

# 基于 Facet 模型的边缘检测算法

隋连升, 王 慧

(西安理工大学计算机科学与工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 使用 CCD 的影像测量系统进行精加工零件尺寸检测时, 零件轮廓边缘的定位精度和处理速度是优先考虑的 2 个问题。该文介绍了一种基于 Facet 模型的综合梯度边缘检测算法, 并针对其边缘定位精度低和执行效率低的问题, 给出一种提高边缘定位精度的算法和加速计算 Facet 模型的算法。该改进算法使用动态阈值定位边缘以提高边缘定位精度, 同时将 Facet 模型的二维卷积分解为 2 个一维卷积核, 使算法的复杂度从  $O(i^2)$  降低到  $O(2i)$ 。通过对理想影像和实际工件影像的边缘检测, 说明该算法在影像测量中可以有效抑制工件影像的噪声, 获得较好的边界特征, 且执行效率较高。

**关键词:** 影像测量系统; Facet 模型; 综合梯度算法

## Edge Detection Algorithm Based on Facet Model

SUI Lian-sheng, WANG Hui

(College of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**【Abstract】** The localization of a part's edges and the speed of the image are important factors in detecting the size of the part with a CCD image measurement system. An integrated gradient edge detecting algorithm based on the Facet model is studied in this paper. For the low efficiency and low localization, a dynamic thresholding method is used for enhancing the precision of localization, and an accelerated method is provided for computing 2D Facet model. It reduces the computation complexity from  $O(i^2)$  to  $O(2i)$  by decomposing the 2D convolution mask to two 1D masks. The principle of the algorithm is analyzed, and the experiments for detecting the edges of some images are finished. The images include an ideal image without noise and a practical image of a circuit board. With experimental results, it is known that the algorithm in this paper can reduce the effects of image noise availablely and preferable edges are detected, and it is able to improve the speed of the computation.

**【Key words】** image measuring system; Facet model; integrated gradient algorithm

### 1 概述

近年来, 影像测量在微零件装配、集成电路组装等领域得到广泛应用。使用 CCD 成像的影像测量系统进行精加工零件尺寸检测时, 图像轮廓边缘的定位分析是决定测量精度的一个关键因素。现有的边缘检测算法可以分为 2 类: 基于梯度的方法和基于过零点的方法。前者主要利用图像边界具有较高梯度值的特点来获得图像的边界信息, 典型的如 Roberts 算法。这种滤波器对图像噪声的控制能力较弱, 边缘的定位精度较低。Canny 提出了基于梯度的边界搜索算法<sup>[1]</sup>; Zuniga 和 Haralick<sup>[2]</sup>提出了综合梯度边缘检测算子, 这种算子在降低噪声敏感性和评计偏差等方面具有很大的优越性。后者主要是利用二阶导数过零点来检测图像的边缘<sup>[3]</sup>, 主要有 LOG 算子和 Haralick 边缘检测算子。现有的这些边缘定位分析方法并非针对精加工尺寸和形状的影像测量, 在测量系统中, 边缘往往是密集、相交、模糊的, 且 CCD 产生的高斯噪声较大。适用于精加工尺寸和形状影像测量的边缘定位分析方法仍有待于进行专门研究。

本文在文献[4]的基础上对基于 Facet 模型的综合梯度边缘检测算法进行了改进, 并探讨其对精加工零件图像进行检测、定位的精度问题和算法的加速问题。

### 2 Facet 模型

#### 2.1 Facet 模型的离散正交多项式

Facet 模型运用分段的思想, 在以某个像素为中心的规则区域内找到最佳逼近该邻域强度值的解析函数。对于简单的

图像, 可以采用平模型、斜模型或二次模型<sup>[5]</sup>, 对于复杂区域的图像, 要用到三次模型或高次模型。根据文献[4]中 Facet 模型局部邻域的图像表面灰度强度可以由二元三次多项式表述:

$$f(r, c) = k_1 + k_2r + k_3c + k_4r^2 + k_5rc + k_6c^2 + k_7r^3 + k_8r^2c + k_9rc^2 + k_{10}c^3 \quad (1)$$

其中,  $r$  和  $c$  是函数要逼近的局部图像平面的坐标;  $k_i (i = 1, 2, \dots, 10)$  是拟合系数。

**定义 1** 设  $S$  为 2D 局部邻域像素集合  $I(r, c)$  为  $(r, c) \in S$  处的灰度值,  $\{g_1(r, c), g_2(r, c), \dots, g_N(r, c)\}$  为一组 2D 离散正交多项式基函数, 则拟合函数  $f$  表示为

$$f(r, c) = \sum_{i=1}^N K_i g_i(r, c) \quad (2)$$

其中,  $K_i (i = 1, 2, \dots, N)$  为拟合系数, 利用最小二乘拟合, 通过使目标函数  $\varepsilon^2$  最小获得。

根据基函数的正交性:

$$\sum_{(r, c) \in S} g_i(r, c) g_j(r, c) = 0$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N$ , 且  $i \neq j$ , 可得

$$K_i = \frac{\sum_{(r, c) \in S} g_i(r, c) I(r, c)}{\sum_{(r, c) \in S} g_i^2(r, c)} \quad (3)$$

**作者简介:** 隋连升(1972 -), 男, 副教授、博士, 主研方向: 计算机视觉, 图形图像处理; 王 慧, 硕士研究生

**收稿日期:** 2008-11-14 **E-mail:** Wanghui\_cba@163.com

该式表明系数  $K_i$  可通过对图像  $I(r,c)$  进行模板运算获得。其中, 模板大小为区域  $S$  的范围, 与像素  $(r',c')$  相对的模板权因子  $w_{i,(r',c')}$  通过下式计算:

$$w_{i,(r',c')} = \frac{g_i(r',c')}{\sum_{(r,c) \in S} g_i^2(r,c)} \quad i=1,2,\dots,N \quad (4)$$

## 2.2 离散正交多项式基构造

二维离散正交多项式基集可以通过 2 个一维离散正交多项式集张量积构造。

**定义 2** 设  $\{P_1(r), P_2(r), \dots, P_T(r)\}$  和  $\{Q_1(c), Q_2(c), \dots, Q_U(c)\}$  是分别定义在  $R$  和  $C$  上的离散正交多项式集合, 其中

$$R = \{-m, -m+1, \dots, 0, \dots, m\}$$

$$C = \{-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n\}$$

$m$  和  $n$  为正整数, 则  $\{P_1(r)Q_1(c), \dots, P_T(r)Q_U(c)\}$  是一组定义在  $R \times C$  上的离散正交多项式集合, 这里“ $\times$ ”表示集合的笛卡尔积, 下标  $t=1,2,\dots,T; u=1,2,\dots,U$ , 表示多项式次数加 1。

考虑采用 2 个一维离散 Chebyshev 多项式集合构造。通过张量积运算并忽略高于三次的多项式, 则式(1)可写为

$$\begin{aligned} f(r,c) = & K_1 + K_2r + K_3c + K_4(r^2 - 2) + K_5rc + K_6(c^2 - 2) + \\ & K_7\left(r^3 - \frac{17}{5}r\right) + K_8(r^2 - 2)c + K_9r(c^2 - 2) + \\ & K_{10}\left(c^3 - \frac{17}{5}c\right) \end{aligned} \quad (5)$$

## 3 综合梯度边缘检测算法

本文在 Facet 模型的基础上使用了综合梯度边缘检测算子。首先定义了基于 Facet 模型的梯度算子, 然后定义了梯度方向。在梯度方向上计算梯度强度。梯度强度是局部邻域的所有可能方向的一阶方向导数的综合最大值。该算法消除了由二阶导数引起的噪声扩大, 同时抑制了噪声敏感性和评估偏差。

**定义 3** 设图像的灰度函数为  $I(r,c)$ ,  $I'_\theta(r,c)$  为沿  $\theta$  的一阶方向导数, 则

$$I'_\theta(r,c) = \frac{\partial I(r,c)}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial I(r,c)}{\partial c} \cos \theta \quad (6)$$

沿  $\theta$  方向的  $N \times N$  邻域的综合方向导数  $F_\theta$  定义为

$$F_\theta = \frac{1}{4N^2} \int_{-L}^L \int_{-W}^W I'_\theta(r,c) drdc \quad (7)$$

其中, 积分区间  $L, W$  为待调整参数。当  $L=W=0$  时, 综合梯度就等同于 Facet 模型梯度算子。当  $L$  和  $W$  值接近模板尺寸的  $1/2$  时检测性能最优。使  $F_\theta$  取得最大值的  $\theta$  为梯度方向的估计值, 即综合梯度的估计值为

$$G = F_{\theta_{\max}} \mathbf{u}_{\theta_{\max}}$$

其中,  $F_{\theta_{\max}} = \max_{\theta} F_\theta$ ;  $\mathbf{u}_{\theta_{\max}}$  是  $F_\theta$  取得最大值方向上的单位矢量。

当  $L=W$  时, 最大化  $F_\theta$  的  $\theta$  为

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{B}{A} \\ F_{\theta_{\max}} &= \sqrt{A^2 + B^2} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $A = L^2k_7 + \frac{1}{3}L^2k_9 + k_2$ ;  $B = L^2k_{10} + \frac{1}{3}L^2k_8 + k_3$ 。

原始算法中, 最耗时的是 Facet 模型系数  $k_i (i=1,2,\dots,10)$  的求取。改进的算法将利用最小二乘拟合求取问题转化为

2 个一维模板运算, 简化系数的计算。原始算法中并没有考虑模板和阈值大小选取的不同对边缘定位精度的影响。改进的算法中将根据实际情况选取合适的模板尺寸和阈值大小, 以使检测结果达到最优。

改进算法处理过程如图 1 所示。改进的算法主要体现在流程图的虚线所画部分。

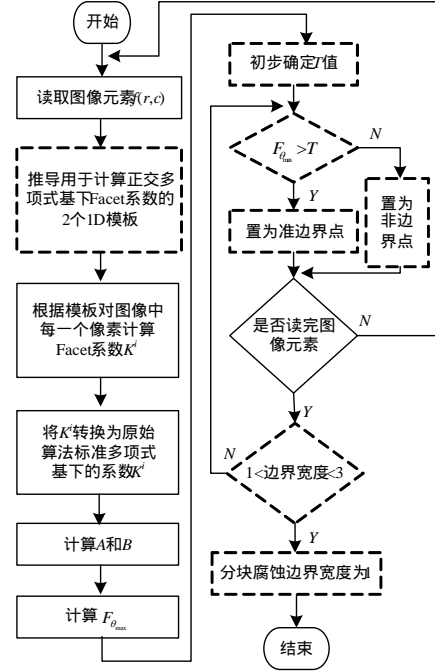


图 1 改进算法流程

### 3.1 权因子模板的分解

由式(3)和式(4)可知, 每个系数  $K_i (i=1,2,\dots,M)$  可以通过图像与其相应的 2D 权因子模板卷积求出。对于每一个像素要计算  $M$  个系数来说, 计算量相当大, 有必要缩减运算复杂度。由于 2D 离散正交多项式基是由 2 个 1D 多项式的张量积得到的, 因此 2D 权因子模板可进一步分解, 即与图像的 2D 卷积可以通过 2 个单独的 1D 卷积实现, 从而降低算法复杂度。

设  $\{M_0(r), M_1(r), \dots, M_N(r)\}$ ,  $\{Q_0(c), Q_1(c), \dots, Q_M(c)\}$  分别为定义在  $R$  和  $C$  上的 DOP 集合, 定义在  $R \times C$  上的 2D DOP 基为

$$W_i(r,c) = M_N(r)Q_M(c)$$

其中,  $R = \{-i, -i+1, \dots, 0, \dots, i\}$ ;  $C = \{-j, -j+1, \dots, 0, \dots, j\}$ ;  $i, j$  为正整数, 则式(3)可以表示为

$$\begin{aligned} K_i &= \frac{\sum_{c=-j}^j \sum_{r=-i}^i W_i(r,c) I(r,c)}{\sum_{c=-j}^j \sum_{r=-i}^i W_i^2(r,c)} = \frac{\sum_{c=-j}^j \sum_{r=-i}^i M_N(r)Q_M(c) I(r,c)}{\sum_{c=-j}^j \sum_{r=-i}^i M_N^2(r)Q_M^2(c)} = \\ &= \frac{\sum_{r=-i}^i M_N(r)}{\sum_{r=-i}^i M_N^2(r)} \cdot \frac{\sum_{c=-j}^j Q_M(c) I(r,c)}{\sum_{c=-j}^j Q_M^2(c)} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可见, 系数  $K_i$  可通过 2 个 1D 卷积得到, 即先用  $r$  方向模板对图像进行卷积, 再对结果采用  $c$  方向模板处理。

### 3.2 阈值和模板尺寸的选取

影响综合梯度算法性能的因素主要有模板  $N$  和阈值  $T$  的选取。阈值  $T$  决定了 2 个像素可以被看作同一区域的灰度最

大差别,取决于要检测特征的最小对比度,其值对边缘检测的效果影响很大。试验表明, $N$ 和 $T$ 的取值对检测结果有较大影响。图2和图3是 $N$ 和 $T$ 取不同值时,一幅图像中漏检边缘和误检边缘对检测结果的影响。图2中 $T=15$ ,图3中 $N=5$ 。由图2可见,当 $N$ 取值接近5时检测结果的漏检率和误检率较低。由图3可见,当 $T$ 在15附近时检测结果的漏检率和误检率较低。在本文中,根据对比度、噪声强度的不同,最大可以取30甚至更大,对比度小的可取到10甚至更小。

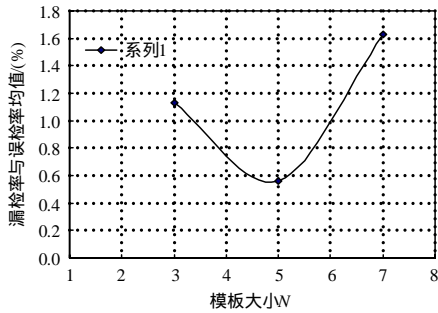


图2  $N$ 对检测结果的影响( $T=15$ )

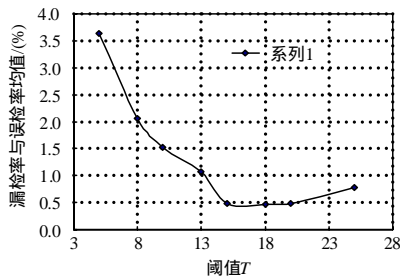


图3  $T$ 对检测结果的影响( $N=5$ )

#### 4 实验结果及分析

对于一幅 $N \times M$ 的图像,在局部邻域 $S$ 上计算Facet模型某一系数 $K_i$ ,若采用2D卷积模板,每一个系数需要进行 $i^2$ (其中 $i$ 为模板尺寸)次乘法运算,故处理整幅图像需要 $i^2 \times N \times M$ 次乘法运算。若采用2个1D卷积模板,先对整幅图像进行 $r$ 方向滤波,每个像素需要进行 $i$ 次乘法,整幅图像需要 $i \times N \times M$ 次乘法运算;然后再对卷积结果进行 $c$ 方向滤波,总共需要 $2i \times N \times M$ 次乘法运算,可见,采用2D模板的时间复杂度是 $O(i^2)$ ,而采用2个1D模板的时间复杂度为 $O(2i)$ 。

实验1 图4是算法针对理想图像的检测结果。

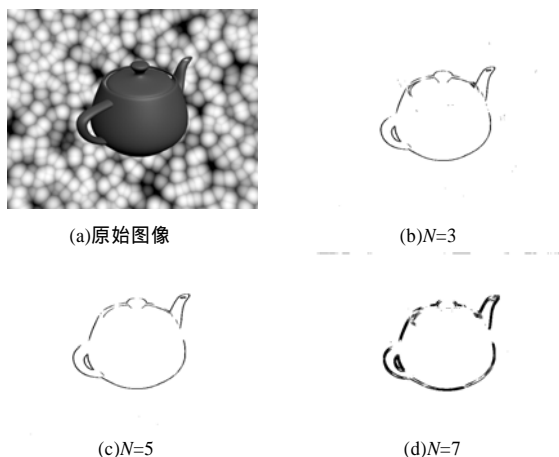


图4 检测结果

在试验中,取 $T=15$ 。当 $N=3$ 时,由图4(b)可见,物体漏检的边缘较少,但是误检的边缘却较多;当 $N=7$ 时,由图4(d)可见,误检的边缘较少,而漏检的边缘较多;当 $N=5$ 时,由图4(c)可见,边缘检测效果最优。

实验2 图5是针对实际电路板影像的另外几种经典边缘检测算法的检测结果。图5(b)、图5(c)抑制噪声的能力较差,而噪声对本文算法影响较小。但是,与Canny相比,本文算法的漏检率较高,特别是原图中影像测量的十字交叉线,在本文算法中已丢失一部分;但是本文算法的误检率远低于其他2种算法。总体而言,算法的检测结果比较满意。

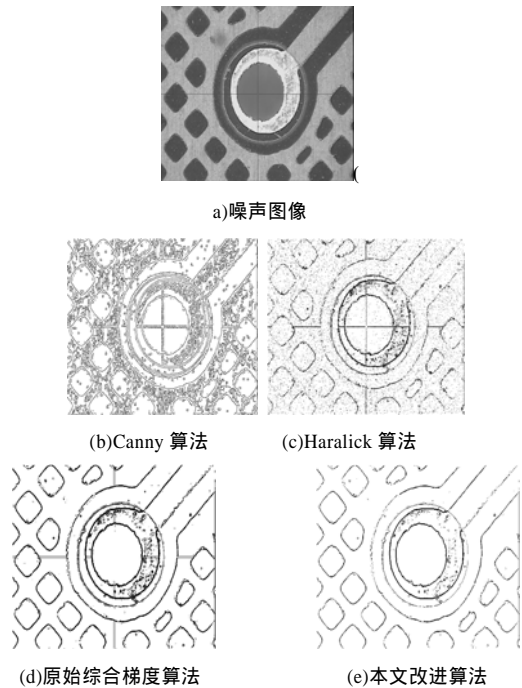


图5 与几种边缘检测算法检测结果的比较

表1为不同算法对该图像处理的误差和速度的对比。误差通过提取的边缘与原始图像的真实边缘相对比以计算误检率、漏检率和均值得到,时间为每幅图像处理的平均时间。由表1可见,改进后的算法的漏检率高于Canny算法,但误检率却低于其他几种算法。由误差均值可以看到,改进后的算法能在漏检率与误检率之间得到很好的折中。改进后的算法在提高边缘定位精度的前提下,算法的处理速度也有所提高。

表1 算法性能比较

算法	误差(像素)			时间/s
	误检率	漏检率	均值	
Canny 算法	0.112 500 00	0.001 923 08	0.112 516 44	0.553 000
Haralick 算法	0.067 788 46	0.046 145 08	0.068 196 82	1.328 000
综合梯度算法	0.032 451 92	0.028 569 39	0.046 145 08	1.056 500
本文算法	0.027 644 23	0.007 211 54	0.028 569 39	0.737 500

#### 5 结束语

本文针对基于Facet模型的综合梯度边缘检测边缘定位精度低和计算量大的问题,通过动态阈值的选取和将2D卷积核分解为2个1D卷积核,使算法的定位精度有所提高,且复杂度从 $O(i^2)$ 降低到 $O(2i)$ 。实验证明,改进算法对噪声抑制能力较强,可快速有效地实现影像边缘提取,对精加工零件高精度实时检测具有现实意义。

(下转第193页)