

基于局部主动轮廓模型的飞机壁板铆接孔定位方法研究*

姜春英, 闫子龙, 牛祥鑫, 叶长龙, 于苏洋

(沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136)

[摘要] 对飞机壁板铆接孔的定位方法进行了研究,提出了一种基于局部主动轮廓模型的铆接孔定位方法。首先通过基于灰度直方图的全局阈值分割和形心法进行铆接孔的粗定位;然后以粗定位坐标为圆心建立遍历圆,并以遍历圆作为限制条件构造能量圆,建立能量方程求解遍历圆内能量最小的像素点为铆接孔的精定位位置;最后进行视觉引导铆接孔定位试验,试验测得定位误差小于0.05mm,满足飞机壁板自动铆接的工艺要求,且比传统的区域主动轮廓模型定位精度高,具有一定的可行性。

关键词: 自动铆接; 机器视觉; 主动轮廓模型; 粗定位; 精定位; 能量圆

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.058



姜春英

副教授,工学博士,研究方向为航空智能装备与机器人技术研究与应用。

铆接是飞机装配主要的连接方式,它占整个飞机装配劳动量的30%^[1]。传统的人工铆接效率低,精度较差,很难达到工艺要求,自动钻铆技术出现不仅改善了劳动条件、

降低了安装成本,提高了装配效率和安装质量,成为改善飞机性能的重要措施之一^[2-4]。其中铆接孔的定位精度对铆接质量影响较大,特别是对结构连接部位的疲劳寿命和飞机气动外形性能有较大影响^[5-6]。在孔位误差补偿方面,胡玉龙等^[7]提出了飞机数字化装配定位运动的单隐层前馈神经网络模型;齐振超等^[8]将孔位误差进行刚柔建模,但由于铆接过程中孔位变形复杂,规律难以预测,使得定位精度难以满足要求。而机器视觉定位的方法使用灵活,精度较高,不存在累计误差,是一种高效的在线检测技术。李智超^[9]通过改进弦端法进行法兰盘圆孔的圆心定位,但是异常弦端点难以剔除,从而会造成较大定位误差。Li等^[10]提出自适应种子区域生长法的特征提取,但不同光照环境需设定不同的生长规则,适应性

受限。闫国瑞^[11]使用Canny边缘检测的方法进行了飞机壁板铆接孔的提取,但铆接孔周围会有刮蹭和毛刺,易产生伪边缘。基于区域的主动轮廓模型加入了高层理解机制,引入能量函数使轮廓向目标边缘逼近^[12-14],精度较前几种方法要高,但需要进行整幅图像的计算,一般速度较慢,且易受干扰,稳定性难以保证。

综合上述问题和方法,针对已整体完成钻孔的飞机壁板,提出一种基于局部主动轮廓模型的飞机壁板铆接孔定位方法。首先对铆接孔进行基于灰度直方图和形心法的粗定位,使粗定位位置在真实圆心位置附近,这样就将孔的定位问题划分到了局部,减少了计算量并增加了稳定性;然后建立能量方程,求得能量最优解,进而得到精定位位置;最后进行了视觉引导铆接孔定位试验,并验证算法可行性。这种方法较传统方法精确度高,能够满足飞机壁板自动铆

*基金项目:沈阳市科技计划项目(F16-216-6-00)。

接的工艺需求,算法实现步骤如图1所示。

铆接孔粗定位

铆接孔的粗定位是为了获得精确位置附近的坐标,将整体问题变为局部问题。粗定位分为两步:首先是利用灰度直方图的全局阈值分割进行铆接孔特征提取;然后通过形心法得到粗定位的坐标。为了凸显铆接孔特征并便于后续图像处理,使用环形光源进行打光。采集到的铆接孔图像如图2所示。

1 基于灰度直方图的全局阈值分割

由图2可知,铆接孔位置灰度分布和背景灰度分布区别十分明显,故使用基于灰度直方图的全局阈值对这种特征进行分割效果较好^[15-16]。图2的灰度分布直方图如图3所示。

如图3所示,铆接孔图像的灰度分布直方图可分为两个区域。第1个为左侧灰度从32~64之间的区域,它为前景图像,即铆接孔特征;第2个为右侧灰度从224~255的区域,它为背景图像,是铆接孔附近的区域。从灰度直方图中可知前景区域和背景区域分离效果较好。基于灰度直方图的全局阈值分割按照如下步骤进行:

(1) 选择初始估计值为全局阈值 T 。

(2) 利用 T 分割图像 $f(x,y)$,将图像分为两部分,其中 G_1 由灰度值大于 T 的所有像素组成; G_2 由所有灰度值小于等于 T 的像素组成。

(3) 对 G_1 和 G_2 的像素分别计算平均灰度值 m_1 和 m_2 。

(4) 计算一个新的阈值 T :

$$T = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \quad (1)$$

(5) 重复步骤2~4,直到连续迭代的 T 值的变化量小于等于一个预定义的参数 ΔT 为止。

这种分割方法的关键在于初始值和迭代条件的选取,初始值应在图

像最大灰度值和最小灰度值之间,而迭代条件决定着算法运算的速度和精确性。本文按照通常的选取方法将初始阈值和迭代条件选取如下:

$$T = \frac{1}{2}[\max(f(x,y)) + \min(f(x,y))] \quad (2)$$

$$\Delta T = 1 \quad (3)$$

这种算法对每一幅图像都有自

动估计阈值的能力,适应性较强,能够快速完成铆接孔的特征提取。

2 形心法粗定位铆接孔

在全局阈值分割之后的图像得到的铆接孔特征是一个粗略的孔特征,它还包括孔边划痕和不良光照产生的小型低灰度区域,但整个特征大部分还是铆接孔,对分割的特征通过形心法进行粗定位。形心法是对图

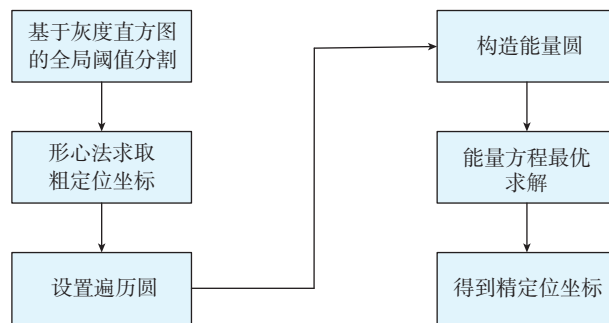


图1 算法步骤
Fig.1 Algorithm step

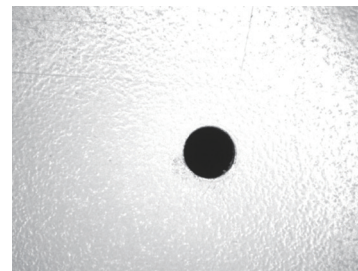


图2 铆接孔原图
Fig.2 Riveting hole original image

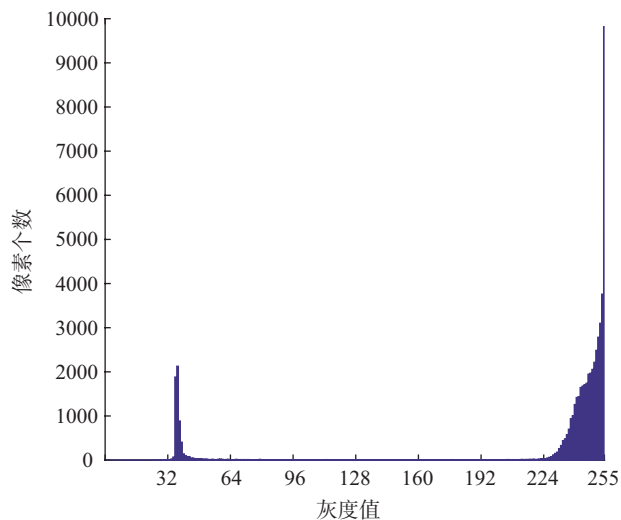


图3 铆接孔图像灰度分布直方图
Fig.3 Riveting hole image grayscale distribution histogram

像特征的所有像素点分别求 x 坐标平均值和 y 坐标平均值,将求得平均值作为粗定位坐标,这样求得的坐标会在铆接孔精确位置附近,表示为:

$$\begin{cases} O_{rx} = \frac{\sum_{f=1}^n x_f}{n} \\ O_{ry} = \frac{\sum_{f=1}^n y_f}{n} \end{cases} \quad (4)$$

式中, (O_{rx}, O_{ry}) 为粗定位之后的圆心坐标, (x_f, y_f) 为铆接孔特征上的点坐标, n 为点的总个数。通过形心法可以得到铆接孔的粗定位位置 (O_{rx}, O_{ry}) , 这个坐标将作为精定位的输入。

铆接孔精定位

铆接孔的形状是关于中心对称的,且孔内灰度值和孔外差别较大,利用这两个特性进行铆接孔的精确定位计算。以粗定位的坐标为基准,设置遍历圆,在圆内和圆上遍历每一个点,对每个点以此点为圆心设定能量圆,求解单个能量圆的能量,最后计算得出能量最小的圆,当能量最小时表明关于灰度的对称性最好,这个圆的圆心就是铆接孔的精定位坐标。

由形心法粗定位铆接孔可知,粗定位的圆心坐标为 (O_{rx}, O_{ry}) , 以此点为圆心设置遍历圆,遍历圆的半径依据粗定位的精度而设定,遍历圆上及圆内点范围如下:

$$(x_t - O_{rx})^2 + (y_t - O_{ry})^2 \leq r_1^2 \quad (5)$$

式中, (x_t, y_t) 为遍历圆上或者圆内的点, r_1 为遍历圆的半径。以遍历点为圆心,建立能量圆,方程如下:

$$(x_e - x_t)^2 + (y_e - y_t)^2 \leq r_e^2 \quad (6)$$

式中, (x_e, y_e) 为能量圆上的点, r_e 为能量圆的半径,圆的参数方程可表示为:

$$\begin{cases} x_e = r_e \times \cos \theta \\ y_e = r_e \times \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中, θ 为直线与 x 轴正方向的夹角,连接能量圆上一点到圆心形成直线,对生成的直线方程进行变换并引入直线系数 k , 可得:

$$\begin{cases} x_1 = k \times \cos \theta \\ y_1 = k \times \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中, $k > 0$, (x_1, y_1) 为线上点的坐标,当 $k = r_e$ 时, $(x_1, y_1) = (x_e, y_e)$ 。对于生成的单个能量圆,将其分为两部分,第 1、2 象限为第 1 部分区域 up, 第 3、4 象限为第 2 部分区域 down, 将 θ 从 0 到 179 每隔一度分成 180 份, k 从 1 到 r_e 每隔 1 分成 r_e 份建立能量方程:

$$E(x_t, y_t) = E_{up}(x_t, y_t) + E_{down}(x_t, y_t) \quad (9)$$

$$E_{up}(x_t, y_t) = \sum_{\theta=0}^{179} \sum_{k=1}^{r_e} I[x_c(k, \theta), y_c(k, \theta)] \quad (10)$$

$$E_{down}(x_t, y_t) = \sum_{\theta=0}^{179} \sum_{k=1}^{r_e} -I[x_c(k, \theta + 180), y_c(k, \theta + 180)] \quad (11)$$

$$\begin{cases} x_c(k, \theta) = x_1 \\ y_c(k, \theta) = y_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $I[x, y]$ 表示灰度值。遍历 k 将两个区域内与原点对称的连线上各 r_e 个点的灰度值的差求和,遍历 θ 将能量圆内的所有连线进行相加求总能量。在初始状态,以粗定位点为能量圆圆心时其能量圆、遍历圆及真实

铆接孔位置关系如图 4 所示。

图 4 中最里面的红色的圆为遍历圆,其圆心为粗定位的位置,中间的绿色的圆为真实铆接孔,最外面的蓝色的圆为能量圆,过圆心的虚线 L 为能量圆中的 k 从 1 到 r_e 遍历的能量线, θ 为能量线与 x 轴夹角。

为了求取真实铆接孔的圆心坐标,联立式(5)~(12),可求得以 (x_t, y_t) 为自变量的一组离散能量值,再求能量最小值对应的遍历点坐标就是铆接孔圆心位置,即:

$$E(x_r, y_r) = \min[E(x_t, y_t)] \quad (13)$$

如图 5 所示,当能量圆能量达到最小的时候,能量圆与真实铆接孔同心,此时圆心即精定位坐标。

分别用本文提出的局部主动轮廓模型和传统的区域主动轮廓模型进行铆接孔定位。

图 6 (a) 为本文提出的局部主动轮廓模型精定位图片,直接可以找到圆心位置,为了方便观察,将定位中心位置用白点标记;图 6 (b) 是用传统的区域主动轮廓模型进行铆接孔定位,它是先找到铆接孔的边缘,然后求取边缘的几何中心,从而得到圆心的位置。可以看出,虽然两种方法都能找到孔位置,但传统的方法找到的边缘位置右上方有一个凸起,它是铆接孔附近的毛刺导致的,故其几何中心

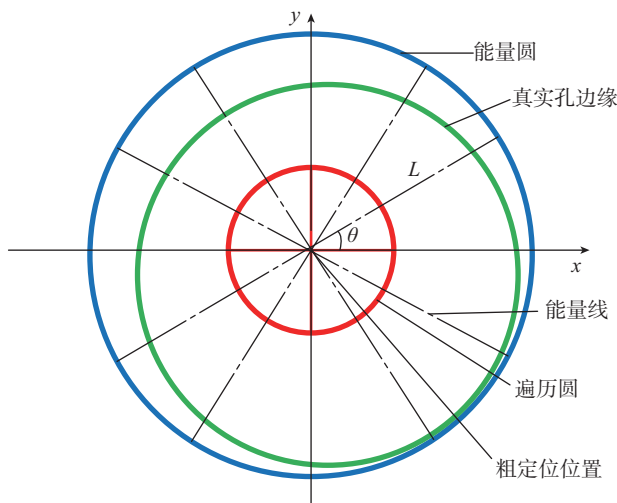


图4 初始遍历位置
Fig.4 Initial traversal position

与真实位置误差较大。而本文提出的局部主动轮廓模型因为先进行粗定位,之后利用图像特征的对称性在真实孔附近寻找,不会被个别的毛刺影响,抗干扰能力强。

结果与讨论

通过视觉引导的平面铆接孔定位试验对本文提出的方法进行精度分析和可行性验证。首先进行了系统的标定;然后通过双机器人铆接试验平台进行局部主动轮廓模型和区域主动轮廓模型的孔定位试验;最后进行了算法精度分析和视觉引导送钉试验,对本文提出方法的可行性进行验证。

1 视觉引导铆接孔定位试验流程

如图7所示为视觉引导铆接孔定位试验过程流程,首先进行系统的标定,包括相机标定^[17]、像素大小标定、手眼标定;然后通过局部主动轮廓模型和区域主动轮廓模型分别得出的孔测量位置,并借助标准件得出孔的标准位置;最后进行精度对比和视觉引导送钉试验,将局部主动轮廓模型和区域主动轮廓模型分别得到的孔位置和借助标准块得到的位置进行对比,算出它们的误差并且应用提出的局部主动轮廓模型进行视觉引导送钉试验,验证本文提出方法的可行性。

2 系统标定

在进行正式的铆接孔定位试验之前,需要进行系统标定,包括相机标定、像素大小标定及手眼标定,去掉图像中因相机产生的畸变,完成像素尺寸到物理尺寸的变换以及图像坐标系到工具坐标系的转换。

3 铆接孔定位及精度对比

通过自动铆接视觉测量试验平台进行本文提出的局部主动轮廓模型和传统的区域主动轮廓模型精度对比试验。视觉检测系统包括相机、镜头和光源,其中相机选用大恒500万像素灰度相机、镜头选用

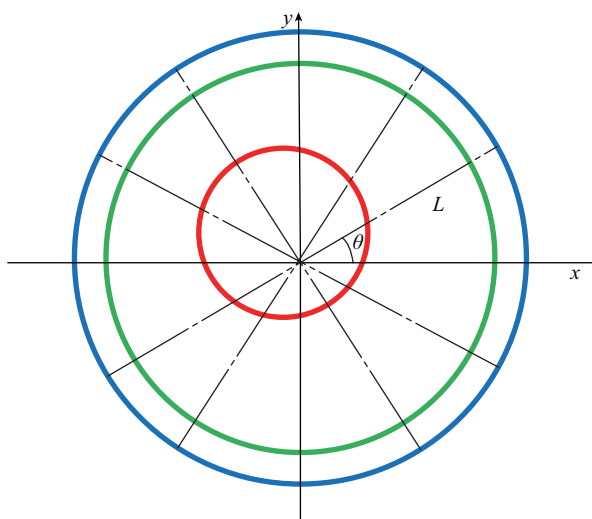
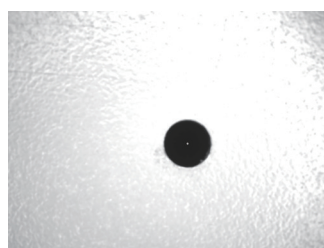


图5 能量最小位置

Fig.5 Minimum energy position



(a) 精定位



(b) 区域主动轮廓模型定位

Fig.6 圆心位置

Fig.6 Center position

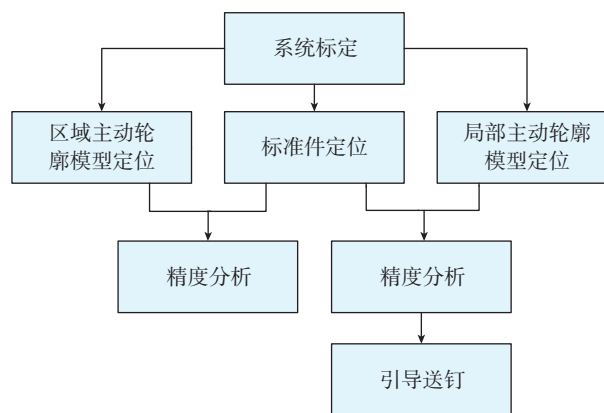


图7 视觉引导铆接孔定位试验流程

Fig.7 Visual guidance riveting hole positioning experiment process

Computar 25mm 定焦镜头、光源选用环形白光源。视觉检测系统安装在铆枪的上方,且相机与试验壁板保持平行,物距为110mm。试验所用壁板为专门精加工的金属平面板,其平面度为0.05mm,其上铆接孔的圆度为0.005mm。执行末端执行送钉动

作,搭建的试验平台如图8所示。

设计一组直径为4.0~4.1mm,一端直径为8mm的圆柱形标准件,将标准件插入铆接孔,通过测量标准块得到圆心位置作为标准位置(图9)。

对10个位置的铆接孔分别通过局部主动轮廓模型与区域主动轮廓

模型进行定位,与通过标准件测得的铆接孔标准位置对比如表 1 和 2 所示。

已知此型号飞机壁板标准铆钉尺寸为 4.0mm,铆接孔标准尺寸为 4.1mm,因为是圆形孔,其定位误差最大为 0.05mm。由表 1 和 2 通过计算可得,传统的区域主动轮廓模型最大孔定位误差为 0.086mm,平均孔定位误差为 0.063mm,不满足定位精度要求。本文提出的局部主动轮廓模型最大定位误差为 0.039mm,平均孔定位误差为 0.027mm,满足工艺要求,从而验证了算法的精确性。

4 视觉引导送钉试验

由铆接孔定位及精度对比可知,本文提出的基于局部主动轮廓模型的铆接孔定位方法精度满足自动铆

接的工艺要求。为了进一步验证算法的可行性,对进行连续定位的 10 个铆接孔进行视觉引导送钉试验,结果如图 10 所示。

如图 10 所示,进行视觉引导送钉的 10 个铆接孔全部送钉成功,进一步验证了本文方法的可行性。

结论

针对飞机壁板上的铆接孔传统建模困难、定位精度低及实时性差等缺点,提出了一种基于局部主动轮廓模型的铆接孔定位方法,设计了一套基于机器视觉的定位系统,并对本文提出的局部主动轮廓模型和传统的区域主动轮廓模型进行了铆接孔定位精度对比及视觉引导送钉试验。结果表明,本文提出的铆接孔的定位

表1 局部主动轮廓模型孔定位坐标及偏差

Table 1 Local active contour model hole position coordinates and deviation mm

孔序号	孔标准位置	孔测得位置	偏差
1	(-0.646,189.443)	(-0.657,189.421)	0.025
2	(-0.601,189.275)	(-0.612,189.286)	0.016
3	(-0.657,189.084)	(-0.679,189.062)	0.031
4	(-0.814,189.927)	(-0.803,188.938)	0.016
5	(-0.678,188.647)	(-0.690,188.680)	0.039
6	(-0.578,188.546)	(-0.556,188.568)	0.031
7	(-0.566,188.388)	(-0.578,188.377)	0.016
8	(-0.375,188.657)	(-0.342,188.669)	0.035
9	(-0.274,188.848)	(-0.252,188.837)	0.025
10	(-0.286,188.961)	(-0.264,188.983)	0.031

表2 区域主动轮廓模型孔定位坐标及偏差

Table 2 Regional active contour model hole position coordinates and deviation mm

孔序号	孔标准位置	孔测得位置	偏差
1	(-0.646,189.443)	(-0.668,189.476)	0.039
2	(-0.601,189.275)	(-0.635,189.231)	0.055
3	(-0.657,189.084)	(-0.613,189.051)	0.062
4	(-0.814,189.927)	(-0.858,189.894)	0.055
5	(-0.678,188.647)	(-0.623,188.614)	0.070
6	(-0.578,188.546)	(-0.523,188.601)	0.078
7	(-0.566,188.388)	(-0.514,188.322)	0.086
8	(-0.375,188.657)	(-0.331,188.613)	0.062
9	(-0.274,188.848)	(-0.241,188.804)	0.055
10	(-0.286,188.961)	(-0.242,188.906)	0.070



图8 铆接试验平台

Fig.8 Riveting experiment platform



图9 标准件

Fig.9 Standard parts

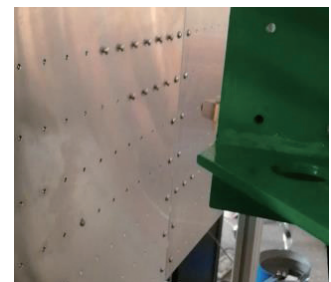


图10 视觉引导送钉

Fig.10 Visual guide sending nail

方法符合工艺要求,且精度更高。

参考文献

[1] 杨沛,郭亚洲,李玉龙.航空铆钉的动态力学性能测试[J].航空学报,2014,35(11): 3012-3024.

YANG Pei, GUO Yazhou, LI Yulong. Test of dynamic mechanical properties of aviation rivets[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3012-3024.

[2] 曹增强.电磁铆接技术在大飞机制造中的应用初探[J].航空学报,2008,29(3): 716-720.

CAO Zengqiang. Study on the application of electromagnetic riveting technology in large aircraft manufacturing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 716-720.

[3] YU C, JIN Z, KE Y, et al. A robot assisted assembly system for small components in aircraft assembly[J]. Industrial Robot, 2014, 41(5): 413-420.

[4] BALAJI H, SELVARAJ P, RAO

- V S. Trends in manufacturing and assembly technologies for next generation combat aircraft[J/OL]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2014-01-01. https://www.researchgate.net/publication/286861425_Trends_in_manufacturing_and_assembly_technologies_for_next_generation_combat_aircraft.
- [5] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 3: 734-740.
- XU Guokang. Automated assembly technology for large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 3: 734-740.
- [6] 李奕寰, 曹增强, 张岐良, 等. 铆模倾角对铆接质量的影响研究[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 426-433.
- LI Yihuan, CAO Zengqiang, ZHANG Yuliang, et al. Study on the influence of the inclination angle of riveting on the riveting quality[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 426-433.
- [7] 胡玉龙, 王仲奇, 李西宁, 等. 基于ELM的飞机数字化装配定位运动模型[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1374-1383.
- HU Yulong, WANG Zhongqi, LI Xining, et al. Modeling of aircraft digital assembly positioning motion based on ELM[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1374-1383.
- [8] 齐振超, 张开富, 李原, 等. 大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3439-3449.
- QI Zhenchao, ZHANG Kaifu, LI Yuan, et al. Analysis and optimization of positioning errors of automatic drilling and riveting of large wall panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3439-3449.
- [9] 李智超. 基于机器视觉的孔组直径测量研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LI Zhichao. Research on hole group diameter measurement based on machine vision[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [10] LI G, WAN Y. Adaptive seeded region growing for image segmentation based on edge detection, texture extraction and cloud model[C]//International Conference. DBLP, 2010: 285-292.
- [11] 闫国瑞. 机器人制孔视觉测量系统开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- YAN Guorui. Development and research of robotic hole vision measurement system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [12] CASELLES V, COLL T. A geometric model for active contours in image processing[J]. Numerische Mathematik, 1993, 66(1): 1-31.
- [13] 吴继明. 基于水平集方法的主动轮廓模型理论研究及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- WU Jiming. Theoretical research and application of active contour model based on level set method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [14] 邢辉, 彭亚丽, 刘侍刚, 等. 一种区域自适应主动轮廓模型的图像分割方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(9): 176-179.
- XING Hui, PENG Yali, LIU Shigang, et al. Image segmentation method based on region adaptive active contour model[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(9): 176-179.
- [15] 刘欣欣, 李雪, 王琼. 基于灰度直方图的多阈值分割法[J]. 计算机应用与软件, 2013(12): 28-30.
- LIU Xinxin, LI Xue, WANG Qiong. Multi-threshold segmentation method based on gray histogram[J]. Journal of Computer Applications and Software, 2013(12): 28-30.
- [16] 龙建武, 申铨京, 臧慧, 等. 高斯尺度空间下估计背景的自适应阈值分割算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(8): 1773-1782.
- LONG Jianwu, SHEN Xuanjing, ZANG Hui, et al. Adaptive threshold segmentation algorithm for estimating background in gaussian scale space[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(8): 1773-1782.
- [17] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Computer Society, 2000, 22: 1330-1334.

通讯作者: 姜春英, E-mail: 99448588@qq.com。

Research on Positioning Method of Aircraft Panel Riveting Hole Based on Local Active Contour Model

JIANG Chunying, YAN Zilong, NIU Xiangxin, YE Changlong, YU Suyang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] The positioning method of the riveting hole of the aircraft panel is studied. A riveting hole positioning method based on local active contour model is proposed. Firstly, the rough positioning of the riveting hole is performed by global threshold segmentation based on grayscale histogram and shape method. Then a traversal circle with the rough positioning coordinates as the center of the circle is created, and the energy circle is constructed with the traversal circle as the constraint. The energy equation is established to solve the precise positioning position of the rivet hole with the smallest energy point in the traversing circle. Finally, the visual guiding riveting hole positioning experiment is carried out. The experimental measurement of the positioning error is less than 0.05mm, which meets the process requirements for automatic riveting of aircraft panel. Moreover, it has higher accuracy than the traditional regional active contour model and has certain feasibility.

Keywords: Automatic riveting; Machine vision; Active contour model; Rough positioning; Precise positioning;

Energy circle

(责编 大漠)