

文章编号:1001-9081(2008)07-1729-03

## 基于三级灰度模型空间矩的陶瓷基片尺寸测量

李军利, 李元宗

(太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024)

(ljlyut@163.com)

**摘要:** 分析了图像边缘二级灰度模型空间矩的亚像素细分算法及其原理误差, 建立了更符合实际的图像边缘三级灰度模型, 推导出三级灰度模型下任意角度图像边缘的二维空间矩以及边缘的亚像素位置函数。将该算法应用于陶瓷基片的尺寸测量和分类中, 测量效果好、分类精度高。该方法在零件尺寸的高精度测量中具有较高的实用价值。

**关键词:** 灰度模型; 空间矩; 陶瓷基片; 亚像素; 尺寸测量

**中图分类号:** TP391.41    **文献标志码:** A

### Size measurement of ceramic substrate based on three level edge gradation model spatial moment

LI Jun-li, LI Yuan-zong

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** This paper introduced the subpixel subdivision algorithm for spatial moment based on two level edge gradation model and analyzed its principle error, and established more actual three level edge gradation model, and deduced two-dimensional spatial moment of random angle image edge as well as its subpixel location function. The algorithm is applied to size measurement and classification of ceramic substrate, and measurement is more effective and classification accuracy is higher. The algorithm has high value in measurement of component size.

**Key words:** gradation model; spatial moment; ceramic substrate; subpixel; size measurement

## 0 引言

边缘是图像中最显著的特征, 边缘检测在计算机视觉和图像处理领域有着重要的意义。在测量视场一定的条件下, 提高边缘或尺寸检测的定位精度, 可从硬件和软件两方面着手; 硬件方面可选用高分辨率的 CCD 摄像机(即增加单位面积的像素点数)和采样率较高的图像采集卡等办法, 这将增加检测系统的硬件成本, 并且硬件的分辨率又要受到当前制造水平的限制, 不可能一味提高, 而高分辨率的采样将大幅度增加图像处理的运算量; 软件亚像素细分算法节省成本、灵活多样, 特别是随着图像处理技术的快速发展, 已成为图像处理和机器视觉领域的发展方向。到目前为止, 图像边缘的亚像素定位出现了梯度法、曲线拟合、非线性插值、灰度空间矩等方法<sup>[1-2]</sup>。灰度空间矩亚像素边缘检测方法具有精度高、计算过程相对简单, 不受图像灰度数据的加性和乘性变化的影响而受到了广泛的关注和应用。

## 1 理想二级边缘模型空间矩亚像素细分算法

图像的理想二级边缘模型如图 1 所示。

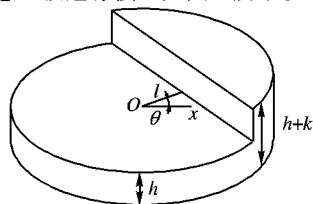


图 1 图像理想边缘的二级灰度模型

其理想采样区域为单位圆, 边缘将整个单位圆分成两部分, 其中一个区域灰度值为  $h$ , 另一个区域灰度值为  $h+k$ , 图像边缘的法线与  $x$  轴方向的夹角为  $\theta$ ,  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ , 单位圆中心到边缘的距离为  $l$ ,  $l \in [-1, 1]$ ,  $f(x, y)$  表示图像数据, 则二维  $p+q$  阶空间矩定义为:

$$M_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

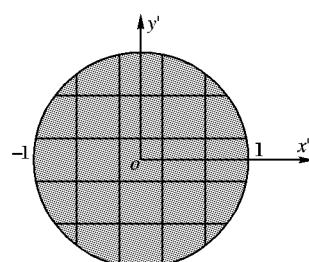


图 2 模型旋转后边缘与  $y$  轴平行

用  $x', y'$  表示, 有式子:

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (3)$$

那么, 旋转后与旋转前的二阶及二阶以下空间矩的关系为:

$$M'_{00} = M_{00} \quad (4)$$

$$M'_{10} = \cos \theta M_{10} + \sin \theta M_{01} \quad (5)$$

$$M'_{01} = -\sin \theta M_{10} + \cos \theta M_{01} \quad (6)$$

$$M'_{11} = -\sin \theta \cos \theta M_{20} + \sin \theta \cos \theta M_{02} + (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) M_{11} \quad (7)$$

收稿日期: 2008-01-07; 修回日期: 2008-03-10。

作者简介: 李军利(1970-), 男, 山西晋城人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 机械电子工程、机器视觉; 李元宗(1940-), 男, 山西定襄人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 机械电子工程、机器人。

$$M'_{20} = \cos^2 \theta M_{20} + \sin^2 \theta M_{02} + 2 \cos \theta \sin \theta M_{11} \quad (8)$$

$$M'_{02} = \sin^2 \theta M_{20} + \cos^2 \theta M_{02} - 2 \sin \theta \cos \theta M_{11} \quad (9)$$

由空间矩的性质  $M'_{01} = \iint y f(x, y) dx dy = 0$ , 那么由式

(6) 可得:

$$\theta = \arctan \left( \frac{M_{01}}{M_{10}} \right) \quad (10)$$

根据式(1), 旋转空间矩计算通式为:

$$M'_{pq} = \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} h x^p y^q dy dx + \int_1^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} k x^p y^q dy dx \quad (11)$$

利用式(11) 可分别计算下列空间矩:

$$M'_{00} = \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} h dy dx + \int_1^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} k dy dx = h\pi + \frac{k\pi}{2} - k \arcsin l - kl \sqrt{1-l^2} \quad (12)$$

$$M'_{10} = h \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} x dy dx + k \int_1^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} x dy dx = k \frac{2}{3} (1-l^2)^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

$$M'_{20} = h \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} x^2 dy dx + k \int_1^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} x^2 dy dx = \frac{h\pi}{4} + \frac{k\pi}{8} + \frac{k}{2} l (1-l^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{k}{4} l \sqrt{1-l^2} - \frac{k}{4} \arcsin l \quad (14)$$

由式(12)、(13) 和(14) 可计算得:

$$l = \frac{4M'_{20} - M'_{00}}{3M'_{10}} \quad (15)$$

$$k = \frac{3M'_{10}}{2 \sqrt{(1-l^2)^3}} \quad (16)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} [2M'_{00} - k(\pi - 2 \arcsin l - 2l \sqrt{1-l^2})] \quad (17)$$

方程(10) 给出了图像边缘与  $y$  轴的夹角  $\theta$ 。方程(15) 给出了边缘与像素中心距离  $l$  的表达式。

在离散情况下, 原始矩的  $M_{00}, M_{10}, M_{01}, M_{11}, M_{20}, M_{02}$  的计算可改为相关运算, 即模板算子与灰度图像相乘。模板算子用如下方法获得: 将半径为 1 的单位圆用  $5 \times 5$  的正交网格进行采样, 如图 3, 利用式(1) 计算归一化的灰度矩, 6 个原始矩  $M_{00}, M_{10}, M_{01}, M_{11}, M_{20}, M_{02}$  的计算模板算子<sup>[3]</sup> 通用公式如下:

$$m_{pq} = \iint x^p y^q dx dy \quad (18)$$

其中:  $p = 0, 1, 2; q = 0, 1, 2$ 。

计算原始矩时, 将模板算子中心与边缘所在的整像素的

$$M'_{00} = h\pi + k \left[ \frac{\pi}{2} - l_2 \sqrt{1-l_2^2} - \arcsin l_2 \right] + \delta k [l_2 \sqrt{1-l_2^2} - l_1 \sqrt{1-l_1^2} + \arcsin l_2 - \arcsin l_1] \quad (21)$$

$$M'_{10} = \frac{2}{3} \cdot \delta k \left[ \sqrt{(1-l_1^2)^3} - \sqrt{(1-l_2^2)^3} \right] + \frac{2}{3} k \sqrt{(1-l_2^2)^3} \quad (22)$$

$$M'_{20} = \frac{\pi}{4} h + k \left[ \frac{\pi}{8} + \frac{l_2}{2} \sqrt{(1-l_2^2)^3} - \frac{l_2}{4} \sqrt{1-l_2^2} - \frac{1}{4} \arcsin l_2 \right] + \frac{\delta k}{2} \left[ l_1 \sqrt{(1-l_1^2)^3} - \frac{1}{2} l_1 \sqrt{1-l_1^2} - \frac{1}{2} \arcsin l_1 - l_2 \sqrt{(1-l_2^2)^3} + \frac{1}{2} l_2 \sqrt{1-l_2^2} + \frac{1}{2} \arcsin l_2 \right] \quad (23)$$

$$M'_{02} = \frac{\pi}{4} h + k \left[ \frac{\pi}{8} - \frac{l_2}{6} \sqrt{(1-l_2^2)^3} - \frac{l_2}{4} \sqrt{1-l_2^2} - \frac{1}{4} \arcsin l_2 \right] - \frac{\delta k}{2} \left[ \frac{1}{3} l_1 \sqrt{(1-l_1^2)^3} + \frac{1}{2} l_1 \sqrt{1-l_1^2} + \frac{1}{2} \arcsin l_1 - \frac{1}{3} l_2 \sqrt{(1-l_2^2)^3} - \frac{1}{2} l_2 \sqrt{1-l_2^2} - \frac{1}{2} \arcsin l_2 \right] \quad (24)$$

$$M'_{01} = M'_{11} = 0 \quad (25)$$

中心对齐, 像素灰度值与模板算子对应值相乘之和分别得到  $M_{00}, M_{10}, M_{01}, M_{11}, M_{20}$  和  $M_{02}$ , 代入方程(10) 得到  $\theta$  角,  $\theta$  角代入方程(12) ~ (14), 再代入方程(15) 得到边缘位置  $l$  值。

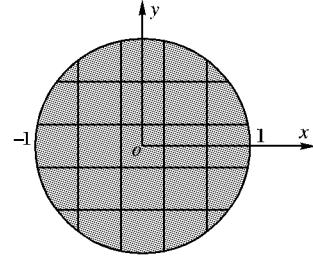


图 3  $5 \times 5$  采样矩的圆形区域

## 2 三级边缘模型空间矩的亚像素细分算法

在实际图像中, 由于 CCD 摄像机的感光元的大小是有限的, 且是对连续边缘进行离散采样, 是一种非理想采样, 存在有限口径的平均灰度效应, 而且一般图像测量的光学系统是衍射受限系统, 因此, 在边缘附近, 从背景到边缘或从边缘到背景必然存在一个过渡阶段, 这就使得边缘模型应使用更符合实际的三个灰度模型来描述。如图 4 所示。

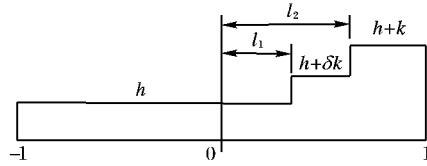


图 4 实际边缘的三级灰度模型

图 4 中:  $h$  代表背景灰度,  $h+k$  代表目标灰度,  $h+\delta k$  代表过渡阶段的灰度, 可见, 由式(15) 所计算出的亚像素位置必然存在原理误差<sup>[4]</sup>。 $l_1$  和  $l_2$  分别表示采样像素边缘到像素中心的距离, 假设  $l_1 < l_2$ , 那么  $l$  在  $l_1$  和  $l_2$  之间, 即实际边缘  $l$  在以  $l_1$  和  $l_2$  为边界的那个像素中的某个位置。实际的边缘  $l$  与过渡灰度增量  $\delta k$  有如下关系:  $l$  越接近  $l_2$ ,  $\delta k$  就越大(接近  $k$ )。可以用下列线性关系式近似表示:

$$\alpha = \frac{\delta k}{k} = \frac{l_2 - l}{l_2 - l_1} \quad (19)$$

三级边缘模型参数主要有  $h, k, \delta k, \theta, l_1$  和  $l_2$ 。下面先计算顺时针旋转  $\theta$  角后边缘垂直于  $x$  轴的旋转矩, 其计算通式为:

$$M'_{pq} = \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} h x^p y^q dy dx + \int_1^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} \delta k x^p y^q dy dx + \int_{l_2}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} k x^p y^q dy dx \quad (20)$$

由式(20) 可得到 6 个旋转空间矩:

式(21)~(25)是旋转 $\theta$ 角后边缘垂直于 $x$ 轴的旋转矩,要求得旋转前的原始矩,可以将边缘垂直于 $x$ 轴的图像逆时针旋转 $\theta$ 角,即顺时针旋转 $-\theta$ 角,将(21)~(25)所得等式以

$$l_{s\theta} =$$

$$\frac{\cos^2 \theta [ l_2 \sqrt{(1 - l_2^2)^3} + \alpha l_1 \sqrt{(1 - l_1^2)^3} - \alpha l_2 \sqrt{(1 - l_2^2)^3} ] + \sin^2 \theta [ -\frac{1}{3} l_2 \sqrt{(1 - l_2^2)^3} - \frac{1}{3} \alpha l_1 \sqrt{(1 - l_1^2)^3} + \frac{1}{3} \alpha l_2 \sqrt{(1 - l_2^2)^3} ]}{\cos \theta [ -\alpha \sqrt{(1 - l_2^2)^3} + \alpha \sqrt{(1 - l_1^2)^3} + \sqrt{(1 - l_2^2)^3} ]} \quad (26)$$

当式(26)中 $\theta = 0$ 时,得到三级边缘模型垂直于 $x$ 轴时的亚像素位置 $l_s$ 为:

$$l_s = \frac{(1 - \alpha) l_2 \sqrt{(1 - l_2^2)^3} + \alpha l_1 \sqrt{(1 - l_1^2)^3}}{(1 - \alpha) \sqrt{(1 - l_2^2)^3} + \alpha \sqrt{(1 - l_1^2)^3}} \quad (27)$$

### 3 误差校正函数

式(26)得到了边缘三级灰度模型下任意角度 $\theta$ 的图像亚像素边缘位置,它与理想边缘二级灰度模型下亚像素边缘位置的误差函数 $E(l, \theta)$ 定义为:

$$E(l, \theta) = l - l_s \quad (28)$$

该误差函数含有 $l$ 、 $\theta$ 、 $l_1$ 和 $l_2$ ,而由实际三级边缘模型可知, $l_1$ 和 $l_2$ 是最靠近 $l$ 的相邻两个像素的边界,在由理想二级边缘空间矩算子初步估算 $l$ 后,可以确定 $l_1$ 和 $l_2$ 的值。分析可知,当 $l = l_2$ 或 $l = l_1$ 时,原理误差等于0,这时边缘恰处在像素的边缘。在窗口的左右相邻像素范围内,原理误差是奇对称的。

实际三级灰度模型的边缘亚像素定位计算由式(10)、(26)得到,误差校正可通过误差函数(28)计算或通过建立误差校正表,通过查表和线性插值实现。

### 4 应用与结论

电工陶瓷基片是制造电容器等的基本材料,壁薄易碎,采用人工测量尺寸费时费力,测量精度难以保证,分类效果较差。为此,通过机器视觉获取基片图像,采用整像素边缘检测和空间矩亚像素细分算子得到基片尺寸边缘的亚像素位置<sup>[5]</sup>,实现基片尺寸的精确测量和基片的高精度分类。

图像测量系统采用BASLER A 113P面阵CCD摄像机,像素为1300(H)×1030(V),像元分辨率为6.7 μm(H)×6.7

及 $-\theta$ 角代入式(4)~(9)右边,就可求得角度为 $\theta$ 的图像边缘原始矩 $M_{00}$ 、 $M_{10}$ 和 $M_{20}$ ,然后将 $M_{00}$ 、 $M_{10}$ 和 $M_{20}$ 代入式(15)得到角度为 $\theta$ 的图像边缘亚像素位置 $l_s$ :

$$\mu\text{m}(V), \text{光源采用柯拉照明法。所测量的陶瓷基片公称尺寸为长 } 60 \text{ mm} \times \text{宽 } 50 \text{ mm} \times \text{厚 } 0.4 \text{ mm}。 \text{ 系统由吸盘式机械手上料, 绳带输送和气缸分类输出。}$$

基片图像经过中值滤波处理后,采用Prewitt和LOG算子进行整像素边缘快速定位,然后对初步定位的图像边缘用三级灰度边缘模型空间矩算子进行亚像素边缘定位,求出灰度图像的亚像素边缘距离像素的中心位置,从而得到基片的长、宽尺寸,再根据基片分档要求,完成分类输出。试验表明,采用该方法测量精度为0.005 mm,分类效率30片/min。该基片分类系统已在三环集团公司基片分类机中得到应用,分类精度和效率均优于进口同类产品。

图像边缘三级灰度模型更符合图像边缘实际情况,基于图像边缘三级灰度模型的空间矩亚像素细分算法所测量的图像边缘位置精度更高。三级灰度空间矩模型及像素算法在零件尺寸的高精度测量中具有较高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 刘亚威,杨丹,张小洪.基于空间矩的亚像素边缘定位技术的研究[J].计算机应用,2003,2(2):47~49.
- [2] 杨敏,叶邦彦,牟丽,等.机械零件图像中直线边缘亚像素定位方法[J].华南理工大学学报,2003,12(12):30~33.
- [3] 王建明,浦昭邦,尹继学.空间矩亚像素细分算法的研究[J].光学技术,1999,7(4):3~6.
- [4] LYVERS E P, MITCHELL O R. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transaction On PAMI, 1989, 11(12):1293~1309.
- [5] 张永宏,胡德金,徐俊杰.基于视觉图像的机加工零部件亚像素边缘定位[J].机械工程学报,2004,6(6):179~182.
- [6] 刘扬阳,金伟其,苏秉华,等.超分辨率图像处理技术进展及其在遥感中的应用[J].红外与激光工程,2005,34(1):72~75.
- [7] 王晓红,赵荣椿.匀速直线运动模糊的PSF之估计[J].计算机应用,2001,21(9):40~41.
- [8] 张秉仁,陈里铭,高游.基于像素运动的图像模糊机理与恢复技术[J].计算机工程,2004,30(8):21~22.
- [9] 张婷婷,许刚.基于模糊集理论鉴别运动模糊参数[J].计算机工程与应用,2007,43(33):75~77.
- [10] 张云霞.运动模糊图像的复原与重建[D].大连:大连理工大学,2006.
- [11] CANNON M. Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase[J]. IEEE Transactions Acoustics Speech Signal Processing, 1976, 24 (1): 58~63.
- [12] 邹谋炎.反卷积和信号复原[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [13] YITZHAKY Y, KOPEIKA N S. Identification of the blur parameters from motion blurred images[J]. Graphical Models and Image Processing, 1997, 59(5):310~320.
- [14] 邱慧,于起峰.基于自相关的匀速运动模糊尺度参数识别[J].国防科技大学学报,2006,28(5):123~125.