

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.11.008

基于 SFM 的退役零件失效 特征表征精度影响研究*

张 琦¹, 张秀芬^{1*}, 蔚 刚²

(1. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古机电职业技术学院 教学实习部, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要:针对失效特征与失效程度影响退役零件可再制造性问题,为了快速、准确地表征失效零件的失效程度,提出了基于从运动中恢复形状和泊松表面重建的退役零件失效特征表征方法。构建了由智能手机、Visual SFM、MeshLab 和 SolidWorks 软件构成的实验平台,应用控制变量法和正交实验法研究了照片数量、拍摄高度、失效程度、零件形状对表征精度的影响;应用所提方法和实验平台对退役破碎锤进行了案例研究,对其失效特征进行了表征和量化实验。研究结果表明:平拍拍摄、箱体类、失效程度大的零件具有较高的重建精度和表征精度;所提方法能够准确、高效地重构退役零件,可为快速评估退役零件可再制造性提供数据支撑。

关键词:从运动中恢复形状;泊松表面重建;三维重建;失效特征表征;重建精度

中图分类号:TH17;TP24

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)11-1305-06

Influence of the accuracy of failure characterization of retired parts based on SFM

ZHANG Qi¹, ZHANG Xiu-fen¹, YU Gang²

(1. College of Mechanical Engineer, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Department of Teaching Practice, Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot 010070, China)

Abstract: Aiming at the problems of failure characteristics and failure degree affect remanufacturability of retired parts, in order to rapid and accurate characterization of the failure of parts, a method to characterize the failure characteristics of retired parts was presented based on shape from motion and Poisson surface reconstruction. An experimental platform composed of smart phone, Visual SFM, MeshLab and SolidWorks software was constructed. The effects of the number of photos, shooting height, failure degree and part shape on the characterization accuracy were studied by using control variable method and orthogonal experiment method. The method and experimental platform were used to study the case of decommissioned crushing hammer. The results indicate that the flat shooting, box type and parts with large failure degree have higher reconstruction accuracy and characterization accuracy. The proposed method can reconstruct retired parts accurately and efficiently, and provide data support for rapid remanufacturability evaluation of retired parts.

Key words: shape from motion (SFM); Poisson surface reconstruction; 3D reconstruction; failure characterization; reconstruction accuracy

0 引 言

退役机械零件往往存在多种失效模式,比较典型

的失效形式有磨损、腐蚀、变形和断裂等。不同的失效模式对应着不同的失效特征,如失效面积、失效长度、失效体积等。其中,失效特征的识别与表征对于快速

收稿日期:2020-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51965049,51565044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017MS(LH)0510);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY19272);内蒙古机电职业技术学院科学研究项目(NJDZJR1813)

作者简介:张琦(1996-),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事机械设计和再制造方面的研究。E-mail:1254824421@qq.com

通信联系人:张秀芬,女,教授,硕士生导师。E-mail:xxff_6188@163.com

评估零部件的可再制造性具有重要意义。

通常,机械零件内部的失效特征多采用超声波无损探伤、电磁波无损探伤、射线检测等^[1-3]技术进行表征和量化。机械零件表面的失效特征则多采用模糊评价法、3D 扫描仪重建法等^[4-5]进行表征和量化。其中,模糊评价法通过专家评价结果进行失效特征量化,主观性较大,评价不精确。3D 扫描仪重建法则通过 3D 扫描仪对物体进行扫描,并构建失效零件的三维模型,需要特定的设备,成本高、过程复杂、效率低。

基于图像的三维重建即是通过照相机中的传感器拍摄物体的图像,来获得物体的三维模型。图像三维重建分为多摄像头重建和单一摄像头重建^[6-7]。单摄像头重建包含从聚焦中获取深度(depth from focus, DFF)^[8]、从阴影中恢复形状(shape from shading, SFS)^[9]、从运动中恢复形状(SFM)^[10]等。其中:SFM 方法具有重建精度高、鲁棒性强等特点,是近年来研究和应用最广的方法。李文达等^[11]以无人机拍摄的地面信息图片为输入,基于 SFM 法进行了地面三维模型重建。李莹等^[12]采用 SFM 方法重建了城市植被。

为了克服已有失效特征表征中存在的精度低、成本高等不足,笔者提出基于 SFM 的失效特征表征的方法,并研究失效特征表征精度的影响因素,为提高可控制表征精度提供理论支持。

1 退役零件失效特征表征方案

以退役机械零件表面失效特征为研究对象,根据退役零件照片序列中的特征信息,笔者基于 SFM 法重建出该零件的稀疏点云,通过 CMVS/PMVS 法重建出该零件的稠密点云,通过泊松表面重建算法获得零件三维图形,导入到 SolidWorks 进行网格实体转换,并与未失效零件进行对比,获得失效区域的失效信息。

退役零件失效特征表征方案由退役零件三维重建和退役零件失效特征表征两部分组成。退役零件失效特征表征方案流程如图 1 所示。

退役零件失效特征的三维重建旨在通过 SFM 和表面泊松重建方法恢复退役零件的三维图形,其具体的步骤如下:

(1)构建退役零件图像集。通过智能手机拍摄采集退役零件失效特征的图像集,不需要提前对相机位置和退役零件的相对位置进行标定,通过合适的拍摄角度和拍摄位置采集到高精度的图片,高精度的图片可以优化三维重建的精度。因此,图片集应包含退役零件尽可能多的失效信息,图片与图片间应包含相同的特征点;

(2)构建退役零件三维点云。构建退役零件图像

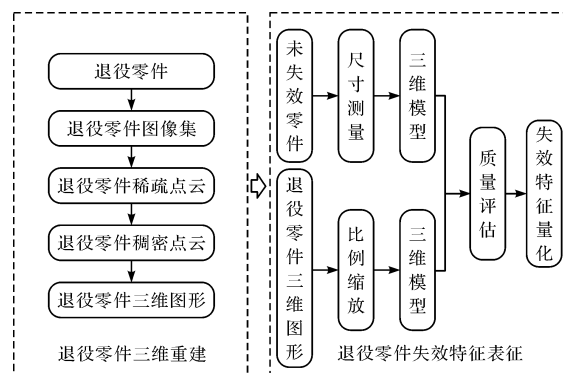


图 1 退役零件失效特征表征方案流程图

集后,将图像集导入到 Visual SFM 软件中(该软件中包含图片特征信息提取和匹配模块,SFM 方法重构稀疏点云模块和 CMVS/PMVS 重构稠密点云模块),应用以上模块对图像集进行处理,重构出退役零件的稠密点云,获得了包含相机相对位置、稀疏点云和稠密点云信息的文件;

(3)构建退役零件三维图形。将包含退役零件相关信息的文件导入到 MeshLab 软件中,去除退役零件稠密点云中的冗余点,应用泊松表面重建模块,拟合出最接近退役零件表面的三维模型,通过修复流形边缘得到最终的三维图形。

退役零件失效特征表征旨在通过对比退役零件和未退役全新零件的三维模型,得到量化的失效信息和直观对比图。为快速准确评估退役零件的可再制造性提供数据支撑,其步骤如下:

(1)构建退役零件的三维数字化模型。将退役零件失效特征三维重建出的三维图形以多边形数据格式(PLY)保存,导入到三维软件 SolidWorks 中选择图形实体进行打开,设置单位长度为毫米,将图形转换成网格实体。由于其三维重建过程中丢失了失效零件的尺寸信息,需要测量失效零件上的部分长度信息,对重建后三维模型中相同点的长度信息进行比例缩放,以还原真实尺寸的失效零件的三维模型;

(2)构建未失效零件的三维数字化模型。未失效零件其尺寸完好,通过测绘或原设计厂获得零件的三维数字化模型。

(3)量化失效特征。对构建的失效和未失效零件的三维数字化模型进行质量评估仿真,通过分析仿真获得失效零件和未失效零件的失效体积、表面积、质量等失效信息,对量化的数据求其差值,得到失效零件在该失效形式下的失效量。

2 失效特征重建精度影响因素

为了提高失效特征的表征精度,笔者根据退役零

件失效特征表征方案流程及 SFM 方法的特点,提取出 3 个影响重建精度的影响因素,主要包括零件形状、失效程度、照片采集数量和角度等。

笔者采用控制变量法对影响因素进行实验研究,采用正交实验得到最优化的重建结果。

2.1 照片采集数量和拍摄高度的影响

SFM 方法的原理在于从运动中恢复形状,其中涉及到重建图片内的特征信息,图片的数量和拍摄高度会影响特征信息量,从而影响重建精度。

首先,笔者以重建物体为坐标原点建立三维坐标系,在该坐标系中研究照片数量和拍摄高度的影响。

将拍摄高度分为平拍、俯拍和仰拍拍摄 3 种,在保证拍摄所使用的设备、外部环境和照片数量相同的情况下进行 3 次实验,实验情况如表 1 所示。

表 1 玩偶拍摄高度实验表

实验对象	设备	拍摄高度	照片数量
玩偶	红米 note7	平拍	36
玩偶	红米 note7	俯拍	36
玩偶	红米 note7	仰拍	36

笔者通过拍摄高度实验确定最佳的拍摄高度后,对拍摄照片的数量展开实验。为了保证实验的可靠性,笔者在同一拍摄高度绕玩偶拍摄 72 张图片,每张图片间隔弧度为 0.873 rad,按拍摄角度变化从图片集中选择不同数量图片进行重建。

不同拍摄高度与照片数量下的玩偶重建稠密点云,如图 2 所示。

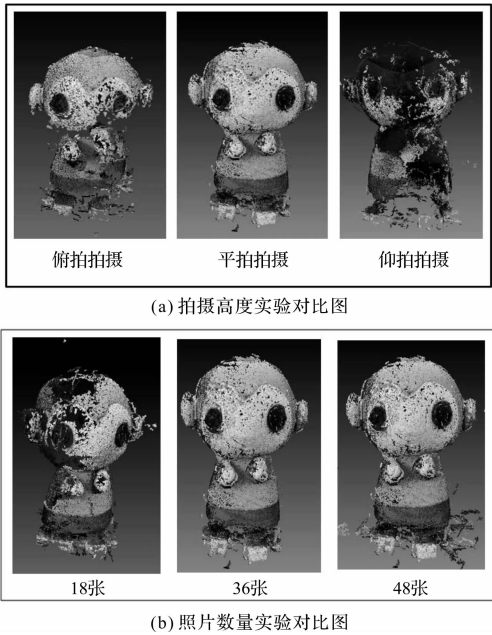


图 2 拍摄高度与照片数量实验对比图

由图 2 可知:

(1) 俯拍拍摄重建的稠密点云有部分缺失和部分重建错位,仰拍拍摄重建的稠密点云有大部分的缺失,平拍

拍摄获取的稠密点云特征恢复较好,没有重建错位的发生。对比以上 3 种拍摄高度可知,平拍拍摄效果最好;

(2) 图片数量较少时,重建后的稠密点云会丢失部分特征信息,图片数量超过 40 张后重建精度不会增加,反而会引入冗余特征点和噪点,也会增加重建所需的时间。因此,图片数量为 36 至 40 张时重建精度较好。

2.2 零件形状的影响

根据其本身结构和功能不同,机械零件具有多种形状。为了更好地划分类别,笔者将退役零件的形状分为轴套类、箱体类、轮盘类 3 种。其中,轴套类零件特点为长度较长,类似长方体;箱体类零件特点为形状较为规则,类似正方体;轮盘类零件特点为形状不规则,类似薄圆柱体。

实验过程中选取了各类零件,采用相同的拍摄设备,保证外界环境光照等外界条件一致,在采集特征照片的过程中选择相同的拍摄高度,对每类零件拍摄相同数量的照片,对比三维重建获取的三维图形与实物,判断零件形状对三维重建精度的影响。

零件形状实验情况如表 2 所示。

表 2 零件形状实验表

对象	设备	拍摄高度	照片数量
控制器箱体	红米 note7	平拍	36
摇柄	红米 note7	平拍	36
刹车盘	红米 note7	平拍	36

不同类型零件形状实验结果如图 3 所示。

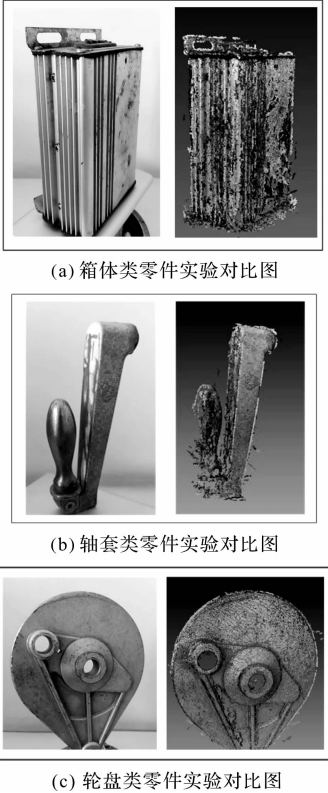


图 3 不同类型零件形状对比图

由图 3 可知,重建效果最好的是箱体类零件,重建出的稠密点云能够较好地还原零件的特征信息;其次是轴套类零件,重建后有小部分的特征信息丢失;最后是轮盘类零件,虽然从图 3 中看其重建后的稀疏点云比较好地还原了零件的特征信息,但是却丢失了另一面的特征信息。其原因在于零件特征信息的提取过程中,由一面转换到另一面过程中长方形零件和不规则零件其图片包含的特征信息快速减少,造成后续的特征点匹配时出现错误匹配和匹配不上等情况,使重建后的稀疏点云出现变形甚至将匹配出多个点云,从而影响稠密点云的重建。

为解决该问题,可以在面与面的过渡区间密集地拍摄图片,从而使每张图片中的特征信息能够相互匹配。

2.3 失效程度的影响

退役零件有多种失效模式,典型的有磨损、腐蚀、变形等。在以上的失效模式下,往往伴随着退役零件质量减小的现象,具体表现为外部形状、体积、表面积等特征发生变化。

根据退役零件质量变化程度,可将退役零件失效程度分为轻度失效、中度失效和严重失效 3 种:(1)轻度失效表现为零件表面磨损和腐蚀量非常小,在局部有点蚀、烧伤等;(2)中度失效表现为零件表面出现较大磨损或腐蚀,零件的表面有比较明显的变化和损伤;(3)严重失效表现为零件表面磨损或腐蚀非常严重,零件有较大的形状变化。

实验时,确定一种退役零件,选择 3 种不同失效程度的零件进行三维重建,采用相同的拍摄设备,保证外界环境光照等外界条件一致,采集特征图片过程中选择相同的拍摄高度,对每个零件拍摄相同数量的照片。

零件失效程度影响实验情况如表 3 所示。

表 3 零件失效实验表

对象	设备	拍摄高度	照片数量
轻度失效刹车片	红米 note7	平拍	36
中度失效刹车片	红米 note7	平拍	36
重度失效刹车片	红米 note7	平拍	36

零件不同程度失效的实验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,刹车片的刹车皮存在不同程度的磨损,刹车片与刹车皮边存在轻微磨损,重建效果最好的是重度失效的零件,其次是中度失效的零件,最后是轻度失效的零件。这是由于轻度失效零件表面只有非常小的磨损量,在重建过程中会损失小部分特征信息,从而引入误差,影响重建效果。

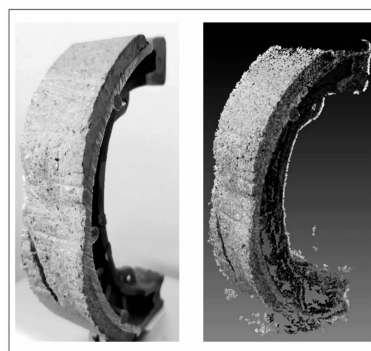
为了解决该问题,可以在零件失效处增加拍摄数量,避免特征信息的损失。



(a) 零件轻微失效对比图



(b) 零件中度失效对比图



(c) 零件重度失效对比图

图 4 零件不同程度失效对比图

2.4 实验结果优化

在上述实验中,拍摄照片数量和拍摄高度是影响每一次实验的因素,定义为全局影响因素。零件形状和失效程度分别影响单次实验,故定义为局部影响因素。

笔者对各影响因素中的影响因子对重建后的稠密点云进行评分。影响因素评分如表 4 所示(分值在 0 ~ 1 之间)。

表 4 影响因素评分表

影响因素	评分 1	评分 2	评分 3
拍摄高度	仰拍 A_1 0.5	平拍 A_2 1	俯拍 A_3 0.7
照片数量	18 张 B_1 0.6	36-40 张 B_2 1	48 张 B_3 0.9
零件类型	轮盘类 C_1 0.5	箱体类 C_2 1	轴套类 C_3 0.8
失效程度	轻度失效 D_1 0.6	严重失效 D_2 1	中度失效 D_3 0.8

构造重建精度的函数式为:

$$P = A_n B_n (w_1 C_n + w_2 D_n) \quad (1)$$

式中: P —重建精度,取值范围为 0% ~ 100%,值越大,则重建精度越高; A_n, B_n, C_n, D_n —拍摄角度、照片数量、零件类型、失效模式的评分值; w —各局部影响

因素权重,上述实验中 w_1 取 0.4, w_2 取 0.6。

为了综合检验零件形状、失效程度、照片采集数量和拍摄高度等影响因素对重建精度的影响,笔者采用正交实验法寻找最优解。

实验时选择红米 note7 作为拍摄设备,实验时保证外部环境的一致性。

设定影响因素: A - 拍摄高度, B - 照片数量, C - 零件形状, D - 失效程度。

设定水平:

A : A_1 - 仰拍; A_2 - 平拍; A_3 - 俯拍。

B : B_1 - 18; B_2 - 36; B_3 - 48。

C : C_1 - 轮盘类零件; C_2 - 箱体类零件; C_3 - 轴套类零件。

D : D_1 - 轻度失效; D_2 - 严重失效; D_3 - 中度失效。

正交实验的参数如表 5 所示。

表 5 正交实验参数表

次数	影响因素 A	影响因素 B	影响因素 C	影响因素 D
1	A_1	B_1	C_1	D_1
2	A_1	B_2	C_2	D_2
3	A_1	B_3	C_3	D_3
4	A_2	B_1	C_1	D_1
5	A_2	B_2	C_2	D_2
6	A_2	B_3	C_3	D_3
7	A_3	B_1	C_1	D_1
8	A_3	B_2	C_2	D_2
9	A_3	B_2	C_3	D_3

将评分代入式(1)进行计算,获得最次解为 $A_1B_1C_1D_1$,其重建精度 P 为 16.8%,获得最优解为 $A_2B_2C_2D_2$,即采用平拍拍摄,拍摄照片数量为 36 张,箱体类零件,其重建精度 P 为 100%,精度最高。

上述结果与通过观察对比实验效果相符。

3 案例研究

笔者采用正交实验获取的重建方法进行案例研究,对退役零件失效特征表征和失效信息量化,对量化后数据与 3D 扫描仪测量数据对比,以验证重建的准确率。

3.1 破碎锤锤头图像集的获取

该实验选取碎煤机中的退役碎煤锤锤头进行实验。破碎锤为铸件,具有固定的规格和尺寸,也具有比较规则的表面。对未失效破碎锤测绘后,基于 SolidWorks 软件构建出三维数字化模型。

碎煤机在碎煤时,锤头与煤块接触,将煤块打碎,在运行过程中绕轴旋转,磨损十分严重,且磨损具有不规则性。由于破碎锤在工作时磨损的部位是锤头部分,笔者主要对锤头进行三维重建;使用手机采用平拍

拍摄采集了 36 张锤头图片构成图像集,每张图片分辨率为 $3\,000 \times 4\,000$ 像素。

3.2 稀疏和稠密点云的建立

采集到失效锤头的图像集后,笔者应用 SFM 方法在 Visual SFM 软件中建立稀疏和稠密点云;应用 SIFT 算法提取和匹配图片中的特征点,利用随机抽样一致算法去除匹配错误的特征点,进行稀疏点云重建。由于所得到的稀疏点云只能看出锤头大体的轮廓,点与点之间间距很大,不能很好地表现出零件的表面特征,需要使用 CMVS/PMVS 算法重建出锤头的稠密点云。

锤头稠密点云如图 5 所示。



图 5 锤头稠密点云图

由图 5 可以明显地看出锤头的表面细节,点与点之间的距离也很小,有很小部分的细节缺失。笔者将评分 $A_2B_2C_3D_2$ 代入式(1)进行计算,其重建精度 P 为 92.0%。上述结果与通过观察实验效果相符。稠密点云不能够直接导入到三维软件当中去,需要做进一步的处理。

3.3 泊松表面重建与失效特征表征量化

为了得到最接近锤头真实表面的三维曲面,需要使用泊松表面重建算法。重建后的三维图形和稠密点云十分接近,既修补了稠密点云中的缺陷部分,也将稠密点云中的点还原成了三维曲面,得到的三维模型是密闭的。

笔者将重建的三维模型图形导入到 SolidWorks 中,将锤头的材质设置成灰铸铁,通过仿真分析得到模型的质量、表面积和体积等信息。

对于未失效破碎锤进行相同的操作,得到模型的信息。锤头失效信息的对比如表 6 所示。

表 6 锤头失效信息对比表

对象	表面积/ m^2	体积/ m^3	质量/kg
未失效锤头	5.373×10^{-2}	6.076×10^{-4}	4.374
失效锤头	3.652×10^{-2}	4.304×10^{-4}	3.098

由此可见,破碎锤的锤头经过磨损其表面积减小了 $1.720 \times 10^{-2} \text{ m}^2$,体积减小了 $1.772 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,质量减少了 1.276 kg。

锤头直观对比如图 6 所示。

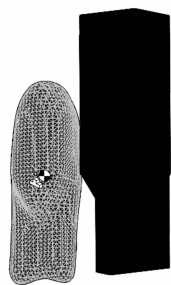


图 6 锤头直观对比图

图 6 中,破碎锤在工作后的磨损十分严重,锤头部分被磨小。笔者对锤头部分进行扫描,其体积为 $4.603 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。由三维重建与扫描结果对比可知,三维重建的准确度为 93.5%。由此证明了实验方法和所提出的失效特征表征方法的可行性与准确性。

4 结束语

为了快速、低成本地表征零件失效程度,支持零部件可再制造性快速评估,笔者提出了基于 SFM 的退役零件三维重建和失效特征表征方法,研究了零件形状、失效程度、拍摄高度和数量对重建精度影响,为提高表征精度提供了理论支持;

笔者以某破碎锤为例进行了实验,获得了表征其失效特征的表面积、体积、质量等信息,并将该结果与 3D 扫描结果进行了对比,证明了笔者所提出方法的可行性与有效性。

该方法具有以下特点:

(1) 以退役零件图片为输入,基于 SFM 方法和表面泊松重建算法获得了零件的三维模型,克服了传统扫描法成本高、过程复杂等不足;

(2) 通过对比失效零件和未失效零件的三维模型,直接获取量化的失效零件失效信息,克服了传统模糊评判法主观性强、精度低等不足;失效零件的三维重建和失效特征表征均采用计算机仿真计算完成,减少了工作强度,提高了效率;

(3) 研究了零件形状、失效程度、照片采集数量和拍摄高度对重建精度的影响,获取了最优重建方法。

由于 SFM 方法中图像的特征信息错误匹配和匹配精度不高,导致目前的重建精度受到影响。下一步笔者将对图像匹配算法进行设计和优化,以降低 SFM

方法对照片数量和拍摄环境的影响,提高重建精度,缩短重建时间。

参考文献 (References):

- [1] PETRICEANU C, DOBROTĂ D, RONTESCU C, et al. Research of the ultrasonic testing parts reconditioned by welding [J]. *Metalurgija*, 2016, 55(3): 465-468.
- [2] 周志新. 机械裂纹无损检测方法综述[J]. *机电工程*, 2017, 34(10): 1138-1143.
- [3] KIM K S, KANG S Y, KIM W S, et al. Improvement of radiographic visibility using an image restoration method based on a simple radiographic scattering model for x-ray nondestructive testing [J]. *NDT and E International*, 2018, 98(5): 117-122.
- [4] 杜彦斌, 廖 兰. 基于失效特征的机械零部件可再制造度评价方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(1): 135-142.
- [5] XU J, WANG K, SHENG H, et al. Energy efficiency optimization for ecological 3D printing based on adaptive multi-layer customization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245(1): 118826.
- [6] 毕天腾, 刘 越, 翁冬冬, 等. 基于监督学习的单幅图像深度估计综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(8): 1383-1393.
- [7] 王才东, 董祥升, 陈志宏, 等. 基于双目视觉的机械零件位姿检测系统研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(12): 1337-1341.
- [8] ASADA N, FUJIWARA H, MATSUYAMA T. Edge and depth from focus [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 26(2): 153-163.
- [9] 赵子阳, 蒋慕蓉, 黄亚群, 等. 结合 SFS 和双目模型的单幅图像深度估计算法[J]. *计算机科学*, 2019, 46(S1): 161-164.
- [10] 张浩鹏, 魏全茂, 张 威, 等. 基于序列图像的空间目标三维重建[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(2): 273-279.
- [11] 李文达, 闫启明, 张尚弘, 等. 基于无人机和 SFM 的地貌数据采集精度影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(6): 1225-1234.
- [12] 李 莹, 于海洋, 王 燕, 等. 基于无人机重建点云与影像的城市植被分类[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(1): 149-155.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

张 琦, 张秀芬, 蔚 刚. 基于 SFM 的退役零件失效特征表征精度影响研究[J]. *机电工程*, 2020, 37(11): 1305-1310.

ZHANG Qi, ZHANG Xiu-fen, YU Gang. Influence of the accuracy of failure characterization of retired parts based on SFM [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(11): 1305-1310.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>