

基于多尺度彩色形态矢量算子的边缘检测

刘直芳 游志胜 曹刚 徐欣

(四川大学计算机学院图形图象研究所, 成都 610064)

摘要 数学形态学在图象处理中已经得到广泛地应用,但传统的形态学常应用于二值图象处理,后来发展应用到灰度图象处理,对于其用于彩色图象处理的研究还不是很多.通过对传统的数学形态学的几何描述,以及对目前形态学在边缘检测中的应用分析,提出了一种新的多尺度的彩色形态矢量边缘检测算子,该方法是利用不同尺度形态边缘检测算子来检测不同尺度下的边缘强度,再对不同尺度下的边缘强度图进行合并,从而得到新的边缘强度图象.利用该算法对实际图象和合成图象进行了实验,将实验结果与传统的边缘检测算法相比较,由于新的多尺度彩色形态矢量算子能检测出更多细节边缘,因此将更有利于图象的进一步分析处理,同时将实验图象人为地增加噪声后,再利用该算法进行实验,其结果表明,该算法对噪声具有很好的鲁棒性.

关键词 多尺度 彩色形态 边缘检测 二值形态 灰度形态

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0888-06

A Multi-scale Color Vector Morphological Edge Detection

LIU Zhi-fang, YOU Zhi-sheng, CAO Gang, XU Xin

(Institute of Image & Graphic, Department of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract Mathematical morphology in its original form is a set-theoretical approach to image analysis. It studies image transformations with a simple geometrical interpretation and their algebraic decomposition and synthesis in terms of elementary set operations. Mathematical Morphology has been applied in many fields, at the beginning, it is only applied in binary images called binary-scale morphology, and then it has been developed to gray-level images called gray-scale morphology, but there are few researches in color image. In this paper we present a new color vector morphological edge detection methods using a multi-scale approach for detection edge under noisy condition. The goal of edge detection is to detect and localize edge points even under noise condition. Not all edges with various fineness regarding spectral contrast and spatial geometry can be detected by a single operator. In fact, some details that seem to be freak and noisy in one scale may become relevant in other scale. Hence, edges of different fineness are detected using operator at different scale, and then they are judiciously combined to produce all the edges of interest in an image. The experiment has proved this proposed method can detect detail edges in color image. Its superiority has been revealed by comparing with the traditional edge detection methods such as LOG. The experimental results have shown this method is robust to noise.

Keywords Multi-scale, Color vector morphological, Edge detection, Binary-scale morphological, Gray-scale morphology

0 前言

在计算机视觉和图象处理系统中,由于许多信息都包含在图象的边缘上,因此对计算机视觉和模式识

别来说,边缘检测都是一种很重要的图象预处理,而形态学图象处理方法已经成为数字图象信号处理和计算机视觉领域中一种有效的方法.众所周知,数学形态学是一种用于非线性图象(信号)处理和理论,这一特点使它摒弃了传统的数值建模以及分析

的观点,而是从集合的角度来刻划和分析图象^[1],如今数学形态学在图象处理中已经越来越得到广泛的应用.鉴于数学形态学的基础和表达语言是集合理论,它运算算法简单,结构元选取方便,因此它在图象处理和模式识别中的应用得到了迅速推广.而数学形态学的主要内容则是设计一套变换(运算)概念和算法,用以描述图象的基本特征^[2].

数学形态学(Mathematical Morphology)不仅是一种应用于图象处理和模式识别领域的新方法,而且形态学图象处理方法已经成为数字信号处理和计算机视觉领域中广泛应用的有效方法.最初的形态学研究是以二值图象为对象,称为二值形态学; Serra 和 Sternberg 等把二值形态学扩展到灰度图象处理,称为灰度形态学^[3,4],由于其应用最大最小运算将二值形态算子(如形态膨胀、形态腐蚀、形态开和形态闭)推广到了灰度图象处理,因而使灰度形态学的理论和应用研究也得到进一步的发展.与灰度图象相比,彩色图象能提供更为丰富的信息,尽管彩色图象处理在很多的领域中有广泛的应用,但至今在形态学处理研究中,仍主要局限于二值图象和灰度图象的研究^[5,6].为了使人们有一个完整的概念,本文将对基本的二值形态变换以及基本的灰度形态变换和基本的彩色形态变换进行描述,并在将数学形态学扩展到彩色图象的同时,又采用多尺度的数学形态算子来进行彩色图象的边缘检测.根据实验结果可以知道,多尺度的形态变换用于彩色图象边缘检测具有很好的效果,本文还将该方法与传统的边缘检测方法进行了比较实验,结果表明,该方法具有很好的抗噪声能力.

1 关于形态学的一些基本定义

形态学操作是基于两个图象进行的,一个是待处理的原始图象,一个是结构元图象.形态学最基本的操作算子是形态膨胀和形态腐蚀算子,基于膨胀和腐蚀,还有形态开和形态闭算子.这里首先给出基本的二值形态变换的定义,然后主要给出基本灰度形态变换的定义,最后在灰度形态变换基础上,给出基本的彩色形态变换的定义.

1.1 二值形态变换

二值形态膨胀和腐蚀是最基本的二值形态变换操作运算,因为根据其可以构成复杂的其他形态变换,如形态开-闭、闭-开、骨架提取、细化以及由其推

出的形态开和形态闭运算.设 B 为二值图象(矩阵), S 为给定的结构元素(集合); \hat{S} 表示结构元素 S 关于原点的映射, S_x 表示结构元素 S 经平移 x 后的结果. \hat{S}_x 为结构元素 S 先做关于原点的映射,然后再平移 x 后的结果.

$$\text{二值形态膨胀: } B \oplus S = \{x | [\hat{S}_x \cap B] \subseteq \emptyset\} \quad (1)$$

$$\text{二值形态腐蚀: } B \ominus S = \{x | [\hat{S}_x \cap B] \subseteq B\} \quad (2)$$

$$\text{二值形态开: } B \circ S = \{B \ominus \hat{S}\} \oplus S \quad (3)$$

$$\text{二值形态闭: } B \bullet S = \{B \oplus \hat{S}\} \ominus S \quad (4)$$

1.2 灰度形态变换

Serra 和 Sternberg 等人将二值形态变换推广到灰度形态变换^[4],即利用最大最小运算来对灰度图象进行形态变换.与二值形态变换相似,最基本的灰度形态变换是膨胀和腐蚀运算.灰度形态变换的定义如下:设 f 为灰度图象, g 为结构元素,则基本的灰度形态变换为:

灰度形态膨胀:

$$(f \oplus g)(r, c) = \max_{(i, j)} \{f(r - i, c - j) + g(i, j)\} \quad (5)$$

灰度形态腐蚀:

$$(f \ominus g)(r, c) = \min_{(i, j)} \{f(r + i, c + j) - g(i, j)\} \quad (6)$$

灰度形态开:

$$(f \circ g)(r, c) = (f \ominus g)(r, c) \oplus g(r, c) \quad (7)$$

灰度形态闭:

$$(f \bullet g)(r, c) = (f \oplus g)(r, c) \ominus g(r, c) \quad (8)$$

由于彩色形态变换是建立在灰度形态变换基础之上的,所以本文将利用图 1 对一些基本的不同结构元素的灰度形态变换进行几何解释和说明.图 1 中, $f(x)$ 为灰度图象的灰度函数曲线, $g(x)$ 为结构元素,其中,图 1(a)、图 1(c)、图 1(e)和图 1(g)中的 $g(x)$ 为抛物线结构元素,图 1(b)、图 1(d)、图 1(f)和图 1(h)中 $g(x)$ 为扁平结构元素.

大家知道,灰度图象的灰度函数曲线是由斜坡边缘和纹理等特征组成的^[4],而利用数学形态滤波对其进行处理,则可以将斜坡边缘和纹理区分开,但是纹理特征不能与噪声区分开.图 2 描述了灰度图象灰度函数曲线的基本组成及形态变换运算结果.

1.3 彩色形态变换

彩色形态变换是灰度形态变换的一种推广,利用式(5)~式(8)可推出基本的彩色形态变换,它也由基本的形态变换,如形态膨胀和形态腐蚀等组成.在定义彩色形态变换之前,先定义彩色形态变换的几个基本概念.其中, $V(i)$ 是彩色图象在彩色 R, G, B

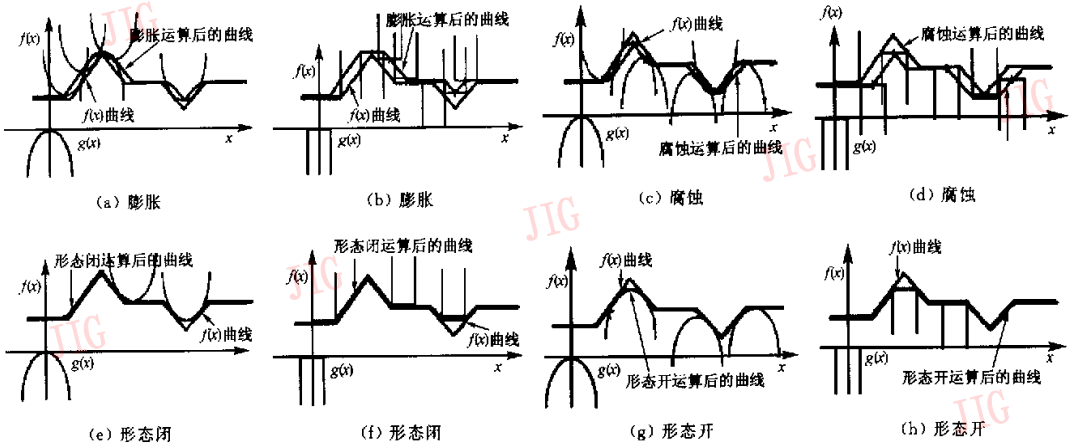


图1 基本灰度形态变换的几何解释

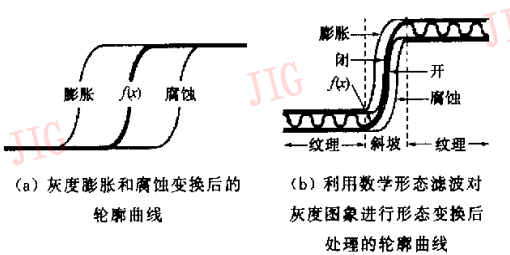


图2 灰度图象函数曲线的组成以及其基本形态变换

空间的矢量, $V(i) = \{R(i), G(i), B(i)\}$, $R(i) \geq 0$, $G(i) \geq 0$, $B(i) \geq 0$, 其中, $V(i) \in \bar{Z}^3$, \bar{Z} 是整数集合, \bar{Z} 是大于、等于0的整数集合, $i \in D_V$, D_V 是 $V(i)$ 的定义域, $D_V \subset \mathbb{Z}^2$, S 为平面结构元素, $S \subset \mathbb{Z}^2$.

定义矢量 $V(i)$ 在某一矢量范数下矢量的最小运算和最大运算为

$$\min\{V(i), i \in D_V\} = V(a) \quad (9)$$

其中, $a = \operatorname{argmin}\{\|V(i)\|; i \in D_V\}$

$$\max\{V(i), i \in D_V\} = V(b) \quad (10)$$

其中, $b = \operatorname{argmax}\{\|V(i)\|; i \in D_V\}$.

彩色形态膨胀:

$$V \oplus S = \max\{V(i-j); (i-j) \in D_V, j \in S\} \quad (11)$$

彩色形态腐蚀:

$$V \ominus S = \min\{V(i-j); (i-j) \in D_V, j \in S\} \quad (12)$$

$$V \circ S = V \ominus S \oplus S \quad (13)$$

$$V \bullet S = V \oplus S \ominus S \quad (14)$$

2 一种新的彩色形态边缘检测算子

在定义新的彩色形态变换边缘检测算子之前,

先看一下基本的形态变换边缘检测算子.

二值图象的形态变换边缘检测算子定义如下:

设集合 B (二值图象) 的边缘为 $C(B)$, 可以通过下述算法提取边缘. 设 S 是一个合适的结构元素, 则其边缘可首先利用式(2)使 B 被 S 腐蚀, 然后求集合 B 与它的腐蚀的差即为其边缘.

$$C(B) = B - (B \ominus S) \quad (15)$$

对基于灰度形态变换的边缘检测算子有膨胀边缘检测算子和腐蚀边缘检测算子以及形态梯度边缘检测算子, 其几何解释如图3所示.

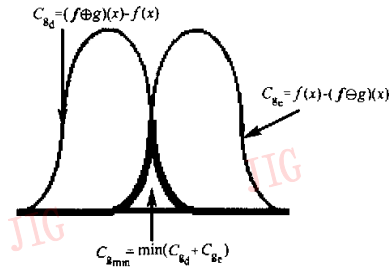


图3 灰度形态变换的边缘检测算子的几何解释

设 f 为灰度图象, g 为结构元素, 这些边缘检测算子分别定义如下: 灰度膨胀边缘检测算子:

$$C_{s_d} = (f \oplus g)(r, c) - f(r, c) \quad (16)$$

灰度腐蚀边缘检测算子:

$$C_{s_c} = f(r, c) - f \ominus g(r, c) \quad (17)$$

灰度形态梯度边缘检测算子:

$$\begin{aligned} C_{s_{\min}} &= (f \oplus g)(r, c) - (f \ominus g)(r, c) \\ &= (f \oplus g)(r, c) - f(r, c) - (f \ominus g)(r, c) + f(r, c) \\ &= C_{s_d} + C_{s_c} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, 下角 g_d, g_e, g_{sum} 分别代表灰度膨胀、灰度腐蚀、灰度形态梯度。

而对于一般的基于彩色形态变换的边缘检测算子则与灰度形态变换边缘检测算子相似, 设 V 为彩色图象在 R, G, B 空间的矢量, g 为结构元素, 则利用式 (11)(12) 将彩色形态变换边缘检测算子定义如下

彩色膨胀边缘检测算子:

$$C_{color_d} = (V \oplus g)(r, c) - V(r, c) \quad (19)$$

彩色腐蚀边缘检测算子:

$$C_{color_e} = V(r, c) - (V \ominus g)(r, c) \quad (20)$$

彩色梯度形态边缘检测算子:

$$\begin{aligned} C_{color_{sum}} &= (V \oplus g)(r, c) - (V \ominus g)(r, c) \\ &= (V \oplus g)(r, c) - V(r, c) - (V \ominus g)(r, c) + V(r, c) \\ &= C_{color_d} + C_{color_e} \end{aligned} \quad (21)$$

为了使检测出的边缘更适合人的感知机制, 本文在此采用一种新的彩色形态变换边缘检测算子。在定义该检测算子之前, 先定义几个结构元素如图 4 所示 (图中 \ast 为中心像素, \bullet 为其有效的邻域像素)。

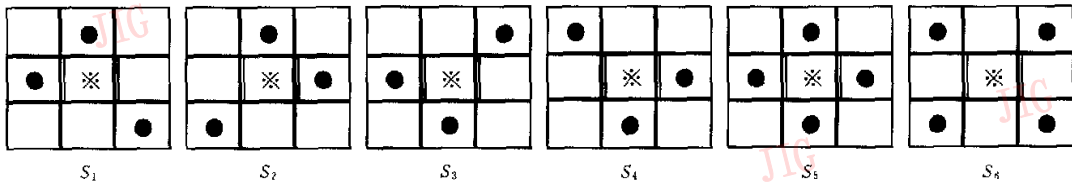


图 4 6 个结构元素 ($S_i, i=1, 2, 3, 4, 5, 6$)

从图 4 可以看出: $S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 = N_8$, $S_6 = (N_8 - N_4) \cup (0, 0)$

其中, N_8 是以 \ast 为中心的八邻域, N_4 是以 \ast 为中心的邻域。

根据式 (11) 和式 (12), 彩色图象 $V(r, c) = \{R(r, c), G(r, c), B(r, c)\}$ 被扁平结构元素 σ 的膨胀和腐蚀, 分别记为 $D_\sigma(r, c)$ 和 $E_\sigma(r, c)$, 用式 (9) 和式 (10) 矢量最小和最大运算来定义一种新的彩色膨胀边缘检测算子为

$$\tilde{C}_{color_d}(r, c) = \min \{ D_{S_6}(r, c) - V(r, c), D_{S_5}(r, c) - V(r, c), W_{color_d}(r, c) \} \quad (22)$$

其中, $W_{color_d}(r, c) = \max \{ |D_{S_1}(r, c) - D_{S_2}(r, c)|, D_{S_3}(r, c) - D_{S_4}(r, c) \}$

同理, 可以知道新彩色腐蚀边缘检测算子为

$$\tilde{C}_{color_e}(r, c) = \min \{ V(r, c) - E_{S_6}(r, c), V(r, c) - E_{S_5}(r, c), W_{color_e}(r, c) \} \quad (23)$$

其中, $W_{color_e}(r, c) = \max \{ |E_{S_1}(r, c) - E_{S_2}(r, c)|, E_{S_3}(r, c) - E_{S_4}(r, c) \}$

新的彩色梯度形态边缘检测算子为

$$\tilde{C}_{color_{sum}}(r, c) = \tilde{C}_{color_d}(r, c) + \tilde{C}_{color_e}(r, c) \quad (24)$$

在本文的实验中, 是采用式 (24) 新的彩色梯度形态边缘检测算子来进行边缘检测。

3 多尺度的彩色形态边缘检测

大家知道, 多尺度的形态运算在形态学中具有十

分重要的地位, 因为多尺度运算可以极大地提高形态学运算的稳定性。人们很早就意识到单尺度运算难以很好地描述对象多变的结构和细节, 但不符合人的感知机制。一般说来, 图象的信息依其结构的不同, 在人们感知过程中的重要性也会不同, 即图象中不同结构的信息, 客观上就应该出现在感知的不同层次上。人的感知过程就是一个由粗到精的分层处理过程, 即首先通过大范围特征来进行粗分析, 然后在这一基础上, 通过捕捉细节, 使分析得以越来越精细, 最终获得对感知对象的准确理解^[7-9], 而多尺度运算正是与这一机制相匹配的多层次描述和多层次处理方法^[1]。大家知道, 单尺度的形态运算只是一种半连续性运算, 而在实际运算中, 半连续性运算就意味着不连续, 即可以用图 5 中的图形来描述这种情况。设集合 X' 是集合 X 的一个很小的扰动, 它们的细长部分, 宽度上略有不同, 若以半径为 γ 的圆盘结构元素 S_γ 对其作腐蚀和开运算, 则不仅其结果有很大的差异, 而且这种运算的不连续性, 对于运算结果的稳定性分析会产生不利的影响, 而采用多尺度运算, 则可以极大地增强形态学变换的稳定性。由图 5 不难看出 $X' \ominus S_\gamma$ 和 $X' \circ S_\gamma$ 不会去掉 X' 的细长部分, 而它们分别只对于 $X \ominus S_\gamma$ 和 $X \circ S_\gamma$ 有一个小的扰动变化, 即结果出现连续对应性。由此可见, 在多尺度运算中, 通过不同尺度的扰动变化就可以使运算结果的连续对应性成为可能, 这就显著提高了运算的稳定性。

在单尺度结构元素中, 其半径为 1。下面讨论多尺度的形态边缘检测算子的定义。若多尺度的结构

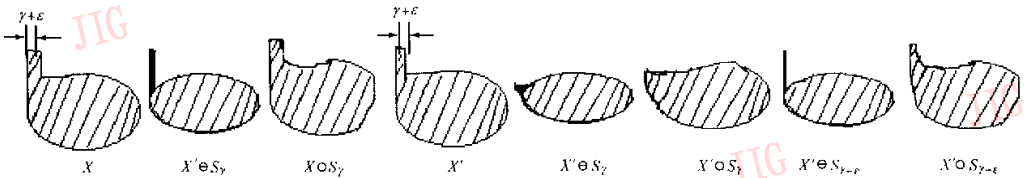


图 5 不同尺度结构元素的形态腐蚀和开运算

元素定义为

$$S_i^n = nS_i, i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad \text{其中, } n \text{ 为尺度数}$$

则利用式(22)、(23)和式(24)可以知道尺度 n 的新膨胀边缘检测算子为

$$\tilde{C}_{color_d}^n(r, c) = \min \{ D_{S_i^n}(r, c) - V(r, c), D_{S_j^n}(r, c) - V(r, c), W_{color_d}^n(r, c) \} \quad (25)$$

其中, $W_{color_d}^n(r, c) = \max \{ |D_{S_i^n}(r, c) - D_{S_j^n}(r, c)|, |D_{S_j^n}(r, c) - D_{S_k^n}(r, c)| \}$.

同理,可以知道尺度 n 的新彩色腐蚀边缘检测算子定义与式(25)相似,记为 $\tilde{C}_{color_c}^n(r, c)$,其梯度形态边缘边缘检测算子定义为

$$\tilde{C}_{color}^n(r, c) = \tilde{C}_{color_c}^n(r, c) + \tilde{C}_{color_d}^n(r, c) \quad (26)$$

最后利用不同尺度检测出的边缘来进行边缘的合并,即可得到所需要的边缘强度图。

在尺度 n 下,利用式(26)可得到若彩色图象的边缘强度,则联合各尺度的边缘强度可得到新的彩色边缘强度图象定义为:

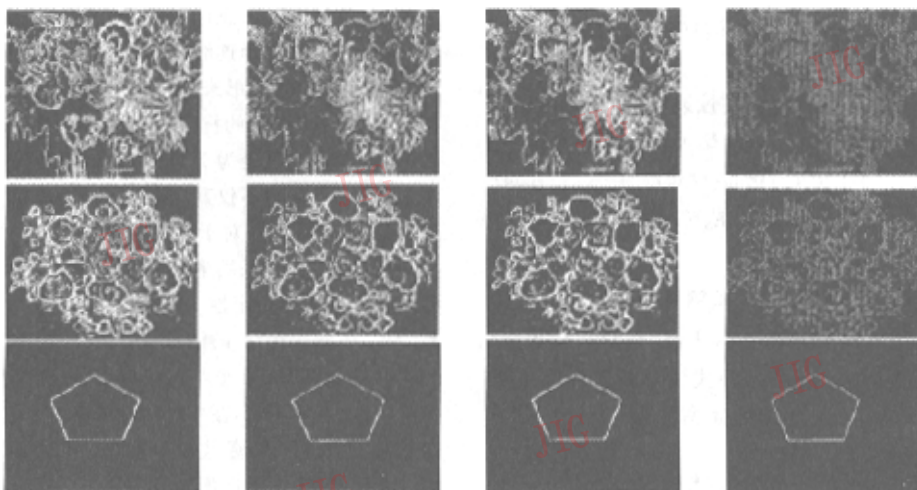
$$\hat{C}_{color}(r, c) = \sum_{n=k}^l w_n \tilde{C}_{color}^n(r, c) \quad (27)$$

其中, w_n 为不同尺度下边缘的权系数。

在本文的实验中,尺度数 n 取 1, 2, 3 来进行形态边缘合并。

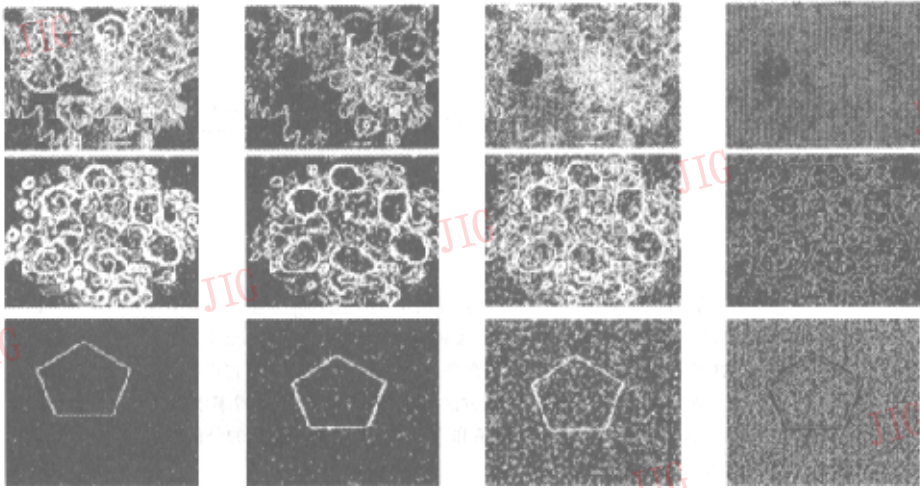
4 实验结果与分析

本文还对该方法与原有的彩色形态变换边缘检测算子,即式(21)和传统的边缘检测算子,如 Sobel, Prewitt 以及 LOG 算子进行了比较实验. 实验用原始图象如图版 1 图 1(a)所示,图版 1 图 1(b)是人为添加了 15% 高斯噪声的图象. 图 6 是对图版 1 图 1(a)利用本文方法与传统方法进行检测获得的边缘图象,其中,图 6(a)是利用本文方法检测得到的边缘图象,图 6(b)是利用传统的形态学进行边缘检测得到的边缘图象,图 6(c)是利用 Sobel 算子检测得到的边缘,图 6(d)是利用 LOG 算子检测得到的边缘. 图 7 是对图版 1 图 1(b)进行边缘检测得到的边缘图象,图 7(a)、(b)、(c)和(d)分别与图 6(a)、(b)、(c)和(d)采用的检测方法相同. 由图 6、图 7 可见,多尺度彩色形态边缘检测算子能提取较为细节的边缘以及具有较强的抗噪声能力。



(a) 本文方法检测结果 (b) 传统形态学方法检测结果 (c) Sobel 算子检测结果 (d) LOG 算子检测结果

图 6 图版 1 图 1(a)的边缘检测结果



(a) 本文方法检测结果 (b) 传统形态学方法检测结果 (c) Sobel 算子检测结果 (d) LOG 算子检测结果

图 7 图版 1 图 1(b) 添加了噪声的图象边缘检测结果

5 结论

边缘检测对计算机视觉和模式识别来说, 都是一种很重要的图象预处理, 而形态图象处理方法已经成为数字图象信号处理和计算机视觉领域中广泛应用的一种有效方法. 本文利用数学形态学的基本知识, 在对形态学进行几何解释的同时, 提出了一种基于多尺度彩色矢量算子的边缘检测算法. 实验结果表明, 该算法与传统的形态边缘检测算子相比, 不仅能检测出图象中较细节的边缘信息成分, 同时该算法具有较好的抗干扰能力, 因而更有利于图象的分析处理.

参考文献

- 1 裴炜, 石膏云, 程民德. 数字空间中的数学形态学——理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- 2 崔屹. 图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 3 Serra J. Image analysis and mathematical morphology[M]. New York, USA, Academic Press, 1982.
- 4 Sternberg S R. Grayscale morphology[J]. CVGIP, 1986, 35(3): 333~355.
- 5 Chanad B., Malay. K., Padmaja Y. A multi scale morphologic edge detector [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(10): 1469~1478.
- 6 Goutsias J., Henk J., Heijmans A M et al. Morphological operators for image sequences [J]. CVIU, 1995, 62(3): 326~346.
- 7 Maragos P. Pattern spectrum and multi-scale shape representation[J]. PAMI, 1989, 34(11): 701~716.

- 8 Lee J., Haralick R., Shapiro L. G. Morphologic edge detection [J]. IEEE Trans. On Robotics Automat. 1987, 3: 140~156.
- 9 吴永东, 马颂德. 多尺度形态滤波及弹性匹配技术在类星体谱线识别中的应用[J]. 中国图象图形学报, 1997, 2(1): 3~6.



刘直芳 1974 年生, 1998 年获武汉测绘科技大学工程测量专业工程学士学位, 2001 年获武汉大学摄影测量专业硕士学位, 现为四川大学计算机学院的在读博士研究生. 主要从事图象处理、模式识别和智能交通方面的研究.



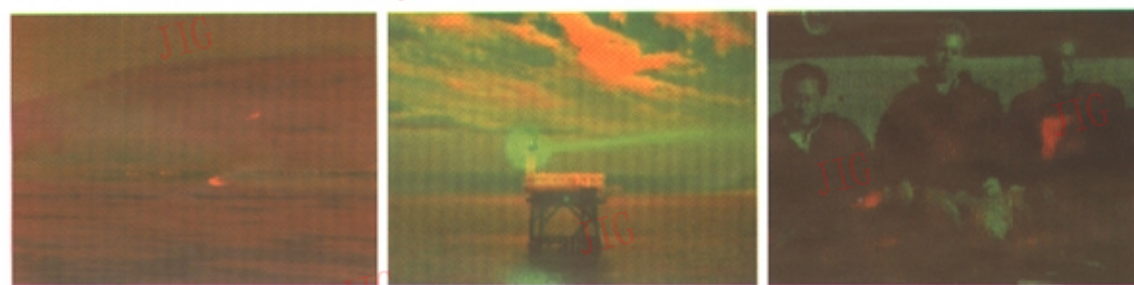
游志胜 1945 年生, 四川大学计算机系教授、博士生导师, 中国图象图形学会副理事长. 主要研究领域为计算机视觉、图象处理与模式识别、神经网络、雷达模拟系统、ITS 等.



曹刚 1976 年生, 四川大学计算机学院图形图象研究所的在读博士研究生. 主要从事智能交通、人工智能和模式识别方面的研究.



徐欣 1979 年生, 四川大学计算机学院图形图象研究所工程师. 主要从事图象处理、智能交通方面的研究.



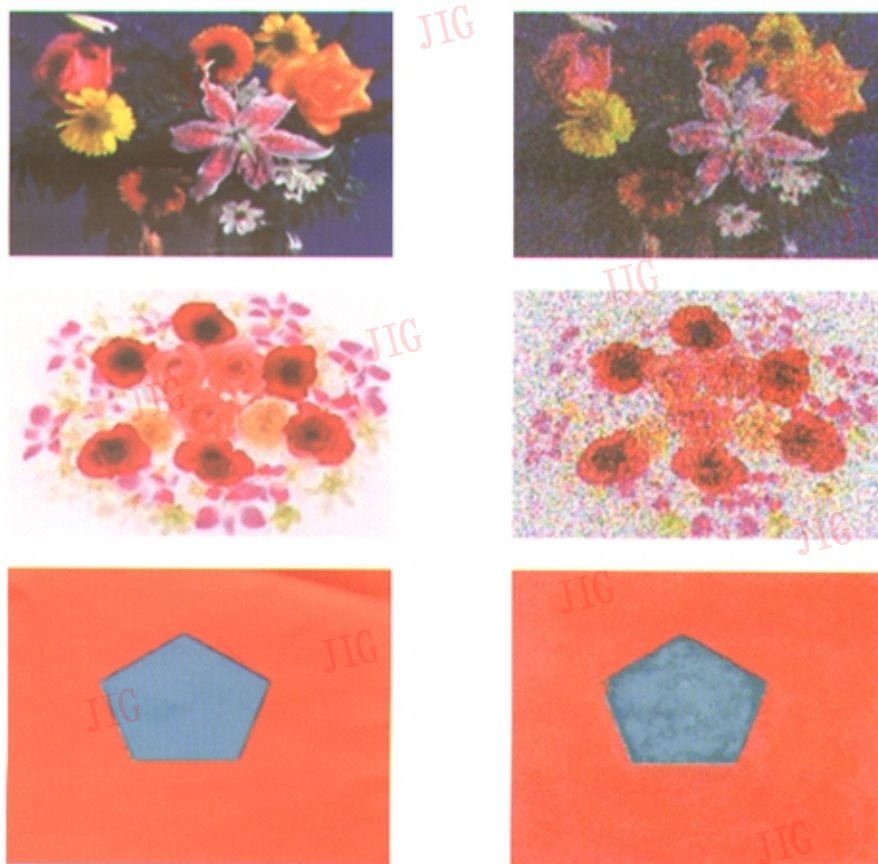
(a) 汽车、飞机、山岭大雾场景

(b) 海上平台场景

(c) 安全检查场景

图 1 多通道彩色融合结果图象

刘直芳等：基于多尺度彩色形态矢量算子的边缘检测



(a) 原始图象

(o) 添加了噪声的图象

图 1 实验用的原始图象以及添加了噪声的图象