

航空零件化铣胶膜激光刻线的视觉检测技术研究

童康康,张丽艳,叶南

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:设计并实现了一套针对航空零件化铣胶膜激光刻线的快速视觉检测系统。针对化铣胶膜刻线的特点讨论了检测路径的生成方法。研究了化铣胶膜刻线的图像处理方法和误差分析方法。该系统为化铣胶膜激光刻线提供了快速有效的数字化检测手段。

关键词:化铣胶膜刻线;视觉检测;路径规划;图像处理

中图分类号:V262.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)04-0201-05

Visual Inspection of Laser Etching Curves on Chemical Milling Adhesive Film of Aircraft Parts

TONG Kangkang, ZHANG Liyan, YE Nan

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

Abstract: A fast visual inspection system for laser etching curves on chemical milling adhesive film on aircraft parts is designed and implemented. In view of characteristics of the chemical milling adhesive film, the least viewpoints and their sequence for taking the inspection images are planned. The image processing method and error analysis method of the etching curves are studied. This system can be used to provide a fast and effective digital inspection means for the laser etching curves on the chemical milling film.

Keywords: chemical milling adhesive film curve; visual inspection; path planning; image processing

0 引言

飞机结构中广泛应用的大型薄壁零件上的减重槽和加强筋常采用化学铣切工艺加工。化铣工艺需要先在零件表面涂覆一层可剥性保护涂料,经固化后形成一层保护性胶膜,即化铣胶膜,然后在化铣胶膜上沿待铣切区域的边缘刻线,确定需要铣切加工的部位^[1]。经过刻线后,涂覆于待铣切加工部位的保护胶膜可沿边缘刻线剥去,把零件浸入腐蚀溶液中,就可以对零件裸露的待铣切区域表面进行腐蚀加工。

化铣工艺中的胶膜刻线精度直接决定了铣切区域的准确与否,是决定化铣质量的重要因素。传统的化铣刻线工艺是依据加工样板由人工刻线。刻线的尺寸精度由样板保证,生产准备周期长、劳动强度大、成本高、效率低,而且刻线质量难以保证。

现采用五轴激光刻线机进行数控刻线后,胶膜刻线的精度和生产效率大大提升。然而采用新设备新工艺的同时,原有的与样板进行实物对比的检测手段不能与新的刻线加工精度要求相适应,这也成了制约新工艺应用的瓶颈。

常用的三维数字化检测手段有三坐标测量机、机械臂式测量机、探针测量设备、激光跟踪仪等。但这些接触式测量手段需要测头(或探针、靶球)与被测物表面直接接触,逐点测量,检测效率较低。另外,接触式检测方式下测头难以精确接触到胶膜刻线,因此检测精度也难以保证。另一类常用的光学扫描设备只能检测深度和宽度比较大的胶膜刻线,且还需要通过后续的数据分析处理才能获得检测结

果。所以,目前迫切需要研发新的高效率、高精度的化铣胶膜刻线数字化检测手段来保证激光刻线的质量要求。

针对化铣胶膜刻线检测的需求特点,本文自主研发了面向航空零件化铣胶膜激光刻线的视觉检测系统。初步实验验证结果表明,本文方法的精度和效率可以满足工程应用需求。

1 系统结构和总体流程

化铣胶膜刻线视觉检测系统由多自由度数控运动机构、图像采集系统与视觉检测软件构成。多自由度数控运动机构既可以是独立的多轴运动平台,也可以是五轴激光刻形机,用于带动图像采集系统到达指定拍摄位置。图像采集系统固定在运动机构末端,负责采集被测目标的图像,由相机、镜头、光源等构成。视觉检测软件用于预先规划视觉检测的检测路径、接收图像采集系统拍摄的图像,并对拍摄的图像进行分析处理,从而得到胶膜刻线的检测结果。

胶膜刻线检测系统的总体流程如图1所示。首先在运动机构上安装图像采集系统,用文献[2]所述的方法进行系统标定,解算出系统内外参数。接着在运动机构的工作平台上对被测零件装夹找正,并解算得到图像采集系统、运动机构、被测零件三者之间的空间位姿关系。然后在检测软件中对化铣胶膜刻线的三维曲线模型进行等间距采样,采样点组成空间测点序列 $\{P_i | i=1, 2, \dots, n\}$ (n 是测点总数)。进一步根据被测零件几何信息、测点坐标和系统内外参数进行图像拍摄位置和姿态规划,即检测视点规划,进而对所有检测视点进行排序,完成检测路径规

划。其中检测视点规划算法保证每个测点 P_i 能够被 2 个检测视点下所拍摄的图像清晰成像。根据相机成像模型和零件的三维数模信息分别计算得到每个测点 P_i 在规划的 2 个检测视点下所拍摄图像上的理论成像位置 ${}^L P_i$ 和 ${}^R P_i$ 。然后通过运动机构依次移动图像采集系统至每个规划的检测视点采集当前视场区域的图像数据,对拍摄图像进行胶膜刻线的识别与提取。记 ${}^L P_i$ 所对应的实拍图像

上的刻线提取结果为 M_L , ${}^R P_i$ 所对应的实拍图像上的刻线提取结果为 M_R 。根据 ${}^L P_i$ 和 M_L 确定出 ${}^L P_i$ 在 M_L 上的对应点 ${}^L P_i'$,同理得到 ${}^R P_i$ 的对应点 ${}^R P_i'$,后文称 ${}^L P_i'$ 和 ${}^R P_i'$ 为 P_i 的实际成像位置。进而根据双目立体成像理论对 ${}^L P_i'$ 和 ${}^R P_i'$ 进行三维重建,得到理论测点 P_i 的实测空间位置 P_i' 。比较 P_i 和 P_i' ,得到该测点加工误差。

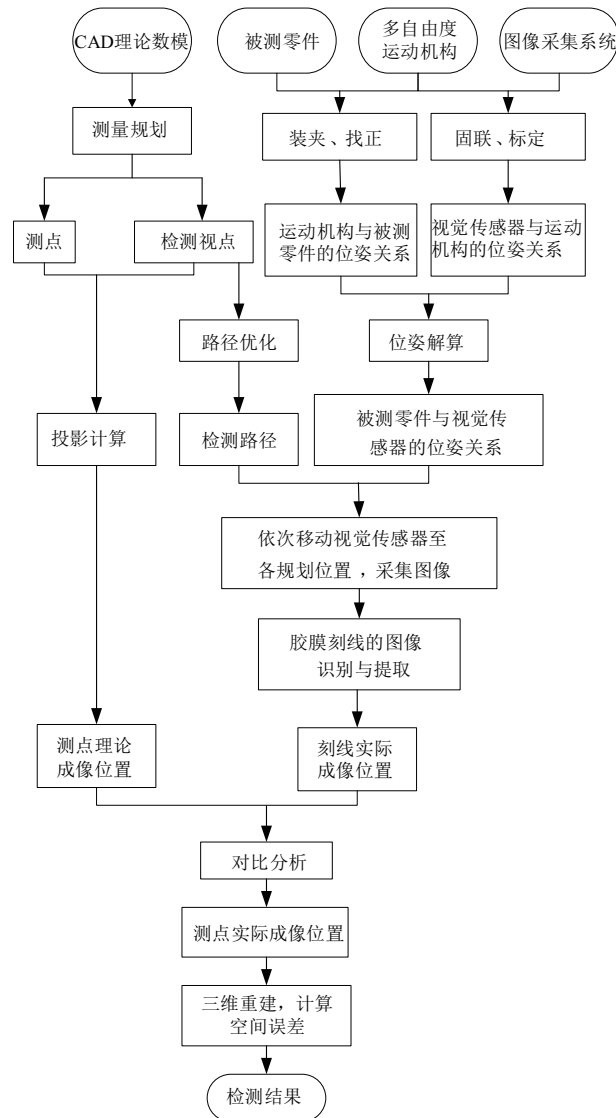


图1 检测系统总体工作流程

2 路径规划

化铣胶膜刻线一般是位于复杂自由曲面上的复杂曲线,如何规划图像拍摄的位置(视点位置)、方向(视点方向)以及图像拍摄的顺序(检测路径)是本文的一个研究重点。为此,设计了检测视点的生成方法,采用 LKH^[3] 算法,对检测视点进行了路径优化。

2.1 检测视点的计算

化铣胶膜刻线形状复杂,一次拍摄无法覆盖一整条刻

线,本文先将被测零件细分成一系列互相独立的区域 R_k ($k=1,2,\dots,W$) (W 是区域总数),使得细分后的每一个区域 R_k 都能被图像采集系统一次拍摄完整,然后计算区域 R_k 的视点位置和视点方向。零件细分的流程如图2所示,具体步骤如下。

步骤1:读取待检测零件的 CAD 模型,将待测零件离散成三维点云 $\{Q_j | j=1,2,\dots,m\}$ (m 为点云的总点数),将 CAD 模型上的化铣胶膜刻线等距离采样,离散成三维点列 $\{P_i | i=1,2,\dots,n\}$ 。三维点云和三维点列合在一块,定义为待测零件的初始区域 R 。定义以区域为元素的空队列 F 和 G ,将 R 存入队列 F 中。

步骤2:判定队列 F 是否为空,若空,则输出 G 中的所有元素得到区域细分结果,记为 $\{R_k | k=1,2,\dots,W\}$,细分结束;若非空,对 F 进行出队操作。记从队列 F 中取出的元素为区域 R_k , R_k 内点云集合记为 S_k ,点列集合记为 C_k 。计算 S_k 中所有点的坐标平均值 $\bar{P}_k$ 和法矢平均值 $\bar{N}_k$ 。过 $\bar{P}_k$ 以 $\bar{N}_k$ 为平面法矢方向生成平面 A_k 。将 C_k 内所有点投影到 A_k 上,并计算得到 A_k 上包围所有投影点的最小长方形 B_k 。

步骤3:计算点云 S_k 中每个点的法矢与平均法矢 $\bar{N}_k$ 之间的夹角,并统计夹角超过夹角阈值 α_T 的点占总点数的比例 γ 。

步骤4:若步骤2中 B_k 的大小超过图像采集系统的有效视场,或者步骤3中的比例 γ 大于给定阈值 γ_T ,则转步骤5,否则转步骤6。

步骤5:在平面 A_k 内,过点 $\bar{P}_k$ 作垂直于 A_k 且平行于 B_k 长边方向的平面 C_x ;过 $\bar{P}_k$ 作垂直于 A_k 且平行于 B_k 短边方向的平面 C_y 。平面 C_x 和 C_y 将区域 R_k 分割为4个区域,将这4个区域存入队列 F 。转步骤2。

步骤6:将 R_k 存入队列 G 。转步骤2。

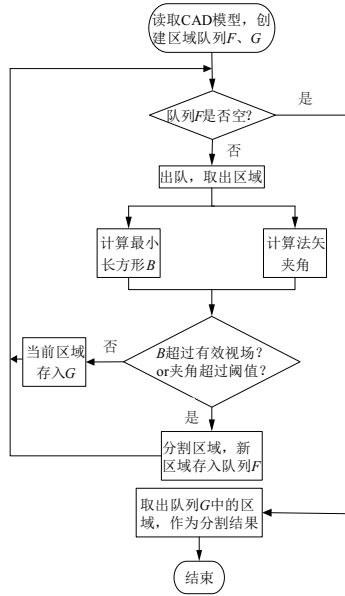


图2 零件细分流程图

细分零件后,遍历 $\{R_k | k=1,2,\dots,W\}$ 中所有包含测点的区域,根据图像采集系统的视场、景深等相关参数计算生成每个区域的左右两个拍摄视点。具体计算过程如下。

如图3所示,在区域 R_k 内以 $\bar{P}_k$ 为端点作垂直于平面 A_k 的直线段 L_k , L_k 的另一端点记为 T_k 。以 T_k 为起点作平行于 B_k 长边方向的直线段 L_k^L 和 L_k^R , L_k^L 和 L_k^R 长度相等,方向相反。 L_k 的长度 a 、图像采集系统的物距 f 、线段 L_k^L 和 L_k^R 各自的长度 b 、拍摄双目立体图像对基线距离 e 之间满足 $a^2+b^2=f^2$, $e=2b$ 。 f 和 e 是已知参数。 L_k^L 和 L_k^R 各自除 T_k 以外的另一个端点即为对区域 R_k 采集图像的两个视点位置。

确定视点位置后还需要计算生成视点方向,以保证被测目标完全被拍摄图像覆盖,同时被测目标要尽可能地位

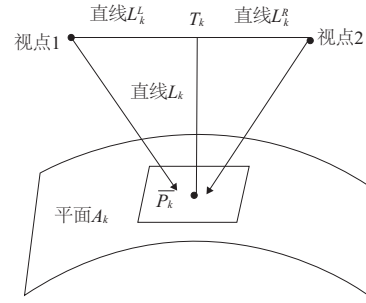


图3 视点计算示意图

于拍摄的图像中央。如图4所示, E 是区域 R_k 的一个视点, DH 是被测区域的长边, $\angle DEF = \angle HEF = \alpha$ 。不难证明 α 略小于视场角的一半,最终拍摄的图像范围略大于区域范围。由角平分线定理可知:

$$\frac{DE}{HE} = \frac{DF}{HF} \quad (1)$$

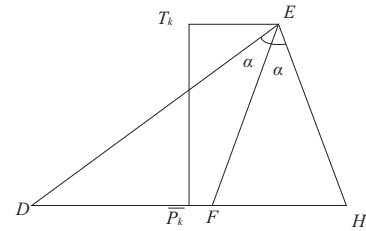


图4 视点方向计算

本文根据视点位置 E 计算得到 DE 和 HE 长度,进而计算得到 F 的位置, EF 就是视点方向。

2.2 检测顺序规划

完成视点规划后,路径规划可抽象为旅行商问题^[5](traveling salesman problem, TSP)。旅行商问题有众多求解算法,但目前并没有实际有效的精确算法^[6],其中LKH (lin-kernighan heuristic)^[3]局部启发搜索算法,是求解TSP问题最快、稳定性最高的算法之一^[5]。本文采用LKH算法对视点进行路径规划。图5是采用上述方法对一大型航空蒙皮类零件化铣胶膜刻线的规划效果。

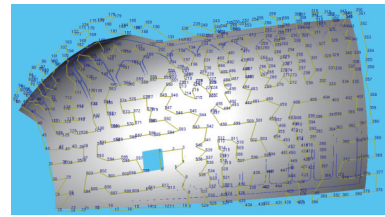


图5 路径规划效果图

3 误差分析

3.1 测点理论成像位置的计算

根据相机成像模型^[4]计算测点 P_i 在左右2个检测视

点下的理论成像位置。

$$\lambda \begin{bmatrix} {}^L u_i \\ {}^L v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{B}_L \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\lambda \begin{bmatrix} {}^R u_i \\ {}^R v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{B}_R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中 $\mathbf{A}$ 是相机内参数矩阵, $\mathbf{B}_L$ 、 $\mathbf{B}_R$ 分别是图像采集系统在左右视点下的外参数矩阵, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_L$ 、 $\mathbf{B}_R$ 均由系统标定得到, 是已知量。 $[x_i, y_i, z_i, 1]^T$ 是测点 P_i 的空间齐次坐标, λ 是比例因子。由此便可计算得到 P_i 在左右两个检测视点下的理论成像位置 $[{}^L u_i, {}^L v_i]^T$ 和 $[{}^R u_i, {}^R v_i]^T$ 。图 6a) 和图 6b) 分别为测点在左右视点下的理论成像位置叠加在实拍图像上的局部效果图。

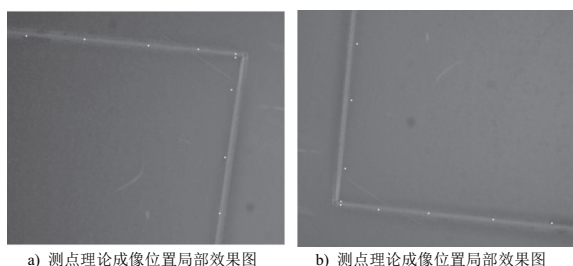


图 6 局部效果图

3.2 实拍图像的胶膜刻线识别提取

胶膜刻线的提取是通过算法得到图像中刻线实际位置的过程。如图 7 所示, 胶膜刻线有一定的宽度, 曲线本身和图像背景在灰度上有一定的区分度。



图 7 刻线原始拍摄图



图 8 刻线提取效果图

刻线提取本质是对拍摄图像进行边缘提取, 目前常用的边缘检测方法有 Canny 边缘检测算法改进方法^[7]、SU-SAN 边缘检测算法改进方法等^[8], 这些算法有的对噪声比较敏感, 有的提取的边缘连续性较差。HALCON 算法包中的 line_gauss 算子专门针对具有一定宽度的曲线进行识别提取, 可有效去除噪声, 提取的曲线连续性较好。为此, 本文的胶膜刻线检测中的图像处理部分基于 HALCON 平台实现。提取的效果如图 8 所示。

3.3 刻线误差分析

通过前面的分析, 获得了测点 P_i 的两个理论成像位置 ${}^L P_i$ 和 ${}^R P_i$ 以及对应刻线的实际成像提取结果 M_L 和 M_R 。本文进一步分析计算得到测点误差, 具体步骤如下:

步骤 1: 计算测点理论成像位置 ${}^L P_i$ 在 M_L 上的对应点 ${}^L P_i'$ 。如图 9 所示, 以 ${}^L P_i$ 为起点, 沿 ${}^L P_i$ 法线方向与 M_L 中刻线求交, 考虑实际刻线的宽度, 会得到 2 个交点, 将这 2 个点的平均值作为 ${}^L P_i$ 在 M_L 上的对应点位置 ${}^L P_i'$ 。

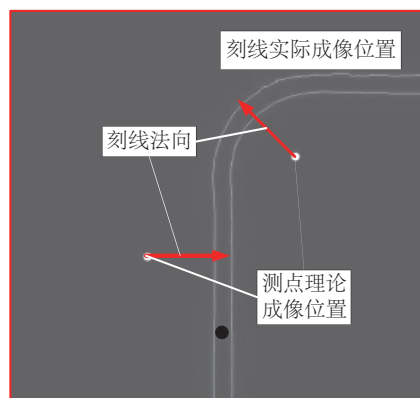


图 9 测点实际成像位置计算

步骤 2: 计算 ${}^R P_i$ 在 M_R 上的对应点位置 ${}^R P_i'$ 。如图 10 所示, O_L 和 O_R 是图像采集系统对测点 P_i 进行拍摄成像的 2 个点, e_L 和 e_R 是极点, ${}^L P_i'$ 和 ${}^R P_i'$ 是 P_i 在 2 个像平面上的实际成像点。由极线几何^[9]可知:

$${}^R P_i'^T \mathbf{F} {}^L P_i' = 0 \quad (4)$$

式中 $\mathbf{F}$ 是基础矩阵。 M_L 平面上一点 ${}^L P_i'$ 乘以本质矩阵, 得到 ${}^L P_i'$ 的极线, 则 ${}^R P_i'$ 在 ${}^L P_i'$ 的极线上。

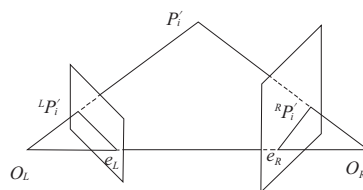


图 10 左右实际成像点位置关系图

由 ${}^L P_i'$ 的位置, 可计算得到 ${}^R P_i'$ 的极线, 该极线与 M_R 中刻线相交可得到 2 个交点, 本文将这 2 个交点的平均坐标作为测点 P_i 的实际成像位置 ${}^R P_i'$ 。

步骤 3: 计算测点 P_i 的实测位置 P_i' 。由 ${}^L P_i'$ 和 ${}^R P_i'$, 结合图像采集系统拍摄左右图像时的投影矩阵, 根据三角测量法可计算得到 P_i' 的空间坐标 $[x_i', y_i', z_i']^T$ 。

步骤 4: 计算测点误差。结合 P_i 和 P_i' 可计算得到误差: $E_i = \sqrt{(x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2 + (z_i - z_i')^2}$, 对所有测点的误差进行统计, 并以此判断刻线精度。

4 实验验证

根据现有实验条件, 本文用图 11 所示的试验件进行

验证实验。该试验件是 1 个 $200\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的化铣板,主体为铝合金,上下表面均涂覆一层厚度约为 0.05 mm 的化铣胶膜,试验件上表面刻有 2 组宽度约为 0.1 mm 的激光刻线。

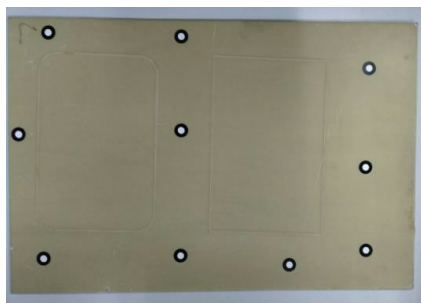


图 11 试验件实物图

在 DMG 80P duoBLOCK 机床上进行了检测实验。对于不同的数控运动机构,只需替换相关参数即可。对图像采集系统进行了系统标定,并对试验件进行了路径规划,结果如图 12 所示。

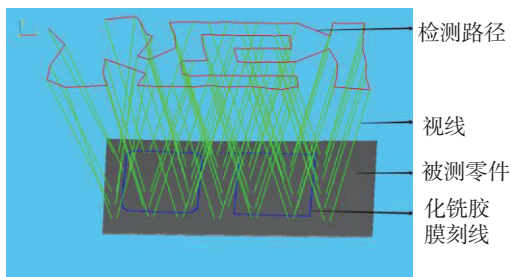


图 12 试验件路径规划结果图

在规划视点下采集刻线图像,并分析处理得到测点的实际空间坐标。部分测点的理论位置与实测位置如图 13 所示。

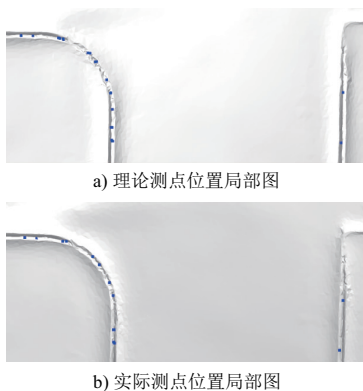


图 13 理论与实测图

统计所有测点的误差结果如图 14 所示。本文试验件中胶膜刻线测点检测的平均误差为 0.12 mm ,最大误差为 0.34 mm 。

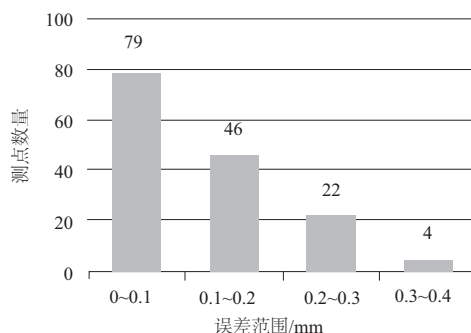


图 14 测点误差分布图

5 结语

本文设计并实现了一套针对航空零件化铣胶膜激光刻线的视觉检测方法。设计并实现了检测视点生成方法,用尽可能少的拍摄视点获得每个测点的双目立体图像对。通过图像分析处理并三维重建得到了实际测点的空间位置,进而计算得到化铣胶膜刻线的加工误差。实验表明本文研发的视觉检测原型系统是有效可行的。后续工作将进一步将该原型系统集成于五轴激光刻形机,实现复杂化铣零件刻形的在机原位检测。

参考文献:

- [1] 赵永岗,张春刚,王辉,等. 化学铣切在钛合金加工中的研究及应用[J]. 表面技术,2009,38(6):83-86.
- [2] 唐君萍,张丽艳. 飞机复杂零件上大量小尺寸导孔的快速视觉检测[J]. 中国机械工程,2015,26(18):2457-2459.
- [3] Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(1):106-130.
- [4] 塞利斯基. 计算机视觉[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [5] 黄厚生. 求解旅行商问题的新方法研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [6] 马良. 旅行推销员问题的算法综述[J]. 数学的实践与认识,2000,30(2):156-165.
- [7] 王植,贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报,2004,9(8):957-962.
- [8] 曾俊. 图像边缘检测技术及其应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [9] 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1997.

收稿日期:2018-02-07