

图像边缘检测研究进展

高朝阳¹, 张太发¹, 曲亚男²

1. 黑龙江科技学院理学院, 哈尔滨 150027
2. 哈尔滨广播电视大学, 哈尔滨 150001

摘要 图像边缘是图像的最基本和最重要的特征之一,它包含了位置、轮廓等许多有用的信息,为人们描述或识别目标及解释图像提供了一个重要的特征参数。边缘检测是图像处理、图像分析和计算机视觉领域中最经典的研究内容之一,是进行模式识别和信息提取的基本手段。已有的图像边缘检测方法很多,但每种方法都尚有不足之处,在某些情况下仍不能检测到目标物体的最佳边缘,未形成一种普遍适用的边缘检测方法。因此边缘检测一直是图像处理与分析技术中的研究热点,其新理论、新方法不断涌现。对已有方法进行改进,或是按照具体要求设计新方法,是目前边缘检测领域研究的主导方向。本文阐述了边缘检测的研究意义,总结了图像边缘检测的基本思想和检测出的边缘的一般要求,回顾了边缘检测的各种方法,分析了这些方法的优点和存在的不足,总结了边缘检测的最新发展方向。最后分析了现有的边缘评价方法的特点,为边缘检测进一步的研究和应用提供参考。

关键词 边缘检测; 松弛迭代; 形变模型; 数学形态学

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)20-0112-06

Advances in Research on Edge Detection of Images

GAO Chaoyang¹, ZHANG Taifa¹, QU Yanan²

1. School of Science, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China
2. Harbin Radio and TV University, Harbin 150001, China

Abstract The image edge is one of the most fundamental and significant features of the image. The edge contains a great deal of useful information on important contours and locations and offers people important parameters to describe and recognize objects in the image. Edge detection is one of the most basic operations in image processing, image analysis, and computer vision. It is one of the basic methods for pattern recognition and image information extraction. Research on edge detection has a long history, and there have been many algorithms proposed for it. However, all of the methods for edge detection still have some drawbacks and cannot detect the optimal edges in some cases. It is difficult to develop a general method for edge detection. Edge detection is a study hot spot in the field of image processing. New feasible theory and methods are proposed every day. The main research methods for the study of edge detection are to make improvements to existing methods or to find new methods for edge detection with special application requirements. This paper illustrates the significance of the edge detection and summarizes the elementary steps of edge detection and the general requirements for the obtained edge. Then it reviews the various methods of edge detection, analyzes the merits and the deficiencies of those methods, and summarizes the recent development of edge detection. Finally, it analyzes all kinds of common edge evaluation methods available at presently. This paper may serve as a valuable reference for future studies and applications of edge detection.

Keywords edge detection; relaxative iteration; deformable model; mathematical morphology

0 引言

边缘是图像最基本的特征,存在于目标与背景、目标与

目标、区域与区域、基元与基元之间,图像的大部分信息存在于边缘中。因此,常将边缘定义为其周围像素灰度有阶跃性

收稿日期: 2010-01-25; 修回日期: 2010-09-12

基金项目: 黑龙江科技厅项目(GZ08A109); 黑龙江省教育厅项目(11541323)

作者简介: 高朝阳, 副教授, 研究方向为应用数学与图像处理, 电子信箱: g-cy@163.com; 张太发(通信作者), 讲师, 研究方向为计算机图形学与图像处理, 电子信箱: ztf991@163.com

变化或屋顶状变化的象素集合^[4]。

边缘检测是基于物体和背景间灰度或纹理特性上某种不连续性或突变性的一种检测技术,是图像处理的重要内容,也是图像分割、模式识别、机器视觉、区域形状提取等领域分析的基础,是图像分析与三维重建的重要环节。边缘检测算法的优劣将直接影响提取轮廓的精度和系统的性能。1959年,Julez^[5]最早提到了边缘检测;1965年,Roberts^[6]最早开始系统地研究边缘检测。经过50多年的研究,已经出现了很多不同的边缘检测方法,各有其特点,但也有各自的局限性,边缘检测技术有待于进一步分析研究。

本文简要介绍了边缘检测的基本思想,对各种图像边缘检测技术进行了综述,讨论了当前使用的边缘评价方法,分析了近年来图像边缘检测的发展趋势及其应用的前景,为实际应用中选择合适的边缘检测方法提供依据。

1 边缘检测基本思想

边缘检测的基本思想是首先利用边缘增强算子突出图像中的局部边缘,然后定义图像中的边缘强度^[4],通过设置门限的方法提取边缘点。轮廓产生于灰度急剧变化处,可用微分运算抽出图像轮廓,又由于数字图像数据是以一定间隔分开排列的,实际运算中可用差分运算代替微分运算。

图像的边缘检测一般可以分为4个步骤,如图1所示。
 ① 滤波。由于导数计算对噪声比较敏感,须用滤波器降噪改善,但大多滤波器在降噪的同时也导致边缘强度损失,图像降噪和边缘增强之间需达到一种平衡。
 ② 增强。突出邻域强度值有显著变化的点,一般通过计算梯度幅值完成。
 ③ 检测。采用某种方法确定图像中的边缘点,一般采用梯度幅值的阈值判断。
 ④ 定位。确定边缘所在的像素,也可在子像素级上估计边缘位置,同时也可以估计边缘方向。

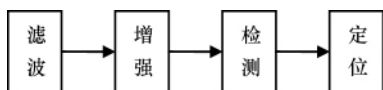


图1 边缘检测步骤

Fig. 1 Steps of edge detection

边缘检测分为彩色图像边缘检测和灰度图像边缘检测两种。如果输入的是彩色图像 $p(x,y)$,可以采用式(1)转换对灰度图像进行处理^[5]:

$$p(x,y)=0.3R+0.59G+0.11B \quad (1)$$

其中, R 、 G 、 B 分别为红、绿、蓝三基色。

一般来说,对检测出的边缘有以下几个要求^[6]:
 ① 边缘的定位精度要高;
 ② 检测的响应最好是单像素的;
 ③ 对不同尺度的边缘都能较好地响应并尽可能减少漏检;
 ④ 对噪声不敏感;
 ⑤ 检测灵敏度受边缘的方向影响小。这些要求往往很矛盾,很难在一个边缘检测方法中得到完全的统一,需要根据具体的情况权衡,折中处理。

2 边缘检测技术

边缘检测的实质是采用某种算法提取出图像中对象与背景间的交界线。传统的检测方法是微分算子法。近年来,随着相关数学知识的应用和人工智能等的发展,出现了一些新的图像边缘检测方法,如数学形态学法、小波变换法、模糊数学法、神经网络法等,这些方法对噪声有很好的抑制作用,且能更好地检测边缘细节信息。

2.1 传统边缘检测技术

图像的边缘具有方向和幅度两个属性,像素沿边缘方向变化平缓,垂直边缘方向则变化剧烈。边缘上的这种变化可用微分(导数)算子检测出来,其中一阶微分(导数)认为最大值对应边缘,而二阶微分(导数)则以零点对应边缘位置。

2.1.1 经典算子法

该方法包括一阶和二阶导数算子,其中一阶导数算子有梯度算子、Roberts算子、Prewitt算子和Sobel算子等,二阶导数算子有Laplace算子和Wallis算子等^[7]。

对于图像 $f(x,y)$,其梯度定义为一个向量:

$$\text{grad}(x,y)=\left[\frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y}\right]^T=[G_x \quad G_y]^T$$

幅度和方向为 $|\text{grad}(x,y)|=\sqrt{G_x^2+G_y^2}$, $\theta=\arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$ 。

为简化计算,常采用近似梯度幅度值:

$$|\text{grad}(x,y)|=\max(|f'_x|, |f'_y|)$$

或

$$|\text{grad}(x,y)|=|f'_x|+|f'_y|$$

其中, $f'_x=f(x+1,y)-f(x,y)$, $f'_y=f(x,y+1)-f(x,y)$ 。

常用小区域模板和图像卷积计算梯度值,不同边缘检测算子对应于不同的模板。梯度算子可用图2(a)的模板表示,梯度大小代表边缘强度,梯度方向与边缘垂直。梯度算子仅计算相邻像素的灰度差,对噪声敏感,无法抑制噪声影响。

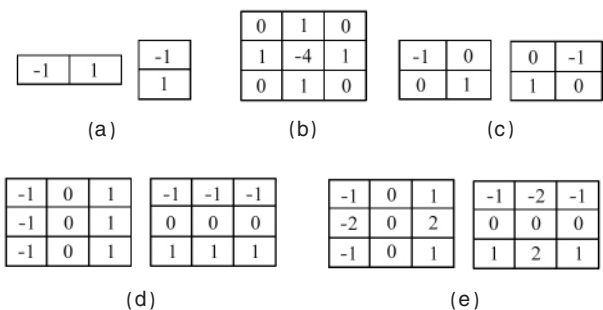


图2 检测算子的模板

Fig. 2 Masks of edge detectors

1965年,Roberts提到了类似的Roberts算子,即采用对角线方向相邻像素之差近似梯度幅值检测边缘,图2(c)是其模板,检测的效果较梯度算子略好。

为较少噪声影响,1970年,Prewitt研究的算子从加大边缘增强算子的模板出发,由 2×2 扩大到 3×3 ,如图2(d)所示。

Sobel算子在Prewitt算子的基础上,对4邻域采用带权的方法计算差分,对应的模板如图2(e),该算子不仅能检测

到边缘点,且能进一步抑制噪声的影响,但检测的边缘较宽。

Laplace 算子是二阶微分算子,为标量,如式(2)所示:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (2)$$

对数字图像而言,式(2)可以表示为

$$\nabla^2 f(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)$$

该算子对应的模板见图 2(b),为一个与方向无关的各向同性边缘检测算子,如果只关心边缘点的位置而不顾其周围的实际灰度差时,一般选择该算子进行检测。

Wallis 算子是由 Laplace 算子与对数算子组合构造出来的一种微分算子,其对数字图像中的画面锐化比较均衡。

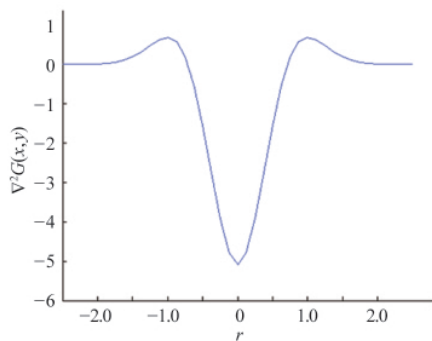
2.1.2 最优算子法

为减少噪声的影响,通常在求导数之前先对图像进行滤波。常用的滤波器是高斯函数的一阶和二阶导数。1980年, Marr^[8]最先提出采用 Laplace 算子求高斯函数的二阶导数得到 LoG(高斯拉普拉斯)算子。

为了去除噪声的影响,LoG 算子首先用高斯函数对图像进行滤波,然后对滤波后的图像求二阶导数,即

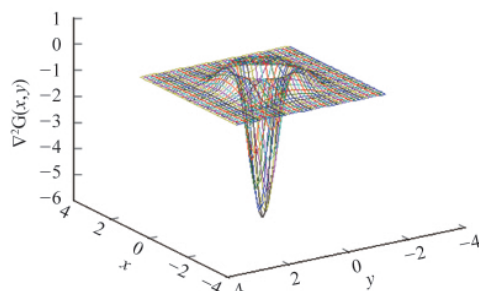
$$M(x, y) = \nabla^2(G(x, y) \otimes f(x, y)) = (\nabla^2 G(x, y)) \otimes f(x, y) \quad (3)$$

其中, $\nabla^2 G(x, y) = \frac{1}{\pi\delta^4} \left(\frac{x^2+y^2}{2\delta^2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}\right)$, 为高斯拉普拉斯算子,是一个轴对称函数,各向同性,其二维和三维图如图 3 所示^[9]。



(a) 二维剖面图

(a) Two-dimensional figure



(b) 三维空间图

(b) Three-dimensional figure

图 3 高斯拉普拉斯算子

Fig. 3 Laplacian of Gaussian operator

边缘检测即寻找 LOG 算子的过零点,它被认为是微分法中利用平滑二阶导数检测图像边缘最成功的一种算子。但在实际图像中,高斯滤波的零交叉点不一定全是边缘点,还需进一步确定真伪^[10]。

1986年, Canny^[11]将边缘检测问题转换为检测单位函数极大值问题,根据边缘检测的有效性和定位的可靠性,研究了最优边缘检测器所需的特性,推导出数学表达式。Canny 算子力图在抗噪声干扰和精确定位之间寻求最佳折中方案,用 Canny 算子检测图像边缘的步骤如下:①用高斯滤波器平滑图像;②计算滤波后图像梯度的幅值和方向;③对梯度幅值应用非极大值抑制,其过程为找出图像梯度中的局部极大值,将其他非局部极大值点置零以得到细化的边缘;④用双阈值算法检测和连接边缘,使用两个阈值 T_1 和 T_2 ($T_1 > T_2$), T_1 用来找到每条线段, T_2 用来在这些线段的两个方向上延伸寻找边缘的断裂处,并连接这些边缘。

Canny 算子比 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子和 Kirsch 算子极小化算法的去噪能力强,能在噪声和边缘检测间取得较好的平衡,检测到真正的弱边缘,但也容易平滑掉一些边缘信息。与 Canny 算子密切相关的还有 Deriche 算子和沈俊算子,它们在广义意义上是统一的。

2.1.3 边界查找法

边界查找法通常是查找高梯度值的像素,然后将它们连接起来形成边缘曲线。边界查找法在很大程度上受起始点和以前检测像素结果的影响,困难是如何连接高梯度值的像素,因为在实际图像中它们通常不相邻。另一个问题是噪声的影响,由于梯度算子具有高通特性,而噪声通常也是高频的,可能会造成一些错误边缘像素的检测^[12]。

典型的边界查找法是将边缘检测问题转化为图论中寻求最小代价路径的问题。求解最小代价通常有两类方法,一是贪婪法,即通过在图中进行全局搜索寻找对应最小代价的路径,计算量较大;二是动态规划优化法,为了加快运算速度,只求次优解。早在 20 世纪 80 年代初期,串行边界查找法就被用于 X 射线的心血管图像及肺部图像的边缘检测。

2.2 现代边缘检测技术

2.2.1 拟合检测法

对数字图像进行某种形式的拟合,根据拟合参数确定边缘,包括曲线拟合和曲面拟合。拟合检测法的实质是利用图像的统计特性提取边缘,计算量较大。

1992年, Lawrence 等^[11]用 Fourier 参数模型描述曲线,根据 Bayes 定理,按极大后验概率原则给出一个目标函数,通过极大化该目标函数决定系数。该方法得到的是边界曲线而不是离散的像素点,对物体识别等高层后续处理有益。

1970年, Prewitt 首先提出用曲面拟合方法做图像边缘提取,用关于坐标的 n 阶多项式对原始图像做最小二乘方意义下的最佳拟合,一般 n 取值为 1 和 2,均方差公式为^[13]

$$\varepsilon = \sum_{x, y \in \Delta_k} [p(x, y) - f(x, y)]^2 \quad (4)$$

综述文章 (Reviews)

其中, $p(x, y)$ 为拟合曲面, $f(x, y)$ 为图像面积元的灰度值, Δs 为某个图像面积元, 多项式的 m 个参数由图像 $n \times n$ 个邻域灰度确定, 由拟合的最佳曲面函数即可确定灰度梯度等参数。

2.2.2 松弛迭代法

图像边缘上某一点与其某邻域内点的状态和方向相关, 松弛迭代边缘检测基于该思想, 首先用某种简单的边缘检测算法得到初始边缘、边缘强度和方向, 然后用一种非线性概率模型, 根据相邻边缘的状态和方向, 用松弛迭代法调整初始边缘, 流程如图 4 所示。

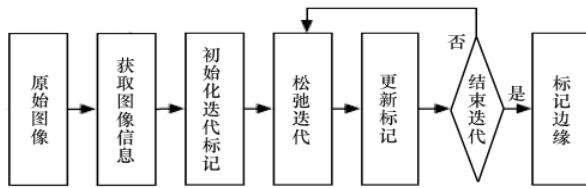


图 4 松弛迭代法流程

Fig. 4 Method of relaxative iteration

松弛迭代法是从边界增强的角度提出来的, 根据边界曲线上的点信息在局部具有的一致性和相关性, 使用边缘点的位置、梯度矢量、曲率等信息初始化松弛网络像素的标记。由于噪声点的信息是随机、无规律的, 而同一边缘上的点的相容性是噪声不具备的, 通过不断迭代, 对标记进行重复纠正和约束, 增强有规律的边缘信息, 削弱无规律的噪声, 最后使迭代收敛于真实边缘。

2.2.3 多尺度检测法

传统方法都是单尺度的算子, 不可能正确且准确地检测出所有的边缘, 同时, 滤除噪声时也影响边缘检测的正确性, 由此, Rosenfeld 提出了多尺度方法, Marr 倡导并提出了一些启发性的组合规则, Within 等发展完善, 形成理论。

Mallat 小波^[14]是 1992 年基于 Canny 算子提出的, 它是传统的 Fourier 变换的继承和发展, 基本思想是沿着梯度方向, 分别用几个不同尺度的边缘检测算子在相应点上检测模极大值变化情况, 通过阈值的选取, 综合考虑不同尺度检测结果, 得到最终边缘。Mallat 小波具有多尺度特性, 可用于图像的边缘提取, 其优点如下: ① 提供了一个数学上完备的描述; ② 通过选取合适的滤波器, 可以极大地减小或去除所提取的不同特征之间的相关性; ③ 具有变焦特性, 即在低频段可使用高频分辨率和低时间分辨率, 在高频段可使用低频分辨率和高时间分辨率; ④ 可用过快速算法实现; ⑤ 较好地解决了噪声和定位之间的矛盾。

2.2.4 基于形变模型的方法

20 世纪 90 年代以来, 随着医学影像设备的发展, 可以获得更高空间分辨率和软组织分辨率的图像, 基于形变模型的方法开始大量应用于医学图像, 并取得了成功^[15]。形变模型包括形变轮廓模型和三维形变表面模型。形变轮廓模型又称为 snake 模型或活动轮廓模型, 其分割过程就是使轮廓曲线在外能和内能的作用下向物体边缘靠近, 外力推动轮廓运动,

内力保持轮廓光滑; 形变表面模型是活动轮廓模型在三维空间的推广, 且更少地需要用户交互或指导。

形变模型的优点是能够直接产生闭合的参数曲线或曲面, 对噪声和伪边界有较强的鲁棒性。一些形变模型利用形状和标记点集合等先验知识, 分割结果更为准确和健壮。参数形变模型的固定参数与内部能量约束限制了其几何灵活性, 不能随意改变拓扑形状, 且对初始形状敏感, 可改进约束和交互支配模型的能量或内外力函数解决其几何灵活性问题^[16-17]。对于拓扑灵活性问题, 可使用几何形变模型方法解决。它利用 Osher 和 Sethian 于 1988 年提出的水平集曲线演化技术^[18], 由偏微分方程控制曲率相关的波前演化。

2.2.5 基于神经网络的方法

神经网络模拟生物, 特别是人类大脑的学习过程, 由大量并行的节点构成, 每个节点都能执行一些基本的计算, 通过调整节点间的连接关系以及连接的权值实现学习过程。与传统的图像边缘检测方法相比, 神经网络具有大规模并行处理、分布式信息存储、良好的自适应性和自组织性以及很强的学习、联想和容错功能等优点, 可检测出精确的图像边缘。典型的神经网络拓扑结构如图 5 所示^[19]。

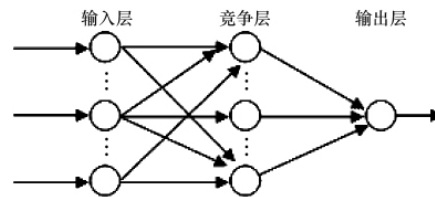


图 5 网络拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of network

在各种神经网络模型中, 应用最广泛的是前馈型神经网络, 用于训练前馈网络的最常用方法是 BP 算法。目前已有多种基于 BP 网络的边缘检测算法, 但 BP 网络收敛速度慢, 容易收敛于局部极小点, 数值稳定性差, 参数难以调整, 很难满足实际应用的要求。

2.2.6 基于模糊数学的方法

边缘检测问题的实质是图像中边缘点和非边缘点的模式识别问题。模糊数学理论主要解决在模式识别的不同层次中, 由于信息不全面、不准确等造成的不确定性问题。

20 世纪 80 年代中期, Pal 和 King 等^[20]提出一种图像边缘检测模糊算法, 首次将模糊集合理论引入图像边缘检测, 多应用于模式识别和医学图像。该算法的基本流程见图 6。

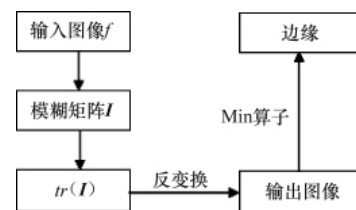


图 6 Pal-King 算法流程

Fig. 6 Figure of Pal-King algorithm

20世纪90年代, Cheng等^[21]将模糊测度的概念引入最大熵原则,得到了模糊C分类最大熵原则。J. K. Udupa^[22]提出了模糊连接度对对象进行刻画,认为目标是以某种凝聚力凝聚在一起形成物体,明确阐述了如何更有效地利用模糊理论解决实际问题,在医学图像的分割问题中得到较好的结果,但需要选择阈值和初始种子,且模糊连接度中的参数如何进行选择还需进一步研究。

2.2.7 基于数学形态学的方法

数学形态学可用于解决噪声抑制、特征提取、边缘检测等问题,近年来图像处理中的应用日渐重视。形态学处理的基本思想是在图像中移动一个任意大小的结构元素,以卷积方式运算^[23]。传统形态学的基本操作是腐蚀和膨胀,其基本运算相互结合可以产生出复杂的效果。当结构元素 A 包含原点时,根据形态学的基本运算定义和扩张性,有以下6种形态梯度:①膨胀型: $MEO_1=f \oplus A - f$;②腐蚀型: $MEO_2=f - f \ominus A$;③膨胀腐蚀性: $MEO_3=f \oplus A - f \ominus A$;④开运算型: $MEO_4=f - f \circ A$;⑤闭运算型: $MEO_5=f \circ A - f$;⑥开闭运算型: $MEO_6=f \circ A - f \circ A$ 。

上述检测算子是传统线性差分算子的推广,其检测出的边缘与结构元素 A 有关。针对不同图像及不同检测目的,可选择不同形式的结构元素,但这同时也是该方法的缺陷,即算法适应性较差,可结合形态学参数和优化理论相解决。

2.2.8 其他检测方法

近年来随着计算机技术及其他相关学科的发展,又出现了一些其他检测方法。文献[24]给出了一种基于健壮的行序测试含噪图像的边缘检测方法,使用边缘有权模型从含噪图像中提取边缘。文献[25]提出一种基于非负聚类过程的离散强度分布一阶导数估计方法,给出了梯度可用于边缘检测的估计区间,该方法可舍弃由噪声引起的虚假边缘。文献[26]将支持向量机应用于储粮昆虫图像的边缘检测,利用支持向量机两类分类的思想,借助支持向量机分辨出图像的背景和目标,从而检测出图像的边缘。文献[27]提出一种基于相似邻域标准的含噪图像和无噪图像边缘检测的方法,该方法对含有椒盐噪声的图像尤其有效,且比较节省时间。文献[28]将蚁群算法应用于CT图像边缘检测,对蚁群算法进行了改进,并针对图像中的不同内容采取不同的转移策略和信息素更新规则。文献[29]提出一种基于离散余弦变换连续扩展的边缘检测方法,处理中间数据点时比常用的离散傅里叶变换或离散余弦变换更精确。文献[30]利用突变理论研究图像的突变特性,利用突变模型描述系统状态变化的规律,通过尖点突变理论建立边缘模型,实现有效的图像边缘检测,具有较好的实时性。文献[31]提出两种边缘检测方法,一种基于神经网络,另一种基于小波和Sobel结合的方法。文献[32]提出一种新颖的基于概率密度梯度的边缘检测算法,通过估计图像中各像素点的概率密度梯度得到图像的概率密度梯度场,然后根据图像的边缘点在概率密度梯度场中具有两侧梯度方向相反的特性实现边缘检测,检测出的边缘具有尺度不变形。

3 边缘评价方法

图像边缘检测结果的优劣需要一个客观的评价。1981年, Kitchen等^[33]提出了基于边缘局部相关性的方法,主要检测边缘的线性连接程度,但该方法不考虑边缘的错检、漏检及边缘偏移的情况,评价结果不够准确。1992年, Venkatesh等^[34]在标准边缘图的基础上判断结果中存在错检、漏检、偏移及重检情况,评价结果较Kitchen方法准确,但实际上标准边缘图却很难得到,且该方法未考虑线性的连接情况。1998年, 杨炬等^[35-36]提出两种边缘评价方法,一是基于边缘有序度的方法,二是基于区域一致性测度的方法。这两种方法都同时考虑了边缘的线性连接情况及边缘错检、漏检的程度,同时不需要标准边缘图进行评价。2003年, 林卉等^[37]提出一种基于连通分量的边缘评价方法,即基于边缘点数 A 、4连通成分数 B 、8连通成分数 C 及其比值 C/A 、 C/B ,该方法是一种基于边缘局部相关性的方法,且不需要标准边缘图。这些方法都是可取的,但是针对图像各自的特点以及应用的需要,需进一步对通用、客观的评价方法进行深入分析和研究。

4 前景与展望

在图像处理和分析中,边缘检测一直是人们关注的热点,也是机器视觉领域最活跃的研究课题之一,在工程应用中占有十分重要的地位。虽然近几年来发表了很多研究成果,但因边缘检测问题自身的难度,目前的方法大多针对于某个具体的任务,还没有通用的解决方案,且各种边缘检测算法没有一个好的通用的评价标准。从图像边缘检测发展看,有以下明显的趋势:①对原有边缘检测算法的不断改进;②新概念、新知识的引入和多种方法的有效综合;③交互式边缘检测方法研究的深入;④对特殊图像的边缘检测的研究越来越得到重视;⑤对图像边缘检测算法评价方法的研究越来越受到关注。

参考文献 (References)

- [1] 魏伟波, 芮筱亭. 图像边缘检测方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(30): 88-91.
Wei Weibo, Rui Xiaoting. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(30): 88-91.
- [2] Julez B. A method of coding TV signals based on edge detection [J]. *Bell System Tech*, 1959, 38(4): 1001-1020.
- [3] Roberts L. D. Machine perception of three-dimension solids in optical and electro-optimal information processing [C]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press, 1966: 157-197.
- [4] Hildreth E. C. Edge detection [M]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, 1985.
- [5] 刘其涛, 张骏. 阈值选取与边缘检测相结合提取红外图像特征[J]. 激光与红外, 2005, 35(12): 980-982.
Liu Qitao, Zhang Jun. *Laser & Infrared*, 2005, 35(12): 980-982.
- [6] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415-419.

- Duan Ruiling, Li Qingxiang, Li Yuhe. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 415-419.
- [7] 任毅斌, 王子嫣, 于吉红, 等. 数字图像中边缘检测算法综合研究[J]. 计算机与信息技术, 2007(8): 23-26.
Ren Yibin, Wang Ziyang, Yu Jihong, et al. *Computer & Information Technology*, 2007(8): 23-26.
- [8] Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection[C]//Proceeding of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. 1980, 207(1167): 187-217.
- [9] 张太发, 程东旭, 石端银. 基于 Log 算子的一种新的边界轮廓线提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(22): 183-185.
Zhang Taifa, Cheng Dongxu, Shi Duanyin. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(22): 183-185.
- [10] Clark J J. Authenticating edge produced by zero-crossing algorithm[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 11(1): 43-57.
- [11] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [12] 林瑶, 田捷. 医学图像分割方法综述 [J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(2): 192-204.
Lin Yao, Tian Jie. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, 15(2): 192-204.
- [13] 康颐. 基于小波变换的医学 CT 图像边缘检测技术研究[D]. 成都: 成都理工大学信息工程学院, 2008.
Kang Yi. Studying of edge detection of medical CT image on wavelet transform [D]. Chengdu: College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, 2008.
- [14] 迟键男. 图像形态学和小波分析在图像增强和边缘检测中的应用[D]. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院, 2005.
Chi Jiannan. Application of image morphology and wavelets in image enhancement and edge Detection [D]. Shenyang: College of Information Science and Engineering, Northeastern University, 2005.
- [15] Duncan J S, Ayache N. Medical image analysis: Progress over two decades and the challenges ahead [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 22(1): 181-204.
- [16] Xu C Y, Prince J L. Snakes, shapes, and gradient vector flow [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1998, 7(1): 359-369.
- [17] Lachaud J O, Montanvert A. Deformable meshes with automated topology changes for coarse to fine three dimensional surface extraction[J]. *Medical Image Analysis*, 1999, 3(2): 187-207.
- [18] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithm based on Hamilton-Jacobi Formulation [J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1): 12-49.
- [19] 王康泰. 灰度图像边缘检测方法研究[D]. 杭州: 浙江工商大学信息与电子工程学院, 2007.
Wang Kangtai. The algorithm research of gray image edge detection[D]. Hangzhou: College of Information & Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, 2007.
- [20] Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1981, 11(7): 494-501.
- [21] Cheng H D, Chen J R, Li J G. Threshold selection based on Fuzzy c-Partition entropy approach [J]. *Pattern Recognition*, 1998, 31(7): 857-870.
- [22] Udupa J K, Samarasekera S. Fuzzy connectedness and object definition: Theory, algorithm, and application in image segmentation [J]. *Graphical Model and Image Processing*, 1995, 58(3): 246-261.
- [23] 季虎, 孙即祥, 邵晓芳, 等. 图像边缘提取方法及展望[J]. 计算机工程与应用, 2004(14): 70-73.
Ji Hu, Sun Jixiang, Shao Xiaofang, et al. *Computer Engineering and Applications*, 2004(14): 70-73.
- [24] Lim D H. Robust rank-order test for edge detection in noisy images[J]. *Nonparametric Statistics*, 2006, 18(3): 333-342.
- [25] Jacquey F, Loquin K, Comby F, et al. Non-additive approach for gradient-based edge detection [J]. IEEE International Conference on Image Processing, San Antonio, TX, 2007.
- [26] 侯慧芳, 白莉媛, 刘素华. 基于支持向量机的图像边缘检测研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(18): 32-33, 58.
Hou Huifang, Bai Liyuan, Liu Suhua. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(18): 32-33, 58.
- [27] Awad A, Man H. Similar neighborhood criterion for edge detection in noisy and noise-free images [C]//Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology. 2008(3): 483-486.
- [28] 张景虎, 郭敏, 王亚文. 基于改进蚁群算法的 CT 图像边缘检测方法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(5): 1236-1239.
Zhang Jinghu, Guo Min, Wang Yawen. *Computer Applications*, 2008, 28(5): 1236-1239.
- [29] Asatryan D G, Patera J. Edge detection algorithm based on DCT continuous extension technique [J]. *Elementary Particles and Fields*, 2008, 71(5): 795-799.
- [30] 毕晓君, 樊松. 基于突变理论的图像边缘检测技术 [J]. 应用科技, 2008, 35(6): 1-6.
Bi Xiaojun, Fan Song. *Applied Science and Technology*, 2008, 35(6): 1-6.
- [31] Araghi L F, Arvan M R. An implementation image edge and feature detection using neural network [C]//Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology, 2009(1): 978-980.
- [32] 孙达, 刘家锋, 唐降龙. 基于概率密度梯度的边缘检测 [J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 299-307.
Sun Da, Liu Jiafeng, Tang Xianglong. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(2): 299-307.
- [33] Kitchen L, Rosenfeld A. Edge evaluation using local edge coherence[J]. *IEEE Tran Syst Man, Cybern*, 1981, 11(9): 597-605.
- [34] Venkatesh S, Kitchen L. Edge evaluation using necessary components[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1992, 54(1): 23-30.
- [35] 杨焯, 梁德群. 一种基于边缘有序度的边缘评价方法[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(7): 103-105.
Yang Xuan, Liang Dequn. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1998, 32(7): 103-105.
- [36] 杨焯, 梁德群. 一种基于区域一致性测度的边缘评价方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(3): 234-238.
Yang Xuan, Liang Dequn. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4(3): 234-238.
- [37] 林卉, 舒宁, 赵长胜. 一种新基于连通成分的边缘评价方法 [J]. 国土资源遥感, 2003, 57(3): 37-40.
Lin Hui, Shu Ning, Zhao Changsheng. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003, 57(3): 37-40.

(责任编辑 代丽)