

# 基于视觉检测的自动化精确寻边技术

葛朝廷,田威,李鹏程,晏阳,钱晓硕  
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对箱体蒙皮配制中的自动化和高精度需求,提出一种基于视觉检测的箱体自动化精确寻边方法。根据箱体边界特征设计基于 Hough 变换的方法,实现对所需边界点的提取。将图像处理得到的边界点恢复为三维点云,对不同位置拍照处理得到的边界点云进行合并、旋转投影得到二维平面内的边界点。通过曲线拟合最终得到完整有序的边界点云。利用箱体扫描平台和激光跟踪仪设计相应的试验,实验证明了该方法的可行性和准确性。

**关键词:**边界提取;点云合并;箱体;蒙皮制造

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0181-04

## Automatic Accurate Box Boundary Detection Technology Based on Visual Inspection

GE Chaoting, TIAN Wei, LI Pengcheng, YAN Yang, QIAN Xiaoshuo

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To meet the requirements of automation and high precision in the preparation of box skins, an automatic and precise boundary detection method based on visual inspection is proposed. According to the boundary feature of the box, the method based on Hough transform is designed to extract the required boundary points. The boundary points obtained by image processing are restored to three-dimensional point clouds, and the boundary point clouds attained by photographing at different positions are merged and rotated to gain the boundary points in the two-dimensional plane. A complete and orderly boundary point cloud is finally obtained through curve fitting. The corresponding test is designed by using the box scanning platform and laser tracker, and the feasibility and accuracy of the designed method are verified.

**Keywords:** boundary detection; point-cloud merging; box; skin manufacturing

## 0 引言

蒙皮类零件的制造是发射箱产品生产装配中的重要环节之一,蒙皮的尺寸精确度直接影响箱体装配的密封性,是保证武器装备可靠性的关键因素之一<sup>[1]</sup>。现阶段箱体蒙皮的配制主要采用人工划线的方式,蒙皮精度和生产效率较低。视觉检测技术能够精确获取点云或图像数据,通过合适的数据处理技术提取关键信息,在工业领域已经显示出重要的应用价值<sup>[2]</sup>。而边界往往包含着产品的主要信息,因此对边界特征的提取是视觉检测技术中的重要研究内容<sup>[3]</sup>。

贺美芳等<sup>[4]</sup>利用二次参数曲面拟合点云,求解曲率极值以提取边界点,但其计算较复杂,数据量多时处理效率较低。余飞祥等<sup>[5]</sup>结合扫描线点云的分布特点,通过邻域搜索和设置角度阈值判断测量点是否为边界点,但其只适用于扫描线点云。相较点云,图像处理中边缘检测算法的研究更为成熟,但图像的质量往往受到光照和材料光学性能的影响,因此出现了三维点云与二维图像结合的边界提取方案<sup>[6]</sup>。谭小群等<sup>[7]</sup>将点云数据转换成图像数

据,利用图像处理算法获取边界点,再将结果恢复为点云数据,实现对孔的检测定位。同时目前常用的手持式激光扫描仪<sup>[8-9]</sup>以及结合直线或旋转运动机构的线激光扫描仪<sup>[10-11]</sup>获取点云的方式难以兼顾大尺寸部件检测对效率和自动化水平的要求。

结合以上分析,针对发射箱体蒙皮制造的实际需求和箱体结构的特点,本文提出了一种基于视觉检测的自动化精确寻边方法。首先将利用双目快照式传感器采集的数据转换为深度图,采用 Canny 边缘检测算子进行边缘检测,并根据箱体结构特征提出基于 Hough 变换的方法进一步提取边界点,然后将边界点恢复为点云数据,对不同位置拍照获取的点云进行合并、旋转投影以及曲线拟合等操作,最终得到蒙皮的工程图,为蒙皮的数控切割提供参考。

## 1 点云深度图像的获取与处理

### 1.1 点云深度图像的获取和预处理

点云数据的获取是通过搭载在五轴机床末端上的双目快照式传感器,由离线编程系统规划机床运动轨迹,机

**基金项目:**江苏省自然科学基金项目(BK20210299);江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键核心技术)项目(BE2021090)

**第一作者简介:**葛朝廷(1997—),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为航空航天智能装配技术,gechaoting8715@163.com。

床运动到指定位置后,双目传感器拍照得到对应点云。考虑到实际箱体边界框架尺寸较大,整体近似为四边形,同时每条边在较小的尺度内可以认为边界为直线段。因此为了兼顾效率和精度,在每条边上只规划若干拍照点。实际情况中由于被测量工件的表面质量、材料以及传感器本身稳定性的影响,采集的点云数据可能会缺失少部分点。双目快照式传感器 Gocator 以 16 位有符号整数的形式传输所采集的数据,对于缺失部分的点,传感器将对应的数据值  $H$  置为  $-32768$ 。本文将采集的数据转换为 16 位深度图像进行处理,具体转换关系如下:

$$P(m,n) = -H(m,n) + 32767 \quad (1)$$

式中: $H(m,n)$  为传感器所采集的数据第  $m$  行第  $n$  列的数据值; $P(m,n)$  为对应深度图像第  $m$  行第  $n$  列的像素值。点云及对应深度图如图 1 所示(本刊为黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

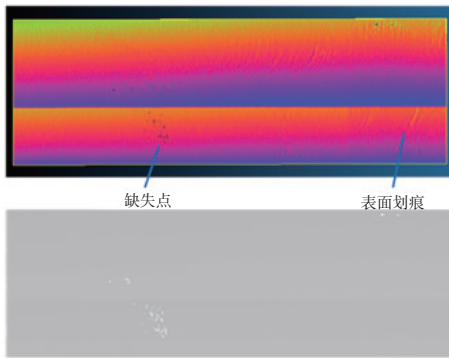


图 1 工件表面点云及对应深度图

对于转换得到的深度图像,本文利用 Canny 算法实现对图像的边缘检测,检测结果如图 2 所示。由于工件表面质量的影响,经过 Canny 算法处理得到的边缘并不都是安装蒙皮时相匹配的边界,所以需要检测的边缘特征点进一步处理。



图 2 边缘检测结果图

## 1.2 基于 Hough 变换提取边界点

与箱体尺寸相比,传感器单次拍照视野根据到被测物体表面的距离不同,在  $71 \times 98 \text{ mm}^2 \sim 100 \times 154 \text{ mm}^2$  间,在传感器单次拍照所覆盖的较小区域可将其中所要提取的边界视为直线。因此可以利用 Hough 变换通过以下步骤实现对所需边界点的提取。

步骤 1:对边缘检测的结果用 Hough 变换进行处理,检测到的线段以 Vec4i 的形式保存在集合 Lines 中,Vec4i 中保存的是每个线段的两个端点坐标。若 Lines 为空,则返回 false。

步骤 2:对集合 Lines 中的线段计算其长度并进行冒泡排序处理。虽然边缘检测的结果存在一些伪边缘,但这

些边缘点一般并不接近于直线,或者即使可以检测到线段,线段的长度相比要提取的蒙皮所匹配的边界明显短。因此可以通过设置线段长度阈值对 Hough 检测的结果进行筛选。这里将该阈值设为 100 像素,保留长度  $l > 100$  的最长的线段。若最长线段长度  $l_{\max} < 100$  则返回 false。

步骤 3:假设所保留的线段端点为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ ,则所在直线公式为  $(y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + x_1y_2 - x_2y_1 = 0$ ,遍历 Canny 边缘检测后的所有图像边缘特征点  $P'(m, n)$ ,由点到直线距离公式计算所有边缘点到步骤 2 保留的线段的距离  $d(m, n)$ 。设定合适的阈值  $d_k$ ,若  $d(m, n)$  超过阈值  $d_k$  时将该边缘特征点剔除,否则保留。具体如下:

$$P'(m, n) = \begin{cases} 0, & d(m, n) > d_k \\ P'(m, n), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

## 1.3 点云数据的转换

经过以上对转换得到深度图像的处理之后,实现了对所需图像边界点的提取。但目前得到的边界点是深度图像上一系列像素点的位置,需要将其对应位置下传感器所采集的原始数据转换为三维的数据点。 $H(m, n)$  表示传感器最初所采集的数据第  $m$  行第  $n$  列的数据值, $P^*(m, n)$  为对应深度图像经过上述图像处理之后第  $m$  行第  $n$  列的像素值。通过二次开发输出传感器每次拍照时的相关参数  $x$  向偏移  $x_{\text{offset}}$ 、 $x$  向分辨率  $x_{\text{resolution}}$ 、 $y$  向偏移  $y_{\text{offset}}$ 、 $y$  向分辨率  $y_{\text{resolution}}$ 、 $z$  向偏移  $z_{\text{offset}}$ 、 $z$  向分辨率  $z_{\text{resolution}}$ 。当图像处理最终得到的某一位置的像素值  $P^*(m, n)$  为 255,即该位置就是最终保留下来的边界点,且对应的原始数据相同位置的数据值不为  $-32768$ ,即不为缺失点时,将按如下公式将其恢复为传感器坐标系下可用的点云数据,单位为 mm。

$$\begin{cases} x = x_{\text{offset}} + n \times x_{\text{resolution}} \\ y = y_{\text{offset}} + m \times y_{\text{resolution}}, & \text{如果 } (P^*(m, n) = 255 \& H(m, n) \neq -32768) \\ z = z_{\text{offset}} + H \times z_{\text{resolution}} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 完整边界点云的获取

### 2.1 点云合并

蒙皮覆盖的工件区域边界点云是视觉系统在不同的位置分别拍照获得的,需要将各个位置处理得到的边界点云转换到一个统一的坐标系下,合并得到整块蒙皮覆盖区域的边界点云。高精度五轴机床末端为多功能末端执行器,除了视觉系统还包括制孔和铆接设备,其末端 TCP 坐标系建立在制孔工位中心。通过机床运动学建模可以获得末端 TCP 在机床基坐标系下的位姿矩阵  $T_{\text{TCP}}^{\text{Base}}$  与机床各轴变量的关系,同时对双目快照式传感器进行手眼标定可以得到传感器坐标系和末端 TCP 坐标系之间的位姿矩阵  $T_{\text{Sensor}}^{\text{TCP}}$ 。则视觉系统相对机床基坐标系的转换矩阵如下:

$$T_{\text{Sensor}}^{\text{Base}} = T_{\text{TCP}}^{\text{Base}} T_{\text{Sensor}}^{\text{TCP}} \quad (4)$$

在每个拍照位置记录下当前机床坐标  $(X, Y, Z, A,$

$B$ ), 代入  $T_{\text{Sensor}}^{\text{Base}}$  即可得到当前视觉系统坐标系与机床基坐标系之间的转换矩阵, 并将其放入集合  $T$  中。设共有  $n$  个拍照点位, 每个点位提取到的边界特征点数量为  $k_i$ 。  $P(i, j) = [x(i, j), y(i, j), z(i, j)]$  表示第  $i$  ( $0 \leq i < n$ ) 个拍照位置中的第  $j$  ( $0 \leq j < k_i$ ) 个边界特征点在视觉系统坐标系中的坐标。由下式即可将边界特征点  $P(i, j)$  更新为机床基坐标系下的坐标。合并得到的边界点云如图 3 所示。

$$(P_{(i,j)}, 1) = T_i (P_{(i,j)}, 1)^T \quad (5)$$



图 3 点云合并效果图

## 2.2 点云旋转投影

为了获取箱体边界的二维图, 需要将提取的三维边界特征点向二维平面投影。由于传感器在拍照获取点云时, 视觉系统坐标系与基坐标系的  $xOy$  平面并不平行, 因此并不能直接将三维边界特征点向基坐标系  $xOy$  平面投影。需要先对三维边界特征点云进行旋转操作, 使得点云拟合平面平行于基坐标系  $xOy$  平面之后再投影。

利用最小二乘法可以得到三维边界特征点云的拟合平面公式  $S_1: ax+by+cz+d=0$ ,  $(a, b, c)$  即为拟合平面的单位法向量。假设点云先绕基坐标系  $x$  轴旋转, 再绕  $y$  轴旋转得到平行于基坐标系  $xOy$  平面的拟合平面  $S_2$ , 对应单位法向量为  $(0, 0, 1)$ 。相反,  $S_2$  绕  $y$  轴旋转  $y_{\text{rad}}$ , 绕  $x$  轴旋转  $x_{\text{rad}}$  得到  $S_1$ , 则有

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos x_{\text{rad}} & -\sin x_{\text{rad}} \\ 0 & \sin x_{\text{rad}} & \cos x_{\text{rad}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos y_{\text{rad}} & 0 & \sin y_{\text{rad}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin y_{\text{rad}} & 0 & \cos y_{\text{rad}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解上式, 得

$$\begin{cases} x_{\text{rad}} = \arctan\left(-\frac{b}{c}\right) \\ y_{\text{rad}} = \arcsin a \end{cases} \quad (7)$$

则由平面  $S_2$  到平面  $S_1$  对应旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \cos \theta_y \\ -\cos \theta_x \sin \theta_y & \sin \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

则由平面  $S_1$  到平面  $S_2$  对应的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & \sin \theta_x \sin \theta_y & -\cos \theta_x \sin \theta_y \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ \sin \theta_y & -\sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于所有边界特征点, 代入下式得到所拟合平面平行于  $xOy$  平面的点云, 并将点云投影至  $xOy$  平面内, 即对所有点云的  $z$  值进行置 0 处理, 得到二维平面内的边界点云。

$$P_{(i,j)} = \mathbf{R}_2 P_{(i,j)} \quad (10)$$

## 2.3 点云拟合和工程图生成

对于二维平面内的边界点云数据可以采用 3 次 B 样条曲线进行拟合, 得到更光滑的点云数据。最终利用 DXF 库依次连接点云中的边界拟合点, 并导出相应的工程图文件, 用于后续激光切割配制蒙皮。拟合后的上下边界点云和生成的工程图如图 4 所示。



(a) 上下边界 B 样条拟合结果



(b) 蒙皮 DXF 工程图

图 4 样条曲线拟合结果及对应工程图

## 3 试验验证

为了验证本文的箱体边界视觉检测方法的可行性和准确性, 以某型发射箱框架为例, 搭建试验平台对产品框架进行拍照扫描, 分析试验结果。

### 3.1 箱体扫描精度验证方案设计

试验平台如图 5 所示, 主要包括高精度五轴机床, 搭载视觉检测系统的多功能末端执行器, 试验箱体和夹持支撑箱体的旋转工装和辅助支撑等。其中视觉检测设备型号为 Gocator3210 双目快照式传感器。

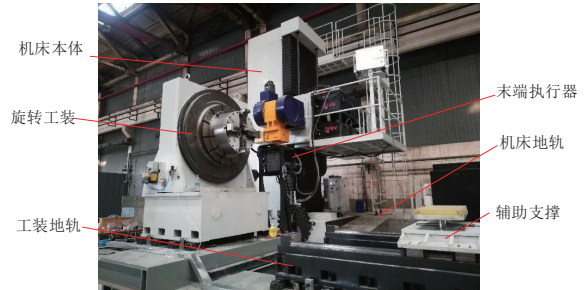


图 5 扫描验证试验平台

机床带动末端视觉检测设备沿规划轨迹进行走位, 并在相应点位拍照, 上下边界各设置了 5 个拍照点位。同时利用激光跟踪仪在视觉检测系统对应的拍照区域测量得到一系列边界点。对于拍照和测量得到的二维点云, 利用左右边分别拟合的直线对上下边界裁剪后得到 4 个角点, 将蒙皮近似看做四边形, 4 个角点之间的距离则代表每条边的长度, 控制着蒙皮的整体尺寸。由拍照处理和激光跟踪仪测量处理得到的蒙皮整体尺寸如图 6 和表 1 所示。

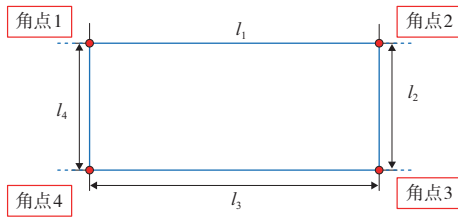


图6 蒙皮整体尺寸示意图

表1 蒙皮整体尺寸对比 单位:mm

蒙皮整体尺寸	拍照处理结果	测量处理结果
$l_1$	1 618.60	1 619.07
$l_2$	494.23	494.13
$l_3$	1 623.65	1 624.02
$l_4$	493.98	494.20

要保证蒙皮尺寸的精确性主要是控制蒙皮上下边界的距离,以使蒙皮上下边界能与箱体上下边界精确配合。对比视觉检测处理和激光跟踪仪测量得到的每对上下边界点云所拟合线段之间的距离,结果如表2所示。

表2 蒙皮上下边界的距离 单位:mm

序号	最大距离		最小距离	
	检测值	测量值	检测值	测量值
1	493.20	493.01	492.20	492.18
2	493.76	493.56	492.73	493.02
3	493.05	493.41	492.96	493.20
4	494.73	495.01	494.00	493.90
5	494.16	494.08	494.05	493.87

### 3.2 试验结果分析

视觉检测和激光跟踪仪测量得到的整体尺寸偏差最大的为上边界,偏差大小为 0.47 mm。蒙皮上下边界点云所拟合线段之间的最大距离偏差为 0.36 mm,满足发射箱箱体蒙皮配制的尺寸精度要求。此外进行了箱体扫描的效率验证实验,以长约 10 m 的箱体框架为例,在机床运动速率为 8 000 mm/min 的条件下,获取箱体框架一个面的点云信息并处理得到对应工程图用时为 11'36",效率上较人工裁制蒙皮有明显提高。

## 4 结语

本文提出一种基于视觉检测的自动化精确寻边方法。对边缘检测的结果通过 Hough 变换去除离群点,实现对箱体边界点的提取;利用机床运动学模型和对视觉系统的标定结果实现了边界点云的合并,对合并点云进行旋转投影和样条曲线拟合,得到了箱体二维边界点云序列和对应工程图。最后通过试验与激光跟踪仪的测量结果进行对比,验证了本文所提检测方法的可行性和准确性。另外,通过拍照获取点云的方式效率高,配合高精度五轴机床,适合大尺寸部件的精确测量,能够满足效率要求。

### 参考文献:

- [1] 齐强,毕世华,瞿军. 舰面环境中发射箱的贮存性能研究[J]. 兵工学报,2006,27(5):956-960.
- [2] 梁振振,马万太,钟霖,等. 基于机器视觉的锭坯轮廓在线检测系统研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):199-202.
- [3] 柯映林,范树迁. 基于点云的边界特征直接提取技术[J]. 机械工程学报,2004,40(9):116-120.
- [4] 贺美芳,周来水,朱延娟. 基于局部基面参数化的点云数据边界自动提取[J]. 机械科学与技术,2004,23(8):912-915.
- [5] 余飞翔,黄翔,李泷果,等. 基于扫描线点云的飞机蒙皮边界特征提取[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(4):701-707.
- [6] WANG Y, EWERT D, SCHILBERG D, et al. Edge extraction by merging 3D point cloud and 2D image data [C]//2013 10th International Conference and Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT). Melville, NY, USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [7] 谭小群,唐婧仪,于薇薇,等. 基于线激光扫描和图像处理的基准孔检测技术研究[J]. 现代制造工程,2019(4):115-121.
- [8] ALLARD P H, MONY C. Pipeline external corrosion analysis using a 3D laser scanner [C]//18th World Conference on Non-destructive Testing, Durban, South Africa: [s.n.], 2012.
- [9] 郑立华,麦春艳,廖崑,等. 基于 Kinect 相机的苹果树三维点云配准[J]. 农业机械学报,2016,47(5):9-14.
- [10] 庄志炜,田威,李波,等. 基于模板匹配的孔位与法矢检测算法[J]. 计算机集成制造系统,2021,27(12):3484-3493.
- [11] SCHLARP J, CSENSICS E, SCHITTER G. Optical scanning of laser line sensors for 3D imaging [J]. Applied Optics, 2018, 57(18):5242-5248.

收稿日期:2022-02-21