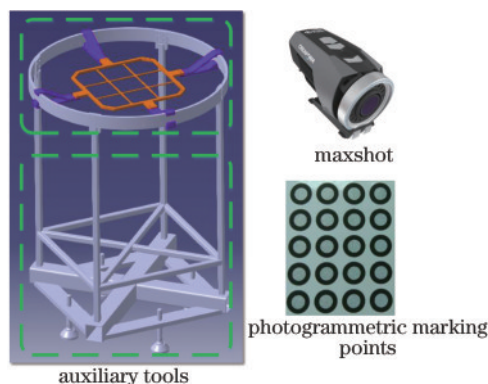


图 5 MaxShot-3D 辅助系统图

Fig. 5 MaxShot-3D auxiliary system

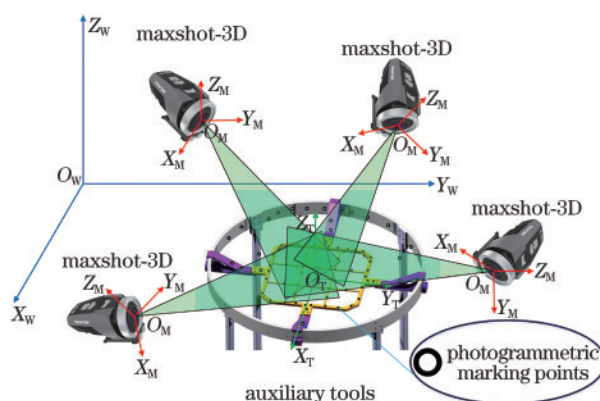


图 6 MaxShot-3D 辅助系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of MaxShot-3D auxiliary system 置,建立辅助工装坐标系^[11-13]。

2.3 基于 NDT-ICP 坐标转换关系

基于 NDT-ICP 的匹配方法主要分为粗配准和精配准,粗配准用于减少点云之间的旋转和平移,提高精细配准的效率和趋势,细分布准则最小化两组点云之间的配准误差。精配准是基于粗配准的结果,对两组点云进一步精确对齐^[14]。算法流程如图 7 所示。

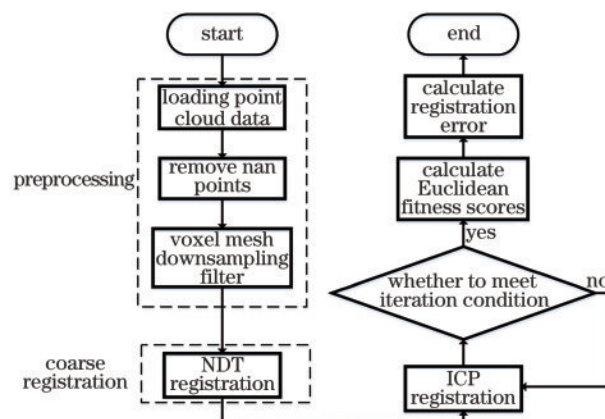


图 7 NDT-ICP 算法流程图

Fig. 7 Flow chart of NDT-ICP algorithm

1) 粗配准

①将理论数据模型划分为大小一致的单元。

②为体素中的每个点 x_i 生成一个正态分布 $N(q, C)$, x_i 的概率密度函数为

$$p(x_i) = \frac{1}{c} \exp \left[-\frac{(x_i - q)^T C^{-1} (x_i - q)}{2} \right]. \quad (1)$$

③计算每个立方体中各个点的均值向量 q 和协方差矩阵 C , 表示为

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - q)(x_i - q)^T, \quad (3)$$

式中: $x_i (i=1, \dots, n)$ 为每个立方体中包含的所有点。

④转移矩阵 T 待配准点云与理论点云之间的变换表示为

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

⑤变换参数的评价方法表示为

$$s(p) = \sum_{i=1}^n p [T(p, x_i)] = \sum_{i=1}^n \exp \left[-\frac{(x'_i - q_i)^T C^{-1} (x'_i - q_i)}{2} \right], \quad (5)$$

式中: x'_i 为点云 x 根据变换参数 p 映射到第一组点云 (目标点云) 坐标系的坐标; $T(p, x_i)$ 表示当前点的坐标变换; $s(p)$ 表示评价方法参数。

⑥利用海森矩阵法求出 $s(p)$ 的最优值, 得到转换矩阵。

2) 精配准

NDT-ICP 配准后的两个点云分别记为 P 和 Q , 其中 P 为待配准点云, Q 为基准点云^[15]。

①寻找最近的点。两点集的欧氏距离为

$$d(p_i, q_i) = \|p_i - q_i\| = \sqrt{(x_{pi} - x_{qi})^2 + (y_{pi} - y_{qi})^2 + (z_{pi} - z_{qi})^2}, \quad (6)$$

式中: R 为旋转矩阵; T 为平移矩阵; $q_i = Rp_i + T, i=1, 2, \dots, N$ 。

②使用四元数方法计算 R 和 T , 完成一次注册。

③函数定义为

$$E = \sum_{i=1}^N |(Rp_i + T) - q_i|^2. \quad (7)$$

根据精度要求, 定义终止迭代条件, 如果达到终止条件, 则输出最优矩阵。

3 测量系统数学模型

3.1 柔性测量系统相关坐标系

基于 MaxShot-3D 的复杂零件三维外形机器人柔性测量系统中坐标系主要包括以下几部分: 工业机器人 $O_R - X_R Y_R Z_R$ 作为世界坐标系与 $O_W - X_W Y_W Z_W$ 重合, MaxShot-3D 摄影测量系统坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$, 投影光栅测量系统坐标系 $O_M - X_M Y_M Z_M$, 测量工装坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 及被测工件坐标系 $O_P - X_P Y_P Z_P$ 。对测量系统中各个坐标系进行如下定义, 如图 8 所示。

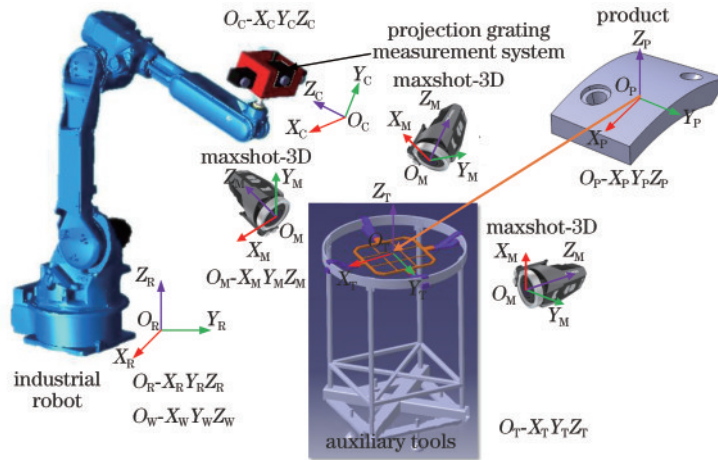


图 8 系统坐标系

Fig. 8 System coordinate system

1) 工业机器人坐标系 $O_R - X_R Y_R Z_R$ (即世界坐标系 $O_W - X_W Y_W Z_W$)。工业机器人坐标系中的 Z_R 垂

直于机器人基座平面, 并与机器人第一轴的轴线重合, X_R 轴和 Y_R 轴位于基座平面上。从投影光栅测

量坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 到工业机器人坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 之间的转换关系为 ${}^R_C T$ 。

2) MaxShot-3D 摄影测量系统坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 。MaxShot-3D 摄影测量坐标系中的 Z_M 轴与相机镜头轴线重合且正向指向摄影测量系统, 而 X_M 轴和 Y_M 轴都位于相机镜头光平面上。MaxShot-3D 摄影测量的反射目标点的坐标均位于此坐标系下。

3) 投影光栅测量系统坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 。投影光栅测量系统中的 Z_C 轴与投影光栅镜头重合且正向指向投影测量系统, 而 X_C 轴和 Y_C 轴都位于投影光平面上。从待测工件的坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 到投影光栅测量坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 之间的转换关系为 ${}^C_P T$, 随着测量位置的变化 ${}^C_P T$ 也在不断变换。

4) 测量工装坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 。测量工装坐标系中的 Z_T 轴垂直于辅助托架与工件接触平面, X_T 轴和 Y_T 轴位于托架接触平面且 X_T 指向与工业机器人坐标系 Y_R 重合。从 MaxShot-3D 摄影测量坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 到测量工装的坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 之间的转换关系为 ${}^T_M T$, 使用 MaxShot-3D 摄影测量系统对工组坐标系进行标定后, 之间的转换关系 ${}^T_M T$ 是不变的; 从测量工装的坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 到投影光栅测量坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 之间的转换关系为 ${}^C_T T$, 使用投影光栅测量系统获取测量工装坐标系, 当工组位置稳定之后, 转换关系 ${}^C_T T$ 不再发生改变。

5) 待测零件坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 。待测零件坐标系 O_P 与零件的质点重合, Z_P 垂直于工件稳定摆放平面, X_P 轴和 Y_P 轴位于通过质点且平行于稳定摆放的平面上。从待测零件坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 到测量工装坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 之间的转换关系为 ${}^T_P T$, 在完成初始位置测量之后, 通过 NDT-ICP 算法获取之间的转换关系, 随着工件的摆放与测量工装的位置不同, ${}^T_P T$ 随之发生变化。

3.2 数学模型建立

基于 MaxShot-3D 的复杂零件三维形貌机器人柔性测量系统建立数学模型的步骤如下。

1) 假设 MaxShot-3D 摄影测量坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 获取的反射目标点的坐标为 $P_M = \{x_i, y_i, z_i | i = 1, \dots, N\}$, 反射目标点在工装坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 下的坐标为 $P_T = {}^M_T T P_M$, $P_T = \{x_i, y_i, z_i | i = 1, \dots, N\}$ 。

2) 假设发射目标点在投影光栅测量坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 下的坐标为 P_{CT} , 则 $P_{CT} = {}^C_T T P_T$ 。

3) 假设反射目标点在工业机器人极坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 下的坐标为 $P_R = {}^R_C T P_{CT}$ 。

4) 假设 P 点为工件上测量范围内的任意一点, P 点在零件坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 下的坐标为 P_P , P 点在工装坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 下的坐标为 P_{T-P} , 则 $P_{T-P} = {}^T_P T P_P$ 。

5) P 点在投影光栅测量坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 下的坐标为 P_{CP} , 则 $P_{CP} = {}^C_T T P_P$ 。

6) 假设发射目标点在工业机器人极坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 下的坐标为 P_{RP} , 则 P 点满足的坐标转换关系为 $P_{RP} = {}^R_C T P_{CP}$ 。

零件坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 下的点 P_P 在每次测量时需要先转换到工装坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 下, 然后再转换到投影光栅测量坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 下, 最后转换到全局坐标系 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 下, 计算公式为

$$P_{RP} = {}^R_C T {}^C_T T P_P \quad (8)$$

由于待测零件每次摆放的位置不同, 需要通过 NDT-ICP 算法求解 ${}^T_P T$, 通过启动柔性测量系统, 使投影光栅测量系统的测量指示光斑会聚于统一反射目标点, 驱动柔性测量系统从不同的方向及角度, 完成同一反射目标点的测量, 完成标定工作, 从而得到 ${}^R_C T$; 将工具坐标系下的反射目标点坐标导入柔性测量系统并运行柔性测量系统, 获得反射目标点在摄影测量坐标系的位置, 完成标定工作, 从而获得转换关系 ${}^C_T T$, 从而使测量系统完成测量工作。

4 测量实例实验

实验所搭建的基于 MaxShot-3D 的复杂零件三维形貌柔性测量系统, 如图 9 所示。其中传统柔性测量系统是由日本安川 YASKAWA 的

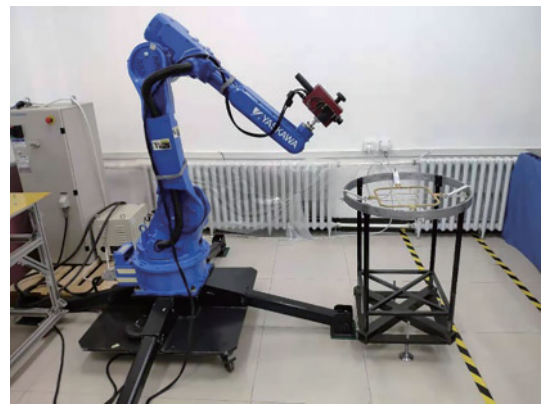


图 9 机器人测量系统

Fig. 9 Robot measurement system

MOTOMAN-HP20D 工业机器人与德国 GOM 公司的 ATOS-Compact Scan 5M 蓝光光栅光学扫描系统所组成,测量半径为 1717 mm,投影光栅测量系统的单次拍摄范围为 40~1200 mm²,最小距离为 0.017 mm,属于较为先进的传统柔性测量系统;本实验采用 CREAFORM 公司 MaxShot-3D 摄影测量系统,工作范围在 2~10 m 内零件测量精度较高,空间测量精度为(0.020+0.025) mm。该系统主要针对零件表面复杂且表面禁止粘贴反射合作目标的零件进行高精度、自动化的柔性外形测量。柔性测量系统测量时获得大量的点云数据,因此有必要对该系统进行坐标测量精度实验。本节验证柔性测量系统的长度测量精度、重复测量精度及实际工件测量精度^[16-17]。

4.1 精度检定实验

传统精度检定实验中,通常采用更高精度的台式三坐标或者激光跟踪仪测量数据,先与待检定测量数据的坐标系统一,再进行坐标测量的精度分析。借鉴于传统的坐标测量精度验证实验,采用长度测量精度检定实验代替坐标测量精度检定。搭建适合于柔性测量系统的长度测量精度验证实验系统。在柔性测量系统辅助工装上粘贴若干个磁力座,放置适用于柔性系统的特制球形坐标测量工具,如图 10 所示,运行柔性测量系统完成坐标测量工作,获取高反光合作目标的位置;选取测量数据中一点坐标作为原点,计算其余坐标与中心原点坐标之间的距离,此结果作为测量值;采用激光跟踪仪与特制合作目标测量磁力座坐标数据,选取相同的坐标原点,计算其余坐标与中心原点坐标之间的距离,此结果为理论值。实验验证数据结果如表 1 所示。

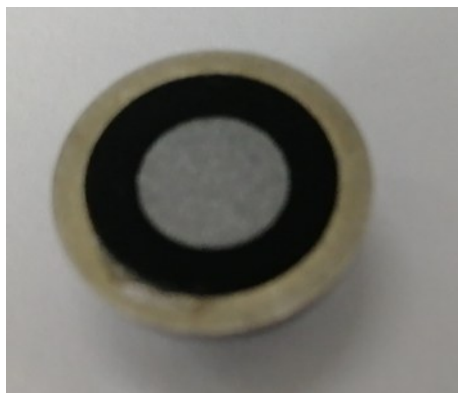


图 10 坐标测量工具

Fig. 10 Coordinate measuring tool

表 1 长度测量精度实验数据

Table 1 Experimental data of length measurement accuracy

Serial number	Theoretical value /mm	Measured value /mm	Absolute error /mm	Error /%
1	180.667	180.756	0.089	0.04926
2	366.356	366.230	-0.126	-0.03439
3	566.810	566.676	-0.134	-0.02364
4	665.208	665.279	0.071	0.01067
5	892.216	892.381	0.165	0.01849
6	963.425	963.571	0.146	0.01515
7	1020.895	1020.706	-0.189	-0.01851
8	1160.795	1160.637	-0.158	-0.01361
9	1206.895	1206.799	-0.096	-0.00795
10	1245.652	1245.790	0.138	0.01107
11	1268.426	1268.608	0.182	0.01434
12	1455.756	1455.604	-0.152	-0.01044
13	1776.176	1776.314	0.138	0.00776
14	1832.562	1832.373	-0.189	-0.01031
15	2005.446	2005.318	-0.128	-0.00638
16	2105.899	2105.766	-0.133	-0.00632

由表 1 可知,基于 MaxShot-3D 的复杂零件三维形貌柔性测量系统的长度测量精度均方根误差小于 0.2 mm,最大相对误差为 0.04926%,基本满足工业检测需求。

4.2 重复测量精度实验

长度测量精度实验能够完成长度测量精度和绝对测量精度的验证,然而进行系统测量稳定性实验也是十分必要的,可以消除柔性系统在检测过程中由于各种原因机器人驱动电机产生的轻微振动对长度测量精度的影响。

基于长度测量精度实验,在测量辅助工装上布置一个磁力靶座,放置适用于柔性系统的特制球形坐标测量工具,驱动柔性测量系统按照空间 14 个不同的方位完成同一点的多次重复坐标测量,验证该系统的检测稳定性。重复测量精度验证数据如表 2 所示,其中 x 、 y 、 z 为点云的空间坐标分量。

通过表 2 可知,采用 3σ 的评价准则计算柔性测量系统的重复测量精度,数据结果优于 0.1 mm,说明柔性系统的稳定性较好。

4.3 测量实例

为了验证柔性测量系统能够实现复杂零件免粘贴合作目标的可行性,使用实验所搭建的测量系统对一个包含曲率、异形孔的零件进行测量,如

表 2 重复测量精度实验数据

Table 2 Repeated measurement precision experimental data

Serial number	x / mm	y / mm	z / mm
1	1564.655	-650.785	-860.436
2	1564.648	-650.779	-860.388
3	1564.637	-650.821	-860.367
4	1564.647	-650.813	-860.459
5	1564.645	-650.832	-860.447
6	1564.629	-650.775	-860.401
7	1564.654	-650.825	-860.398
8	1564.617	-650.752	-860.442
9	1564.663	-650.831	-860.379
10	1564.636	-650.775	-860.407
11	1564.681	-650.774	-860.456
12	1564.626	-650.756	-860.388
13	1564.644	-650.829	-860.401
14	1564.658	-650.791	-860.416
3σ	0.047	0.083	0.086

图 11 所示。将工件置于测量辅助工装上,启动柔性测量系统,测量初始站位,采用本文所提出的坐标转换算法,将工件坐标系下测量路径规划测量坐标

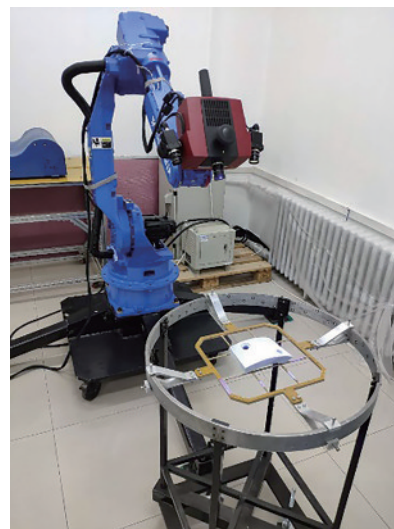


图 11 多特征复杂零件测量

Fig. 11 Measurement of multi-features complex parts

系转换至机器人基座坐标系下,通过调用仿真软件预先仿真的测量站位点(包括 12 个测量站位点如表 3 所示),驱动柔性测量系统,完成零件测量。

表 3 多特征复杂零件自动测量机械手位置

Table3 Multi-feature complex parts automatic measurement manipulator position

Serial number	X / mm	Y / mm	Z / mm	$R_x / (^{\circ})$	$R_y / (^{\circ})$	$R_z / (^{\circ})$
1	993.977	-38.314	529.875	59.0847	-24.6469	101.8146
2	1038.727	-132.692	546.725	59.3185	-38.6348	103.0469
3	1096.241	-331.921	494.674	43.2820	-66.5047	117.3944
4	1224.882	-369.999	541.026	45.9820	-50.9580	162.3511
5	1271.108	-321.508	623.037	123.6948	-43.0365	47.4343
6	1289.774	-199.100	675.893	133.5328	-36.1505	41.7240
7	1376.074	-47.454	697.958	118.1917	-24.5146	73.5471
8	1360.720	39.387	695.143	124.2321	-5.3254	81.3530
9	1403.427	185.290	631.219	116.7444	2.6653	94.9790
10	1454.913	191.956	554.876	60.6811	-17.0922	10.2865
11	1068.734	259.451	496.732	64.3929	-2.4811	78.5036
12	1031.300	115.174	526.958	61.3720	-14.8742	89.8495

完成检测点云数据与理论数模的最佳拟合处理,进行拟合结果的三维偏差比较,如图 12 所示,柱状图为偏差分布,单位为 mm,精度在 $\pm 0.0823 \text{ mm}$ 以内。分析偏差分布柱状图可知,柔性测量系统具有免粘贴合作目标多特征复杂零件的检测能力,并保留复杂零件的局部特征。

以上实验说明引入 MaxShot-3D 辅助测量系统的方案能够使柔性系统保持较高的测量精度和稳定性,提高柔性测量系统针对不同工件的自动测量能力。

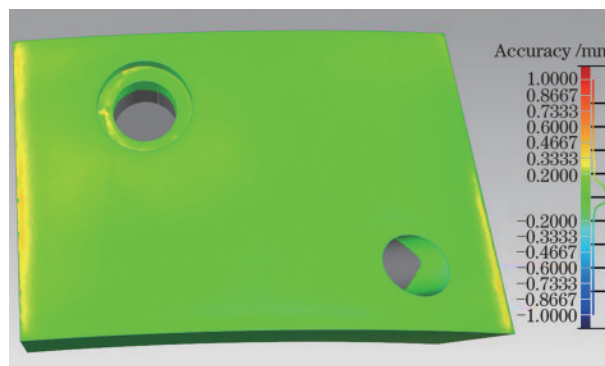


图 12 多特征零件偏差对比结果

Fig. 12 Comparison results of multi-feature parts deviation

5 结 论

本文介绍一种基于 MaxShot-3D 的复杂零件三维形貌柔性测量系统,该系统主要由传统柔性测量系统和 MaxShot-3D 测量辅助系统组成,在研究柔性系统中投影光栅测量系统的原理、MaxShot-3D 测量辅助系统原理和 NDT-ICP 匹配算法的基础上,建立检测系统数学模型。通过完成长度精度验证实验、重复测量精度验证实验和免粘贴合作目标测量实例,说明该柔性系统的可靠性和可行性。各项实验验证结果表明:长度测量精度的均方根误差小于 0.2 mm,最大相对误差为 0.04926%,在 3σ 评价标准下,测量系统的重复测量精度小于 0.1 mm。因此,所搭建测量系统能够满足工业生产对测量精度的要求。

参 考 文 献

- [1] Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase-shifting and modulation ratio[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704003.
卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制比的结构光三维形貌垂直测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704003.
- [2] He Q X, You Z Z, Kong X D. Positioning error compensation method of industrial robot based on closed-loop feedback of position and orientation[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(7): 872-876.
何庆稀, 游震洲, 孔向东. 一种基于位姿反馈的工业机器人定位补偿方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 872-876.
- [3] Bin D E. Research on intelligent 3D vision measurement method of robot based on linear-structured light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
彬德尔. 基于线结构光视觉的机器人智能三维测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [4] Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 214-228.
马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 214-228.
- [5] Liu L, Ma G Q, Gao Y, et al. Flexible measurement technology of complex curved surface three-dimensional shape robot based on iGPS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304006.
刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304006.
- [6] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. High-quality three-dimensional shape measurement based on binary particle swarm dithering optimization [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004003.
蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于离散粒子群抖动优化的高质量三维形貌测量[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004003.
- [7] Yang S R, Yin S B, Ren Y J, et al. Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3239-3246.
杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.
- [8] 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.
- [9] Fan H Y, Xu X P. Research on reverse method of shaped parts based on ATOS [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(2): 36-39, 46.
范弘悦, 徐熙平. 基于 ATOS 的异形件逆向方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 36-39, 46.
- [10] Li Y L, Jiang L B. 3D vision measurement based on close-range industry photogrammetry[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(6): 45-48.
李云雷, 蒋灵搏. 基于近景工业摄影的三维视觉测量[J]. 制造业自动化, 2015, 37(6): 45-48.
- [11] Zhang H Y, Li Z C, Feng Q Q, et al. Fast targets recognition method on online vision position and orientation measurement [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(2): 145-147.
张宏宇, 李宗春, 冯其强, 等. 视觉在线位姿测量中标志点快速识别方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(2): 145-147.
- [12] Feng Q Q. Artificial targets math and high-speed calculation of self calibration bundle adjustment in digital industrial photogrammetry [D]. Zhengzhou: PLA University of Information Engineering, 2007.

- 冯其强. 数字工业摄影测量中的标志点匹配和自检校光束法平差快速解算[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
- [13] 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.
- [14] Shi X Y, Peng J J, Li J P, et al. The iterative closest point registration algorithm based on the normal distribution transformation [J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 147: 181-190.
- [15] Tang Z R, Liu M Z, Jiang Y, et al. Point cloud registration algorithm based on canonical correlation analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0404006.
- 唐志荣, 刘明哲, 蒋悦, 等. 基于典型相关分析的点云配准算法[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0404006.
- [16] Wang W F, Huang G P, Jiang T, et al. Research and tests of the length calibration method for the scale-bar in industrial photogrammetry [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(1): 52-55, 60.
- 王伟峰, 黄桂平, 姜彤, 等. 工业摄影测量中基准尺长度标定方法研究与试验[J]. *测绘科学技术学报*, 2015, 32(1): 52-55, 60.
- [17] Li W, Dong M L, Sun P, et al. Relative orientation method for large-scale photogrammetry with local parameter optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9): 2053-2060.
- 李巍, 董明利, 孙鹏, 等. 大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(9): 2053-2060.