

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210202

基于 GLCM 和 FCM 算法融合的 铣削零件缺陷提取方法

蔡航 茅健 杨杰 李彬鹏

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院 上海 201620)

摘要: 零件质量合格与否影响整个装配体的服役寿命,如何快速准确的检测零件质量是否合格已经成为研究热点之一,机器视觉缺陷检测应用日益广泛,但由于铣削后零件纹理背景存在的缘故,常常导致零件表面缺陷的检测不够精准。本文提出一种将灰度共生矩阵(GLCM)和模糊C均值聚类算法(FCM)相结合的新型图像表面缺陷提取方法,利用改进后的灰度共生矩阵将缺陷与铣削背景的对比度提高,再针对缺陷与铣削背景之间的灰度差较大这一特性,使用模糊C均值聚类的方法对图像进行分割。该算法可以有效区分加工缺陷与加工纹理,并快速准确的提取零件缺陷特征。通过缺陷提取实验,并与传统的分割算法对比,可得出该算法能够快速的提取铣削零件表面缺陷,并且对提取多类缺陷具有良好的适应能力。

关键词: 铣削零件;机器视觉;表面缺陷;特征提取;智能算法

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040; 520.6099

Defect extraction method of milling parts based on the fusion of GLCM and FCM algorithms

Cai Hang Mao Jian Yang Jie Li Binpeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Whether the quality of parts is qualified or not affects the service life of the entire assembly. How to quickly and accurately detect whether the quality of parts is qualified has become one of the research hotspots. Machine vision defect detection is increasingly used, but due to the existence of the texture background of the parts after milling, It often leads to insufficient precision in the detection of surface defects of parts. This paper proposes a new image surface defect extraction method that combines the gray-level co-occurrence matrix and the fuzzy C-means clustering algorithm. The improved gray-level co-occurrence matrix is used to increase the contrast between the defect and the milling background, and then the defect and the milling background are used to increase the contrast. For the feature of large gray scale difference between milling backgrounds, fuzzy C-means clustering method is used to segment the image. The algorithm can effectively distinguish processing defects and processing textures, and quickly and accurately extract part defect features. Through the experiment of defect extraction, and compared with the traditional segmentation algorithm, it can be concluded that the algorithm can quickly extract the surface defects of milling parts, and has good adaptability to extract multiple types of defects.

Keywords: milled parts; machine vision; surface defects; feature extraction; intelligent algorithm

0 引 言

金属零件在工业制造领域应用较为广泛,如汽车制造、航空航天、船舶行业等。零件在铣削加工的过程中,刀具的规律性运动会导致方向性的切削纹理出现在零件表面;同时加工过程中,刀具磨损、机床振动、切屑碰撞和零件材质

不均匀等因素都可能导致零件表面产生裂纹、划痕、麻坑等各种各样的缺陷。视觉检测技术具有检测精度高,速度快,成本低,易于应用以及灵活的特点,且该技术在检测时不会对零件造成损伤。

由于背景纹理的存在会大幅度影响检测的准确率,所以需要使用一些方法将缺陷从背景纹理中提取出,再对缺

收稿日期:2022-06-03

陷进行检测。由于铣削零件的纹理背景具有明显方向的规律性,对于这种纹理缺陷的提取方法主要有灰度共生矩阵法、傅里叶变换法、小波类变换法和 Gabor 滤波器法^[1-2]。傅里叶变换法虽然能够有效的避免光照不均匀和噪声导致的图像信息缺失^[3],但是该方法的难点在于如何平衡各个频段对结果的权值,所以并不适合对较小的纹理缺陷特征的提取^[4]。小波类变换法是通过多种尺度去表示图像纹理,然后通过模式识别的方式进行特征分类;而在小波变换中,其母小波函数的选定和分解尺度参数的选择对最后的结果具有决定性的作用,但目前对这两部分内容研究还未有明确结果^[5-8]。Gabor 滤波器是用于检测具有规则纹理的一种滤波器,但是使用该滤波器需要进行大量的样本学习训练以获得一组优良的参数,这是由于该滤波器对纹理的方向特别敏感,参数少许的偏差就会导致错误的结果。

针对 Gabor 滤波器在提取纹理时存在较大缺陷问题,本文提出使用改进的灰度共生矩阵处理法提取零件表面纹理,该方法简单,易于实现,具有较强的适应能力和鲁棒性。利用改进后的灰度共生矩阵处理图像可减少或清除背景纹理的影响,通过实验选取最合适特征值对缺陷进行提取;再使用模糊 C 均值聚类算法对灰度共生矩阵处理后的缺陷区域图像进行图像分割,并将分割后的图像进行二值化处理,最终得到良好的缺陷图像。

1 零件缺陷提取方法

1.1 灰度共生矩阵及其改进

灰度共生矩阵法(gray-level co-occurrence matrix, GLCM),就是一种通过计算图像中灰度结构重复出现的概率,得到其共生矩阵来表达图像纹理信息的技术,然后计算该共生矩阵的某些数学模型得到部分特征值,以此来表示图像的某些纹理特征。灰度共生矩阵能反映图像灰度关于方向、相邻间隔、变化幅度等综合信息,它是分析图像局部模式及其排列规则的基础。GLCM^[9]的输入参数为灰度图中像素的灰度值以及对应的位置关系,输出参数表示图像中像素灰度幅值变化大小、方向以及各个像素之间的相邻间隔等信息。计算公式如下:

$$\begin{cases} P(i, j, 0^\circ) = \{(i, j)(i_1, j_2) \in N_x \cdot N_y \parallel i - i_1 = 0, j - j_2 = 1\} \\ P(i, j, 45^\circ) = \{(i, j)(i_1, j_2) \in N_x \cdot N_y \parallel i - i_1 = -1, j - j_2 = 0\} \\ P(i, j, 90^\circ) = \{(i, j)(i_1, j_2) \in N_x \cdot N_y \parallel i - i_1 = 0, j - j_2 = -1\} \\ P(i, j, 135^\circ) = \{(i, j)(i_1, j_2) \in N_x \cdot N_y \parallel i - i_1 = -1, j - j_2 = -1\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i, j 表示矩阵第 i 行第 j 列在 θ 方向上的元素点。 $P(i, j, \theta)$ 是矩阵中位置在 (i, j) 点的像素值, $\{n_1, n_2\}$ 表示的是矩阵中像素的个数。对 GLCM 矩阵进行作归一化处理,目的是使矩阵具有更好的纹理分辨率,归一化处理公式如下:

$$P(i, j) = \frac{P(i, j)}{R} \quad (2)$$

$$\text{其中, } R = \begin{cases} 2N_y(N_x - 1)\theta = 0^\circ, & 90^\circ \\ (N_x - 1)(N_y - 1)\theta = 0^\circ, & 90^\circ \end{cases}$$

式中: R 是正规化常数

使用 GLCM 算法提取纹理特征时,影响其计算的时间复杂度和分类效果的变量主要有 4 个:矩阵方向 θ 、像素间距 d 、像素灰度级 G 和遍历窗口大小。对于矩阵方向 θ 而言,因为要避免规则性纹理的方向对结果干扰, θ 通常在 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 种方向上进行选定。对于遍历窗口的大小而言,平滑图像信息连续使用较大的滑动窗口,粗糙图像信息不连续使用较小的滑动窗口^[10],基于此选择大小为 5×5 的滑动窗口。同时,实验研究表明,当像素间距 d 取 1 时,可获得较好的结果^[11]。灰度级 G 的大小决定着灰度共生矩阵的大小,当灰度级 G 值过大会占用大量系统资源导致计算时间过长,而当灰度级 G 值过小则导致输出图像丢失一部分必要的信息。

针对于灰度共生矩阵算法对灰度级 G 的敏感程度对其优化,以减少算法的运行时间。因为灰度级 G 的大小决定了 GLCM 矩阵的大小,从而影响计算复杂度。对于包含 256 个灰阶的图像而言,可以得到 1 024 幅大小为 256×256 的图像,因此图像灰度级为 G 的计算复杂度为 $O(G^2)$ 。为此,本文提出先使用维纳滤波对铣削零件的灰度图像进行降噪处理,然后再对处理后的图像进行分块,由于不同图像块区域之间的像素值相差较大,可通过像素值变化的幅度来表示不同的区域图像。在像素值变化较大的缺陷区域,即高频区域采用高灰度级 G_2 处理图像区域,则高频区域的算法复杂度为 $O(G_2^2)$,同理在像素变化较小的非缺陷区域,采用低灰度级 G_1 进行处理,则低频区域的算法复杂度为 $O(G_1^2)$ 。对不同区域使用不同的灰度级,目的是降低灰度共生矩阵的大小,降低算法计算复杂度,其量化过程公式如式(3)所示。

$$p(i, j) = \frac{p(i, j)}{256} \times N \quad (3)$$

式中: N 为量化后的灰度级, $N \in (16, 32, 64, 128)$ 。

改进前后算法时间复杂度如表 1 所示。

表 1 算法时间复杂度对比

算法	时间复杂度	实际运行时间/s
常规 GLCM	$O(G^2)$	93
改进后 GLCM	$O(G_1^2) + O(G_2^2)$	34

表 1 中, $G_1 \leq G_2 \leq G$, 与常规的灰度共生矩阵算法相比,改进后的灰度共生矩阵时间复杂度有较大的降低。改进后的算法流程如图 1 所示。

1) 设置图像遍历窗口大小,然后读入经图像处理后的铣削零件灰度图进行遍历。

2) 将遍历窗口中生成的子图像块逐个向量化,计算向

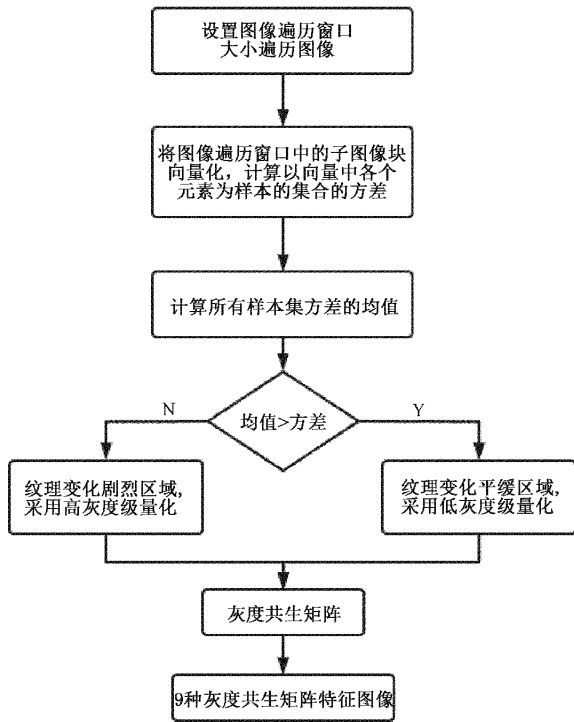


图 1 灰度共生矩阵算法流程

量中各个元素为样本集合的方差 $S_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N^2} (X_i - \bar{X})^2}{N^2 - 1}$, (k = 子图像块数量)

3) 计算上述步骤中方差的均值 $S2_k = \frac{\sum_{k=1}^k S_k^2}{k}$

4) 若 $S_k^2 < S_k^2$, 则该区域为低频区, 采用低灰度级处理图像区域, 若 $S_k^2 > S_k^2$, 则该区域为高频区, 采用高灰度级处理图像区域。

对于具有铣削背景纹理的零件缺陷检测中, 因为背景纹理的存在会大幅度的影响检测的准确率, 因为该情况的存在本文采用灰度共生矩阵处理图像, 减少或清除背景纹理的影响。对灰度共生矩阵的各种特征值和角度对铣削背景纹理的表现进行实验, 挑选处最适合铣削背景纹理的特征和角度。

1.2 基于 FCM 聚类算法的缺陷提取方法

经过改进后的灰度共生矩阵处理原始灰度图像后, 使得图像的缺陷和铣削背景的对比度增强, 两者的灰度值也具有较为明显的差别, 此时可以使用基于其灰度值的聚类分割方法将两者划分开, 得到良好的缺陷图像。聚类方法是聚类分析的重点研究内容, 主要包括以下五种类型: 划分类法、层次类、密度类、网格类、模型类^[12]。模糊 C 均值 (FCM) 算法^[13] 是一种属于划分类的无监督模糊聚类方法, 其计算思路是使得被划分到同一簇的对象之间相似度最大, 而不同簇之间的相似度最小。模糊 C 均值算法是一种柔性的模糊划分, 模糊聚类建立了样本对类别的不确定描

述, 不仅能有效消除一定强度的高斯噪声, 而且可以很好地保留原始图像中的细节和边缘信息, 同时具有计算量小的优点, 从而成为聚类分析的主流。算法流程如图 2 所示。

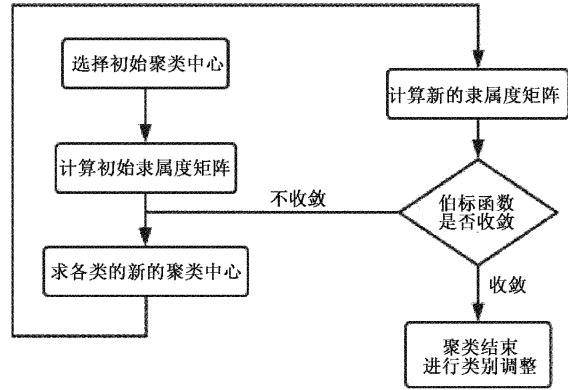


图 2 模糊 C 均值聚类算法流程

- 1) 选择初始聚类中心 $Z_i(0)$
- 2) 计算初始隶属度矩阵 $U(0)$
- 3) 求各类的新的聚类中心 $Z_i(L)$
- 4) 计算新的隶属度矩阵 $U(L+1)$
- 5) 回到步骤 3), 重复至收敛
- 6) 类别调整: (1)合并(2)分解(3)删除

使用上述方法二次处理后的图像可将缺陷区域从图像中分割出来, 分割后的缺陷区域和非缺陷区域的像素级具有显著差别。为了后续的缺陷识别的准确率, 还需将分割出的缺陷图像二值化处理。现有的图像二值化方法主要分为以下几类: 划分类、层次法、基于密度的方法、基于网格的方法和基于模型的方法等。从数学角度来看, 图像分割是将数字图像划分成互不相交的区域的过程。图像分割的过程也是一个标记过程, 即把属于同一区域的像素赋予相同的编号^[14]。本文选取自适应阈值的分割方法对上述方法处理过后的图像进行二值化处理, 可以很好地保留原始图像中的细节和边缘信息, 突显零件表面的缺陷特征, 方便后续的图像缺陷分析与识别, 并且计算量小降低了时间成本。

2 实验过程与结果

2.1 研究对象及实验过程

针对于铣削零件的实验图片, 本文以摇篮车铣五轴为实验机床, 实验材料为钛合金 TC4 进行实验。机床实验机床为摇篮车铣五轴 (VMC-C100HMT), 数控系统采用 HNC-848D 型高档数控系统, 具有高动态性能和高加工精度, 在 X、Y、Z 三个坐标导轨采用了高刚性的直线滚动导轨, 直线轴最大加速度 1 G, 进给速度 10 m/min, 快移 30 m/min; 定位精度 4 μm, 重复定位精度 2 μm, 机床主轴采用异步电主轴, 高转速达 12 000 r/min 并具有内部两档变速, 可在满足低速切削要求的同时满足高速加工要求。

加工样块材质为钛合金 TC4, 密度为 4.5 g/cm³, 尺寸为 70 mm × 70 mm × 20 mm (长 × 宽 × 高)。粗铣刀具

为可转位铣刀,刀具直径为 D21。精铣刀具为硬质合金刀具,刀具直径为 D21。粗铣加工参数如表 2 所示。

表 2 粗铣加工参数

主轴转速 n (r/min)	每齿进给量 a_f /mm	切削深度 a_p /mm	铣削宽度 a_w /mm
1 200	0.05	0.5	10

精铣加工参数如表 3 所示。

表 3 精铣加工参数

主轴转速 n (r/min)	每齿进给量 a_f /mm	切削深度 a_p /mm	铣削宽度 a_w /mm
1 217	0.01	0.2	10

实验图像采集设备为 PV5040-DCC 影像测量仪。如图 3 所示。

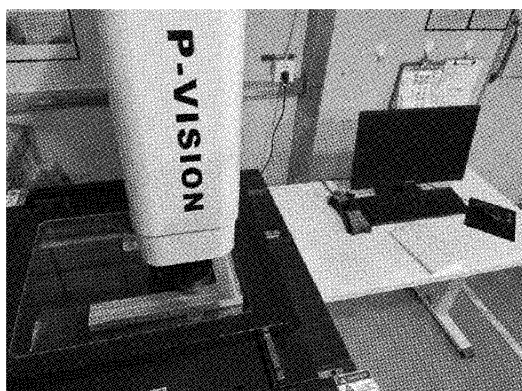


图 3 图像采集平台

该设备手动连续变焦镜头 0.7~4.5X(选配自动变焦),采用 TEO 高分辨率彩色摄像机(选配数字 SONY),配备自动量软件,可实现几何测量,高质量图像采集功能;

CNC 自动机专用控制系统,可实现自动测量;可控三环路 LED 表面冷光源,直轴轮廓冷光源,使光源对测量要求的适性更加强大。

图像的分辨率同样会影响识别的结果,本文基于普赛 PV5040-DCC 影像测量平台对加工钛合金 TC4 零件表面缺陷进行图像采集。采样精度为 10 bit,所采集的每一幅图片大小为 256×256 像素。

2.2 图像缺陷提取

具有铣削背景纹理的零件缺陷检测中,因为背景纹理的存在会大幅度影响检测的准确率,对于该情况用灰度共生矩阵处理图像,减少或清除背景纹理的影响。对灰度共生矩阵的各种特征值和角度对铣削背景纹理的表现进行实验,得出使用改进后的灰度共生矩阵对哪一种特征对应的某些缺陷效果最佳,得出不同特征下的处理结果。

依据上述分析本文用灰度级 16、64 分别对将纹理低频区和纹理高频区进行降级处理,基于 GLCM 矩阵的多种特征提取铣削纹理,其过程如下:

1) 设置遍历窗口大小为 5×5 ,同该窗口大小去遍历维纳滤波去噪后的零件表面灰度图像,高、低频区参数 G_1 、 G_2 分别设置为 16、64。

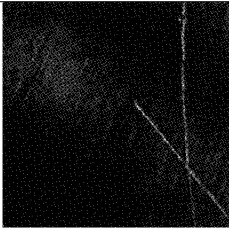
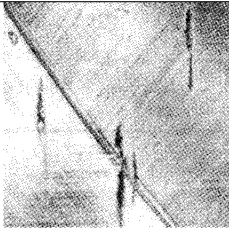
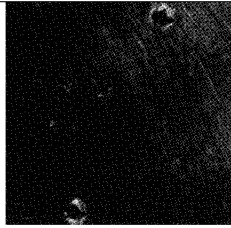
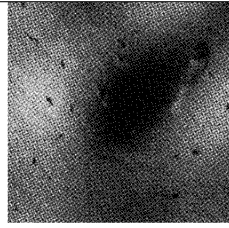
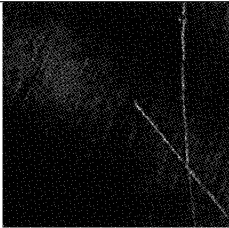
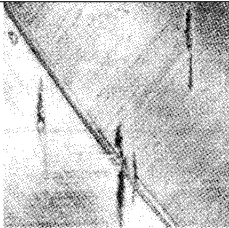
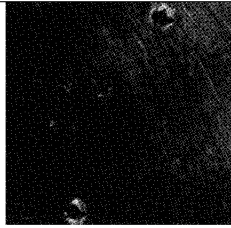
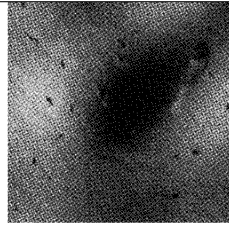
2) 生成在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4 个方向各个区域的灰度共生矩阵,对其进行归一化处理并对加权求和。

3) 计算该区域的 9 种类型的特征值大小,分别将计算出的特征值转化为该区域的中心像素点的像素值。

4) 遍历所有像素点,重复以上操作至遍历完所有图像区域,即完成铣削纹理的特征提取。

得到灰度共生矩阵后,由此可以计算出 14 种纹理图像的一阶和二阶灰度统计特征^[15]。由灰度共生矩阵可以得到多种纹理特征,本文根据需求计算了 9 种纹理特征:均值、协方差、逆差距、对比度、差异性、熵、能量、相关性、自相关。铣削缺陷原始图像如表 4 所示,灰度共生矩阵处理结果如表 5 所示。

表 4 缺陷原始图像

缺陷类型	划痕	裂纹	撞伤	烧伤
缺陷				
原始图片				

经上述方法处理过后的铣削图像的缺陷区域和非缺陷区域的像素级已经有了显著差异,可以看出对比度(Contract)特征图像在划痕、裂纹、撞伤这几类缺陷中能够将缺陷区域较为完整且清晰的提取出来,相关性(Correlation)特征图像在烧伤这一类缺陷中具有良好的提

取效果但为了便于后续的缺陷识别还需将缺陷图像二值化处理。通过 FCM 算法处理灰度共生矩阵中对比度(Contract)特征图像和相关性(Correlation)特征图像,算法步骤为:

1) 设置目标函数的精度 $e=0.0001$,模糊指数 $m=2$

表 5 灰度共生矩阵处理结果

缺陷类型	灰度共生矩阵处理结果					效果最佳的特征
划痕	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	Contract
	Dissimilarity	Entropy	Energy	Correlation	Auto Correlation	
	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	
裂纹	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	Contract
	Dissimilarity	Entropy	Energy	Correlation	Auto Correlation	
	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	
撞伤	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	Contract
	Dissimilarity	Entropy	Energy	Correlation	Auto Correlation	
	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	
烧伤	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	Correlation
	Dissimilarity	Entropy	Energy	Correlation	Auto Correlation	
	Original	Mean	Variance	Homogeneity	Contrast	

和算法最大迭代次数 100;

2) 初始化隶属度矩阵或聚类中心;

3) 重新计算每一类的聚类中心、样本到聚类中心的距离,每次计算都使用直觉模糊隶属度矩阵替换原有的隶属

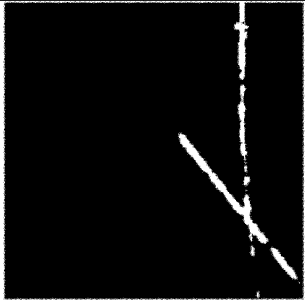
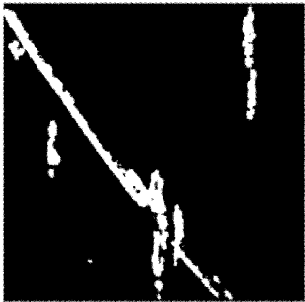

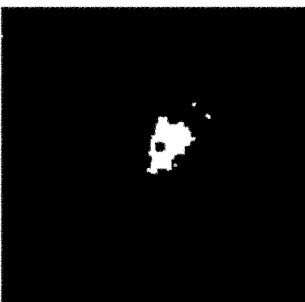
度矩阵,并重新将样本划分到各个类别当中;

4) 若为目标函数收敛则迭代结束;否则,跳转执行步骤3);

5) 根据所得到的隶属度矩阵,取样本隶属度最大值所对应类作为样本聚类的结果,聚类结束。

算法最终得出缺陷图像如表6所示。

表6 缺陷分割结果

缺陷类型	算法得出的缺陷图
划痕	
裂纹	
撞伤	
烧伤	

本文使用灰度共生矩阵对缺陷图像进行处理,经实验得出对于划痕、撞伤、裂纹3种缺陷而言,使用对比度特征能够较好的将铣削零件表面缺陷区域纹理特征分别提取出来;而对于烧伤缺陷而言,使用相关性特征能够较好的将铣削零件表面缺陷区域纹理特征分别提取出来。将提取出得图像使用模糊C均值聚类算法进行缺陷分割,能够将缺陷良好得分割出,得到缺陷图像。实验的总流程如图4所示。

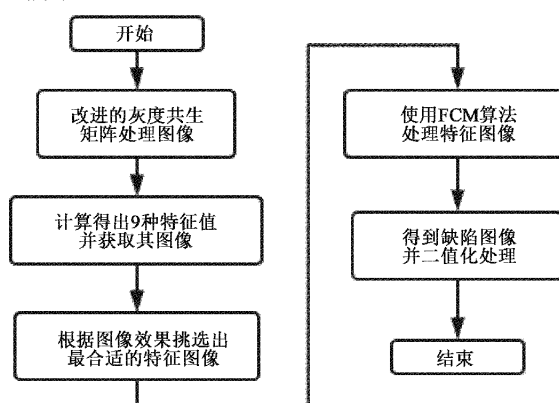


图4 实验总体流程

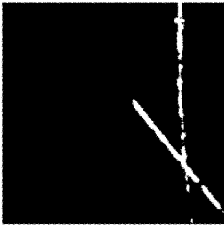
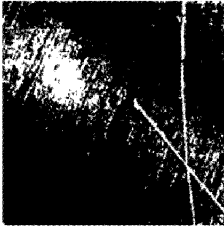
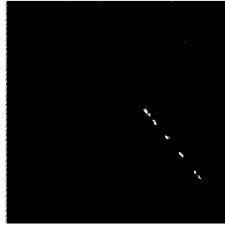
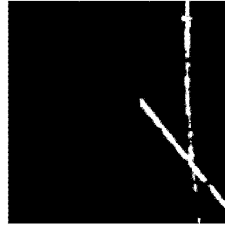
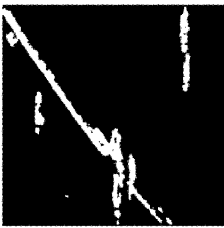

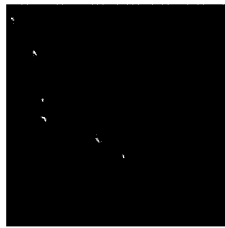
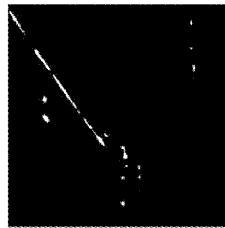
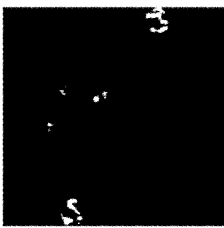

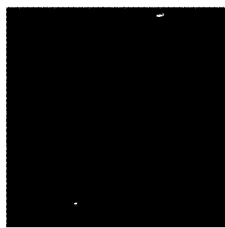
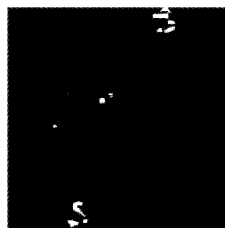



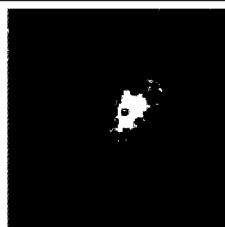
为了验证本文算法的分割效果,将其与传统分割算法进行多组对比实验。

由实验结果表7可以看出,本文所提出的缺陷分割算法的效果明显高于未经纹理处理的图像分割算法,处理纹理后,使用FCM算法的分割效果比其他分割效果更好,体现出了本文算法的优越性。在改进的灰度共生矩阵的对比度特征下,能够较好的提取出缺陷区域。利用灰度共生矩阵处理背景纹理后,再通过模糊C均值(FCM)算法将缺陷区域分割出来并二值化得到的缺陷图像能够为后续的缺陷分析打下良好的基础。综上,本文算法针对铣削零件的缺陷图像,能够将其缺陷区域以良好的效果分割出来。

3 结 论

本文针对视觉检测铣削零件表面缺陷时,由于铣削背景的干扰导致检测成功率较低的问题,设计了一种基于计算机图像处理的方式对零件缺陷进行提取,为自动检测提供条件。针对图像处理方法进行了研究,采用维纳滤波、灰度共生矩阵和FCM聚类算法相互补充共同处理图像,能够将其缺陷区域以良好的效果分割出来。结果表明,相比于其他算法,本算法对铣削零件表面的不同缺陷适应程度更高,缺陷提取效果更好,尤其是对于背景纹理规律一定的铣削加工零件,如航空钛合金铣削零件具有一定的适应性,有利于提铣削零件缺陷检测的信息化、自动化水平。

表7 不同分割算法对比

缺陷类型	本文分割方法	未处理纹理+ FCM 聚类分割	处理纹理+ K-means 聚类分割	处理纹理+ Ostu 自适应阈值分割
划痕				
裂纹				
撞伤				
烧伤				

参考文献

- [1] XIE X. A review of recent advances in surface defect detection using texture analysis techniques[J]. *Elveia Electronic Letters on Computer Vision&Image Analysis*, 2008,7(3): 1-22.
- [2] 刘丽,匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009,14(4):622-635.
- [3] AIGER D, TALBOT H. The phase only transform for unsupervised surface defect detection [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE*, 2010:295-302.
- [4] KUMAR A, PANG G. Defect detection in textured materials using Gabor filters [C]. *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the IEEE*, 2002:1041-1047.
- [5] TOLBA A S. Fast defect detection in homogeneous flat surface products [J]. *Expert Systems With Applications*, 2011,38(10):12339-12347.
- [6] AN V, ORAINTARA S. A study of relative phase in complex wavelet domain: Property, statistics and applications in texture image retrieval and segmentation [J]. *Signal Processing Image Communication*, 2010, 25(1):28-46.
- [7] YANFANG H, PENGFEI S. An adaptive level-selecting wavelet transform for texture defect detection[J]. *Image and Vision Computing*, 2006,25(8):1239-1248.
- [8] 吴鑫,齐铂金,张健合. 航空铝合金针孔缺陷自动分级的图像处理方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011,37(6): 673-679, DOI:10.13700/j. bh. 1001-5965. 2011. 06. 007.
- [9] 任国贞,江涛. 基于灰度共生矩阵的纹理提取方法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2014,31(11):190-192,325.
- [10] 李丽宏,谢东阳,王琳,等. 纹理图像多尺度灰度共生矩

- 阵步长参数的研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(3):108-112.
- [11] BARALDI A, PARMIGGIANI F. Investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1995, 33(2):293-304.
- [12] 徐金东, 赵甜雨, 冯国政, 等. 基于上下文模糊 C 均值聚类的图像分割算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(7):2079-2086.
- [13] 翟华, 茹弘民, 左根明, 等. 融合 KFCM 及频谱质心的瞬时频率估计算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7):1-10, DOI:10.13382/j.jemi.B1801884.
- [14] 张永朋, 刘云鹏, 王仁芳, 等. 医学图像分割概述[J]. 电子世界, 2020(3):85-86, DOI:10.19353/j.cn.dzsj.2020.03.048.
- [15] 吴君, 贺超, 赵兴友, 等. 基于超声图像的纹理特征分析算法的应用[J]. 生物医学工程研究, 2007(2):166-169, DOI:10.19529/j.cnki.1672-6278.2007.02.016.

作者简介

蔡航, 硕士, 主要研究方向为图像处理和视觉检测。

茅健(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为航空装备检测与控制、碳纤维复材增材制造、智能机器人等。

E-mail:jmao@sues.edu.cn