

基于改进主动轮廓模型的注塑制品轮廓提取*

刘 阳¹, 王福利^{1,2}, 常玉清¹, 吕 哲¹

(1 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004;

2 东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室 沈阳 110004)

摘 要: 注塑制品边缘轮廓提取是实现注塑制品边缘缺陷检测的重要前提, 主动轮廓模型为注塑制品边缘轮廓提取提供了思路. 本文结合注塑制品特点, 提出改进的主动轮廓模型方法. 该方法充分利用先验知识, 提出初始轮廓确定方法; 综合参数主动轮廓模型与几何主动轮廓模型的思想, 提出控制点搜索方法; 针对传统参数主动轮廓模型不能实现曲线拓扑的问题, 采用控制点与样条的形式表述制品轮廓, 提出插值准则, 噪声控制点抑制准则以及控制点压缩方法. 实验结果证明, 该方法能够快速、准确的实现对具有待检测制品位于图像的中心附近, 且待检测制品的中心在制品内部的注塑制品边缘轮廓提取。

关键词: 注塑制品; 主动轮廓模型; 边缘提取; 初始轮廓; 控制点

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Injection molding product edge extraction using improved active contour model

Liu Yang, Wang Fuli, Chang Yuqing, Lv Zhe

(1 School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2 Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Edge extraction of injection molding product is the most important precondition of product defect detection. Active contour model offers a good way. The characteristics of injection molding product are studied and an improved method is proposed for its edge extraction. Priori knowledge is used to obtain initial contour. Parametric snakes and geometric snakes are integrated to search snaxels. Both snaxels and spline are used to formulate final contour. Interpolation standard, noise snaxel eliminating and snaxel compression are proposed. Experiment results show that this method is efficient in object edge extraction for the object that is located around the center of the image and whose center is in the inner of the object.

Key words: injection molding product; active contour model; edge extraction; initial contour; snaxel

1 引 言

注塑制品作为塑料这类新型材料的产品, 其采集到的图像具有独特的性质。由于采用机器视觉系统与注塑制品取出装置配合实现对注塑制品图像的获取, 使得制品中心位置大致确定, 但是在制品取出过程中震动的存在, 制品边缘位置却不固定; 由于采用光源, 使得制品的边缘处与背景间存在较大的对比, 但是光源作用也使得

制品纹理及内部轮廓清晰可见, 在一定程度上对制品边缘提取造成影响; 注塑制品的形状与模具的设计息息相关, 其边缘为单连通连续曲线, 但是制品在生产过程中, 可能存在欠注与飞边等缺陷, 因此, 很难对其形状进行建模。不仅如此, 注塑制品的生产周期短, 为了实现在线检测, 边缘提取的速度也是不容忽视的重要指标。

主动轮廓模型是一条受控于外部约束力与图像力的样条, 该样条使某个能量函数达到极值并最终收敛到轮廓特征^[1]。目前, 针对不同应用中能量函数的设计以及

收稿日期: 2007-12 Received Date: 2007-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(60774068)、973 计划子课题(2002CB312201)资助项目

求解等问题出现了很多变形^[24],主要归结为参数活动轮廓模型^[1]:5-7]与几何活动轮廓模型^[8-9]两类。其中,参数活动轮廓模型显式地描述曲线,很容易对 Snake 框架引入先验的形状约束,也很容易地允许用户交互,指定曲线必须经过的点^[1]。但是,这类模型通常只具备单目标轮廓分割能力,且对曲线演化过程中出现的拓扑变化无能为力。几何活动轮廓模型采用了水平集方法隐含地描述曲线,具有拓扑变化能力,更适用于具有复杂结构的图像分割,但是由于该模型通过曲面进化计算曲线,因此,其计算复杂度高,且很难利用先验知识。近 20 年来,主动轮廓模型被广泛应用于边缘提取、医学图像分割^[10]以及运动跟踪^[11]等领域,并取得了大量的研究成果。但是,对于注塑制品这类具有复杂形状以及对边缘提取的精度、速度要求均较高的情况,目前的研究成果均或多或少的存在问题。基于此,本文针对采集到的注塑制品图像的特点,综合利用参数主动轮廓模型与几何主动轮廓模型的优点设计并实现了一套注塑制品边缘提取方法,该方法能够快速、准确的实现对注塑制品的边缘轮廓的提取。

2 本文提出的方法

为了简单且显式的表达注塑制品的轮廓,本文采用参数主动轮廓模型中提出的控制点以及样条的表示方法。为了满足对检测速度的要求,本文采用首先确定初始轮廓的方法,针对采集到的图像中注塑制品的位置及结构特点,提出一种快速初始轮廓确定方法;为了满足对检测精度的要求,本文采用对控制点间插值并搜索的方法,提出插值判断准则以及控制点搜索方法,针对搜索过程中出现的噪声控制点,提出噪声控制点抑制方法;为了在满足精度要求的情况下优化提取到的轮廓,本文提出控制点压缩方法。下面分别从初始轮廓确定、控制点间插值、控制点移动、控制点压缩与噪声控制点抑制以及轮廓搜索终止条件等方面对该方法进行描述。

2.1 初始轮廓确定

利用先验知识确定初始轮廓为实现快速的边缘检测提供了可靠的保证。但是对于注塑制品而言,传统主动轮廓模型所采用的固定初始轮廓位置或人机交互的方法均不适用。首先,为了使轮廓提取方法适应获取到的图像中存在外部光线干扰、边缘缺陷以及制品取出时发生的旋转、平移等因素的影响,采用固定位置的方式是不合适的;其次,为了实现自动在线检测,需要尽可能的避免人工干预,采用人机交互的方式也不合适。基于此,本文针对注塑制品的特点,提出黑白初始轮廓确定方法,该方法首先利用灰度直方图以及 K 均值聚类方法确定二值化阈值,对获取的注塑制品图像进行二值化;然后利用特征方向上像素的灰度以及结构信息确定该特征方向上制品

的初始轮廓点,全部特征方向上的初始轮廓点组成的集合即为所求的初始轮廓。

2.1.1 图像二值化

图像二值化是通过阈值将灰度以及彩色图像变为二值图像,根据选取阈值的方法不同,可以分为全局阈值法和局部阈值法,全局阈值法计算速度快,局部阈值法计算精度高。本文用于确定初始轮廓的二值化图像不要求高精度,而要求高速度,因此,选用全局阈值法。由于获取到的图像受到外界光源等噪声的影响,因此,本文提出利用灰度直方图与 K 均值聚类相结合的方法确定二值化阈值。

首先,利用灰度直方图得到对应灰度值下像素数目;然后,对其进行 K 均值聚类,聚类个数为 3,分别对应背景、目标与其他,并得到 K 均值下背景中心对应的灰度值 V_b 与目标中心对应的灰度值 V_o ;最后,利用式(1)确定二值化阈值。

$$V = \alpha \cdot V_b + (1 - \alpha) \cdot V_o \quad (1)$$

式中: $\alpha \in (0, 1)$ 为可调参数, α 的选取与二值化所忽略的细节信息相关, α 选取的越小,受到噪声干扰越小,但是二值化所忽略的细节信息也越多。

2.1.2 确定初始控制点

本文利用控制点以及样条的方法表述注塑制品边缘轮廓,该轮廓的精度与控制点的个数相关,控制点个数越多,轮廓精度越高,计算速度越慢;因此,本文提出采用初始控制点可调的方法综合算法的计算速度与精度。具体实现步骤如下:设 $C_0(j), j=1, \dots, N_0$ 为初始轮廓点组成的集合,其中, N_0 为根据经验设定的初始控制点个数,利用 N_0 计算角度间隔 $\Delta\theta = 2\pi / N_0$, 定义 $\Delta\theta \cdot j, (j=1, \dots, N_0)$ 为特征方向,选取特征方向上的像素灰度值构成向量 P_j , 则 P_j 由 k_j 段相邻的且每段长度为 $n(k), k=1, \dots, k_j$ 的 255 与 0 组成, 255 代表制品、0 代表背景。若 $k_j = 2$, 则该特征方向上仅包含制品与背景,则这两段的分界点即为所求初始控制点;若 $k_j > 2$, 则该特征方向上或者制品内部、或者背景中存在噪声段,则利用 $n(k)$ 判断该段是否为噪声段,若某背景段相邻两侧的制品段长度均大于该背景段长度,则认为该背景段为噪声段,将其归为制品类;同理,若某制品段相邻两侧的背景段长度均大于该制品段长度,则认为该制品段为噪声段,将其归为背景类。

由本文提出的初始轮廓确定方法可知,该方法适合于位置大致确定,且中心在制品内部的制品轮廓提取。

2.2 控制点迭代搜索

2.2.1 控制点间插值

B 样条主动轮廓模型提出在相邻控制点间插值增加检测精度^[8-9],但是,并非全部相邻控制点间均需要插值,因此,为了提高检测速度,有必要对这个问题进行研究。实际上,几何主动轮廓模型为解决该问题提供了一个思

路,几何主动轮廓模型采用水平集表达最终边缘,该水平集由水平集函数确定,在边缘上,水平集函数值为0,在水平集内侧或者外侧,水平集函数值符号相反,水平集函数实质上是图像灰度的函数。根据几何主动轮廓模型的这个思想,本文提出通过判断控制点间连线两侧窄带内灰度均值对比实现控制点间插值。

控制点 a 与 b 间连线两侧窄带内灰度均值对比 $G(a,b)$ 反映了 a 与 b 间样条与真正轮廓的拟合程度,由边缘曲线的连续性可知,相邻的灰度均值对比相似,因此,利用相邻的灰度均值对比中的最大值作为插值准则,如式(2)所示,其中, $C_i^1(j), j=1, \dots, N_i^1$ 为第 i 次迭代过程中待插值的控制点组成的集合, G_i 为以 $G(a,b)$ 为中心的邻域内全部灰度均值对比的最大值。式(2)表明,若待插值控制点 a 与 b 间的 $G(a,b)$ 为以其为中心的邻域内的最大值,则认为控制点 a 与 b 间不需要插值,否则对其进行插值,由于插值是迭代进行的,若当此迭代过程中该段已经收敛到真实轮廓,则可以通过该灰度均值对比指导邻域内的其他控制点间插值,若该段没有收敛到真实轮廓,则其邻域内其他控制点间插值后新产生的灰度均值对比同样可以指导其收敛到真实轮廓。当控制点 a 与 b 间需要插值时,由式(2)以及待插值控制点间距离的限制可知,插如点的个数与 G_i 相关,并且与控制点 a 与 b 间的距离相关,因此,综合考虑上述因素,本文提出通过式(3)计算插值个数,并在 $C_i^1(j)$ 与 $C_i^1(j+1)$ 之间的连线上进行分段线性插值,得到第 i 次迭代过程中插值后的控制点组成的集合 $C_i^2(j), j=1, \dots, N_i^2$, 其中, $D_m(a,b)$ 表示控制点 a 与 b 间连线距离, $\beta \in (0,1)$, $\gamma \in (0,1)$ 为可调参数,控制插值点数量。

$$G(C_i^1(j), C_i^1(j+1)) < G_i \quad (2)$$

$$M_i(j, j+1) = \min \left\{ \beta \cdot \left(\frac{G_i}{G(C_i^1(j), C_i^1(j+1))} - 1 \right), \gamma \cdot D_m(C_i^1(j), C_i^1(j+1)) \right\} \quad (3)$$

2.2.2 控制点移动

控制点的移动是主动轮廓模型的核心,也是获得轮廓的必要过程,传统的做法希望从图像灰度信息以及曲线结构信息中提取出到达目标的路径,但是对大量图像的分析表明,只有在图像边缘附近图像的灰度信息才能提供抵达边缘的路径,其主要原因是计算该路径的方法存在问题。传统参数主动轮廓模型综合考虑曲线轮廓光滑性与灰度梯度的作用指导控制点的移动^[1],而差分方法获得的图像灰度梯度存在使控制点收敛到局部极小点的可能,从而抑制控制点向边缘方向移动。

由曲线的连续性可知,制品边缘上距离较近的控制点间存在连通曲线,并且,本文确定的初始轮廓点的位置较接近真实边缘,即初始轮廓点以及通过初始轮廓点间

插值方法获得的控制点均在真实边缘附近,因此,只要选取适当的搜索范围、搜索方向与终止条件,即可以通过搜索的方法将本文提出方法获得的控制点移动到制品边缘上。基于此,本文提出分别考虑控制点移动方式与控制点移动终止条件的方法实现控制点移动,即采用搜索的方法利用曲线结构信息计算控制点的搜索方向与范围,并利用灰度信息与曲线结构信息相结合作为控制点移动终止条件。

1) 控制点的搜索方向与搜索范围

控制点的搜索方向必须确保控制点不至终止于与其相邻的控制点所在的位置,因此,本文选取图1中 D_o 与 D_i 所示方向为该控制点的搜索方向,其中, $C_i^2(k)$ 为待移动控制点, $C_i^2(k-1)$ 和 $C_i^2(k+1)$ 为与 $C_i^2(k)$ 相邻的控制点, D_o 与 D_i 方向分别与 $C_i^2(k-1)$ 和 $C_i^2(k+1)$ 所在直线方向垂直。由于本文通过在控制点间插值的方法增加控制点,因此,新迭代过程中的控制点或者为上一次迭代过程中控制点,或者在上一次迭代过程中相邻控制点间连线上,因此,该方向的选取保证了新迭代过程中控制点不至终止于与其相邻的控制点所在的位置。

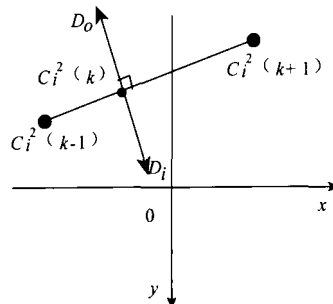


图1 控制点搜索方向

Fig. 1 Searching direction of the control points

根据制品边缘的连续性,搜索范围 F 的大小与待移动控制点到其相邻控制点间距离的最小值有关,因此,本文通过式(4)确定控制点的搜索范围,其中, $\eta \in [1, \infty)$ 为比例系数,控制搜索范围的大小。

$$F = \eta \cdot \min \left\{ D_m(C_i^2(k), C_i^2(k+1)), D_m(C_i^2(k), C_i^2(k-1)) \right\} \quad (4)$$

2) 控制点移动终止条件

主动轮廓模型采用迭代的方法综合考虑图像的灰度信息以及边缘的结构信息实现边缘提取。事实上,若用控制点及其连线表述边缘,则边缘体现为控制点处灰度变化与控制点间连线两侧窄带内灰度均值对比综合最大,因此,本文提出将式(5)作为控制点移动终止条件。但是,由于初始轮廓上的点未必在待检测边缘上,因此,需要采用迭代的方式实现对边缘的搜索,本文为了提高算法的计算速度,提出对式(5)进行改进,结果如式(6)所示,其中, $index(x)$ 表示条件为 x 时对应的图像中像素

点坐标, $Q_i^j(k), k=1, \dots, F$ 为第 i 次迭代过程中待移动的控制点 $C_i^j(j)$ 在其搜索方向上像素点 $P_i^j(k), k=1, \dots, F$ 对应的灰度值组成的集合, $\Delta Q_i^j(k)$ 为搜索方向上像素点 $P_i^j(k)$ 处的灰度变化, $C_i^3(j), j=1, \dots, N_i^3$ 为第 i 次迭代过程中移动后的控制点组成的集合, $G_i^n(a, b)$ 表示在点 a 与 b 连线上以点 a 为起点、长度为 n 的两侧窄带内灰度均值对比。由式(6)可知,改进后减少了计算量,但是可能引入新的噪声,对于该问题,本文采用下节中提出的噪声控制点抑制的方法加以消除。

$$C_i^3(j) = \text{index} \{ \max [\Delta Q_i^j(k) + G(P_i^j(k), C_i^2(j-1)) + G(P_i^j(k), C_i^2(j+1))] \} \quad (5)$$

$$C_i^3(j) = \text{index} \{ \max [\Delta Q_i^j(k) + G_i^n(P_i^j(k), C_i^2(j-1)) + G_i^n(P_i^j(k), C_i^2(j+1))] \} \quad (6)$$

2.2.3 控制点压缩与噪声控制点抑制

经过插值以及搜索移动以后的控制点可能存在冗余的问题,该冗余不仅增加了计算的复杂度,而且增加了轮廓描述的复杂度,因此,需要压缩冗余的控制点,本文根据轮廓的表述形式,提出控制点压缩方法。上文中提到的噪声控制点并非边缘轮廓上的点,这类控制点不仅影响插值点的准确性,而且影响轮廓迭代过程以及最终的表述,因此,必须加以抑制,本文根据该类噪声控制点的特点,提出噪声控制点抑制方法。下面分别对控制点压缩以及噪声控制点抑制进行描述。

1) 控制点压缩

本文采用控制点与控制点间连线相结合的方式表达最终确定的轮廓,这种表述形式简单、有效,但迭代插值过程使得控制点出现冗余的问题,该冗余问题表现为相邻3个或3个以上控制点均在一条直线上,由本文采用的轮廓表达方式可知,仅需保留两个边界点即可实现对这些控制点的表述,因此,本文采用保留边界控制点,消除中间控制点的方法进行压缩,得到压缩后的控制点组成的集合 $C_i^4(j), j=1, \dots, N_i^4$ 。

2) 噪声控制点抑制

噪声控制点的产生与控制点移动搜索范围的大小以及该搜索范围内的待搜索点所具有的特征相关。首先,若搜索范围的大小不足以使控制点移动到轮廓,则必然产生噪声控制点;其次,由于本文采用式(6)代替式(5)的方式提高算法的计算速度,若搜索范围内存在类似轮廓特征的待搜索点,则同样产生噪声控制点。这些噪声控制点都有相似的特征,即该控制点与其相邻两侧控制点间不构成轮廓,也就不存在通路,表现为该控制点与其相邻控制点间连线两侧灰度均值对比均比较小,因此,本文提出通过式(7)判断是否删除该控制点,其中, $\text{mean}(a, b)$ 表示点 a 与 b 的均值, Gm 表示全部灰度均值对比的最大值, $\varepsilon \in (0, 1)$ $\eta \in [0, 1]$ 为可调参数,控制对噪声控制点的抑制程度, η 越大,对控制点的要求越

严格。

$$\text{mean} \left\{ \begin{array}{l} G(C_i^4(j), C_i^4(j+1)) \\ G(C_i^4(j), C_i^4(j-1)) \end{array} \right\} < \varepsilon \cdot Gm \quad (7)$$

2.2.4 轮廓搜索终止条件

轮廓搜索终止条件是实现在边缘提取的重要环节,合适的轮廓搜索终止条件有助于平衡检测速度与检测精度之间的矛盾。传统参数主动轮廓模型将通过迭代方式使包含轮廓结构信息与图像灰度信息相结合的能量函数达到极值的方法作为轮廓搜索终止条件,而本文提出的改进的主动轮廓模型建立在传统主动轮廓模型的基础上,提出依靠控制点与其相邻控制点间连线两侧窄带内灰度均值对比实现对局部控制点的搜索以及对噪声控制点的抑制,依靠控制点与控制点间连线相结合的方式实现对控制点的压缩以及对边缘轮廓的表述,因此,本文提出的改进的主动轮廓模型的轮廓搜索终止条件不仅与迭代过程中是否存在被抑制的噪声控制点相关,而且与控制点的个数、控制点间连线两侧窄带内灰度均值对比相关。若迭代过程中存在被抑制的噪声控制点,则说明存在某段控制点间连线并未收敛到制品边缘,则不能终止;若迭代过程中控制点间连线两侧窄带内灰度均值对比并未达到整体最大,则说明存在某段控制点间连线需要插值,也不能终止;若迭代过程中控制点个数仍存在跳变的现象,则说明该次迭代过程中确定的控制点并非最优控制点,同样也不能终止。因此,本文提出改进的主动轮廓模型方法的轮廓搜索终止条件必须同时满足如下条件:

- 1) 当次迭代过程中不存在被抑制的噪声控制点;
- 2) 控制点数量保持在一定范围内;
- 3) 控制点间连线两侧窄带内灰度均值对比整体最大。

通常情况下,上述轮廓搜索终止条件能够实现,但是考虑到本文将其应用于在线的注塑制品边缘提取,即算法的计算速度也是不容忽视的,因此,提出强制终止条件,该强制终止条件为在有限次迭代内,上述条件不能满足,则强行终止,此时,选取具有最大整体灰度均值对比下所包含的控制点为确定的最终轮廓,其中,迭代次数依实际应用而定。

2.3 算法实现

解决了上述关键问题以后,提出算法实现步骤如下:

- 1) 根据获取图像中制品与背景灰度对比选择适当的 α , 以便使初始控制点较接近真实边缘;
- 2) 计算控制点间连线两侧灰度均值对比,并根据该灰度均值对比进行插值;
- 3) 移动插值后获得的控制点;
- 4) 对移动后的控制点进行压缩与噪声控制点抑制,得到当此迭代控制点数量与被抑制的控制点数量;
- 5) 计算控制点间连线两侧灰度均值对比,判断是否

符合轮廓搜索终止条件,若不符合则重复步骤2),若符合则输出结果。

3 实验与结果分析

实验所用待检测注塑制品为烟灰缸,如图2所示。实验所用图像均在可调光源作用下,通过Basler公司生产的分辨率为 $1\,236 \times 1\,624$ 的相机获得。为了验证算法的实用性,必须保证在同一设定状态下实现对正常烟灰缸图像、欠注缺陷烟灰缸图像以及飞边缺陷烟灰缸图像的边缘提取。为了清晰看到算法的实现过程,本文按照算法实现步骤,分别对其中遇到的问题加以描述。

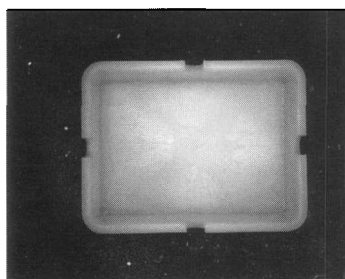


图2 注塑制品烟灰缸
Fig. 2 An injection molding part

本文通过图像中制品与背景间存在的对比实现图像二值化,进而确定初始轮廓,而飞边缺陷烟灰缸图像中制品与背景间对比最弱,若可以确定其初始轮廓,则同一设定状态下必然可以确定其他两类目标的初始轮廓,实验结果如图3所示,其中,初始控制点由黑点所示,初始轮廓由白线所示。虽然该初始轮廓上的控制点已经接近制品的边缘,但是该轮廓整体却与边缘仍存在一定的差异,因此,对初始控制点进行迭代,迭代过程中存在冗余控制点以及噪声控制点,利用本文提出的方法分别对其进行压缩与抑制,实验结果如图4与图5所示。在克服了上述问题带来的影响以后,得到满足终止条件的制品轮廓如图6所示。由图6可知,本文提出的改进的主动轮廓模型克服了注塑制品边缘轮廓上的凹凸特征,实现对正常注塑制品图像中边缘轮廓的提取,克服了存在欠注以及飞边缺陷烟灰缸边缘上复杂的轮廓提取,克服了存在飞边缺陷烟灰缸边缘与背景对比弱的特征,实现对存在飞边缺陷烟灰缸的飞边边缘提取。算法的精度从一方面反应了该算法的优越性,算法的实现速度也是不容忽视的,表1列出了最终轮廓上控制点的数量,迭代次数,整体灰度均值对比以及算法用时。由表1可知,本文提出的改进的主动轮廓模型在精度与速度的要求允许范围内实现了对注塑制品边缘提取。

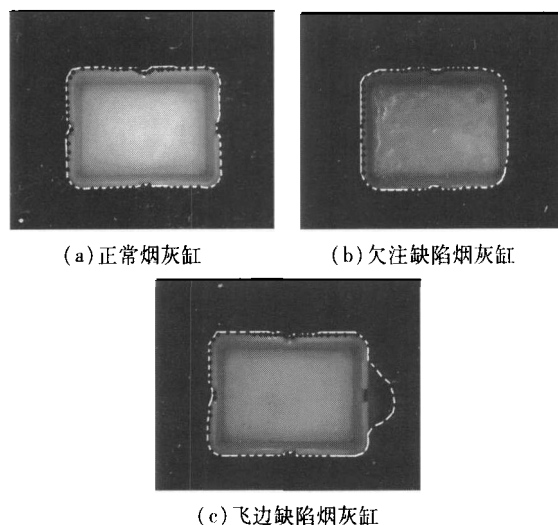


图3 烟灰缸初始轮廓图像

Fig. 3 Initial contour of an ashtray

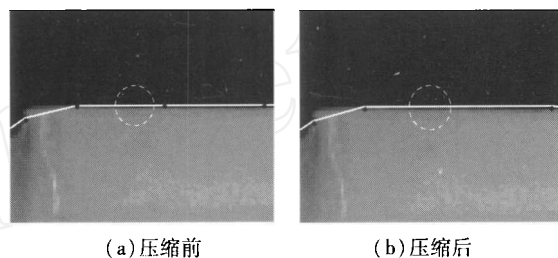


图4 控制点压缩

Fig. 4 Compression of control points

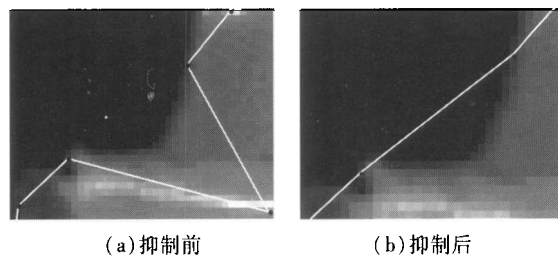


图5 噪声控制点抑制

Fig. 5 Restriction of noisy control points

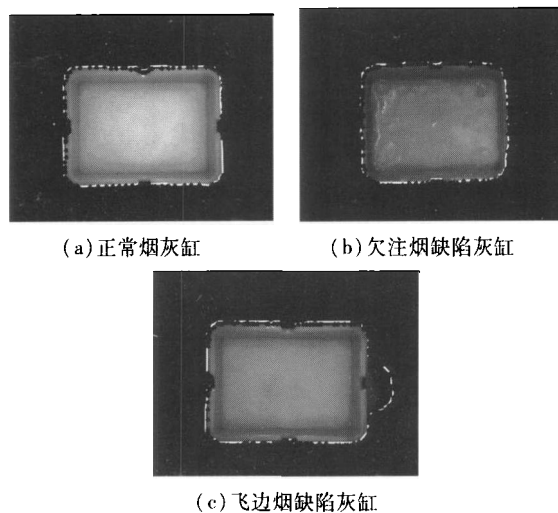


图6 边缘提取结果

Fig. 6 Results of edge extraction

表1 边缘提取数据
Table 1 Edge extraction data

制品类型	迭代次数	整体灰度 均值对比	控制点数量	算法用时
正常烟灰缸	4	68.889	114	21.026
欠注缺陷烟灰缸	5	48.400	131	31.019
飞边缺陷烟灰缸	10	26.552	166	100.136

4 结 论

基于改进的主动轮廓模型方法在注塑制品边缘轮廓提取的应用中展现了其快速性与准确性,本文提出的初始轮廓确定方法提高了具有位置大致确定,且中心在制品内部特征的制品轮廓提取的检测速度;本文提出的插值判断准则为解决传统参数主动轮廓模型难以解决的曲线拓扑变化问题提供了新的思路;本文提出的噪声控制点抑制方法阻止了虚假边缘的存在,控制点压缩方法优化了模型的最终表述。但是本文仅将该方法应用于对注塑制品的边缘轮廓提取,并未完全发掘该方法的潜能,有待在将来的工作中将其扩展为通用的方法。

参考文献

- [1] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: Active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1987,1(4):321-331.
- [2] JAIN A K, ZHONG Y, JOLLY M P D. Deformable template models: A review[J]. Signal Processing, 1998,71(2):109-129.
- [3] JACOB M, BLU T, UNSER M. Efficient energies and algorithms for parametric Snakes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,13(9):1231-1244.
- [4] LI B, ACTON S T. Active contour external force using vector field convolution for image segmentation[J]. IEEE Transactions on image processing, 2007, 8(16):2096-2106.
- [5] XU C, PRINCE J L. Snakes, shapes, and gradient vector flow[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998,7(3):359-369.
- [6] FIGUEIREDO M A, LEITAO J M N. Unsupervised contour representation and estimation using b-splines and a minimum description length criterion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000,6(9):1075-1087.

- [7] BRIGGER P, HOEG J, UNSER M. B-spline snakes: A flexible tool for parametric contour detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9):1484-1496.
- [8] SAPIRO G. Geometric partial differential equations and image analysis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [9] XIE X, MIRMEHDI M. RAGS: Region-aided geometric snake[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,5(13):640-652.
- [10] 栾红霞,戚飞虎. 一种新的用于MR脑图像分割的主动轮廓模型[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4)增:588-560.
- LUAN H X, QI F H. New active contour models for brain MRI segmentation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,25(4)supplement:588-560.
- [11] GENG Y C, LIU Y X, GOTO S, et al. Real-time automatic moving object extraction and tracing based on improved active contour model[A]. In: Proceedings of International Symposium on Intelligent Signal Processing and communication Systems, Hong Kong, CHINA, 2005:149-152.

作者简介



刘阳,2002年于东北大学获学士学位,现为东北大学控制理论与控制工程博士研究生,主要研究方向为基于机器视觉的工业产品质量检测。

E-mail:lmrx@sina.com

LIU Yang received his BS degree from Northeastern University in 2002. He is currently working for PhD. degree in control theory and control engineering in Northeastern University. His research interest covers machine vision based quality inspection of industrial parts.

E-mail:lmrx@sina.com



王福利,1987年于东北大学获得博士学位,现为东北大学教授,主要研究方向为复杂工业过程建模,控制与优化。

WANG Fuli received his PhD degree from Northeastern University in 1987. He is currently a professor in Northeastern University.

His research interest covers modeling, control and optimization of complex industrial process.

E-mail:wangfuli@ise.neu.edu.cn