

# 基于工业摄影扫描测量方法的航空部件再制造 逆向建模实践

马彤彤<sup>1,2</sup>, 吕传景<sup>2</sup>, 朱文芳<sup>1</sup>, 黄桂平<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450045;

2. 郑州辰维科技股份有限公司, 郑州 450001)

**[摘要]** 为对某航空部件进行再修理、再制造, 需对机翼后缘测绘和逆向建模, 提出一种精度逐级控制的测绘方法。利用高精度激光跟踪仪对部件进行一级控制, 并用工业摄影扫描测量系统进行二级控制, 进而完成对点云的“填充式”扫描, 最终将获取的点云数据用于逆向建模。以某机翼后缘结构部件测量为例, 通过精度分析专用软件将实际建模结果与测绘数模进行比对, 误差均在 0.2mm 以内, 完全满足再制造设计要求。通过验证说明该测量方法建立的测绘数模精度高、效率快, 为逆向建模技术提供了一种新的测量思路与方法, 同时可作为航空产品测量检测的重要手段。

**关键词:** 逆向建模; 工业摄影扫描测量; 跟踪仪测量; 测绘数模; 点云数据

## Reverse Modeling Practice of Aviation Parts Remanufacturing Based on Industrial Photographic Scanning Measurements

MA Tongtong<sup>1,2</sup>, LÜ Chuanjing<sup>2</sup>, ZHU Wenfang<sup>1</sup>, HUANG Guiping<sup>1</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Chenway Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

**[ABSTRACT]** In order to meet the demand of aeronautical component remanufacturing design, it is proposed to use the high precision laser tracker to control the wing trailing edge structural components and obtain the point cloud data by means of industrial photographic scanning measurements. Finally, by using the obtained point cloud data to make the reverse modeling task, the results of surveying and modeling are evaluated by Geomagic and Control. The experimental results show that the method has high accuracy, fast efficiency and satisfies the remanufacturing design requirements, which provides a new measurement idea and method for reverse modeling technology.

**Keywords:** Reverse engineering; Industrial photographic scanning measurement; Tracker measurement; Mathematical model of surveying and mapping; Point cloud data

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.096

近年来, 汽车、飞机等行业的发展, 对复杂曲面设计的要求大大增加, 逆向工程应运而生。在我国航空产业的发展过程中, 为了缩短与国外技术差距、提高自身研发能力、获取其设计思路, 根据现有的零件模型及 CAD 技术重构实物产品就成了有效的手段<sup>[1-2]</sup>。其主要过程是通过对物体表面轮廓数据采集, 并利用相应的软件进行三维建模<sup>[3-5]</sup>。

逆向工程获取实物点云数据的方法有很多, 国内外对此作了大量的研究。美国 GSI 公司生产的工业摄影测量系统以及国内西安交通大学研发的 IDSS 系统针

对少量点云测量精度高, 但无法获取高密度点云数据。逆向工程中, 常采用三维激光扫描仪获取部件高密度点云, 其测量精度直接影响到最终产品的制造精度<sup>[6]</sup>。加拿大 Inspeck 公司研发了单幅光栅相移技术, 但其精度无法满足工业测量精度。德国 GOM 公司推出的 ATOS Standard 产品也有其缺点<sup>[7]</sup>, 部分系列三维激光扫描产品精度虽高, 但其拼接误差大, 无法应用到大尺寸工件测量中。以上基于单一技术的点位测量各有千秋, 但是在曲面特征复杂的情况下, 完成高精度建模难度很大。

考虑到上述测量难点,本文提出采用多种技术融合的测量方法。将MPS工业摄影测量系统与HandyScan700™手持扫描仪组合成新型的工业摄影扫描测量系统,并将其应用于后续密集点云数据获取中。通过对点云数据处理等步骤,来完成对曲面复杂模型的高精度重建。

### 1 航空部件测量实施方案

本文项目拟采用高精度跟踪仪对选取的基准点进行测量,以此作为一级控制;再通过摄影测量标志点三维坐标进行二级控制;最后采用扫描仪进行“填充式”扫描点云,得到测绘数模。最终将得到的测绘数模进行逆向重建,并在专业软件中进行建模成果分析,具体路线如图1所示。

#### 1.1 工业摄影扫描测量获取点云数据

##### 1.1.1 工业摄影扫描测量系统

工业摄影扫描测量系统(图2),由MPS/S单相机工业摄影测量系统与手持激光扫描仪Handyscan700™组成,具有大范围、高速度、高精度等特点。通过相机不断移动位置,对粘贴有回光反射标志点的物体进行多摄站拍摄来获取被测物体的多个立体像对(见图3),构成多目立体视觉<sup>[8]</sup>。设物方点由j个摄站(j条光线)相交,则共有j个共线方程:

$$\left. \begin{aligned} x_{ij} - x_{0j} + \Delta x_{ij} = & -f_j \frac{a_{1j}(X_i - X_{Sj}) + b_{1j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{1j}(Z_i - Z_{Sj})}{a_{3j}(X_i - X_{Sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{Sj})} \\ y_{ij} - y_{0j} + \Delta x_{ij} = & -f_j \frac{a_{2j}(X_i - X_{Sj}) + b_{2j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{2j}(Z_i - Z_{Sj})}{a_{3j}(X_i - X_{Sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{Sj})} \end{aligned} \right\} (1)$$

式中,  $x_0, y_0$  和  $f$  称为像片的内方位元素,用来确定投影中心在像空间坐标系中对像片的相对位置。实际成像时,主点的像平面坐标不严格为零,存在一个微小值记为  $(x_0, y_0)$ 。另外,镜头的物镜畸变等干扰也存在偏差  $(\Delta x, \Delta y)$ , 其中的  $a_i, b_i, c_i$  代表的9个元素是3个独立旋转角  $\omega, \varphi$  和  $\kappa$  的函数。

通过式(1),利用空间前、后方交会原理以及配套软件联立计算得到被测物特征点的三维坐标。将这些点坐标值导出,作为后续点云扫描的测量控制网数据。随后再导入到扫描仪的Vxelements联机软件中,设置好扫描参数,即可从任一位置开始工件的外形点云扫描。手持扫描仪上两台相机利用激光束以点云的形式反映出被测物表面的三维数据,操作简单、高效灵活<sup>[9-11]</sup>。

##### 1.1.2 基准点与标志点的布设

高精度的测量需要高精度的基准点作为控制点,拟采用激光跟踪仪对基准点进行坐标采集。具体将基

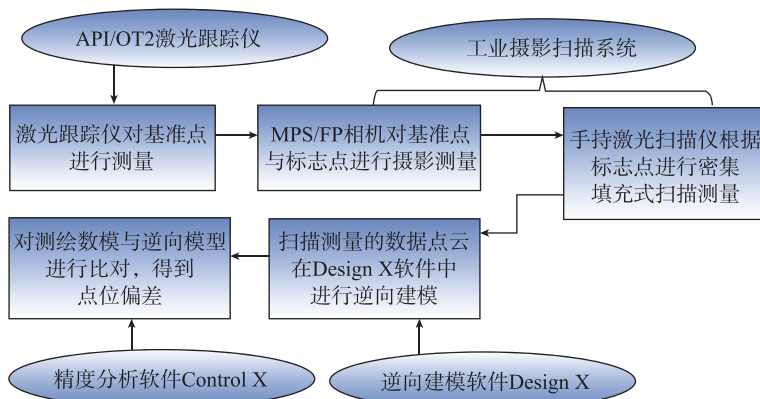


图1 航空部件实施方案

Fig.1 Implementation of aeronautical components



图2 数字工业摄影扫描测量系统

Fig.2 Digital industrial photographic scanning measurement system

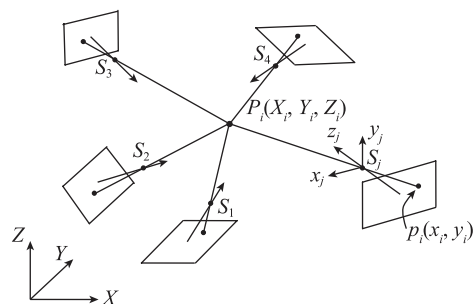


图3 多摄站交会几何

Fig.3 Multi-shot intersection intersection geometry

座(基准点)布设在地面稳定处,如图4所示。同时根据整个部件的结构关系粘贴摄影测量标志点及编码点。标志点的布设应尽量采用网状结构,立体、均匀且点间距合理,同时尽可能无规律粘贴,以便在扫描中准确识别扫描定位点(摄影标志点)的位置,减少点云配准错误,便于点云拼接(图5)。

### 1.1.3 测量控制网的建立

要得到高精度的三维密集点云,建立高质量测量控制网是必不可少的步骤。本项目拟采用以下测量方案:

第一步:利用激光跟踪仪建立整个部件自身的一级测量控制网。激光跟踪仪架设位置如图6所示,手持激光跟踪仪靶球依次放入基座位置,激光跟踪仪可自动跟踪测量基准点的三维坐标值。通过高精度激光跟踪仪测量得到的基准点可为下一步摄影测量提供一级控制。

第二步:利用摄影测量建立二级控制网。利用工业摄影测量系统对被测对象进行全局测量,其中涵盖了上一步对基准点的测量,基座上的摄影测量靶球可与激光跟踪仪靶球替换,见图7。测量网形的合理性直接影响摄影测量最后成果的精度,因此在摄影测量中应根据实际情况采用不同方式。结合部件自身的外形尺寸,综合考虑相机镜头视场角、摄影距离、测量精度、测量场地等问题。在采用FP测量相机对部件摄影获取高质量“准二值影像”的同时,可在地面上布设足够多的编码点以保证在每张图像中的编码数量,便于自动匹配。摄影测量拍摄结束后将图片导入到工业摄影测量MPS软件中处理,利用整体光束法平差得到待测物体表面上的所有点的空间三维坐标值。通过摄影测量获得的三维标志点云,可以为下一步扫描工作提供控制。

第三步:利用手持三维激光扫描仪进行“填充式”扫描。在扫描部件点云数据时,若部件过大,没有足够的点进行控制,会带来拼接误差,且该误差随着距离增加而逐步累积,将会给点云数据的精确性带来较大影响。Handyscan700™三维激光扫描仪在任意扫描瞬间,首先利用它的两个立体相机对物体的目标点进行立体测量,然后通过导入的摄影测量标志点(扫描定位点)间的位置关系搜索出部件上粘贴的对应标志点,从而利用两相机的图像平面与被测物之间构成三角形,配合双相机投射的激光点云对物体进行“填充式”点云扫描(图8),数据格式为STL且能自动生成三角格网面,获得被测物体整体高精度的扫描点云数据,从而用于后期的逆向建模。

## 1.2 基于点云数据的逆向建模

### 1.2.1 建模软件

本文采用的软件为Geomagic Studio、Control X和Design X。Geomagic Studio主要处理网格数据,调

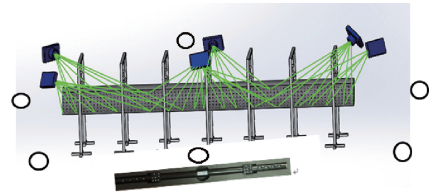


图4 基准点的布设

Fig.4 Layout of the reference point



图5 标志点与编码点的布设

Fig.5 Layout of marking points and coding points

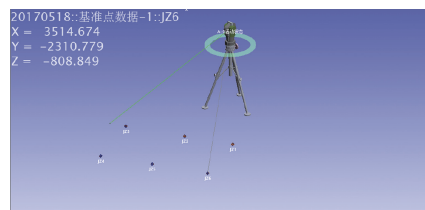


图6 激光跟踪仪测量6个基准点

Fig.6 Laser tracker measurement of six reference points



图7 激光跟踪仪靶球与摄影靶球

Fig.7 Laser tracker target ball and photography target ball

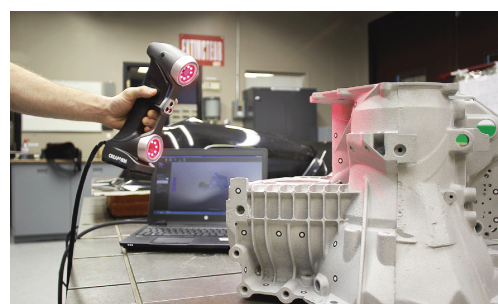


图8 手持激光扫描仪原理

Fig.8 Hand-held laser scanner principle

正坐标,去除噪声和修补网格,简化数据和拼接数据;Control X为质量检测软件,检测逆向成果与扫描数据的偏差。Design X为逆向建模软件,主要根据扫描的点云数据提取轮廓线进行模型逆向操作。

### 1.2.2 逆向建模过程

内业数据处理与逆向建模主要步骤为:坐标调正、

去噪、修补、简化、逆向。网格化数据处理在 Geomagic Studio 中进行,不过度对扫描数据进行光滑、大尺度去噪等操作,确保数据的原始性。

根据逆向建模需求处理扫描数据成果,在统一坐标系之后(根据要求建立某一工件坐标系,所有的数据均统一到这个坐标系进行处理),进行删除多余数据、简化数据、修补必要缺失数据的操作,最后导出 stl 格式的数据。

本次采用的零部件逆向建模的方法是基于点云数据进行曲面重构和实体建模。具体在建模软件 Geomagic Design X 中建立面片草图,截取轮廓线(图 9),通过扫描数据的轮廓线对曲面进行造型设计,构建曲面元素,结合实物外形,采用合适的方法进行逆向建模,并对建成的模型进行精度分析<sup>[12]</sup>。

### 1.2.3 精度分析与验证

基于航空零件制造精度要求高的特点,逆向建模过程中应对建模误差进行实时严格控制,从而保证最终的零件实体数模符合设计公差要求,故需要进行建模精度的验证。扫描数据为原始数据,具体采用原始数据与建成的模型进行比对,保证建模模型光滑平整(无凹坑和突变),相邻部件无超限阶差。

将建成数模与实际数模导入 Geomagic Control 软件中进行建模偏差比较,手动采集模型上的点,利用创建注释等操作可以得出每一点的偏差。

## 2 实例应用

针对某系列飞机部件的使用需求,测绘精度要求型面测绘标准偏差  $\pm 0.2\text{mm}$ ,数模精度与实际部件接口区偏差  $\pm 0.2\text{mm}$ 。

以飞机左机翼扰流板为例,基于前文提及的精度逐级控制的方法来进行实例验证。采用郑州辰维科技股份有限公司集成的工业摄影扫描测量系统,对飞机零部件进行点云获取。首先采用激光跟踪仪系统 API/OT2 对部件周围 6 个基准点坐标进行跟踪测量。接下来采用 MPS/S 单相机摄影测量系统进行测量,获取被测工件图片(图 10)。摄影测量拍摄时,根据扰流板摆放情况来改变摄影位置(采用环绕式),摄站距离工件约 2m。拍摄结束后将照片导入到配套软件 MPS 中可以自动解算出待测部位上所有的标志点坐标及基准点坐标(图 11)。同时,可观察到相机拍摄的网形以及测量光束(图 12),经图像预处理、标志识别与定位、图像匹配、空间三角交会及光束法平差等过程后得到待测点的三维坐标。

利用激光跟踪仪提供的基准点坐标值作为理论参考并将其在 SA 软件中转换到摄影测量坐标系下(图 13),统一坐标系后导出摄影测量的点位坐标,再将摄影测量点坐标导入到手持扫描仪的 Vxelements 联机软

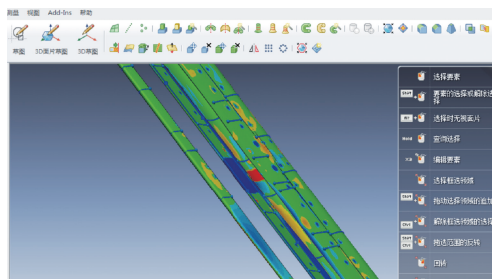


图9 建模过程实时精度控制

Fig.9 Modeling process real-time accuracy control

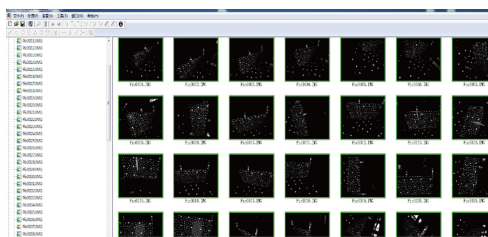


图10 不同位置拍摄的摄影测量照片

Fig.10 Photogrammetric measurements taken at different locations

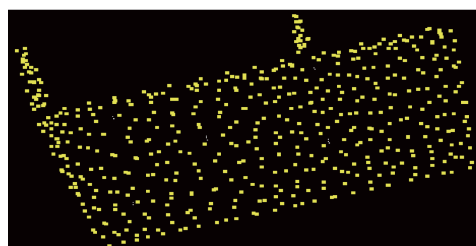


图11 摄影测量三维坐标点

Fig.11 Photogrammetric 3D coordinate points

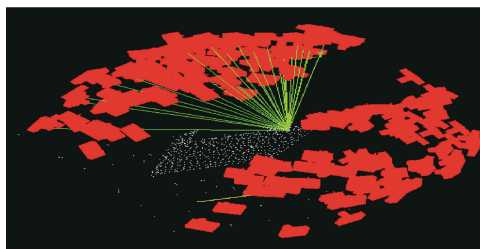


图12 相机拍摄位置

Fig.12 Camera shooting position

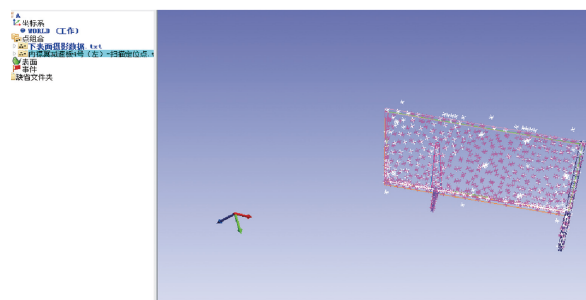


图13 坐标对齐效果

Fig.13 Coordinate alignment

件中(以此作为定位点),启动校准后的Handyscan700™扫描仪,从任意位置开始多角度、全方位地扫描,尽量覆盖部件外形所有特征。扫描结束后,工件所有的外形点云数据均被精确测量和保存在统一的摄影测量坐标系下。以最终获得的高密度点云为逆向建模提供数据基础。

根据扫描的点云数据完成逆向建模,网格化处理后的数据与建模成果如图 14、图 15 所示。

利用 Geomagic Control X 软件分析随机选取的若干测绘数模上的点与实际建成模型的点位偏差,分别如图 16 和表 1 所示。航空部件表面偏差图及数据,如图 17 和表 2 所示。

在测量过程中,一级控制中的跟踪仪测量误差均值为 0.01mm,二级控制中的工业摄影测量误差 RMS 为 0.02mm 左右,三级扫描测量误差均值为 0.03mm。通过三级控制后的测量误差为 0.02mm,建模偏差精度与操作人员有关,将精度控制在要求范围内,即型面测绘偏差为 ±0.2mm,最终结果满足要求。试验数据结果与原始扫描数据进行三维对比分析,误差不大于 0.2mm,远高于测量需求。说明融合多种测量方法的优势并进行综合运用,可高效完成数据采集、点云数据处理和生成三维实体,验证了此方法在工程装备零部件逆向建模方面的良好效果。

### 3 结论

本文所采用的以工业摄影扫描测量来获取点云数据并进行逆向建模的方法与传统点云建模方法相比,在建模效率和精度上有显著优势。该方法几乎可以弥补摄影

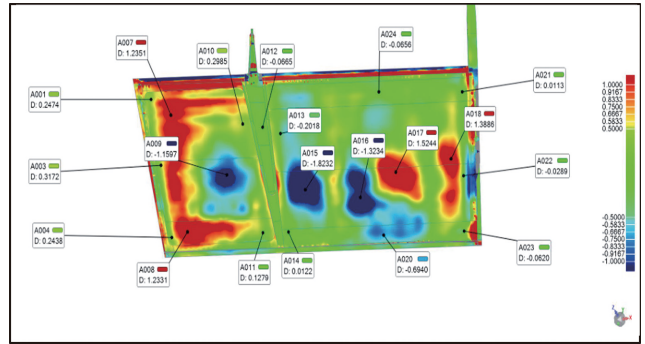


图16 Geomagic Control X分析软件每个部分偏差  
Fig.16 Geomagic Control X analysis software for each partial deviation

表1 实际模型上若干点的偏差值

| 名称   | 偏差      | 偏差 X    | 偏差 Y    | 偏差 Z    |
|------|---------|---------|---------|---------|
| A001 | 0.0158  | -0.0096 | 0.0080  | -0.0097 |
| A002 | 0.0075  | -0.0045 | 0.0038  | -0.0046 |
| A003 | -0.0125 | 0.0075  | -0.0063 | 0.0077  |
| A004 | 0.0287  | -0.0173 | 0.0144  | -0.0178 |
| A005 | -0.0367 | 0.0222  | -0.0185 | 0.0227  |
| A006 | 0.1415  | 0.0855  | -0.0709 | 0.0876  |
| A007 | 0.01161 | -0.0097 | 0.0081  | -0.0099 |

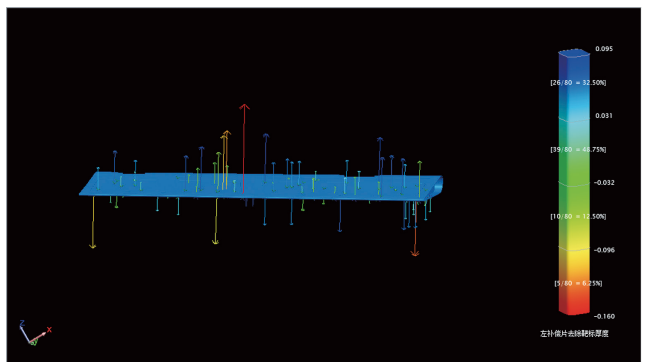


图17 航空部件表面偏差图  
Fig.17 Aeronautical parts surface deviation vector

表2 航空部件表面偏差数据 mm

| 统计量      | $d_x$  | $d_y$  | $d_z$  | 长度 Mag       |
|----------|--------|--------|--------|--------------|
| 最小值      | -0.575 | -0.652 | -0.489 | -0.957       |
| 最大值      | 0.632  | 0.589  | 0.533  | 1.053        |
| 平均值      | 0.012  | -0.011 | 0.01   | 0.008        |
| 测量误差 RMS | 0.18   | 0.175  | 0.163  | 0.3          |
| 公差范围     | —      | —      | —      | ±19.335      |
| 公差之内     | —      | —      | —      | 134 (100.0%) |
| 公差之外     | —      | —      | —      | 0 (0.0%)     |

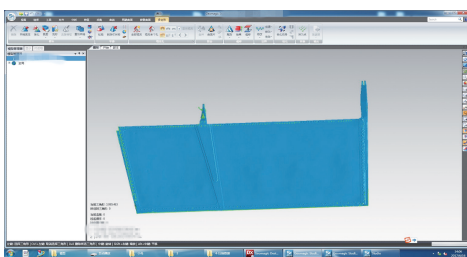


图14 Studio网格化处理后的数据点云  
Fig.14 Studio lattice processing data point cloud

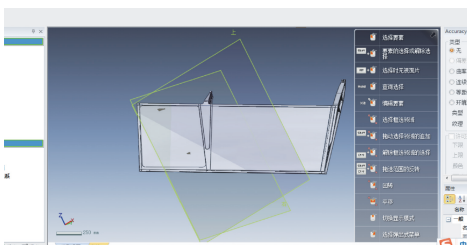


图15 建模成果  
Fig.15 Modeling results

测量未涉及密集点云的问题,并保证了数据的高精度。

实践表明采用该方法所建立的测绘数模精度完全满足项目要求,该方法切实可行,可以作为一类航空产品再制造、再修理的重要测量手段。同时可为技术人员在飞机研制中获取设计思路等提供基础性数据。该方法能够广泛应用于有高精度需求领域的逆向建模中,可节省时间、人力及物力。

### 参考文献

[1] 周小东,成思源,杨雪荣,等.基于参数化逆向建模的仿真优化设计[J].组合机床与自动化加工技术,2015(11):14-18.

ZHOU Xiaodong, CHENG Siyuan, YANG Xuerong, et al. Simulation and optimization design based on parametric reverse modeling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(11): 14-18.

[2] 张剑清,孙明伟,郑顺义,等.基于轮廓约束的摄影测量法元青花瓶数字三维重建[J].武汉大学学报(信息科学版),2009,34(1):7-10.

ZHANG Jianqing, SUN Mingwei, ZHENG Shunyi, et al. 3D reconstruction of a Yuan Dynasty blue-and-white porcelain based on profile constraint and photogrammetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(1): 7-10.

[3] 刘伟军,孙玉文.逆向工程原理、方法及应用[M].北京:机械工业出版社,2008.

LIU Weijun, SUN Yuwen. Reverse engineering principles, methods and applications[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008.

[4] 郝建平.虚拟维修仿真理论与技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

HAO Jianping. Virtual maintenance simulation theory and technology[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2008.

[5] SEOKBAE S, HYUNPUNG P, KWAN H L. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 889-897.

[6] 王永信,邱志慧.逆向工程及检测技术与应用[M].西安:西安交通大学出版社,2014.

WANG Yongxin, QIU Zhihui. Reverse engineering and detection technology and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2014.

[7] 秦龙,涂群章,赵建勋,等.基于FARO测量系统的工程装备零部件逆向建模和虚拟维修研究[J].矿山机械,2011,39(12):98-101.

QIN Long, TU Qunzhang, ZHAO Jianxun, et al. Study on reverse modeling and virtual maintenance of engineering equipment based on FARO measurement system[J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(12): 98-101.

[8] 黄桂平.数字近景工业摄影测量理论、方法与应用[M].北京:科学出版社,2016.

HUANG Guiping. The theory, method and application of digital close-up industrial photogrammetry[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[9] 张序,李兆堃,张婉莹,等.手持式激光扫描仪在文物测量中的应用研究[J].测绘通报,2013(12):41-44.

ZHANG Xu, LI Zhaokun, ZHANG Wanying, et al. Application

research on portable laser scanner in heritage measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(12): 41-44.

[10] 金雯.基于三维激光扫描技术的交通事故现场快速处理[D].上海:同济大学,2007.

JIN Wen. Traffic accident quick processing based on 3D laser scanning technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

[11] 汪建波,孙亦东.手持式三维激光扫描仪在文物保护中的应用[J].江西测绘,2017(1):47-50.

WANG Jianbo, SUN Yidong. The application of hand-held 3D laser scanner in the protection of cultural relics[J]. Jiangxi Cehui, 2017(1): 47-50.

[12] 彭艳敏,党建卫.基于模线样板飞机蒙皮类零件的逆向设计[J].CAD/CAM与制造业信息化,2013(8):46-49.

PENG Yanmin, DANG Jianwei. Reverse design of aircraft skin parts based on mold model[J]. Digital Manufacturing Industry, 2013(8): 46-49.

通讯作者:黄桂平,副教授,研究方向为工业近景摄影测量, E-mail: gui-ping.huang@chenway.cn.

(责编 逸飞)

(上接第95页)

究[J].人工晶体学报,2013,42(7):1315-1318.

WANG Fuzhang, CHEN Bin, SUN Jun, et al. Research on lower stress lithium niobate electro-optical Q-switches[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(7): 1315-1318.

[6] KOECHNER W. 固体激光工程[M].北京:科学出版社,2002:421-437.

KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 421-437.

[7] MELNIKOV K. Electro-optic Q-switch driver design specifics[C]/Proceedings Volume 7822, Laser Optics 2010. San Diego: SPIE Optical Engineering+Applications, 2011: 1-7.

[8] 万玲玉,苏世达,刘立人,等.基于晶体双折射和电光效应设计的90°2×4空间光桥接器[J].中国激光,2009,36(9):2358-2361.

WAN Lingyu, SU Shida, LIU Liren, et al. Design of a new 90° 2×4 hybrid based on the birefringence and the electro-optic effect of crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2358-2361.

[9] 张铁强,申兹国,郭山河.电光晶体光学性质的折射率椭球分析法[J].量子电子学,1992,9(3):242-245.

ZHANG Tieqiang, SHEN Ziguo, GUO Shanhe. Analysis on optical characteristics of electro-optic crystals from refractive indices ellipsoid[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1992, 9(3): 242-245.

[10] HOB DEN M V, WARNER J. The temperature dependence of the refractive indices of pure lithium niobate[J]. Physics Letters, 1966, 22(3): 243-245.

通讯作者:顾海栋,博士、工程师,研究方向为激光系统设计, E-mail: hagongda2008@126.com.

(责编 逸飞)