DOI: 10.3901/JME.2020.08.148

基于线激光扫描的飞机表面铤窝孔参数提取方法*

石循磊¹ 杜坤鹏² 张继文¹ 赵安安² 杨 力²

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084;

2. 西安飞机工业(集团)有限责任公司 西安 710089)

摘要: 飞机表面孔的加工和检测仍是飞机自动化装配领域的一大瓶颈, 主要有工程量大, 材料复杂多样, 精度要求高以及表面多为大型自由曲面等原因。为了实现飞机表面铤窝孔的非接触式自动化检测, 首先分析实际工程中铤窝孔检测的难点, 结合装配时的根本质量需求和接触式量规的测量原理, 给出铤窝孔参数的评价标准; 然后, 借助窝深量规的测量原理, 提出一种针对粗糙曲面工件的补偿模型及修正算法; 最后, 基于线激光三维扫描技术得到的点云数据及灰度图, 综合运用点云库和计算机视觉等技术, 提出一种飞机表面铤窝孔的高精度提取方法。通过多组试验, 比较该方法测量结果与标准件及量规测量结果的差异, 验证了该方法能够高效、准确地检测铤窝孔的相关参数。

关键词: 非接触式测量; 点云重建; 粗糙曲面修正; 窝深; 飞机表面孔检测

中图分类号: TG156

Method for Extracting Hole Parameters of Aircraft Surface Based on Linear Laser Scanning

SHI Xunlei¹ DU Kunpeng² ZHANG Jiwen¹ ZHAO Anan² YANG Li²

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089)

Abstract: The machining and detection of aircraft surface holes is still a major bottleneck in the field of aircraft automation assembly, mainly due to the large amount of engineering, complex and diverse materials, high precision requirements and large free-form surfaces. In order to realize non-contact automatic detection, the difficulties of countersink hole detection in practical engineering is analyzed. Combined with the fundamental quality requirement during assembly and the measurement principle of contact gauge, the criteria for evaluating the parameters of countersinks is given. Then, with the measurement principle of depth gauge, a compensation model for rough and curved surface workpiece is proposed. Then based on the point cloud data and grayscale image obtained by three-dimensional laser scanning technology, using the point cloud library and computer vision technology, a high-precision extraction method for the countersink hole parameters of the aircraft surface is proposed. Through several sets of experiments, the difference between the measured results of proposed method and those of standard part and gauge is compared, which proves that this method can detect the relevant parameters of countersink holes efficiently and accurately.

Key words: non-contact measurement; point cloud reconstruction; rough surface correction; countersink depth; aircraft surface hole detection

0 前言

据资料显示, 飞机部件装配约占整个飞机制造工作量的 40%^[1]。飞机骨架与蒙皮之间普遍采用铆接或高锁螺栓连接^[2](图 1), 而孔的加工精度直接影响飞机的结构性能, 例如, 当孔与飞机表面的垂直度偏差过大时, 会在孔的位置产生附加应力, 从而降低结构的连接强度, 严重影响飞机寿命^[3]。铤窝

深度则影响了飞机气动表面的平整度, 进而影响军用飞机的隐身性能等, 而精确、高效的孔质量检测技术则是保证制孔工艺的关键环节。

图 1 铆钉与铤窝孔装配示意图

* 摩擦学国家重点实验室资助项目(SKLT2019C08)。20190419 收到初稿, 20200122 收到修改稿

对飞机表面镗窝孔检测存在几个特点：其一是待测参数数量多，参数之间还存在交织耦合；其二是测量精度要求高，特别是窝深要求测量不确定度小于 0.01 mm ；其三是机体面型、材质复杂不规则，也无法抽象为简单的平面等简化模型^[4]。目前，大部分的飞机蒙皮、壁板制孔普遍采用人工检测方法，用窝量规、内径千分尺、三坐标测量仪或标准件进行接触式检测。这些检测方式一次只能检测一两项参数，虽然能够保证测量精度，但通用性差、检测效率低，部分重要参数如锥角、法矢偏角等参数指标甚至无法检测。

针对飞机连接孔的自动化测量评估问题，国内外已有一些研究成果和工程应用。EI 公司开发的自动化接触式测量系统能达到较高的精度^[5]，但仍然存在接触式测量的一些缺点，如易碰撞损伤工件，测量工具通用性不强等。在非接触式测量飞机制孔领域，发展较为成熟的是被动式的视觉测量技术和主动式的结构光法。基于视觉的测量方法一般只能得到部分孔质量参数，对窝深的精确测量更为困难。毕运波等^[6]提出了基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法，平均误差约 0.03° ，徐博等^[7]提出了基于亚像素的双目立体视觉测量方法，测量空间圆直径精度达 0.005 mm 。

主动式的结构光法主要有线结构光和面结构光法，后者的扫描速度快，但是受环境干扰大，精度难以满足飞机制孔的要求。基于激光三角法的线激光三维扫描技术属于线结构光法中可靠性和局部精度较高的一种检测技术，在合理的扫描轨迹下可以获得孔及附近的高精度点云数据，借助计算机和点云处理算法可以获得较精确的孔质量参数。如 MALCOMB^[8]实现了激光扫描平面工件埋头孔直径测量精度高于 0.003 mm 。在三维曲面工件测量领域，目前的测量精度普遍不高，如 KARASZEWSKI 等^[9]开发的文物三维重建扫描仪，测量精度约 0.1 mm ，BROSED 等^[10]使用结合机器人的激光传感器进行复杂几何体的三维测量，达到孔径精度 0.03 mm ，位置精度 0.06 mm ，以及 SON 等^[11]开发的针对自由曲面零件的自动化测量系统，平均精度为 0.1 mm 。

本文利用线激光三维扫描技术，提出飞机表面镗窝孔的高精度提取方法。该方法综合运用了点云重建、计算机视觉以及接触式量规测量的原理，考虑了各个参数在实际装配中的根本需求，从而解决了粗糙曲面上镗窝孔的各项参数，特别是窝深的高精度检测问题。

1 参数识别算法框架

通过三维线激光扫描可以获得制孔局部完整的 3D 点云数据以及对应的灰度照片，而镗窝孔的几何模型则可简化为由顶部的机身表面，中段的圆锥面，以及底部的圆柱面三段组成(图 2)，参数提取算法的主线可归结为分别对三段曲面进行点云最佳匹配，进而借助三个空间几何元素的相交关系求解各个参数，然而这种简单的处理模型存在几个问题难以解决。

图 2 镗窝孔简单模型示意图

首先，如图 3 所示，由于镗窝工艺和刀具的原因，中段的圆锥面 $T2$ 和底部的圆柱面 $T3$ 之间存在一段弧形过渡面 $T4$ (图中加粗部分)，其深度和形状均不确定，导致窝深参数 H 的下界限 $S2$ 的位置难以确定，为窝深参数的物理定义带来了困难。

图 3 飞机表面镗窝孔示意图

其次，飞机蒙皮面型 $T1$ 复杂不规则，很难抽象为平面、球面或柱面等简单模型，导致窝深参数 H 的上界限 $S1$ 的空间位置难以确定。同时，面型 $T1$ 的法矢量也与镗窝的法矢偏角参数密切相关。

此外，蒙皮表面局部的粗糙度变化呈现不规律状态，特别是复材蒙皮表面纹理的高度变化达到 0.02 mm ，使得窝深参数 H 的上界限 $S1$ 更难以确定。

最后，由于遮挡以及内孔本身存在的边缘反射光较弱的问题，内孔处扫描采集点云的效果并不好，因而重建的三维图中该部分毛刺较多甚至丢失数据，难以拟合圆孔并计算内径。

这些问题的凸显表明，镗窝质量参数的高精度提取不可简化为如图 2 所示的点云几何处理过程，

而是需要考虑实际工艺过程以及检验对象的最终目标。为此,本文在通过点云数据提取几何面型的基础上,增加粗糙曲面补偿算法以及结合二维灰度图像信息解决上述四个难题。

检测算法的整体框架如图 4 所示,点云数据进行识别分割后,拟合得铤孔锥面和上平面,但由于工件表面是粗糙曲面,所以直接拟合平面会带来较大的测量误差,通过粗糙曲面修正算法来修正上平面的位置,最后结合灰度图,根据几何关系提取孔的各项参数。

图 4 检测算法整体架构图

2 铤孔点云的几何分割算法

点云数据处理的第一步是点云识别与分割,采用基于法线分割算法实现。具体步骤如下。

(1) 求点云的法线,即求每个点所在处的切平面,要求切平面则需要找到点的邻域。本课题中每次扫描将获取上百万个点云数据,所以采用了效率较高的 kd-tree 算法,其基于 FLANN 进行快速最近邻检索^[12-13]。找到邻域之后,就可以拟合目标点的切平面,一种常用的方法是最小二乘法,其本质就是分析每个点由其邻域计算得的协方差矩阵的本征矢量和本征值。对任一点 q_m , 其协方差矩阵为

$$C = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k (q_m - \bar{q})(q_m - \bar{q})^T \quad (1)$$

$$C \cdot v_n = \lambda_n \cdot v_n \quad n \in \{0, 1, 2\} \quad (2)$$

式中, C 为协方差矩阵; k 代表点 q_m 的邻域包含点数; $\bar{q}$ 代表邻域的中心; λ_n 是第 n 个本征值; v_n 是第 n 个本征矢量。由协方差方程求出的本征矢量就是点 q_m 的法线^[14]。

(2) 基于所求点云法线进行点云目标识别。采用 RANSAC 算法,其基本假设是样本数据中既有局

内点(inliers),即正确数据,又有局外点(outliers),即异常数据,这些异常数据无法适应数学模型^[15]。RANSAC 通过反复选择数据中的一组子集来拟合模型,被选取的子集即局内点。

线激光三维扫描仪能获取工件上表面 $T1$ 及铤孔圆锥面 $T2$ 的三维点云数据,因此本算法需要分割的几何面是平面和圆锥面。利用 RANSAC 算法,首先选取三个点确定一个平面,再找出距离该平面一定距离内的所有点,认为是局内点,然后以这些点依据最小二乘法拟合平面,与之前的平面比较,留下局内点较多的平面,以这种方式不断迭代,最终得到能拟合得到包含最多局内点的平面,作为工件上表面 $T1$,得到三维空间中对应的平面参数方程。

$$a_0x + b_0y + c_0z = d_0 \quad (3)$$

式中, (a_0, b_0, c_0) 为平面的单位法矢量,且 $c_0 > 0$,即定义铤孔上平面外法向在坐标系 Z 轴的投影始终为正, $|d_0|$ 为平面到原点的距离。类似地,运用 RANSAC 算法拟合圆锥面 $T2$,得到圆锥面的参数是顶点坐标 (x_0, y_0, z_0) 、轴线方向矢量 (u, v, w) 和锥角 A 。图 5 是试验中分割曲率较小工件的效果图。

图 5 点云分割效果图

3 粗糙度及曲面补偿

3.1 建立补偿模型

飞机蒙皮紧固装配的根本质量目标是保证紧固件与铤孔结合后,钉头与外表蒙皮保持光滑平整,如图 1 所示,因此,铤孔的窝深偏差和法矢偏差的测量值应以正确反映这一装配后偏差状况为最终目标。

注意到图 6 是接触式窝深量规测量原理的示意图。量规与工件接触部分由球锥形测头和环形套筒组成。测量时套筒的压头压紧在工件上表面,球形测头与铤孔锥面接触,在已知铤孔的锥角和内径的情况下计算出窝深^[16]。

$$H = \frac{L}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} \right) - S_0 + S - \frac{D}{2 \tan\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (4)$$

图6 窝深量规测量原理示意图

量规与被测工件共有两个接触位置, 其一是套筒压头与工件上表面接触, 从而确定了镗孔的上平面位置, 其二是球形测头与镗孔锥面接触, 接触点在锥面内部, 从而避开了过渡圆弧面。镗孔内径以及锥角则认为已知且设置为公称参数。本质上, 量规所测窝深数值仅与机体表面和锥面顶点间的相互距离有关, 而与实际孔径 D 无关。镗孔内径变化时, 仅铆钉与镗孔圆柱面间隙发生变化(通常通过涂胶等手段消除), 但上表面的不平整度仍保持不变。

借助接触式量规的测量原理建立粗糙曲面的补偿模型, 具有以下假设。

(1) 假设工件上表面点云集合上存在虚拟的平面压头, 该压头呈环形围绕待测镗窝孔, 虚拟压头与粗糙面的凸出部分紧密接触如图 7 所示。

(2) 虚拟压头对应的环形平面定义了蒙皮外表面, 平面法矢视作蒙皮外表面法矢方向, 圆锥面轴线与压头平面的法线间的夹角定义为镗窝孔的法矢偏差。

(3) 紧固件的公称直径 D_0 已知, 镗窝深度由公称直径定义而与实际孔径无关。

采用该模型具有多种优势: ① 采用窝深量规的测量原理建模, 与紧固件和机体结合后的位置关系一致; ② 这种方式给出了窝深尺寸上界限的确定性标准, 工件上表面粗糙度的变化以及表面曲率的变化均可归结为虚拟压头的接触面, 虚拟压头本质上也是镗孔周围局部表面细节的采样; ③ 该补偿模型使得线激光扫描的非接触式测量与接触式量规测量的结果高度一致, 进而起到物理上替代作用从而提升检查效率的效果。

图7 虚拟量规测量粗糙曲面工件示意图

3.2 曲面修正算法

以虚拟压头所覆盖的机体曲面点云数据拟合平面, 并将该平面视作机体外表面, 由该平面定义机体外表面的位置与法矢方向。具体的, 以拟合圆锥面的轴线为中心线, 首先作与虚拟量规环形压头的外半径相同的圆, 然后分割出上表面 $T1$ 的处于该外半径之内的点云, 这部分点云可以认为是一个类圆环面, 以此部分点云, 运用 RANSAC 算法拟合出新的平面, 最后获得拟合平面的标准参数方程。

$$a_f x + b_f y + c_f z = d_f \quad (5)$$

式中, (a_f, b_f, c_f) 为拟合平面的单位法矢量, 同样有 $c_f > 0$, $|d_f|$ 为拟合平面到原点的距离。由于类圆环的内外径之差较小, 而且靠近镗孔边缘, 所以可以认为类圆环点云几乎在一个平面上, 以此拟合平面作为修正之后镗孔的上平面。

3.3 粗糙面修正算法

复合材料飞机蒙皮的表面粗糙度较大, 因此所述工件的上表面 $T1$ 应修正为粗糙表面, 在曲面修正之后, 通过 RANSAC 算法拟合得到的上表面与量规测量时认为的工件表面之间仍存在较大的误差。如图 7 所示, 量规测量时, 环形压头只与粗糙上表面 $T1$ 的凸起部分接触, 通过前述算法拟合的平面位置偏下。

粗糙面上的点的竖直方向位置是由许多微小的独立随机因素影响的结果, 可以近似用正态分布来描述。如图 8 所示, 横轴代表点的竖直方向位置, μ 是所有点的竖直方向位置的平均值。这些点都是 RANSAC 算法拟合平面的局内点, 最后拟合平面的位置是由最小二乘法计算得出, 因此根据最小二乘法和正态分布的特性, 拟合平面的竖直方向位置即为 μ 。

图8 正态分布图

设上表面 $T1$ 对应的点云数据的点数为 n , 且任意一点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 可以求出各点到拟合平面的距离 d_i (带符号), 即 $d_i = a_f x_i + b_f y_i + c_f z_i$, 则所有点到拟合平面的距离的总体标准差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n} - \frac{(\sum_{i=1}^n d_i)^2}{n^2}} \quad (6)$$

由于粗糙上表面 $T1$ 对应的点的分布可近似认为符合正态分布, 因而到拟合上表面的距离为正负两个标准差之内的点占总点数的比率为 95.6%。根据量规实际测量时的物理情形, 考虑到少量噪点的影响, 此时认为量规压头下平面在点云拟合平面沿法向外平移 2σ 的位置。至此得到了虚拟压头对应平面的方程。

$$a_f x + b_f y + c_f z = d_f + 2\sigma \quad (7)$$

4 制孔参数的提取

铈窝孔的重要参数包括铈孔窝深 H , 法矢偏角 e' , 铈孔孔径 D 以及铈孔锥角 A , 如图 9 所示。其中铈孔锥角 A 已由点云分割识别算法直接给出。其他已知的圆锥参数有圆锥顶点坐标 (x_0, y_0, z_0) 和轴线方向矢量 (u, v, w) 。

图9 铈孔参数示意图

法矢偏角指的是圆锥轴线与上表面法向之间的夹角, 由式(8)给出

$$e' = \arccos(|a_f u + b_f v + c_f w|) \quad (8)$$

圆锥顶点到虚拟压头平面的距离为

$$l = |a_f x_0 + b_f y_0 + c_f z_0 - d_f - 2\sigma| \quad (9)$$

结合该规格铈孔的公称直径 D_0 , 由几何关系可得窝深

$$H = |a_f x_0 + b_f y_0 + c_f z_0 - d_f - 2\sigma| - \frac{D_0}{2 \tan\left(\frac{A}{2}\right)} \cos e' \quad (10)$$

铈孔窝深 H , 法矢偏角 e' 及铈孔锥角 A 的提取均依赖于 3D 点云数据的平面和圆锥面拟合, 对于局部数据的缺失不敏感。由于 3D 扫描过程一般垂直于待测表面, 因而难以获得底部圆柱面的数据, 而依赖于 3D 圆锥面边界的识别提取则由于线激光的反射遮挡而缺失了底部细节(图 10), 进而造成了过大的孔径识别偏差。因此孔径的提取具有特殊性。

图10 铈孔锥面三维点云图

为了获得较为精确的孔径参数, 借助于激光传感器所输出的平面灰度图, 虽然没有深度信息, 但是测孔径更为方便准确, 从而将孔径的识别降维成二维平面的图像处理问题。

图 11 是扫描之后输出的平面灰度图, 对于倾斜角度较大的孔, 扫描得到的内孔圆会发生变形, 在灰度图上投影之后呈椭圆^[17]。将这些像素点提取出来, 设这部分像素点的个数为 M , 每个像素点的面积为 p , 铈孔上平面法向与激光入射方向夹角为 ϕ , 则真实内孔圆的面积为 $Mp / \cos \phi$, 因此内孔直径可表示为

$$D = 2 \sqrt{\frac{Mp}{\pi \cos \phi}} \quad (11)$$

图11 铈孔平面灰度图

孔径的提取过程独立于镗窝深度的提取。正是虚拟压头模型的存在，避免了孔径参数对窝深的影响，从而有效提升了两个参数提取的鲁棒性。

5 试验及结果分析

为了验证上文提出的制孔精度检测方法，建立了一套激光扫描测量试验系统，进行了多组试验，并分析了测量结果。

5.1 试验条件

图 12 是三维扫描测量系统的整体架构图，针对

图 12 扫描测量系统整体架构图

特定被测工件，通过 PLC 编程控制伺服系统进而控制机械平台的运动，激光传感器与机械平台通过连接器固连，被测工件放置于固定工装上，扫描得到的点云数据通过以太网传输给计算机，同时计算机上的软件平台也可以调整激光传感器的参数和状态，然后利用本文的算法对点云数据进行处理，输出最终测量结果。

5.2 试验结果

三组试验分别针对平面标准工件，粗糙平面工件和较光滑曲面工件进行了检测，表中列出的结果均为三次重复试验的平均值。表 1 中的不锈钢标准件有四个待测参数的标准值，可以与试验测量值比较得到误差。表 2 中孔号 Fu 代表平面复材工件孔，Lv 代表曲面铝合金工件孔，前者粗糙度较大，后者则有一定的曲率。表 2 中的试验工件采用量规测量镗孔的窝深值作为参考值，表中的误差是测量值减去参考值的结果，第 3 列是采用本文方法得到的修正后窝深值，第 5 列是未使用公称参数以及粗糙曲面补偿得到的窝深值。

表 1 不锈钢平面标准件测量结果表

	内径/mm	窝深/mm	法矢偏角/(°)	锥角/(°)
标准值	6.000	2.528	0.100	100.00
测量值	5.985	2.519	0.162	99.96
误差	-0.015	-0.009	0.062	-0.04

表 2 试验工件测量结果表

孔号	内径/mm	修正后的窝深 测量值/mm	修正后的窝深 误差/mm	未修正的窝深测 量值/mm	未修正的窝深 误差/mm	法矢偏角/(°)	锥角/(°)
Fu1	6.048	2.478	-0.006	2.459	-0.025	0.207	101.98
Fu2	6.071	2.490	0.010	2.461	-0.019	0.319	101.89
Fu3	6.048	2.483	0.006	2.464	-0.013	0.232	101.97
Fu4	6.074	2.489	0.004	2.459	-0.026	0.210	101.91
Lv1	5.961	2.616	-0.009	2.632	0.007	0.048	99.84
Lv2	6.088	2.627	-0.005	2.590	-0.042	0.148	99.93
Lv3	5.954	2.642	-0.007	2.661	0.012	0.127	100.18
Lv4	5.958	2.616	-0.002	2.634	0.016	0.086	99.80

由于试验条件限制，没有给出除窝深外其他参数的参考值，试验工件的公称直径为 6 mm，公称锥角为 100°。在实际情况中，窝深的精度要求最高，对装配结果的影响最大，而且在本文算法中窝深的计算与其他参数有关，也是修正的重点，因此窝深的测量精度很大程度地反映了算法的测量效果。

从表 1 中可以看出，标准件四个参数的测量误差基本达到了要求。表 2 中，修正后的窝深测量误差均在±0.010 mm 内，对比未修正的窝深误差，测量精度有明显提升，因此该方法基本实现了检测的

精度要求。

6 结论

(1) 分析了飞机表面镗孔检测的难点，考虑到实际工艺过程以及检验对象的根本目标，给出了镗孔参数的评价标准。

(2) 结合接触式量规的测量原理，建立了针对粗糙曲面工件的补偿模型，并提出了相应的修正算法。

(3) 基于点云库和计算机视觉技术，通过处理

镗孔的灰度图像和点云目标的几何关系,得到了镗孔各参数的提取算法。

(4) 通过多组试验,比较了本文方法与一般方法测量结果的差异,结果表明该方法的精度明显提高,验证了其在粗糙曲面情况下的有效性。

本文提出了一种飞机表面镗窝孔的参数提取方法,可应用于已有待测区点云和灰度图像的镗孔精度检测。该方法基本达到了检测要求,后续工作是验证除窝深外其他参数的测量效果,并且进一步提升测量精度。

参 考 文 献

- [1] 高红. 飞机部件柔性装配技术应用及工艺设计[J]. 航空制造技术, 2009(24): 72-75, 79.
GAO Hong. Technical application and process design of flexible assembly for aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(24): 72-75, 79.
- [2] 南成根, 吴丹, 马信国, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔质量研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 177-185.
NAN Chenggen, WU Dan, MA Xinguo, et al. Study on the drilling quality of carbon fiber reinforced plastic and titanium stacks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 177-185.
- [3] 徐超. 基于视觉测量的沉头孔垂直度检测新技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
XU Chao. Research on new technology of vertical measurement of countersink hole based on vision measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [4] 邓松波. 基于机器视觉的飞机蒙皮孔几何参数检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
DENG Songbo. Research on detection technology of aircraft skin hole geometric parameters based on machine vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [5] SMITH J, KOCHHAR-LINDGREN D. Integrated hole and countersink inspection of aircraft components[R]. SAE Technical Paper, 2013.
- [6] 毕运波, 徐超, 樊新田, 等. 基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法[J]. 浙江大学学报, 2017, 51(2): 312-318.
BI Yunbo, XU Chao, FAN Xintian. Method of countersink perpendicularity detection using vision measurement[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(2): 312-318.
- [7] 徐博, 习俊通, 陈晓波. 基于亚像素的圆孔几何参数立体视觉高精度测量[J]. 航空计算技术, 2008, 38(3): 94-96.
XU Bo, XI Juntong, CHEN Xiaobo. High accurate stereo vision metrology for geometric parameters of 3d-hole based on subpixel[J]. Aeronautical Computing Technique, 2008, 38(3): 94-96.
- [8] MALCOMB J R. Laser profilometry for non-contact automated countersink diameter measurement[J]. Sae International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 263-268.
- [9] KARASZEWSKI M, SITNIK R, BUNSCH E. On-line, collision-free positioning of a scanner during fully automated three-dimensional measurement of cultural heritage objects[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2012, 60(9): 1205-1219.
- [10] BROSED F J, AGUILAR J J, GUILLOMÍA D, et al. 3D geometrical inspection of complex geometry parts using a novel laser triangulation sensor and a robot[J]. Sensors, 2011, 11(1): 90-110.
- [11] SON S, PARK H, LEE K H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 889-897.
- [12] 刘宇, 熊有伦. 基于法矢的点云拼合方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 7-11.
LIU Yu, XIONG Youlun. Registration method for point clouds based on normal vectors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 7-11.
- [13] 朱德海. 点云库 PCL 学习教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
ZHU Dehai. Point cloud library PCL learning tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012.
- [14] 薄夫祥. 基于 Kinect 与 PCL 的三维重建系统研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
BO Fuxiang. Research on 3D reconstruction system based on Kinect and PCL[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [15] DERPANIS K G. Overview of the RANSAC algorithm[J]. Image Rochester NY, 2010, 4(1): 2-3.
- [16] 黄惠, 马信国, 吴丹. 一种镗窝深度测量工具的设计[J]. 制造技术与机床, 2014(11): 88-92.
HUANG Hui, MA Xinguo, WU Dan. Design of a countersink depth measurement tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(11): 88-92.
- [17] KAEHLER A, BRADSKI G. Learning OpenCV 3: Computer vision in C++ with the OpenCV library[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc. 2016.

作者简介: 石循磊, 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为航空航天机器人技术与自动化装备。

E-mail: shixl18@mails.tsinghua.edu.cn

张继文(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为航空先进制造装备系统集成, 机器人的运动规划、感知及环境建模。

E-mail: zjwts@163.com