

文章编号 1004-924X(2007)07-1143-08

# 一种基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强方法

曹万鹏, 陈刚, 车仁生, 叶东

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强算法,用于从不均匀的弱照明图像中提取目标边缘。依据照明反射图像形成模板和 CCD 相机成像公式,推导出图像的小波变换公式。对图像局部区域中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。给出一种同时考虑小波模值大小和梯度方向的模糊算子来增强边缘并抑制噪声。最后,采用仿真和真实的图像对该算法进行验证,利用此算法检测阶梯边缘,得到该算法的边缘检测评价标准  $F$  系数值为 0.984 3,边缘定位精度评价系数  $E_d$  值为 0.126 5,通过被检测的特征球边缘计算得到的交比值误差为  $3.72 \times 10^{-3}$ 。实验结果证实,该边缘检测方法能够很好地工作于非均匀的弱照明图像。

**关键词:**边缘检测;小波变换;照明无关;模糊增强

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform

CAO Wan-peng, CHEN Gang, CHE Ren-sheng, YE Dong

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

**Abstract:** An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform is proposed to extract edges out of a non-uniform weak illumination image. By deducing the image wavelet transform formula from the image formation model and CCD camera imaging formula, the pixels' wavelet module coefficients in the edge area of the image are analyzed and compared, and an illumination-independent wavelet edge detection formula insensitive to illumination is designed. Then, the fuzzy enhancement operator is proposed, which increases the difference between the edges, background and noise by taking into account the wavelet module magnitude and gradient direction. Finally, through the synthetic and real images experiments, the performance of proposed edge detection method is evaluated. It is concluded that the edge detection evaluation criterion  $F$  of the proposed method for step edge is 0.984 3, the location accuracy  $E_d$  is 0.126 5, and the mean error of the cross ratio computed by the detected feature circles edge is  $3.72 \times 10^{-3}$ . The experimental results prove that this edge detection method works well for the non-uniform weak illumination images.

**Key words:** edge detection; wavelet transform; illumination-independent; fuzzy enhancement

收稿日期:2007-01-14;修订日期:2007-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50275040)

## 1 引言

在计算机视觉与图像理解系统中,边缘检测有着重要的作用。特别是在计算机视觉运动跟踪与测量领域,目标与背景之间的灰度差信息常常用来在图像中定位被检测目标的边缘。图像中准确的边缘定位是成功完成计算机视觉检测的前提。但在现实场景中,由于噪声,目标运动以及不理想的照明条件等因素的存在,准确的边缘定位难以获得。特别是在非均匀的弱照明图像及低对比度图像中,目标与背景间的灰度差在整个图像中是变化的,在某些地方灰度差别很小,边缘定位异常困难。

为此,过去几年里,基于不同算法的适用于从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>边缘检测方法很善于从一些特定领域的低对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。但是这种方法很繁琐而且不灵活,它们中的一些还需要事先掌握一定的先验知识。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,并能够提取出一些位于低对比度区域的边缘像素。与此同时,其它一些适用于低对比度或非均匀照明图像的边缘检测算法<sup>[5-7]</sup>依据不同的理论和应用环境也应运而生。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来的一些传统边缘检测方法,但是根据 CCD 相机的成像原理,照明因素的影响并没有完全从它们的边缘检测公式中消除,一些低照明区域的边缘依然不能被检测到。因此有必要给出一种完全不受照明因素影响的边缘检测算法。

近些年,基于不同算法的边缘检测方法<sup>[8-13]</sup>相继被提出。因为小波算法在时域与频域所具有的良好定位能力以及模糊逻辑算法善于以一种自然的更接近人的理解方式来表达图像,所以已经有越来越多的图像工作者在图像的边缘检测任务中使用了小波算法和模糊逻辑算法,并获得了较好的检测结果。针对这种情况,本文根据照明反射图像的形成模板与 CCD 相机的成像原理,提出了联合使用一种新的基于小波变换的照明无关边缘检测算法和一种改善的同时考虑了图像局部区

域内像素小波模值大小和梯度方向的模糊增强算法从不均匀的弱照明图像中提取边缘的方法,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。

## 2 图像形成模板和 CCD 相机成像公式

根据 Stockham<sup>[14]</sup>提出的照明反射图像形成模板,一个反射率为  $R(x, y)$  的目标,被光强为  $I(x, y)$  的光源照射,如图 1 所示。

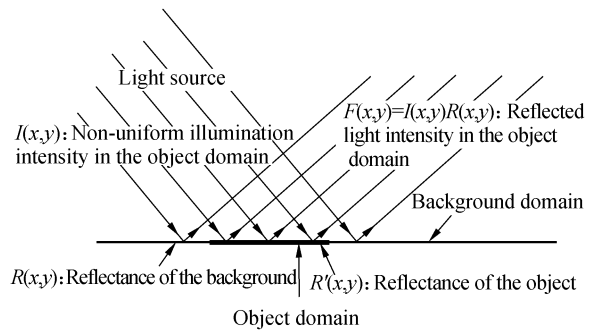


图 1 照明反射图像形成模板

Fig. 1 Image formation model

目标反射的照明强度  $F(x, y)$  可表示为

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

因为工业 CCD 相机通常工作于线形区域,它的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

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

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

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

## 3 基于小波变换的照明无关边缘检测算法

### 3.1 二进小波边缘检测方法

如果一个函数  $\phi(x)$  的均值为 0,且  $\phi(x) \in L^2(R)$ ,那么  $\phi(x)$  被称为小波。 $f(x)$  在二进尺度  $2^j$  和位置  $x$  处的离散小波变换为

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

\* 表示卷积运算,有关小波变换的详细论述可以看文献[15-16]。假设  $\theta(x)$  是一个可微分的积分值为 1, 在无穷远处收敛为 0 的光滑函数, 令小波  $\psi(x)$  是  $\theta(x)$  的一阶导数, 有

$$\psi(x) = d\theta(x)/dx, \quad (5)$$

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

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

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

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

这里  $\alpha(x, y) = \arctan(W_j^y f(x, y)/W_j^x f(x, y))$ 。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存在边缘像素的区域。之后, 由照明反射图像形成模板和 CCD 相机成像公式, 利用基于小波变换的照明无关边缘检测算法, 照明因素的影响就可以从边缘检测公式中去除。

### 3.2 基于图像成像模板和 CCD 相机成像公式的照明无关小波变换

根据公式(2), 图像的小波变换可写为

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

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<sup>[16]</sup>, 有

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

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

应用公式(1), 有

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

现在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, 在小区域中, 照明强度  $I(x, y)$  可看作为常量, 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, 边缘像素的小波模值就相应的低。同时, 目标与背景之间的对比度也会随着目标在整个图像中位置的变化而变化。在这种情况下, 一些边缘像素与噪声和背景被一同滤除掉了, 边缘的定位将是很难的, 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观察与分析, 给出了一种照明无关的小波边缘检测方法。

首先定义一个  $3 \times 3$  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之间的边缘区域时, 模板内的像素将由目标像素与背景像素共同组成。如果边缘梯度方向上局部小波模极值位于模板中心时, 根据边缘的连续性, 该区域中的边缘像素不少于 3 个。根据这一特征, 给出了照明无关的小波边缘检测方法。在这一含有边缘的区域, 排列 9 个 pixel 的小波模值如下:

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

然后, 基于公式(15)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:

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

$W_j'(x, y)$  是变换后照明无关的小波系数,  $[W_j(R(x, y))]_3$  是区域中反射率小波系数的第三大的值。很明显,  $W_j'(x, y)$  独立于照明灰度。在这种区域内, 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, 某一邻域中的边缘与背景像素都具有这种对照明变化、图像灰度和对比度不敏感的差异。根据这一差异, 即使在照明强度很低时, 具有不同反射率的目标间边缘像素依然能够被成功提取出来。很明显, 在这种变换后一些噪声像素也会表现出与边缘相似的特征。因此, 在经过照明无关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, 设计了一种改善的模糊增强算法。

## 4 基于小波模值大小和梯度方向的模糊增强算法

在这里,把一个像素与一个真正边缘像素相似的程度作为像素是否是真正边缘像素的指导。根据这一定义和小波变换后边缘像素的特征,知道局部邻域中模值较大且它的小波梯度方向更接近于垂直边缘的像素有更高的可能性是边缘。因此定义模糊算子如下:

$$P(x, y) = \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{W_j'(x, y) - W_{\min}}{T} \right) \cdot |\cos \epsilon(x, y)| \right\}, \quad (18)$$

$T = W_{\max} - W_{\min}$ ,  $W_{\max}$  和  $W_{\min}$  是邻域中小波模值的最大与最小值,根据文献[17]中的定义,  $\epsilon(x, y)$  是被测像素点梯度方向与邻域中边缘梯度方向的差值。很明显,  $P(i, j) \in [0, 1]$ 。

以往的模糊增强算法大多数只把边缘的强度信息作为唯一的考查对象,而本模糊算子不仅考虑了像素点的小波梯度模值,而且考虑了它的梯度方向。增加的对梯度角的考虑增强了这一方法从存在有噪声的低对比度模糊图像中提取边缘的鲁棒性。模糊算子  $P(x, y)$  的值随像素小波模值的增加而增加,随其小波梯度方向与邻域边缘梯度方向的差值的增加而减小。然后通过公式(19)变换模糊算子

$$P(x, y) = \begin{cases} [P(x, y)]^\theta & 0 \leq P(x, y) \leq \varphi \\ \sqrt[\theta]{1 - \varphi[1 - P(x, y)]} & \varphi \leq P(x, y) \leq 1, \end{cases} \quad (19)$$

公式中,  $\theta, \varphi, \psi$  都是常量,  $\psi \leq 1, \theta \geq 1$ , 根据不同的图像  $\theta$ , 设置  $\varphi, \psi$  的值。随后利用公式(18)完成模糊增强

$$W_j'(x, y) = W_{\min} + T \left\{ 2 \cdot \frac{\arcsin(P(x, y))}{\pi |\cos[\epsilon(x, y)]|} \right\}, \quad (20)$$

通过以上步骤,模糊增强了邻域中小波模值较大且小波梯度方向更接近于垂直边缘的像素,同时增大了边缘像素和噪声、背景之间的差别。

## 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,利用自适应阈值技术初步地找出所有可能的候选边缘像素。这里,采取自适应阈值选取方法提取所有候选边缘像素并去除大部分的噪声与背景。

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

$T$  是自适应阈值,  $T_0$  是初始阈值,  $c$  是一个常数。  $N$  是邻域中的像素数。根据不同的图像,合理地选定  $T_0, N$  和  $c$ 。

第二步,基于小波局部极值和梯度方向,从候选边缘像素中提取单像素的边缘。如图 2,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,连接这些极值点并去除边缘长度小于长度阈值  $T_l$  的边缘。

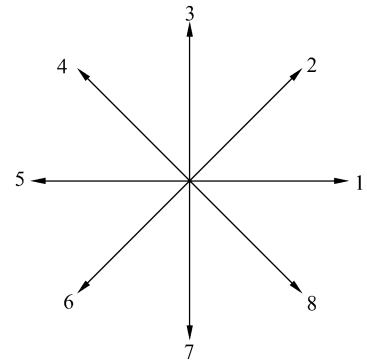


图 2 边缘梯度角

Fig. 2 Wavelet gradient direction angle

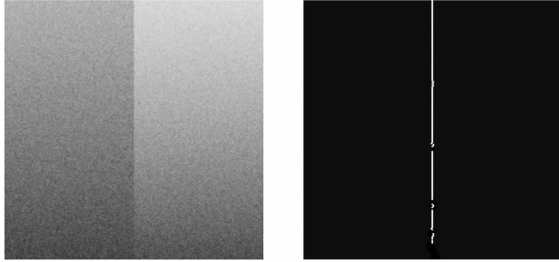
## 6 试验与性能评价

这部分将定性和定量地讨论边缘检测试验结果。分别用普通的小波边缘检测方法,基于对数图像处理模板的差分基边缘检测方法<sup>[3]</sup>以及基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强算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与定量的分析和比较。为方便描述,以下部分将传统的小波边缘检测方法,基于对数图像处理模板的差分基边缘检测方法以及基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强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

首先,利用合成的阶梯边缘图像来验证本算法。在这个仿真实验中,假设相机尺寸是 256

pixel×256 pixel,照明函数根据公式  $i(x, y) = 6 \times y + 200$  变化,  $\alpha = 0.5, \beta = 15$ , 图像的左半边反射率  $r_l$  为 0.1, 右半边反射率  $r_r$  为 0.15, 然后在图像中加入  $\sigma = 5$  的白高斯噪声, 如图 3(a) 所示。三种边缘检测方法分别用来检测图像中的阶梯边缘, 如图 3(b), (c) 和 (d) 所示。



(a)非均匀弱照明下的噪声阶梯边缘 (b)方法 1 边缘检测结果  
(a)Noisy step edge under non-uniform illumination (b)Detected edge by method 1



(c)方法 2 边缘检测结果 (d)方法 3 边缘检测结果  
(c)Detected edge by method 2 (d)Detected edge by method 3

图 3 合成的阶梯边缘图像实验

Fig. 3 Experiment of man-made step edge image

利用 Pratt<sup>[18]</sup> 提出的一种边缘检测算法评价标准  $F$  系数来定量地评价这三种边缘检测方法的性能。 $F$  值设计如下:

$$F = \frac{1}{\max(N_l, N_D)} \sum_{i=1}^{N_D} \frac{1}{1 + \xi d_i^2}, \quad (22)$$

$d_i$  是检出的边缘和离它最近的理想边缘的距离,  $\xi$  是一个惩罚常量,  $N_l$  和  $N_D$  分别是理想的和检出的边缘像素个数。 $F$  值低于或等于 1, 这个值越大, 说明检测器性能越好。

由三种边缘检测方法获得的  $F$  值在表 1 中给出。由表 1 看到, 方法 2 和方法 3 明显有更大的  $F$  值, 同时方法 3 在有噪声干扰的低灰度与低对比度图像中获得了最好的检测结果。从图 3 也

可看到, 在低灰度与低对比度图像区域, 方法 3 因为完全克服了照明因素的影响并使用了考虑像素梯度角信息的改善的模糊增强技术, 因此表现出了更好的边缘检测与抗噪能力。

表 1 三种方法下获得的  $F$  值

Tab.1  $F$  values obtained by three methods

	方法 1	方法 2	方法 3
$F$	0.867 2	0.961 6	0.984 3

然后, 通过计算这三种边缘检测方法的被检测边缘像素位置和真实边缘位置差的均方根来比较这三种方法的定位精度。公式如下:

$$E_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_g(i) - p_d(i))^2} \quad (23)$$

$N$  是图像中边缘像素的个数,  $p_g(i)$  是最近真实像素位置,  $p_d(i)$  是被检测的对应的边缘像素位置。

表 2 给出了用这三种方法检测获得的边缘像素位置和真实边缘位置差的均方根数据。表 2 中的数据证明方法 3 比方法 2、方法 1 有更高的定位精度, 这是因为模糊增强技术的应用大大地改善了边缘检测的抗噪能力和定位精度。

表 2 三种方法的检测边缘像素位置和真实边缘位置差的均方根数据

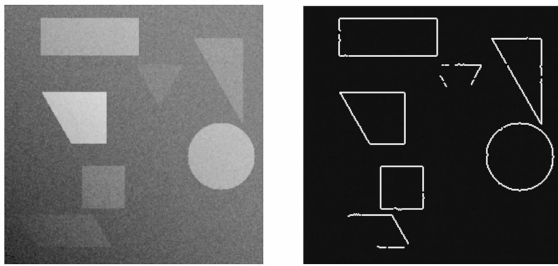
Tab.2 Root-mean-squared localization error between detected ground-truth edge pixels and real edge pixels by three methods

	方法 1	方法 2	方法 3
$E_d$	0.230 9	0.166 9	0.126 5

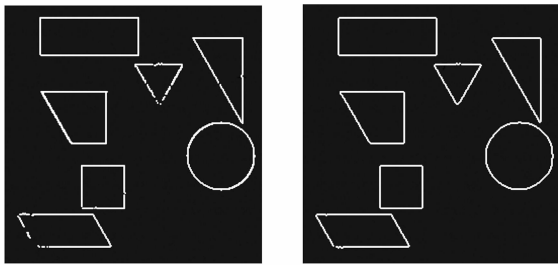
接着, 为考察该边缘检测方法在照明强弱发生变化时的边缘检测能力, 从 0 开始按照一定的步长调整图像的照明强度, 并检测边缘。这里仍设 CCD 相机的系数为  $\alpha = 0.5, \beta = 15$ , 图像的左半边反射率  $r_l$  为 0.1, 右半边反射率  $r_r$  为 0.15。当照明强度高于 120 时, 阶梯边缘像素就能够被该边缘检测方法准确地检测出来。直到照明强度高于 4 710 时, 大量的边缘像素开始相继丢失。这是由于当照明强度低于 120 或高于 4 710 时, 图像左右两边区域的灰度差值过低造成的。而当照明强度在 [120, 4 710] 之间变化时, 该边缘检测

算法总能够不受照明强度变化的影响把边缘从图像中成功地检测出来。

为进一步验证和比较这三种方法的边缘检测能力,以下给出三种方法对含有多个不同几何目标的合成验证图像的边缘检测结果。在这个仿真实验中,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  $i(x,y) = 200 \times (\cos \frac{\pi}{2} \cdot (1 - \frac{(x+y)}{510})) + 400$  变化,  $\alpha = 0.2, \beta = 30$ ,这些几何目标的反射率  $r_g$  从  $[0.12, 0.25]$  中随机取得,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 4(a)所示。图 4(b),(c)



(a)非均匀弱照明下的几何目标 (b)方法 1 边缘检测结果  
(a)Noisy synthetic geometric objects image (b)Detected edge by method 1



(c)方法 2 边缘检测结果 (d)方法 3 边缘检测结果  
(c)Detected edge by method 2 (d)Detected edge by method 3  
图 4 合成的几何目标图像实验

Fig. 4 Experiment of man-made geometric object image

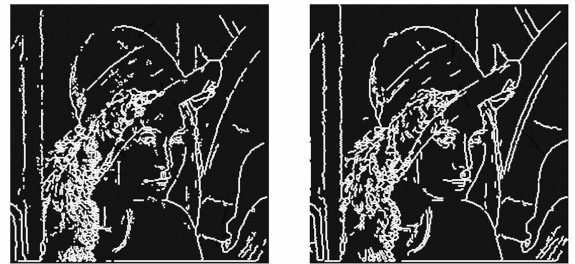
和(d)分别为三种边缘检测方法获得的边缘检测结果。从图 4 也可看到,在低对比度区,方法 1 丢失了大量的边缘像素。尽管在一些低对比度区域,方法 2 准确地定位了其中的边缘像素,但对于低对比度同时还处于低灰度区域中的边缘,方法 2 不能如方法 3 一样给出更好的检测结果。这是因为方法 2 没有考虑 CCD 相机成像模板,它的检

测精度因为  $\beta$  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。

最后,使用 Lena 图像来比较这三种边缘检测方法对一般图像的边缘检测能力。Lena 图像从左下到右上依据公式  $g'(x,y) = \frac{1}{5} (0.5 + 4.5 \times \cos(\frac{\pi}{2} \cdot (\frac{x+y}{510}))) \cdot g(x,y)$  进行暗化。图 5 (b),(c)和(d)分别为三种边缘检测方法获得的边



(a)暗化的噪声 Lena 图像 (b)方法 1 边缘检测结果  
(a)Noisy Lena image (b)Detected edge by method 1



(c)方法 2 边缘检测结果 (d)方法 3 边缘检测结果  
(c)Detected edge by method 2 (d)Detected edge by method 3

图 5 Lena 图像实验

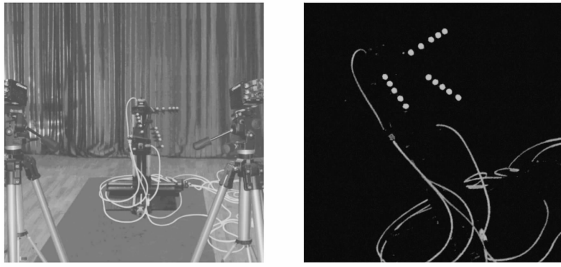
Fig. 5 Experiment of Lena image

缘检测结果,它进一步证明了方法 3 的边缘检测能力。一些位置处于低对比度区域的弱的和复杂的边缘能够被检出,同时长度小于边缘长度阈值的噪声与过于琐碎的边缘像素被滤除。为定量地给出三种边缘检测算法受到低对比度图像影响的大小,选取暗化的 Lena 图像的右上角低灰度低对比度区域进行观察和比较,发现方法 1 丢失了大量位置处于该区域中的边缘像素,方法 2 虽然好于方法 1,但也有一些边缘没有被检测到,而方法 3 则几乎不受影响地检测出了所有的边缘。

## 6.2 真实图像试验

接下来的边缘检测工作是基于双目视觉离散

特征运动估计任务的一部分。图 6(a)中,15 个位于三根杆上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。正确地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。通过调整照明光源的照明强度,照明距离以



(a)运动发生器上反光球图像 (b)CCD 相机拍摄图像  
(a)Motion image of the retro-reflective markers with motion generator (b) Original image taken by CCD



(c)方法 2 边缘检测结果 (d)方法 3 边缘检测结果  
(c)Detected edge by method 2 (d)Detected edge by method 3

图 6 运动发生器上反光球图像实验

Fig. 6 Experiment of the motion image of retro-reflective markers with motion generator

及相机曝光时间等相关参数,并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,以确保即使在很差的照明条件下也可以成功完成运动过程中的边缘检测任务。图 6(b)是 512 pixel×512 pixel 的 Dalsa-CA-D6 相机在照明功率 50 mW,照明距离 3 m 左右,相机曝光时间 2 ms 时拍摄的反光特征标记球在一台六自由度的运动发生器带动下运动的图像。图 6(c)为方法 2 获得的边缘检测结果,图 6(d)为方法 3 获得的边缘检测结果。

从实验中看到,方法 3 给出了更好的边缘检测结果。图像中一些被方法 2 丢失了的弱边缘和特征球边缘能够被方法 3 正确地背景中检测出来。同时,如图 6(a)中所示,运动发生器上固定

有三根带有反光特征球的杆,在每根杆上的 5 个特征球的五点交比值为事先精确标定已知。这里依据一种五点的透视交比不变性原理<sup>[19]</sup>来定量地评价这两种方法的边缘定位精度。具体方法如下:第一步,通过两种边缘检测算法在图像中检测得到每根杆上反光特征球在图像中的边缘位置;第二步,根据获得的边缘位置利用一种圆的 Hough 变换原理<sup>[20]</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。表 3 给出了两种方法获得的交比值误差,方法 3 的误差大大低于方法 2,这进一步说明方法 3 有着更高的边缘定位精度。

表 3 上述两种方法定位边缘后计算得到的交比值的误差  
Tab. 3 Cross ratio errors of two methods

	方法 2	方法 3
杆 1 交比值误差	$1.37 \times 10^{-2}$	$3.71 \times 10^{-3}$
杆 2 交比值误差	$1.66 \times 10^{-2}$	$3.44 \times 10^{-3}$
杆 3 交比值误差	$1.83 \times 10^{-2}$	$4.02 \times 10^{-3}$
误差均值	$1.62 \times 10^{-2}$	$3.72 \times 10^{-3}$

## 7 结 论

从以上的分析与讨论知道,照明无关的小波边缘检测方法以及对应的模糊增强技术可用于从非均匀照明低对比度图像中抽取边缘。这种照明无关的小波边缘检测与模糊增强方法与传统的小波边缘检测方法,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与定量的比较和分析,从实验中得到该算法的边缘检测评价标准  $F$  系数值为 0.984 3,边缘定位精度系数  $E_a$  值为 0.126 5,利用此算法获得的特征球边缘计算得到的交比值误差为  $3.72 \times 10^{-3}$ 。合成的和真实的图像试验结果都证明在非均匀的弱照明情况下,这种边缘检测方法优于另外两种方法,能给出较好的边缘检测结果。这是因为这种边缘检测方法是根据图像形成模板、CCD 成像模板及小波边缘检测原理设计的,它完全消除了边缘检测过程中照明因素的影响。同时,因为改善的同时考虑了像素点的小波梯度模值和梯度方向的模糊增强算子的应用,使得该边缘检测方法具有更高的定位精度和更强的抗噪声能力。

## 参考文献:

- [1] MICHA F, NIR S. 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] 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.  
LI F L, XU K X. An algorithm applied in frontal-view face images for automatically localizing eyes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (2): 320-326. (in Chinese)
- [3] GUANG D, JEAN C P. Differentiation-based edge detection using the logarithmic image processing model [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 1998, 8(2): 161-180.
- [4] TAKASHI S, TOSHIKAZU K. 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] LEE G D, KIM K S, JEONG D S. Rough edge detection of low contrast images using consequential local variance maxima [C]. *TENCON 99, Proceedings of the IEEE Region 10 Conference*, 1999, 1: 734 -737.
- [6] PEREZ M, PAGLIARI C, DENNIS T. A zero-crossing edge detector with improved localization and robustness to image brightness and contrast manipulations [J]. *Pattern Recognition*, 2002, 23(14): 1771-1784.
- [7] LEE W B, KIM D, KWEON I. 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] 林玉池,崔彦平,黄国银.复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3): 509-514.  
LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3): 509-514. (in Chinese)
- [9] CLAUDIO R J, JACOB S. Adaptive image de-noising and edge enhancement in scale-space using the wavelet transform [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(7): 965-971.
- [10] 林晓梅,李琳娜,牛刚,等.基于小波边缘检测的图像去噪方法[J]. *光学 精密工程*, 2006, 12(1): 88-93.  
LIN X M, LI L N, NIU G, *et al.*. Image de-noising based on wavelet edge detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 12 (1): 88-93. (in Chinese)
- [11] PEDRYCA W. Fuzzy sets in pattern recognition: methodology and methods [J]. *Pattern Recognition*, 1990, 23 (1): 121-146.
- [12] 赵春江,施文康,邓勇.基于模糊推理的边界检测方法[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(3): 309-313.  
ZHAO CH J, SHI W K, DENG Y. Edge detection based on fuzzy inference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11 (3): 309-313. (in Chinese)
- [13] ZHOU D L, PAN Q. An improved algorithm of edge detection based on fuzzy sets [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, 6(4): 353-358.
- [14] STOCKHAM T J. Image processing in the context of a visual model [J]. *Proceeding of IEEE*, 1972, 60(7): 828-842.
- [15] MALLAT S, ZHONG S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1992, 14 (7): 710-732.
- [16] MALLAT S. 信号处理的小波导引[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.  
MALLAT S. *A Wavelet Tour of Signal Processing* [M]. Beijing:China Machine Press, 2002. (in Chinese)
- [17] PEDRA L, MONTSENY E. Fuzzy contour detection based on a good approximation of the argument of the gradient vector [C]. *Fuzzy Information Processing Society*, 2002: 255-260.
- [18] PRATT W K. *Digital Image Processing (seconded)* [M]. New York:John Wiley & Sons, 1991.
- [19] CAO W P, CHE R S, YE D. Binocular vision sequence image feature correspondence and motion detection based on cross ratio invariant [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 13: 466-473.
- [20] CAO W P, CHE R S, YE D. A new circle detection method based on hough transform [C]. *ISTM*, 2005, 7(2): 6631-6634.

**作者简介:**曹万鹏(1976—),哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生,主要从事计算机视觉、图像处理、模式识别等工作。E-mail:caowanpeng@hit.edu.cn  
车仁生(1938—),男,哈尔滨人,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授,博士生导师,主要从事计算机视觉、光学精密测量、虚拟现实等工作。