



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112296999 B

(45) 授权公告日 2022.07.08

(21) 申请号 201911102219.1

CN 108972573 A, 2018.12.11

(22) 申请日 2019.11.12

CN 109454642 A, 2019.03.12

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 104259670 A, 2015.01.07

申请公布号 CN 112296999 A

CN 108161931 A, 2018.06.15

(43) 申请公布日 2021.02.02

CN 101488017 A, 2009.07.22

(73) 专利权人 太原科技大学

US 2013329035 A1, 2013.12.12

地址 030024 山西省太原市万柏林区瓦流路66号

CN 109948247 A, 2019.06.28

专利权人 西北电子装备技术研究所(中国电子科技集团公司第二研究所)

CN 109158734 A, 2019.01.08

(72) 发明人 赵忠志 马世杰 王安红 雷海卫

Jianke Chen et al..An identification and classification method for circular object based on rotating image template matching.《2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation》.2013,

闫常春 肖方生 岳军 曹金亮

(续)

(74) 专利代理机构 太原市科瑞达专利代理有限公司 14101

审查员 廖江梅

专利代理师 赵禛

(51) Int. Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109190628 A, 2019.01.11

权利要求书2页 说明书6页 附图7页

(54) 发明名称

一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法

正,提高了各异性成形加工自动化进程与高效生产。

(57) 摘要

本发明涉及一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法,属于图像计算技术领域,解决各异性成形轮廓加工过程中需要人为监视与修正的技术问题,包括以下步骤:相机标定→拍摄工件图像并预处理→寻找边界并形成工件轮廓图像→校准轮廓质心与加工平台的坐标系→在工件轮廓图像上生成用户所需的缩进轮廓坐标集 $S_c$ →利用中值滤波平滑轮廓 $S_c$ 得到

$S_{c-smooth}$ →根据用户预设条件生成覆盖工件图像的多条轮廓线→根据轮廓线生成加工路径。本发明可以根据不同形状来自适应的调整加工轮廓,使各异性成形加工无需人工监视与修



CN 112296999 B

[接上页]

**(56) 对比文件**

G. Bourgeniere ET AL..On the determination of 3D trajectory of moving targets by stereovision.《2005 1st International Conference on Computers, Communications, & Signal Processing with Special Track on Biomedical Engineering》.IEEE,2005,

肖方生.机器视觉在热切机中的应用.《电子

工业专用设备》.2018,(第02期),

田辉等.机器视觉在生瓷片印刷机中的应用.《电子工艺技术》.2012,(第04期),

白伟志等.基于图像分割的船舶涂装轮廓检测方法.《机电一体化》.2016,(第03期),

张宽.基于视觉的陶瓷点胶系统研究.《中国优秀硕士学位论文全文电子期刊网》.2018,

孙坤.不规则轮廓的机器视觉检测算法研究.《中国优秀硕士学位论文全文电子期刊网 信息科技辑》.2018,

1. 一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法,其特征在于包括以下步骤:

S1、相机标定

架设摄像机及背光板,校准摄像机的焦距,调整摄像机的曝光量,使摄像机可以清晰区分工件和背光板;使用 $n \times n$ 棋盘格拍摄 $m$ 张标定图像,利用张正友标定法得到单应矩阵 $H$ 、畸变系数 $\text{distCoeffs} = [k_1, k_2, p_1, p_2]$ 、内参矩阵 $M_1 = [f_x, f_y, c_x, c_y]$ 、外参矩阵 $M_2$ ;

S2、拍摄工件图像并预处理

驱动机械手臂将工件放到工作台上,拍摄工件图像,设为图像 $A$ ,利用步骤S1中得到的畸变系数 $\text{distCoeffs}$ 、内参矩阵 $M_1$ ,根据以下公式(1)~(4)对图像 $A$ 进行矫正,得到去除图像畸变后的图像 $B$ ,

$$\begin{cases} x_B = f_x x_{A'} + c_x \\ y_B = f_y y_{A'} + c_y \end{cases} \quad (1)$$

$$x_{A'} = x_A(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x_A y_A + p_2(r^2 + 2x_A^2) \quad (2)$$

$$y_{A'} = y_A(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_2 x_A y_A + p_1(r^2 + 2y_A^2) \quad (3)$$

$$r = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} \quad (4)$$

其中, $x_A, y_A$ 为图像 $A$ 中同一像素的水平、垂直坐标, $x_B, y_B$ 为图像 $B$ 中同一像素的水平、垂直坐标, $r$ 为中间变量;

S3、寻找边界并形成工件轮廓图像

对步骤S2中去畸变后的图像 $B$ 进行二值化处理得到图像 $B_b$ ,然后对图像 $B_b$ 寻找边界,并找到所有的连通轮廓面积,保留面积最大的轮廓为 $C_{\max}$ ,将其他轮廓删除,得到工件的轮廓图像 $D$ ;

S4、校准轮廓质心与加工平台的坐标系

求步骤S3中轮廓 $C_{\max}$ 的特征矩 $m = \{m_{00}, m_{10}, m_{01}\}$ ,其中, $m_{00}$ 为轮廓面积, $m_{10}$ 为轮廓区域中 $x$ 坐标值之和, $m_{01}$ 为轮廓区域中 $y$ 坐标值之和;根据以下公式(5)得到轮廓质心坐标 $P(x_c, y_c)$ ,将质心坐标 $P$ 设为加工平台的原点;

$$\begin{cases} x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}} \\ y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{cases} \quad (5)$$

S5、在工件轮廓图像上生成用户所需的缩进轮廓坐标集 $S_c$

对步骤S3中轮廓 $C_{\max}$ 的所有坐标点,根据用户设定的轮廓缩进参数 $P_{\text{sawtooth}}$ ,利用以下公式(6)向内缩进,得到用户所需的缩进轮廓坐标集 $S_c$ ,

$$\begin{cases} S_c(x, y) = \min_{(x', y'): \text{element}(x', y') \neq 0} C_{\max}(x + x', y + y') \\ x' = P_{\text{sawtooth}} * k_x \\ y' = P_{\text{sawtooth}} * k_y \end{cases} \quad (6)$$

其中 $(x, y)$ 为图像 $D$ 中轮廓的像素坐标, $(x', y')$ 为图像 $D$ 中 $(x, y)$ 邻接的像素坐标, $k_x, k_y$ 分别表示图像视野与平台大小的水平、垂直比例, $\text{element}$ 为坐标元素;

S6、利用中值滤波平滑轮廓 $S_c$ 得到 $S_{c-\text{smooth}}$

当使用者对当前某段轮廓不满意,可以在图像 $D$ 中通过鼠标画直线 $L$ 截取该段轮廓,求

得L与轮廓的交点为a  $(x_a, y_a)$ , b  $(x_b, y_b)$ , 线段ab代替该段轮廓, 根据中值滤波法平滑交点a、b前后n个轮廓点, 生成调整后的平滑轮廓 $S_{c-smooth}$ ;

S7、根据用户预设条件生成覆盖工件图像的多条轮廓线

对轮廓 $S_{c-smooth}$ , 根据用户设定轮廓扩展参数 $P_{expand}$ , 利用以下公式(7)将步骤S6中获得的轮廓 $S_{c-smooth}$ 向外扩展, 生成多个轮廓为 $S_{c-expand}$ :

$$\begin{cases} S_{c-expand}(x, y) = \max_{(x', y') : element(x', y') \neq 0} S_{c-smooth}(x + x', y + y') \\ x' = P_{expand} k_x \\ y' = P_{expand} k_y \end{cases} \quad (7)$$

其中  $(x, y)$  为图像D中轮廓 $S_{c-smooth}$ 的像素坐标,  $(x', y')$  为图像D中  $(x, y)$  邻接的像素坐标,  $k_x$ 、 $k_y$  分别表示图像视野与平台大小的水平、垂直比例, element为坐标元素;

S8、根据轮廓线生成加工路径

将步骤S7获得的轮廓 $S_{c-smooth}$ 中的像素坐标根据步骤S1中的单应矩阵H利用以下公式(8)和公式(9)转换为拍摄平台实际坐标:

$$[x'', y'', w''] = [u, v, w]H = [u, v, w] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = \frac{x''}{w''} - x_c \\ y = \frac{y''}{w''} - y_c \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $u$ 、 $v$  为 $S_{c-smooth}$ 上的像素坐标值,  $w$  为灰度值,  $x$ 、 $y$  为加工路径的实际坐标值,  $x''$ 、 $y''$ 、 $w''$  为中间参数,  $(x_c, y_c)$  是步骤(4)所得到的加工平台原点坐标。

## 一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于图像计算技术领域,具体涉及的是一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法。

### 背景技术

[0002] 由于计算机技术及图像处理算法的日趋成熟,目前机械加工中已经出现了各种各样的视觉型数控系统,纵观整个加工领域,存在着许多这样的成形加工:如用卷板机床卷制各种形状的金属筒时,同样的加工参数和环境条件,由于板件的形状误差与材质的不均匀,前一个板件能实现板缝之间对接成筒,而后一个却对接不上,因此需要边卷制边调整辊筒位置和速度,整个过程离不开人工参与,还有弯管、弯板、挤压成形等加工都存在类似情况。此类加工有一个共同点,即每次新的加工过程都会出现不同的情况,需要人为的监视与修正,这不同于同一性的模具成形加工,称之为各异性成形加工,正是各异性的特点,制约了该类加工的自动化进程与高效生产。因此,我们需要一种可以根据不同形状来自适应的调整加工轮廓的方法。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的:为了解决各异性成形轮廓加工过程中需要人为监视与修正的技术问题,本发明提供一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法。

[0004] 为了实现上述目的,本发明通过以下技术方案予以实现。

[0005] 一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法,包括以下步骤:

[0006] S1、相机标定

[0007] 架设摄像机及背光板,校准摄像机的焦距,调整摄像机的曝光量,使摄像机可以清晰区分工件和背光板;使用 $n \times n$ 棋盘格拍摄 $m$ 张标定图像,利用张正友标定法得到单应矩阵 $H$ 、畸变系数 $\text{distCoeffs} = [k_1, k_2, p_1, p_2]$ 、内参矩阵 $M_1 = [f_x, f_y, c_x, c_y]$ 、外参矩阵 $M_2$ ;

[0008] S2、拍摄工件图像并预处理

[0009] 驱动机械手臂将工件放到工作台上,拍摄工件图像,设为图像 $A$ ,利用步骤S1中得到的畸变系数 $\text{distCoeffs}$ 、内参矩阵 $M_1$ ,根据以下公式(1)~(4)对图像 $A$ 进行矫正,得到去除图像畸变后的图像 $B$ ,

$$[0010] \quad \begin{cases} x_B = f_x x_{A'} + c_x \\ y_B = f_y y_{A'} + c_y \end{cases} \quad (1)$$

$$[0011] \quad x_{A'} = x_A(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x_A y_A + p_2(r^2 + 2x_A^2) \quad (2)$$

$$[0012] \quad y_{A'} = y_A(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_2 x_A y_A + p_1(r^2 + 2y_A^2) \quad (3)$$

$$[0013] \quad r = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} \quad (4)$$

[0014] 其中, $x_A, y_A$ 为图像 $A$ 中同一像素的水平、垂直坐标, $x_B, y_B$ 为图像 $B$ 中同一像素的水平、垂直坐标, $r$ 为中间变量;

[0015] S3、寻找边界并形成工件轮廓图像

[0016] 对步骤S2中去畸变后的图像B进行二值化处理得到图像Bb, 然后对图像Bb寻找边界, 并找到所有的连通轮廓面积, 保留面积最大的轮廓为 $C_{\max}$ , 将其他轮廓删除, 得到工件的轮廓图像D;

[0017] S4、校准轮廓质心与加工平台的坐标系

[0018] 求步骤S3中轮廓 $C_{\max}$ 的特征矩 $m = \{m_{00}, m_{10}, m_{01}\}$ , 其中,  $m_{00}$ 为轮廓面积,  $m_{10}$ 为轮廓区域中x坐标值之和,  $m_{01}$ 为轮廓区域中y坐标值之和; 根据以下公式 (5) 得到轮廓质心坐标 $P(x_c, y_c)$ , 将质心坐标P设为加工平台的原点;

$$[0019] \quad \begin{cases} x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}} \\ y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{cases} \quad (5)$$

[0020] S5、在工件轮廓图像上生成用户所需的缩进轮廓坐标集 $S_c$

[0021] 对步骤S3中轮廓 $C_{\max}$ 的所有坐标点, 根据用户设定的轮廓缩进参数 $P_{\text{sawtooth}}$ , 利用以下公式 (6) 向内缩进, 得到用户所需的缩进轮廓坐标集 $S_c$ ,

$$[0022] \quad \begin{cases} S_c(x, y) = \min_{(x', y') : \text{element}(x', y') \neq 0} C_{\max}(x + x', y + y') \\ x' = P_{\text{sawtooth}} * k_x \\ y' = P_{\text{sawtooth}} * k_y \end{cases} \quad (6)$$

[0023] 其中 $(x, y)$ 为图像D中轮廓的像素坐标,  $(x', y')$ 为图像D中 $(x, y)$ 邻接的像素坐标,  $k_x$ 、 $k_y$ 分别表示图像视野与平台大小的水平、垂直比例, element为坐标元素;

[0024] S6、利用中值滤波平滑轮廓 $S_c$ 得到 $S_{c\text{-smooth}}$

[0025] 当使用者对当前某段轮廓不满意, 可以在图像D中通过鼠标画直线L截取该段轮廓, 求得L与轮廓的交点为 $a(x_a, y_a)$ ,  $b(x_b, y_b)$ , 线段ab代替该段轮廓, 根据中值滤波法平滑交点a、b前后n个轮廓点, 生成调整后的平滑轮廓 $S_{c\text{-smooth}}$ ;

[0026] S7、根据用户预设条件生成覆盖工件图像的多条轮廓线

[0027] 对轮廓 $S_{c\text{-smooth}}$ , 根据用户设定轮廓扩展参数 $P_{\text{expend}}$ , 利用以下公式 (7) 将步骤S6中获得的轮廓 $S_{c\text{-smooth}}$ 向外扩展, 生成多个轮廓为 $S_{c\text{-expend}}$ :

$$[0028] \quad \begin{cases} S_{c\text{-expend}}(x, y) = \max_{(x', y') : \text{element}(x', y') \neq 0} S_{c\text{-smooth}}(x + x', y + y') \\ x' = P_{\text{expend}} k_x \\ y' = P_{\text{expend}} k_y \end{cases} \quad (7)$$

[0029] 其中 $(x, y)$ 为图像D中轮廓 $S_{c\text{-smooth}}$ 的像素坐标,  $(x', y')$ 为图像D中 $(x, y)$ 邻接的像素坐标,  $k_x$ 、 $k_y$ 分别表示图像视野与平台大小的水平、垂直比例, element为坐标元素;

[0030] S8、根据轮廓线生成加工路径

[0031] 将步骤S7获得的轮廓 $S_{c\text{-expend}}$ 中的像素坐标根据步骤S1中的单应矩阵H利用以下公式 (8) 和公式 (9) 转换为拍摄平台实际坐标:

$$[0032] \quad [x'', y'', w''] = [u, v, w]H = [u, v, w] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[0033] \quad \begin{cases} x = \frac{x''}{w''} - x_c \\ y = \frac{y''}{w''} - y_c \end{cases} \quad (9)$$

[0034] 其中,  $u$ 、 $v$  为  $S_{c\text{-expend}}$  上的像素坐标值,  $w$  为灰度值,  $x$ 、 $y$  为加工路径的实际坐标值,  $x''$ 、 $y''$ 、 $w''$  为中间参数,  $(x_c, y_c)$  是步骤 (4) 所得到的加工平台原点坐标。

[0035] 与现有技术相比, 本发明的有益效果为:

[0036] 本发明提供了一种基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法, 可以根据不同形状来自适应的调整加工轮廓, 使各异性成形加工无需人工监视与修正, 提高了各异性成形加工自动化进程与高效生产。

### 附图说明

[0037] 图1是本发明的流程图;

[0038] 图2是本发明中拍摄的棋盘格图像;

[0039] 图3是本发明中拍摄的工件图像;

[0040] 图4是本发明中预处理后的工件图像;

[0041] 图5是本发明中生成单条轮廓线的工件图像;

[0042] 图6是本发明中手动调整轮廓线的工件图像;

[0043] 图7是本发明中手动调整轮廓线后的工件图像;

[0044] 图8是本发明中根据预设条件生成多条轮廓线的工件图像。

### 具体实施方式

[0045] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细描述。

[0046] 如图1至图8 中 基于机器视觉的不规则工件加工路径生成方法, 包括以下步骤:

[0047] S1、相机标定

[0048] 架设摄像机及背光板, 校准摄像机的焦距, 调整摄像机的曝光量, 使摄像机可以清晰区分工件和背光板; 使用  $n \times n$  棋盘格拍摄  $m$  张标定图像, 利用张正友标定法得到单应矩阵  $H$ 、畸变系数  $\text{distCoeffs} = [k_1, k_2, p_1, p_2]$ 、内参矩阵  $M_1 = [f_x, f_y, c_x, c_y]$ 、外参矩阵  $M_2$ ; 如图2所示是本实施例的标定结果;

[0049] S2、拍摄工件图像并预处理

[0050] 驱动机械臂将工件放到工作台上, 拍摄工件图像, 设为图像  $A$ , 如图3所示, 利用步骤 S1 中得到的畸变系数  $\text{distCoeffs}$ 、内参矩阵  $M_1$ , 根据以下公式 (1) ~ (4) 对图像  $A$  进行矫正, 得到去除图像畸变后的图像  $B$ ,

$$[0051] \quad \begin{cases} x_B = f_x x_{A'} + c_x \\ y_B = f_y y_{A'} + c_y \end{cases} \quad (1)$$

$$[0052] \quad x_{A'} = x_A (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x_A y_A + p_2 (r^2 + 2x_A^2) \quad (2)$$

$$[0053] \quad y_{A'} = y_A (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_2 x_A y_A + p_1 (r^2 + 2y_A^2) \quad (3)$$

$$[0054] \quad r = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} \quad (4)$$

[0055] 其中,  $x_A$ 、 $y_A$  为图像  $A$  中同一像素的水平、垂直坐标,  $x_B$ 、 $y_B$  为图像  $B$  中同一像素的水

平、垂直坐标,  $r$  为中间变量;

[0056] S3、寻找边界并形成工件轮廓图像

[0057] 对步骤S2中去畸变后的图像B进行二值化处理得到图像Bb, 如图4所示, 然后对图像 Bb 寻找边界, 并找到所有的连通轮廓面积, 保留面积最大的轮廓为  $C_{max}$ , 将其他轮廓删除, 得到工件的轮廓图像D, 如图5所示;

[0058] S4、校准轮廓质心与加工平台的坐标系

[0059] 求步骤S3中轮廓  $C_{max}$  的特征矩  $m = \{m_{00}, m_{10}, m_{01}\}$ , 其中,  $m_{00}$  为轮廓面积,  $m_{10}$  为轮廓区域中  $x$  坐标值之和,  $m_{01}$  为轮廓区域中  $y$  坐标值之和; 根据以下公式 (5) 得到轮廓质心坐标  $(x_c, y_c)$ , 将质心坐标P设为加工平台的原点;

$$[0060] \quad \begin{cases} x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}} \\ y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{cases} \quad (5)$$

[0061] S5、在工件轮廓图像上生成用户所需的缩进轮廓坐标集  $S_c$

[0062] 对步骤S3中轮廓  $C_{max}$  的所有坐标点, 根据用户设定的轮廓缩进参数  $P_{sawtooth}$ , 利用以下公式 (6) 向内缩进, 得到用户所需的缩进轮廓坐标集  $S_c$ ,

$$[0063] \quad \begin{cases} S_c(x, y) = \min_{(x', y'): element(x', y') \neq 0} C_{max}(x + x', y + y') \\ x' = P_{sawtooth} * k_x \\ y' = P_{sawtooth} * k_y \end{cases} \quad (6)$$

[0064] 其中  $(x, y)$  为图像D中轮廓的像素坐标,  $(x', y')$  为图像D中  $(x, y)$  邻接的像素坐标,  $k_x$ 、 $k_y$  分别表示图像视野与平台大小的水平、垂直比例,  $element$  为坐标元素;

[0065] S6、利用中值滤波平滑轮廓  $S_c$  得到  $S_{c-smooth}$

[0066] 当使用者对当前某段轮廓不满意, 可以在图像D中通过鼠标画直线L截取该段轮廓, 求得L与轮廓的交点为  $a(x_a, y_a)$ ,  $b(x_b, y_b)$ , 线段ab代替该段轮廓, 根据中值滤波法平滑交点a、b前后  $n$  个轮廓点, 生成调整后的平滑轮廓  $S_{c-smooth}$ , 如图6所示;

[0067] S7、根据用户预设条件生成覆盖工件图像的多条轮廓线

[0068] 对轮廓  $S_{c-smooth}$ , 根据用户设定轮廓扩展参数  $P_{expend}$ , 利用以下公式 (7) 将步骤S6中获得的轮廓  $S_{c-smooth}$  向外扩展, 生成多个轮廓为  $S_{c-expend}$ :

$$[0069] \quad \begin{cases} S_{c-expend}(x, y) = \max_{(x', y'): element(x', y') \neq 0} S_{c-smooth}(x + x', y + y') \\ x' = P_{expend} k_x \\ y' = P_{expend} k_y \end{cases} \quad (7)$$

[0070] 如图7所示是用户调整后的加工路径; 其中  $(x, y)$  为图像D中轮廓  $S_{c-smooth}$  的像素坐标,  $(x', y')$  为图像D中  $(x, y)$  邻接的像素坐标,  $k_x$ 、 $k_y$  分别表示图像视野与平台大小的水平、垂直比例,  $element$  为坐标元素;

[0071] S8、根据轮廓线生成加工路径

[0072] 将步骤S7获得的轮廓  $S_{c-expend}$  中的像素坐标根据步骤S1中的单应矩阵H利用以下公式 (8) 和公式 (9) 转换为拍摄平台实际坐标:

$$[0073] \quad [x'', y'', w''] = [u, v, w] H = [u, v, w] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[0074] \quad \begin{cases} x = \frac{x''}{w''} - x_c \\ y = \frac{y''}{w''} - y_c \end{cases} \quad (9)$$

[0075] 其中,  $u$ 、 $v$  为  $S_{c\_expand}$  上的像素坐标值,  $w$  为灰度值,  $x$ 、 $y$  为加工路径的实际坐标值,  $x''$ 、 $y''$ 、 $w''$  为中间参数,  $(x_c, y_c)$  是步骤 (4) 所得到的加工平台原点坐标, 在本实施例中加工平台原点坐标如下:

[0076] [轮廓]

[0077] 圆心的X坐标=37.222561

[0078] 圆心的Y坐标=50.059418

[0079] 内圈轮廓面积=1219.784027

[0080] 内圈轮廓周长=145.181081

[0081] 轮廓的圈数=8

[0082] [1圈轮廓坐标]

[0083] 轮廓点数=6220

[0084] 轮廓坐标  $\rho_1=84.789702$

[0085] 轮廓坐标  $\theta_1=160.668961$

[0086] 轮廓坐标  $\rho_2=84.754012$

[0087] 轮廓坐标  $\theta_2=160.698242$

[0088] 轮廓坐标  $\rho_3=84.744780$

[0089] 轮廓坐标  $\theta_3=160.743301$

[0090] 轮廓坐标  $\rho_4=84.735564$

[0091] 轮廓坐标  $\theta_4=160.788422$

[0092] 轮廓坐标  $\rho_5=84.726375$

[0093] 轮廓坐标  $\theta_5=160.833542$

[0094] 轮廓坐标  $\rho_6=84.717204$

[0095] 轮廓坐标  $\theta_6=160.878677$

[0096] 轮廓坐标  $\rho_7=84.708056$

[0097] 轮廓坐标  $\theta_7=160.923859$

[0098] 轮廓坐标  $\rho_8=84.698924$

[0099] 轮廓坐标  $\theta_8=160.969055$

[0100] 轮廓坐标  $\rho_9=84.689818$

[0101] 轮廓坐标  $\theta_9=161.014267$

[0102] 轮廓坐标  $\rho_{10}=84.680732$

[0103] 轮廓坐标  $\theta_{10}=161.059509$

[0104] 轮廓坐标  $\rho_{11}=84.671664$

[0105] 轮廓坐标  $\theta_{11}=161.104782$

[0106] 轮廓坐标  $\rho_{12}=84.662619$ 。

[0107] 如图8所述, 最终生成从粗到精的多条加工路径。

[0108] 为了验证轮廓是否精确, 我们采用三个不同尺寸的标准圆进行测量, 实验结果如

表1所示,标准圆半径分别为 $R1=20\text{mm}$ , $R2=30\text{mm}$ , $R3=40\text{mm}$ 。

[0109] 表1

序号	实际测量半径(mm)	系统测量半径(mm)	误差
R1	19.9854	20.0121	0.0267
R2	30.0123	30.0211	0.0013
R3	39.9912	40.0167	0.0255

[0111] 实验表明系统测量与实际测量的误差在 $0.03\text{mm}$ 之内,满足企业需求。

[0112] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

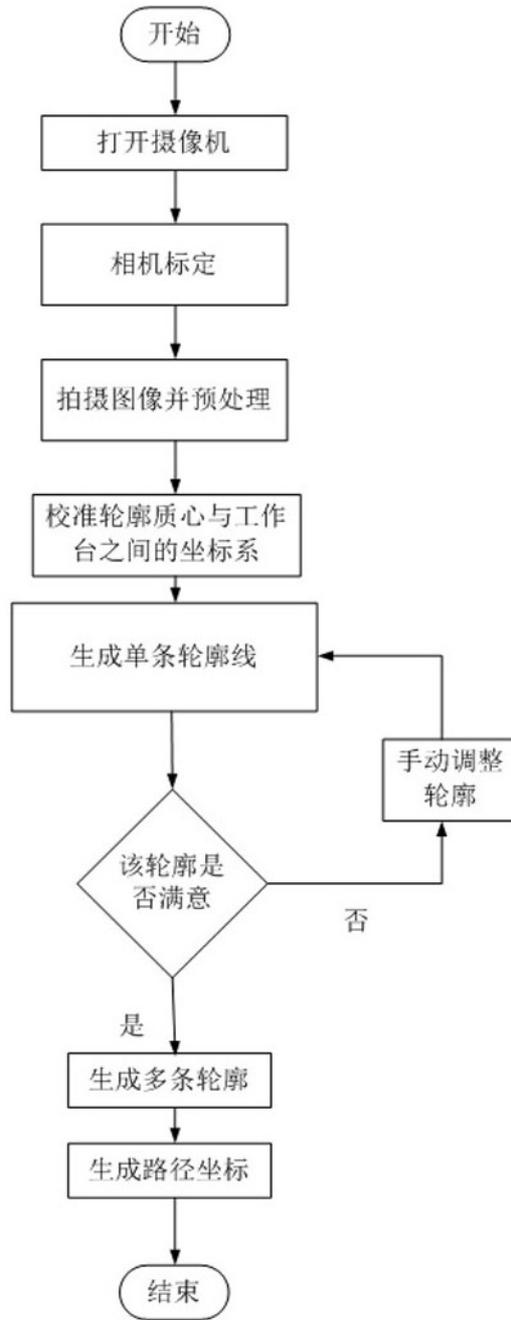


图1

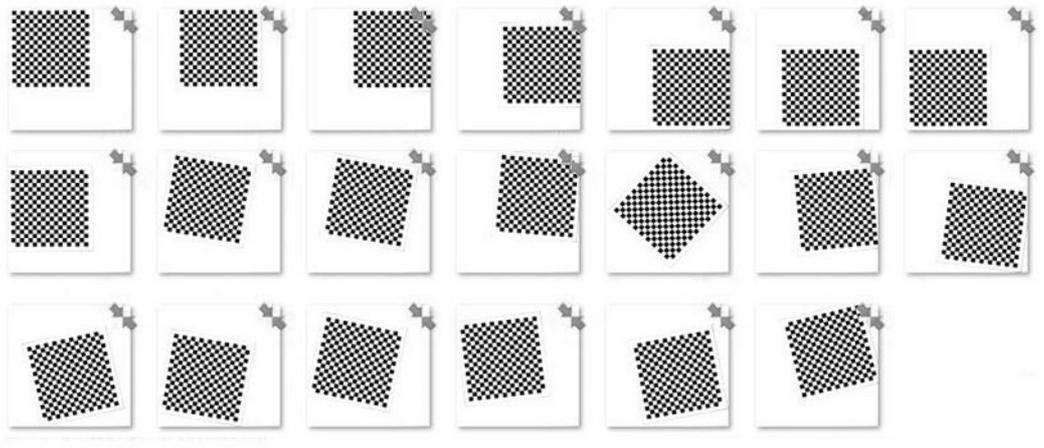


图2



图3

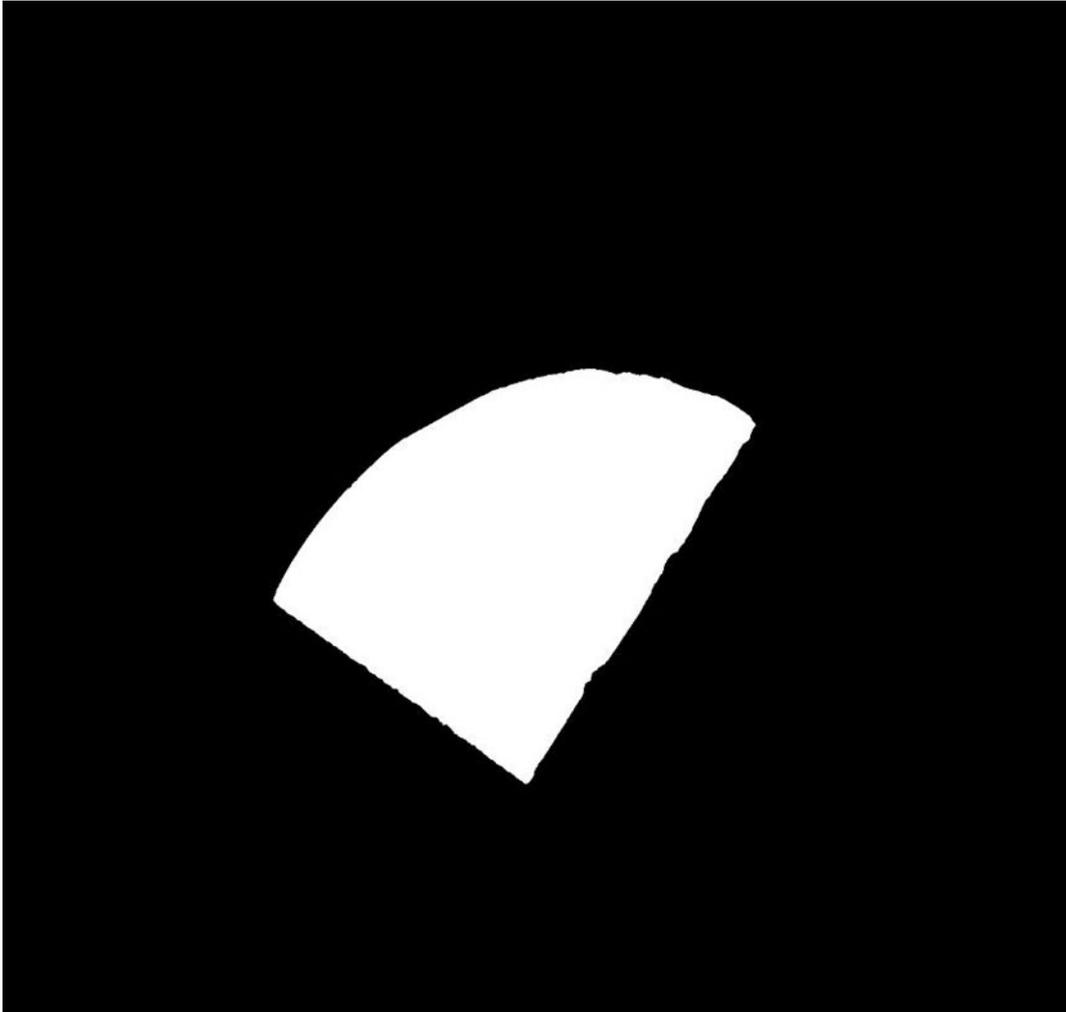


图4

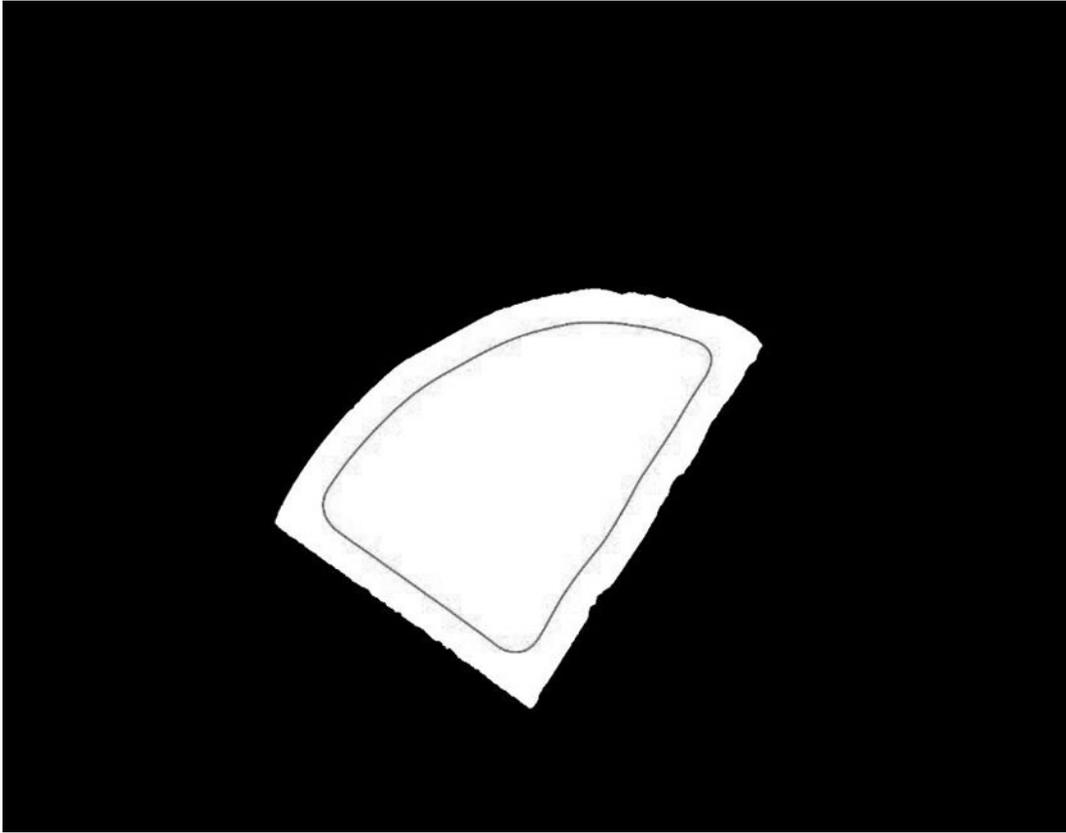


图5

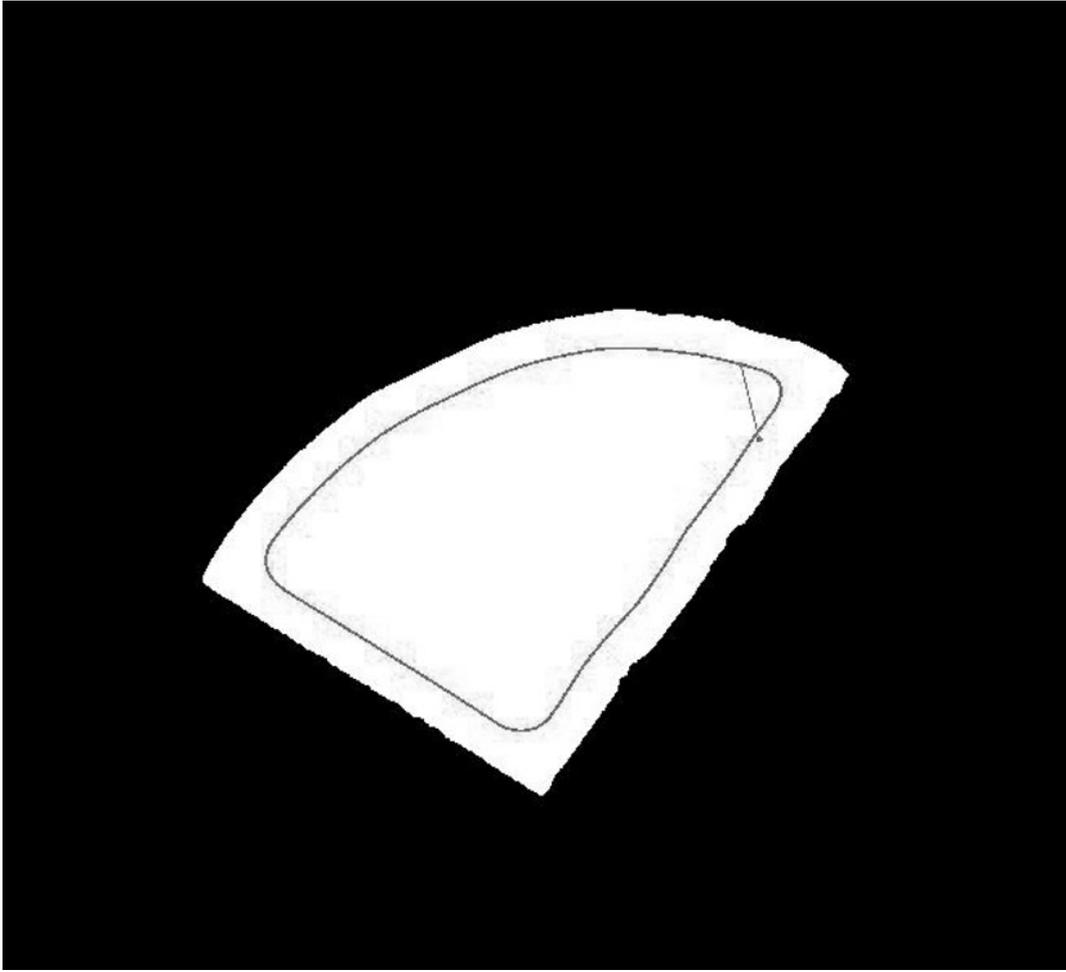


图6

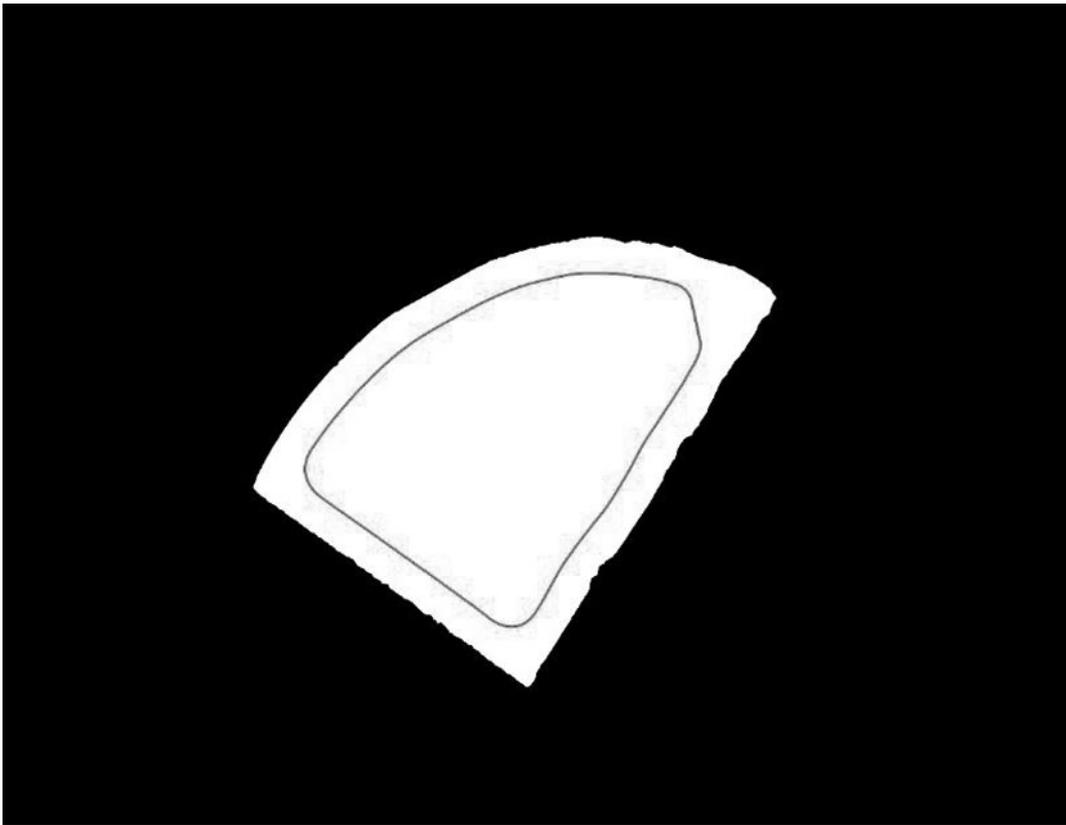


图7

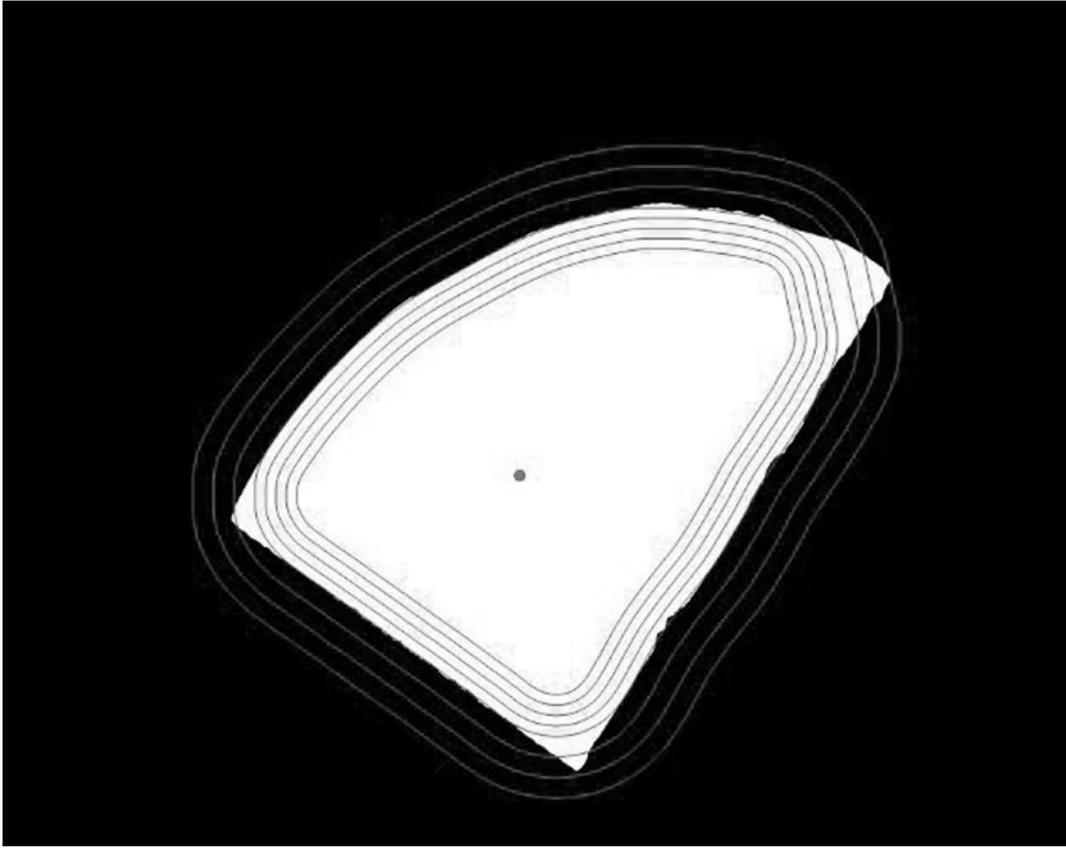


图8