

文章编号: 0253-2239(2007)10-1751-7

# 一种照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法\*

曹万鹏 车仁生 叶 东

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出了一种照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法,用于从非均匀的弱照明图像中提取边缘。根据照明反射图像形成模板与 CCD 相机成像原理,推导出图像的对应小波变换公式。然后,对图像局部区域中噪声、边缘与背景像素的小波系数进行比较分析,设计了一种照明无关的小波边缘检测公式。为增强边缘并抑制噪声,提出了一种改善的小波多尺度相乘边缘检测方法,并依照小波变换后边缘像素的特征,提取单像素的边缘。采用仿真和真实的非均匀的弱照明图像对该边缘检测算法进行验证,并与另外两种边缘检测方法进行定性的和定量的比较。实验结果证实了这种边缘检测方法能够从灰度不均匀的低衬比度图像中正确有效地提取边缘。

**关键词:** 图像处理; 边缘检测; 小波多尺度相乘; 照明无关; 低衬比度

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

## Illumination-Independent Wavelet Scale Multiplication Edge Detection Method

Cao Wanpeng Che Rensheng Ye Dong

(Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** An illumination-independent wavelet scale multiplication edge detection method is proposed to detect edges from the non-uniform weak illumination image. Based on the illumination-reflected image formation model and CCD camera imaging formula, the image wavelet transform formula is deduced. The wavelet module coefficients of the background pixel, noise, edges are observed and analyzed in the local region, and the illumination-independent wavelet edge detection algorithm is worked out. To enhance edge pixels and reduce noise, an improved wavelet scale multiplication edge detection algorithm is applied to orient edges accurately. Through utilizing edge pixels' characteristics after wavelet transform, the single-pixel edges are taken out of the image. In the end, the edge detection experiments for synthetic and real non-uniform weak illumination images were conducted, and its performance is analyzed and compared with other two edge detection methods qualitatively and quantitatively. The experimental result proves it correct and effective when used in the non-uniform gray and low contrast images to detect edges.

**Key words:** image processing; edge detection; wavelet scale multiplication; illumination independent; low contrast

## 1 引 言

基于不同算法的适用于从照明不均匀的弱照明图像中提取边缘的检测方法不断出现。主动轮廓基和能量函数基<sup>[1,2]</sup>边缘检测方法善于从一些特定领域的低衬比度或非均匀图像中检测一些弱的、不完整的

边缘,如医学图像中。但是这种方法很繁琐而且不灵活,其中一些还需要事先掌握一定的被检测目标的先验知识。通过对人类视觉的研究,Guang Deng<sup>[3]</sup>和 Takashi Sakamoto<sup>[4]</sup>分别利用对数图像处理模板在不理想的变化照明条件下检测边缘,并能够提取出位于

\* 国家自然科学基金(50275040)资助课题。

作者简介: 曹万鹏(1976—),男,哈尔滨人,博士研究生,主要从事计算机视觉、图像处理、模式识别等方面的研究。

E-mail: wanpengcao@sina.com

导师简介: 车仁生(1938—),男,哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉、光学精密测量、虚拟现实等方面的研究。

收稿日期: 2007-01-15; 收到修改稿日期: 2007-03-20

低衬比度区域的边缘像素。与此同时,其它一些依据不同理论和应用环境而设计的,适用于低衬比度或非均匀照明图像的边缘检测算法<sup>[5~7]</sup>也应运而生。尽管这些方法在从不均匀的弱照明图像中提取边缘上好于原有的一些传统边缘检测方法,但是根据 CCD 相机的成像原理,它们并没有能完全的从边缘检测公式中去除掉照明因素的影响,依然无法检测到一些低灰度、低衬比度区域的边缘。有必要给出一种不受照明因素影响的边缘检测算法。

Canny<sup>[8]</sup>通过三个标准来评价边缘检测器:好的边缘检测能力、好的边缘定位能力、低的假边缘误检测能力,同时他证明对于孤立的阶跃型边缘来说,高斯函数的一阶导数是最理想的边缘检测器。Marr 等<sup>[9]</sup>则提出应该利用多尺度分析技术来描绘多样性的边缘结构。小波的多分辨力分析技术为在不同尺度检测边缘提供了重要的工具。近年来,因为基于小波变换的边缘检测技术拥有良好的定位性能和较强的抗噪能力,图像工作者们已经更多地把这项技术应用于各个边缘检测领域中<sup>[10~12]</sup>。

## 2 图像形成模板和 CCD 相机成像公式

根据 Stockham<sup>[13]</sup>提出的照明反射图像形成模板,光强为  $I(x,y)$  的光源照射一个反射率为  $R(x,y)$  的目标,如图 1 所示,目标反射的照明强度  $F(x,y)$  可表示为

$$F(x,y) = I(x,y)R(x,y), \quad (1)$$

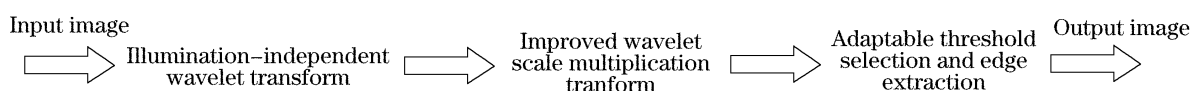


图 2 照明无关小波多尺度相乘边缘检测算法流程图

Fig. 2 Flow chart of illumination-independent wavelet scale multiplication edge detection method

根据照明反射图像形成模板和 CCD 相机成像公式,以及对图像局部区域中噪声、边缘与背景像素的小波系数的分析比较,利用照明无关小波变换边缘检测算法从图像中检测可能的目标边缘。然后采用改善的小波二尺度相乘算法来增强边缘像素,抑制噪声。考虑到低尺度小波变换较高尺度具有更高的定位精度,根据检测任务的具体目的和要求为进一步增强边缘定位精度。算法中调高低尺度上小波系数的指数值,并合理降低高尺度上小波系数的指数值,以提高低尺度上小波系数在小波尺度相乘后系数中所占比例。同时使其仍拥有一定的抑制噪声能力。最后,由图像的整体情况和局部区域内的小波系数自适应地设置阈值选择参量,并依照小波变

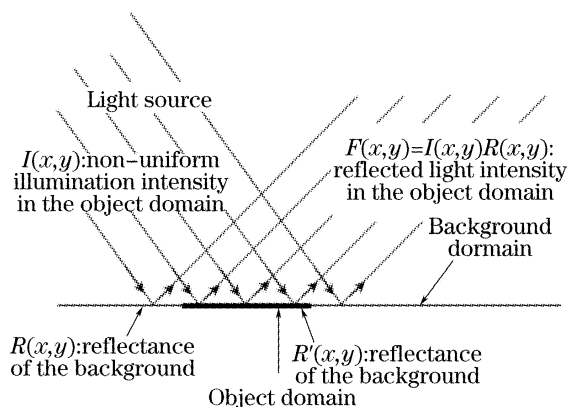


图 1 照明反射图像形成模板

Fig. 1 Image formation model by illumination reflection

工业检测中,通常 CCD 相机工作于线性区域,输出灰度被设计和调整为正比于输入的光强。因此输出灰度函数  $G(x,y)$  可表示为

$$G(x,y) = aF(x,y) + \beta, \quad (2)$$

对于同一台 CCD 相机来说,  $\alpha$ ,  $\beta$  是常量,因此从(1)式和(2)式,有

$$G(x,y) = aF(x,y) + \beta = \alpha \cdot I(x,y) \cdot R(x,y) + \beta. \quad (3)$$

## 3 照明无关的小波变换算法

根据照明反射图像形成模板与 CCD 相机成像原理,本文提出了一种照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法。这一方法的检测性能仅仅依赖于不同目标间反射率的差别,其具体算法流程如图 2 所示。

换后边缘所表现的特性提取单像素的边缘。

### 3.1 二进小波边缘检测方法

如果一个函数  $\psi(x)$  的均值为 0,且  $\psi(x) \in L^2(\mathbb{R})$ ,那么称函数  $\psi(x)$  为小波。 $f(x)$  在二进尺度  $2^j$  和位置  $x$  处的离散小波变换为<sup>[14]</sup>

$$W_j f(x) = f * \psi(x), \quad (4)$$

$*$  表示卷积运算。二进小波可以设计为一种等价于 Canny 边缘检测算子的多尺度边缘检测器。若  $\theta(x)$  是一个可微分的积分值为 1,在无穷大处收敛为 0 的光滑函数,令小波函数  $\psi(x)$  是  $\theta(x)$  的一阶导数,即有  $\psi(x) = d\theta(x)/dx$ ,

$$W_j f(x) = f * \psi_j(x) = 2^j \frac{d}{dx} [f(x) * \theta_j(x)], \quad (6)$$

当  $\theta(x)$  是高斯函数时,  $W_j f(x)$  的极值点的定位等价于 Canny 边缘检测。在二维情况下, 相似地有

$$\psi^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x}, \quad \psi^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y}. \quad (7)$$

小波变换的模值和梯度角为

$$Mf(x, y) = \left| |W_j^X f(x, y)|^2 + |W_j^Y f(x, y)|^2 \right|^{1/2}, \quad (8)$$

$$Af(x, y) = \begin{cases} \alpha(x, y), & W_j^X f(x, y) \geq 0 \\ \pi - \alpha(x, y), & W_j^X f(x, y) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\alpha(x, y) = \arctan[W_j^Y f(x, y)/W_j^X f(x, y)]$ 。在小波边缘检测过程中, 边缘像素在小波梯度方向上处在极值位置<sup>[15]</sup>。基于这个原理, 并且依据邻域中边缘的连续性, 就可以找出图像中所有可能的边缘像素。以此为基础, 由照明反射图像形成模板和 CCD 相机成像公式, 利用照明无关的小波变换算法, 可以从边缘检测公式中消除照明因素的影响。

### 3.2 照明无关小波变换

根据(2)式, 图像的小波变换可以表示为

$$W_j G(x, y) = W_j [\alpha \cdot F(x, y) + \beta]. \quad (10)$$

对于某一台 CCD 相机,  $\alpha, \beta$  是常量, 根据小波函数的定义和性质, 有

$$W_j(\beta) = 0, \quad (11)$$

和

$$W_j G(x, y) = \alpha \cdot W_j F(x, y) + W_j(\beta) = \alpha \cdot W_j F(x, y), \quad (12)$$

应用(1)式, 有

$$W_j G(x, y) = \alpha \cdot W_j F(x, y) = \alpha \cdot W_j I(x, y) \cdot R(x, y). \quad (13)$$

考虑图像中的小区域。如果区域中照明强度  $I(x, y)$  的变化大大低于反射率  $R(x, y)$  的变化, 那么在小区域中, 可以把照明强度  $I(x, y)$  看作常量, 有

$$W_j G(x, y) = \alpha \cdot I(x, y) \cdot W_j R(x, y). \quad (14)$$

由于测量任务中不均匀的弱照明影响, 当目标位于低照明强度区域时, 目标与背景间的灰度差很低, 边缘像素对应的小波变换模值就相应地低。同时, 目标与背景之间的衬比度也会随着目标在整个图像中位置的变化而变化。在滤除噪声和背景时, 边缘提取算法会一同滤除掉一些边缘像素。因此仅仅利用传统小波变换边缘检测算法去准确定位边缘将是很难的, 繁复的, 甚至不可能的。为此通过对小波变换后包含有目标与背景的区域的分析, 本文设计了照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法。

定义一个  $3 \times 3$  模板, 然后移动它并使其覆盖图像中的所有像素。当模板移动经过位于目标与背景

的边缘区域时,  $3 \times 3$  模板内的像素将由目标像素与背景像素共同组成。当边缘梯度方向上局部小波模极值位于  $3 \times 3$  模板中心时, 根据边缘的连续性, 该  $3 \times 3$  区域中的边缘像素不少于 3 个。那么在这一含有边缘的区域中, 排列 9 个像素的小波模值如下:

$$W_1 \geq W_2 \geq \dots \geq W_8 \geq W_9. \quad (15)$$

基于(15)式和小波变换原理, 通过如下公式变换该区域中的每个像素的小波系数:

$$W'_j(x, y) = \frac{W_j[G(x, y)]}{W_3} = \frac{\alpha \cdot I(x, y) \cdot W_j[R(x, y)]}{\alpha \cdot I(x, y) \cdot \{W[R(x, y)]\}_3} = \frac{W_j[R(x, y)]}{\{W[R(x, y)]\}_3}, \quad (16)$$

其中  $W'_j(x, y)$  是变换后照明无关的小波系数,  $\{W_j[R(x, y)]\}_3$  是  $3 \times 3$  区域中反射率小波系数排序的第三大值。很明显, 因为(16)式中消除了照明因素的影响,  $W'_j(x, y)$  独立于照明强度。在这种区域内, 依据(16)式, 边缘与背景像素具有如下差异:

$$(x, y) = \begin{cases} \text{edge pixel: } W'_j(x, y) > \text{or} \rightarrow 1 \\ \text{background pixel: } W'_j(x, y) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (17)$$

在整个图像中, 邻域里边缘与背景像素都具有这种对照明变化、图像灰度和衬比度不敏感的差异。根据这一差异, 即使在照明强度很低时, 本算法依然能够在图像中成功地定位具有不同反射率的目标之间的边缘。但很明显, 噪声像素变换后也会表现出与边缘相似的特征, 因此, 在经过照明无关的小波变换边缘检测后, 为增强图像中的边缘像素, 并抑制噪声, 设计了改善的小波多尺度相乘边缘检测方法。

## 4 改善的小波多尺度相乘方法

因为对于信号的利普席茨 (Lipschitz) 指数  $\alpha \geq 0$ , 当尺度  $2^j$  增加时, 二进小波变换后, 其小波系数大小保持不变或者增加。相反, 白噪声的利普席茨指数低于 0, 二进小波变换后, 其小波系数大小随着

尺度的增加迅速减小<sup>[15]</sup>。依据这一原理,传统的小波多尺度相乘方法通过直接相乘相邻二尺度上同一位置像素的小波系数来加强信号并抑制噪声。尺度积函数  $P_j f(x)$  定义如下:

$$P_j f(x) = W_j f(x) \cdot W_{j+1} f(x). \quad (18)$$

同一边缘在低尺度所对应的小波系数位置与在高尺度所对应小波系数所在位置并不完全相同,而低尺度小波变换较高尺度具有更高的边缘定位精度。基于以上原理,改善传统的小波尺度直接相乘边缘检测方法,其具体步骤由 5 步组成:

1) 对图像进行小波变换,利用(8)式获得相应的小波系数。

2) 利用(16)式去除不均匀照明的影响,并归一化变换后系数到  $[0, 255]$ 。

3) 根据不同的小波变换尺度,修改小波变换系数为  $|W_j f(x, y)|^\gamma$ 。即根据不同的尺度及图像情况、实验要求选择指数  $\gamma$ 。在低尺度,因为小波变换具有更高的定位精度,因此选择较大的  $\gamma$ ,以增加低尺度上小波系数在尺度积中所占比例,反之亦然。

4) 相乘相邻两尺度上修正的小波系数作为新的小波系数  $P_j f(x, y)$ 。

5) 通过(19)式、(20)式,把新的小波系数变换到区域  $[0, 255]$  中:

$$D = \frac{P_{\max} f(x, y) - P_{\min} f(x, y)}{255}, \quad (19)$$

$$P'_j f(x, y) = \frac{P_j f(x, y) - P_{\min}(x, y)}{D}, \quad (20)$$

其中  $P_{\max} f(x, y)$  和  $P_{\min} f(x, y)$  分别是邻域中新的小波系数的极大值和极小值。

## 5 阈值选取与边缘提取

为从图像中提取单像素的边缘,采取两步处理变换后的图像。第一步,利用如下自适应阈值技术初步的提取出图像中所有可能的候选边缘像素,并去除大部分的噪声与背景:

$$T = T_0 + c \sum_{x, y}^N P'_j f(x, y), \quad (21)$$

其中  $T$  是自适应阈值,  $T_0$  是初始阈值,  $c$  是一个比例常量,  $P'_j f(x, y)$  是变换后的小波系数。  $N$  是邻域中的像素数,本算法中  $N$  值取为 9。根据不同的图像,可根据实际情况调整  $T_0$  和  $c$ 。因为上述的小波尺度相乘算法已在一定程度上抑制了噪声,稍后由小波梯度方向上提取边缘并去除那些边缘长度小于长度阈值的像素的步骤将进一步降低噪声的影响,因此

这里选取较小的  $c$  和  $T_0$  值。

第二步,基于小波局部极值和小波梯度方向,从候选边缘像素中提取单像素的边缘。如图 3 所示,小波梯度角分成 8 个方向,根据小波变换后的梯度角,沿图像中方向选取像素的小波极值。最后,连接这些极值点并从中去除掉边缘长度小于长度阈值  $T_1$  的边缘。

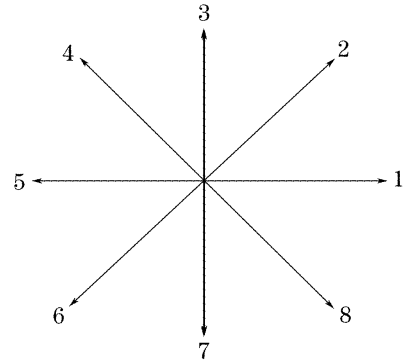


图 3 边缘梯度角

Fig. 3 Edge gradient direction angle

## 6 实验与性能评价

分别用传统的小波尺度相乘边缘检测方法,基于对数图像处理模板的差分基边缘检测方法<sup>[3]</sup>以及本文提出的照明无关的小波尺度相乘边缘检测方法对合成的和真实的图像进行处理,并且对获得的边缘检测结果进行定性的与定量的比较分析。为方便描述,以下部分里将传统的小波尺度相乘边缘检测方法,基于对数图像处理模板的差分基边缘检测方法以及本文边缘检测方法分别命名为方法 1,方法 2 以及方法 3。

### 6.1 合成图像边缘检测性能评价

利用合成的阶梯边缘图像来验证本文算法。在仿真实验中,假设相机尺寸是  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ,照明函数  $i(x, y)$  根据公式  $i(x, y) = 5.5 \times (255 - y) + 250$  变化,  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 15$ ,图像的左半边反射率  $r_l$  设为 0.1,图像的右半边反射率  $r_r$  设为 0.15,然后给图像中加入  $\sigma = 5$  的白高斯噪声,如图 4(a) 所示。分别利用上面三种边缘检测方法来检测图像中的阶梯边缘,如图 4(b) 所示。其中,在方法 3 中,采用 2 尺度与 3 尺度上的小波系数进行相乘。图 4(d)~图 4(f) 分别对应方法 3,且在 2 尺度上小波系数的指数  $\gamma_0$  分别取为 1.4, 1.7, 1.1,在 3 尺度上小波系数的指数  $\gamma_1$  取为 0.6, 0.3, 0.9 时所获得的阶梯边缘检测结果,为区分以下简称为方法 3a,方法 3b 和方法 3c。

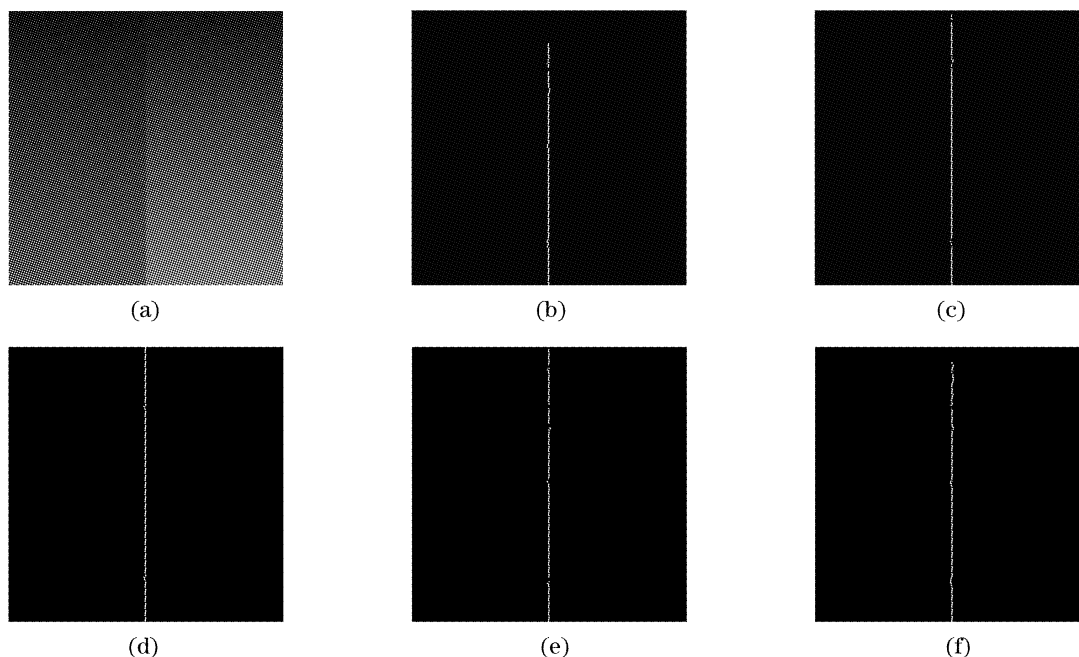


图 4 非均匀照明下含噪阶梯图像边缘检测结果

Fig. 4 Edge detection result of noisy step edge under the non-uniform illumination

表 1 给出了利用方法 1、2 和方法 3a 获得的边缘检测结果的边缘漏检数量和误检测数量。由表 1 看到,方法 2 和方法 3a 明显有更低的边缘漏检测数量,方法 3a 在有噪声干扰的低灰度与低衬比度图像中获得了更好的检测结果。从图 4 中也可看到,因为方法 3a 完全克服了照明因素的影响以及改善的尺度相乘算法的应用和 2、3 尺度上指数系数的合理选择,所以在低灰度、低衬比度图像区域表现出了更好的边缘检测结果与抗噪能力。

表 1 三种边缘检测方法获得的检测结果的边缘漏检数量和误检测数量

Table 1 Number of misdetections and false alarms by the edge detection three methods

	Method 1	Method 2	Method 3a
Misdetections	29	7	0
False alarms	12	5	3

当使用方法 3b 检测图像中的阶梯边缘时,由于 2 尺度上小波系数的指数选取得偏大,使其在两尺度系数乘积中所占比例过大。尽管检测出了图像中较弱的边缘,但因为其抗噪声干扰能力较差。因此相对于图 4(d) 出现了较多的误检测与漏检测。反之,使用方法 3c 检测图像时,其抗噪能力提高但边缘定位精度和检测弱边缘的能力下降,一些弱的边缘从图像中丢失了,同时也出现了更多的像素偏离其正确位置。当噪声干扰较小且检测的主要指标是定位精度时,低尺度上的小波系数指数应选取较高值,而高尺度上小波系数指数应取的较低。当噪声

干扰较大且检测的主要指标是改善图像质量时,低尺度上的指数系数应取的较低,而高尺度上小波系数指数应取的较高。不同尺度上小波系数指数具体的取值应根据具体的实验条件和要求,通过验证实验合理给出。

为进一步验证本文边缘检测算法,利用含有多个不同几何目标的合成图像来验证和比较这三种方法的边缘检测能力。在仿真实验中,依然假设相机尺寸是  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ,照明函数  $i(x, y)$  根据公式  $i(x, y) = 3000 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \times \frac{x+y}{510} + 600$  变化,  $\alpha=0.2, \beta=30$ 。这些几何目标的反射率  $r_g$  从  $[0.12, 0.25]$  中随机选取,尺寸和位置也在限定的范围内随机给出,背景图像的反射率  $r_b$  为 0.1。图像中加入  $\sigma=5$  的白高斯噪声,如图 5(a) 所示。图 5(b),图 5(c) 和图 5(d) 分别为三种边缘检测方法获得的边缘检测结果。从图 5 中看到,在低衬比度区,方法 1 几乎丢失了大部分的边缘像素。尽管在一些低衬比度区域,方法 2 准确的定位了其中的边缘像素,但对于同时处于低衬比度、低灰度区域中的边缘像素,方法 2 不能如方法 3 一样给出好的检测结果。这是因为方法 2 没有考虑 CCD 相机成像模板,它的检测精度因为成像公式中  $\beta$  的存在而受到影响,特别是在低灰度的区域中这一影响会很大。

使用 Lena 图像定性比较这三种边缘检测方法对一般图像的边缘检测能力。Lena 图像从左上到右下依据公式

$$g'(x,y) = \frac{1}{5} \left\{ 0.5 + 4.5 \times \cos \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) \frac{x+255-y}{510} \right] \right\} \cdot g(x,y)$$

进行暗化。图 6(b),图 6(c)和图 6(d)分别为三种

边缘检测方法获得的边缘检测结果。这进一步证明了方法 3 的边缘检测能力,它能够检测出一些位于低衬比度区域的弱的和复杂的边缘。

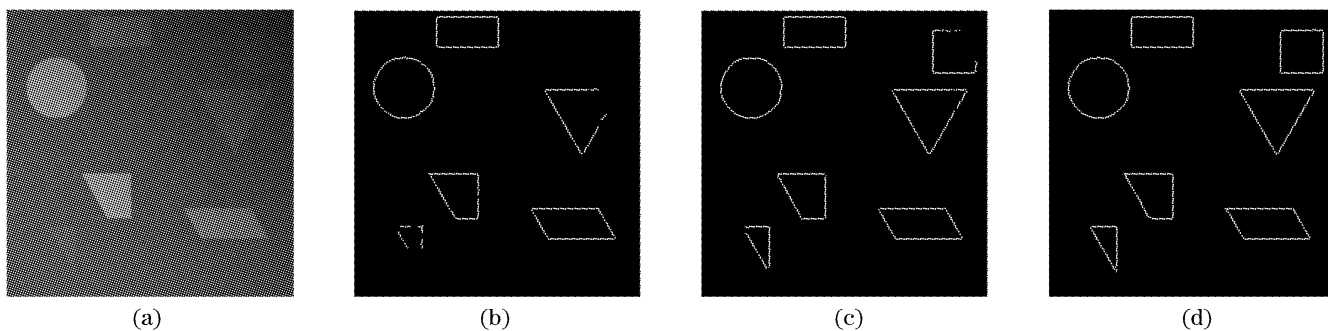


图 5 非均匀弱照明下的几何目标边缘检测结果

Fig. 5 Edge detection result of noisy synthetic geometric object image



图 6 暗化的噪声 Lena 图像边缘检测结果

Fig. 6 Edge detection result of darkened noisy synthetic Lena image

6.2 真实图像实验

图 7(a)中,运动发生器上固定有 3 根带有反光特征球的杆,在每根杆上的 5 个特征球的 5 点交比值已事先精确标定已知。它们在一台六自由度的运动发生器的带动下运动。正确的定位这些标记球在图像中的边缘位置是正确完成运动估计的前提。通过调整照明强度与照射角度,事先模仿运动检测过程中可能的照明变化和照明不稳定性,以确保和验证边缘检测算法即使在很差的照明条件下,也总能成功完成特征目标运动过程中的边缘检测任务。

图 7(b)是弱照明下的 Dalsa-CA-D6 相机拍摄

的反光特征标记球在一台六自由度的运动发生器的带动下运动的图像。图 7(c)为方法 2 获得的边缘检测结果,图 7(d)为方法 3 获得的边缘检测结果。在方法 3 中,选取小波的 2、3 尺度进行相乘,阈值初值和系数分别设置为 40 和 0.1,长度阈值设为 5。同时,为合理设置不同尺度上小波系数的指数,实验中依据 5 点的透视交比不变性原理<sup>[16]</sup>作为定量的调整不同小波尺度上小波系数指数值的指导标准。具体步骤如下:第一步,设置 2、3 尺度上小波系数的初始指数值分别为 1.9 和 0.1,然后利用方法 3 在图像中检测得到每根杆上反光特征球在图像中的边

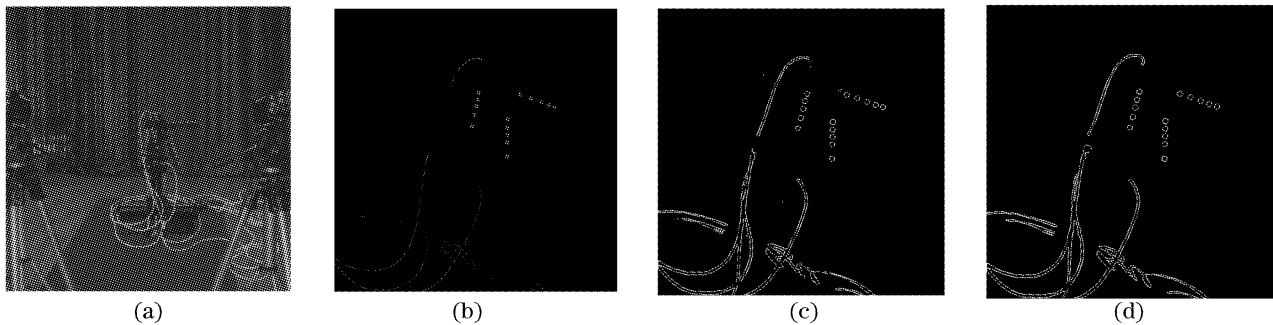


图 7 弱照明下边缘检测结果

Fig. 7 Edge detection result under weak illumination

缘位置;第二步,根据获得的边缘位置利用一种圆的 Hough 变换原理<sup>[17]</sup>计算出它们各自的圆心坐标;第三步,由圆心坐标计算出每根杆的交比值,并与已知的每根杆的真实交比值进行比较,计算交比值误差均值;第四步,以步长-0.05 和 0.05 分别调整 2、3 尺度上小波系数的指数值,并重复步骤 1~4,直到 2、3 尺度上小波系数的指数值分别变为 0.1 和 1.9,选择计算的交比值与真实交比值误差最小时的指数

值作为两尺度上小波系数的指数。当 2、3 尺度上小波系数指数值分别为 1.55 和 0.45 时,方法 3 能给出最好的边缘检测结果。表 2 给出了方法 3 中 2、3 尺度上小波系数指数取不同值时获得的交比值误差,以及方法 2 检测边缘获得的交比值误差。

实验中看到,具有最优指数取值的方法 3 给出了更好的边缘检测结果,正确的从背景中检测出了一些方法 2 没有检测到的弱边缘。

表 2 上述两种方法定位边缘后计算得到的交比值的误差

Table 2 Cross ratio value error with the above two methods to locating edge

	Method 2	Method 3 with $\gamma_1=1.55, \gamma_2=0.45$	Method 3 with $\gamma_1=1.7, \gamma_2=0.3$	Method 3 with $\gamma_1=1.2, \gamma_2=0.8$
Error for cross ratio of Stick 1 / $10^{-2}$	2.61	0.551	2.37	8.12
Error for cross ratio of Stick 2 / $10^{-2}$	2.41	0.526	1.76	7.56
Error for cross ratio of Stick 3 / $10^{-2}$	2.47	0.533	2.02	7.74
Mean of the error / $10^{-2}$	2.50	0.537	2.05	7.81

## 7 结 论

本文提出的照明无关小波尺度相乘边缘检测方法可以从非均匀照明与低衬比度图像中精确地抽取边缘。试验验证中,与传统的小波尺度相乘边缘检测方法,基于对数图像处理模板的差分基边缘检测方法进行了定性的与定量的比较。本文的边缘检测方法是根据照明反射图像形成模板、CCD 相机成像模板及小波边缘检测原理设计的,完全消除了边缘检测过程中照明因素的影响,合成的和真实的图像试验结果都显示出在非均匀弱照明情况下,在边缘检测性能上要优于另外两种方法。而且在一定范围内对照明强度的变化和照明的不均匀性影响并不敏感。同时,改善的小波尺度相乘边缘检测算法的应用也使得本文算法在定位精度上显著好于传统的小波尺度直接相乘边缘检测方法。

## 参 考 文 献

- 1 Chun Yuan, Engene Lin, Jacob Millard *et al.*. Closed contour edge detection of blood vessel lumen and outer wall boundaries in black-blood MR images[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 1999, **17**(2): 257~266
- 2 Li Fenlan, Xu Kexin. An algorithm applied in frontal-view face images for automatically localizing eyes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 320~326 (in Chinese)  
李粉兰,徐可欣.一种应用于人脸正面图像的眼睛自动定位算法[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 320~326
- 3 Deng Guang, Jean-Charles Pinoli. Differentiation-based edge detection using the logarithmic image processing model[J]. *J. Mathematical Imaging and Vision*, 1998, **8**(2): 161~180
- 4 Takashi Sakamoto, Toshikazu Kato. Edge detection method insensitive to the light and shade variance in image[C]. *Systems, Man, and Cybernetics, IEEE International Conference*, 2000, **3**: 1048~1053

- 5 Gyudong Lee, Kuang-Sub Kim, Dong-Seok Jeong. Rough edge detection of low contrast images using consequential local variance maxima[C]. *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference*, 1999, **1**: 734~737
- 6 M. Perez, C. Pagliari, T. Dennis. A zero-crossing edge detector with improved localization and robustness to image brightness and contrast manipulations [C]. *Image Processing*, 2005. *ICIP 2005. IEEE International Conference on 2005*, **2**: II-482-5
- 7 Wangheon Lee, Dongsu Kim, Inso Kweon. Automatic edge detection method for the mobile robot application[C]. *Proceedings of the 2003 IEEWRSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada*, 2003. 2730~2735
- 8 J. Canny. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1986, **8**(6): 679~698
- 9 D. Marr, E. Hildreth. *Theory of Edge Detection* [M]. London: Proc. Royal Soc, 1980. 187~217
- 10 Lei Zhang, Paul Bao. Edge detection by scale multiplication in wavelet domain[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, **23**(14): 1771~1784
- 11 Famao Ye, Lin Su, Shukai Li. Automatic multi-resolution image registration based on genetic algorithm and Hausdorff distance [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 386~388
- 12 Wang Gang, Xiao Liang, Jiang ZhiJing *et al.*. Sub-pixel multifractal method for image processing application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1345~1349 (in Chinese)  
王 刚,肖 亮,姜志静等.亚像素多重分形方法在图像处理中的应用[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1345~1349
- 13 Thomas G. Stockham. Image processing in the context of a visual model[J]. *Proc. IEEE*, 1972, **60**(7): 828~842
- 14 Stéphane Mallat, Sifen Zhong. Characterization of signals from multiscale edges[J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1992, **14**(7): 710~732
- 15 Stéphane Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing* [M]. Yang Lihua, Dai Daoqing, Huang Wengliang *et al.* transl., Beijing: China Machine Press, 2002 (in Chinese)  
Stéphane Mallat. 信号处理的小波导引[M]. 杨力华,戴道清,黄文良等译,北京:机械工业出版社,2002
- 16 W. P. Cao, R. S. Che, D. Ye. Binocular vision sequence image feature correspondence and motion detection based on cross ratio invariant[J]. *J. Physics: Conference Series*, 2005, **13**: 466~473
- 17 Cao Wanpeng, Che Rensheng, Huang Qingcheng *et al.*. A new circle detection method based on Hough transform[C]. *ISTM*, 2005, **7**(2): 6631~6634