

# 基于 L/L 算法的特征提取方法研究

## Image Feature Extraction Method Based on L/L Operators

左 丹 刘 志 朱正明 (浙江工业大学 计算机软件与理论系 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 图像的特征提取是基于图像的铅笔画绘制的重要基础,本文采用 L/L 算法实现了参考图像的特征提取。L/L 算子是一种非线性算子,它将逻辑运算和线性卷积操作结合起来,通过判断所有的逻辑条件来决定是否做出线性响应,从而能在更好的考虑全局结构关系的基础上,对局部区域上的点作出更合理的判断。该算法实现了自动铅笔画绘制过程中的特征提取,同时也弥补了 Canny 算法在提取特征的过程中丢失部分主要特征和产生一些伪边缘特征的不足,并通过分析不同的特征结构独立提取出各类特征线,以及对提取过程中的参数调整来控制特征线的分布。

**关键词:** 特征提取 边缘检测 Canny 算子 铅笔画绘制

### 1 引言

基于图像的铅笔画绘制是非真实感图形绘制的一个分支,它主要利用数字图像处理的一些技术把真实图像转化为铅笔画的效果。近年来,人们从模拟人类绘制过程出发,得到了几种铅笔画的绘制方法<sup>[1-4,6]</sup>。在诸多绘制方法中,图像的轮廓特征提取是基于图像的铅笔画绘制过程的重要基础,特征提取的结果直接影响到后续的绘制过程。如 Sousa 和 Buchanan 在其铅笔画模型中<sup>[1]</sup>,虽然没有给出具体的特征片段提取算法,然而该方法是通过获取图像的特征笔触,然后根据用户指定的铅笔和纸模型参数来实现铅笔画绘制的。Mao 等提出的基于线性卷积积分(LIC)的铅笔画生成算法中<sup>[2]</sup>,并没有对原始图像的轮廓特征作出任何操作,而是直接生成原始图像的白噪声图,然后根据所获取的白噪声图进行不同特征区域的绘制。后来,李龙生等人对该方法进行了改进<sup>[4]</sup>,通过霓虹处理生成铅笔画中的轮廓特征,从而改进了 LIC 处理中白噪声的生成方法。这些算法都实现了铅笔画的绘制,取得了一定的成效,然而对于铅笔画这种艺术表现形式,它更强调对象的结构、形状和神态<sup>[5]</sup>,在绘制过程中需要对绘制内容和方式作出主动的选择。因此在基于图像的铅笔画绘制过程中,有时并不过分要求保留原图的全部特征,而更需要提取一些图像的重要特征,然后在这些重要特征的基础上进行取舍和添加,从而留给欣

赏者更多的联想空间。

2006 年 Hyung W. Kang 等人在其论文中采用了局部增量的 Canny 边缘检测算法<sup>[6]</sup>提取图像的特征,然后根据所提取的主要特征线来添加一些特征区域内的笔触,从而得到了图像的绘制笔触。局部增量的 Canny 算法弥补了传统 Canny 算法<sup>[7]</sup>在边缘检测中会丢失一些重要的曲线特征和产生伪边缘的缺陷,然而此方法需要人工交互,不利于自动铅笔画绘制。本文采用 Iverson 和 Zucker 提出的一种非线性边缘检测方法——L/L 算法<sup>[8]</sup>,该方法弥补了以上诸多缺陷,可以独立的提取各类特征线,并允许在局部区域上分布着不同方向的特征线,从而能产生 T 型结构的绘制线条,同时 L/L 算法可以通过调整参数,来控制特征线的分布。

### 2 L/L 算法特征提取

#### 2.1 L/L 算法原理

在一幅二维图像中,特征线沿边缘走向(切线方向)的灰度变化平缓,垂直于边缘走向(法线方向)的灰度变化剧烈,切线方向的灰度变化决定了图像特征线的局部连续性,而法线方向的这种变化决定了特征线的类型。则满足图像特征线局部连续性的条件称为图像切线方向的条件,满足某一特征线类型的法线方向的灰度变化的条件称为图像法线方向的条件。对于

数字图像,切线方向和法线方向的条件的判断都是基于离散像素点的,只有当像素满足切线方向连续和法线方向的变化符合某一类特征线的条件时,才认为该点是该类特征线上的点。Canny 算法在基于线性假设的基础上,对图像中的所有点做线性卷积操作来实现图像的特征提取的,然而这些点不一定都满足固有的结构条件,因此会产生一些伪结构,同时图像的特征线不全是理想阶梯状边缘线,而 Canny 算法不能准确的对那些线条做出判断。基于这两点考虑,本文采用 L/L 算法来实现图像特征线的提取。

Logical/Linear (L/L) 算子是一种非线性算子,它将布尔逻辑和传统线性算子结合起来。它通过分析图像边缘上的各个点所应该满足的结构特征,并将这些结构判定条件作为运算的一部分,与分解后的各个线性算子相对应,然后用某一逻辑连接器将所有的非线性算子用一种 L/L 连接器连接起来。当像素点满足结构特征的条件时,做出线性响应,然后再采用传统的线性模板提取特征。否则,如果点不满足结构特征的任何一个条件,则认为它是非线性的,不做出任何响应。由于独立的考虑到图像特征线的结构,因此 L/L 算子可以独立提取出各种类型的特征线,同时,L/L 算子允许在局部区域上的特征线有不同的方向,从而可以提取一些 T 型结构。

2.2 L/L 算子布尔代数

如上所述,我们引入 L/L 连接器<sup>[8]</sup>:

$$x \uparrow y = \begin{cases} x + y, & x > 0 \wedge y > 0; \\ y, & x > 0 \wedge y \leq 0; \\ x, & x \leq 0 \wedge y > 0; \\ x + y, & x \leq 0 \wedge y \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$x \downarrow y = \begin{cases} x + y, & x > 0 \wedge y > 0; \\ x, & x > 0 \wedge y \leq 0; \\ y, & x \leq 0 \wedge y > 0; \\ x + y, & x \leq 0 \wedge y \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

符号  $\uparrow$  和  $\downarrow$  将所有的结构预前提连接起来,其运算与布尔代数中的  $\wedge$  和  $\vee$  类似。令  $h = x \uparrow y$ ,则当条件  $x$  和条件  $y$  同时满足时, $h$  才为真 (TRUE),该结构特征才被接受,并做出响应;否则, $h$  为假 (FALSE),该结构特征不存在。 $h$  的值为支持或否定特定结构假设的强度。且有  $x \downarrow y = -x \uparrow -y$ ,因此, $\downarrow$  可以完全由  $\uparrow$  代替。

在图像的特征线提取中,为了描述 L/L 算子与其线性降低之间的关系,使得当点满足特定结构预前提时,L/L 算子退化为传统的最优线性算子,笔者引入了 - 近似连接器:

$$x \uparrow_{\rho} y = x(1 - \sigma_{\rho}(x)\sigma_{\rho}(-y)) + y(1 - \sigma_{\rho}(y)\sigma_{\rho}(-x)), \quad (3)$$

$$x \downarrow_{\rho} y = x(1 - \sigma_{\rho}(y)\sigma_{\rho}(-x)) + y(1 - \sigma_{\rho}(x)\sigma_{\rho}(-y)), \quad (4)$$

其中  $x, y \neq 0, \sigma_{\rho}(x) = \begin{cases} 0, & x < -\frac{1}{\rho} \\ \frac{f(\frac{1}{2} + \rho x)}{f(\frac{1}{2} + \rho x) + f(\frac{1}{2} - \rho x)}, & x \in [-\frac{1}{\rho}, \frac{1}{\rho}] \\ 1, & x > \frac{1}{\rho} \end{cases}$

$$f(x) = \begin{cases} e^{-1/x}, & x > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

且有  $\lim_{\rho \rightarrow \infty} x \uparrow_{\rho} y = x \uparrow y, \lim_{\rho \rightarrow \infty} x \downarrow_{\rho} y = x \downarrow y$ ; 当  $\rho = 0$

时,  $\sigma_0(x) = \frac{1}{2}, x \uparrow_0 y = \frac{3}{4}(x + y)$ ,如图 2。从图中可以看到,当  $\rho = 0$  时,L/L 连接器是完全线性连接的,当  $\rho \rightarrow \infty$  时,L/L 连接器则是完全逻辑连接的。

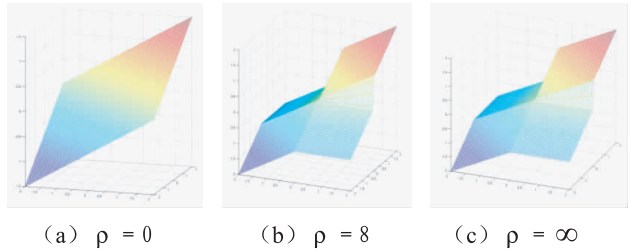


图 2  $\rho$  取不同的值时,  $x \uparrow_{\rho} y$  的取值示意图

2.3 L/L 算法实现

下面以理想阶梯形边缘为例来讲述 L/L 算法的实现。设图像法线方向的条件为  $N(y)$ ,切线方向的条件为  $T(x)$ ,对于指定的模板大小和方向,L/L 算法的实现步骤如下:

- (1) 计算图像的法线算子  $N(y)$ ,得到点所在曲线的结构特征的判定算子。
- (2) 计算图像的切线算子  $T(x)$ ,得到点沿切线方向向局部连续性的判定算子。

(3) 计算二者的笛卡儿乘积  $N(y) \times T(x)$  ,得到二维图像的 L/L 算子。

### 2.3.1 法线算子

图 3 为理想梯形边缘的法向横截面图及与高斯函数的导数进行卷积操作的示意图。其中实线为理想梯形边缘的法线横截面,三条虚线分别是理想梯形边缘与高斯函数一阶导数,二阶导数及三阶导数进行卷积操作的示意图。理想梯形边缘从一个较低的灰度跳跃到另一个比它高很多的灰度。从图中可以看出,实线在 0.5 处到 1.5 处发生了一次跳跃。

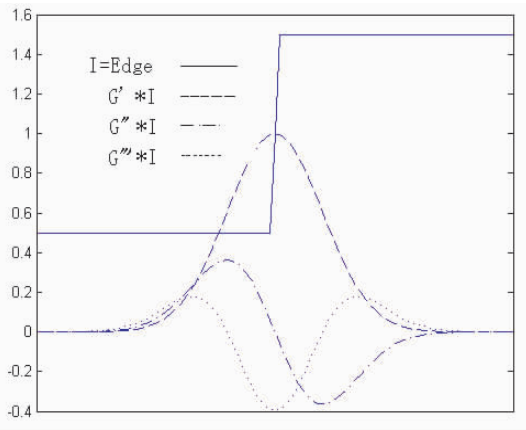


图 3

高斯函数为:  $G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2}$  ,通过图像特征曲线和高斯函数及其各阶导数进行卷积操作来消除图像中可能存在的噪声点。设曲线截面信号为  $\beta(x)$  ,经过高斯函数平滑的曲线信号为  $\beta_{\sigma}(x)$  ,由于经过高斯平滑后,信号不会产生新的极大值,因此满足  $\beta_{\sigma}(x)$  极大值的条件对  $\beta(x)$  同样适用。且  $\beta'_{\sigma}(x) = \beta'(x) * G_{\sigma}(x) = \beta(x) * G'_{\sigma}(x)$  。则由图 3 可知特征线的二阶导数过零点,即,  $\beta''(x - \epsilon) > 0, \beta''(x + \epsilon) < 0$  其中  $\epsilon > 0, \beta''(x) > 0$  ;同时,为了更精确的提取到符合特征条件的线条,可以考虑特征线更高阶的导数,于是,由图 3 可知,理想阶梯型图像与高斯函数的第三阶导数的卷积在边缘处有极小值,即有判定条件:  $\beta^{(4)}(x - \epsilon) < 0, \beta^{(4)}(x + \epsilon) > 0$  ,从而得到阶梯形边缘线的类型判断算子为:

$$N = n'_c \hat{\wedge} n''_l \hat{\wedge} n''_r \hat{\wedge} n_l^{(4)} \hat{\wedge} n_r^{(4)}, \text{ 其中, } n'_c = G'_{\sigma}(x),$$

$$n''_l = G''_{\sigma}(x + \epsilon), n''_r = -G''_{\sigma}(x - \epsilon), n_l^{(4)} = -G^{(4)}_{\sigma}(x + \epsilon),$$

$$n_r^{(4)} = G^{(4)}_{\sigma}(x - \epsilon)。$$

### 2.3.2 切线算子

函数  $f(x)$  在点  $x_0$  连续的条件为:  $\lim_{z \rightarrow x_0^-} f(x) = \lim_{z \rightarrow x_0^+} f(x) = f(x_0)$  ,除了噪声点外,曲线上的所有点都应该满足这一条件。因此在对点做切线条件的判断之前,首先要对图像进行高斯平滑去噪处理。基于端点稳定性的考虑,可采用了分段函数将高斯函数分成了两个区域(或四个区域),并使用稳定器来保证在曲线的端点截断。如下:

$$t^-(x) = G(x)\sigma_a(-x) + bG'(x), t^+(x) = G(x)\sigma_a(x) - bG'(x)$$

其中  $b$  为稳定因子。从而得到切线算子为:  $T = t^- \hat{\wedge} t^+$  。

### 2.3.3 特征提取算子

求取法线算子和切线算子的笛卡儿乘积得到:

$$\Psi = T \times N = (t^- \hat{\wedge} t^+) \times N = (t^- \times N) \hat{\wedge} (t^+ \times N), N$$

$$= n'_c \hat{\wedge} n''_l \hat{\wedge} n''_r \hat{\wedge} n_l^{(4)} \hat{\wedge} n_r^{(4)}$$

下图是阶梯形边缘线的提取流程图。

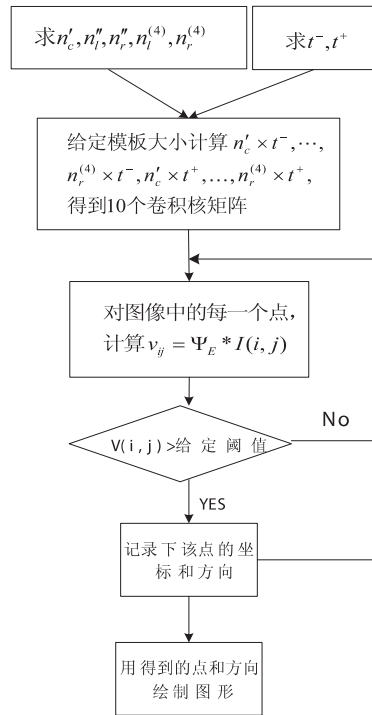


图 4

## 3 实验结果与分析

本实验采用计算机配置为 P4 2.93G CPU, 632MB 内存,用 VC++ 6.0 编程实现。图 5 分别采用几种 Canny 算法和 L/L 算法做理想阶梯形边缘线提取后的对比,其中图

(b)的参数 $\sigma = 0.2, h = 0.01, h_1 = 0.15$ ;图(c)与图(b)参数类似,只是 $\sigma = 0.4$ ;图(d)通过直方图来自动变更 Canny 算法的高低阈值,其参数为 $\sigma = 1.0$ ;图(e)采用的是 L/L 算法的结果,参数为 $h = 0.01$ ,切线算子的 $\sigma = 2.0$ ,法线算子的 $\sigma = 1.5, \varepsilon = 0.8$ 。比较四幅结果图,很显然,采用本文提出的 L/L 算法的效果最佳。

原图中四个矩形框处的检测图像,L/L 算子明显优于 Canny 算子,例如男子下巴处,L/L 算子检测结果跟原图更接近,然而 Canny 算子却把由于光线作用而产生的阴影也当成了边缘的一部分,又如衬衫里面的黑色衣服那块的 T 形边缘,Canny 算子的检测在该处出现了断裂,而 L/L 算子却能很好的检测出该 T 形结构。

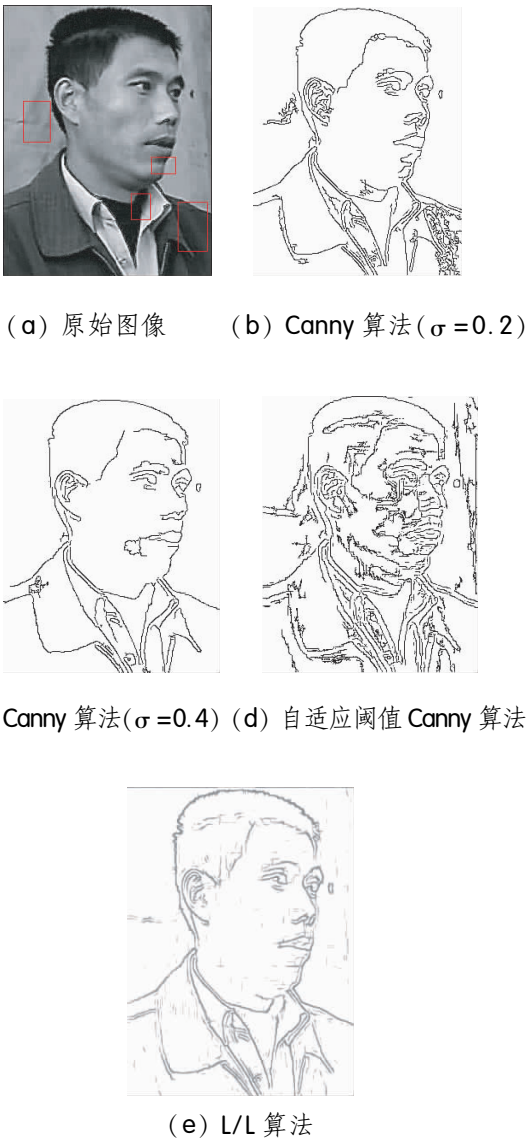


图 5

### 4 结束语

本文采用 L/L 算法实现了基于图像的自动铅笔画绘制中的特征提取,模拟了人类手工作画过程中的景物轮廓勾勒过程。该算法通过分析不同的图像特征结构独立的提取了各类特征线,使得在铅笔画绘制阶段,可以通过控制不同的特征线来选用不同的绘制类型。另外,在特征提取过程中,可通过调整参数来得到不同的特征线分布,如图 6 所示。

铅笔画绘制过程是一个艺术创作过程,人类在作画时会受到很多情感因素的影响,从而直接影响到绘制的每个步骤,因此要模拟每一过程绘制都不是一件简单的事情。下一步的工作是如何根据这些特征来绘制一些次要的,但是更能反映图像三维结构的线条。

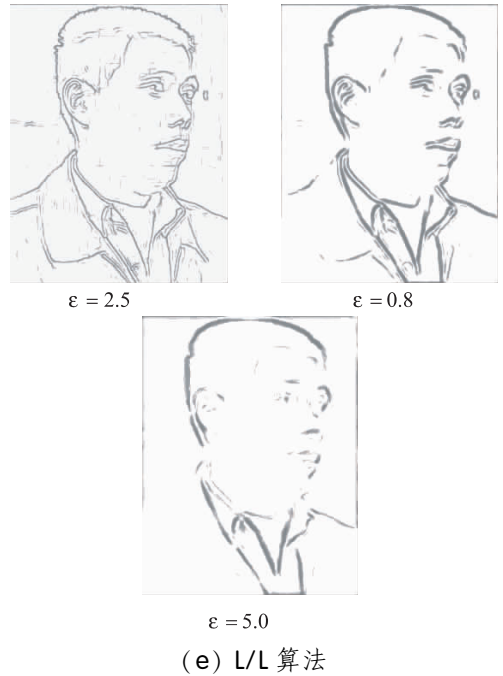


图 6 L/L 算法在  $\sigma_x = 2, \sigma_y = 1.5$  时,取不同值时的结果图

### 参考文献

1 Sousa MC, Buchanan JW. Computer - generated graphite pencil rendering of 3D polygonal models. EU-ROGRAPHICS' 99 Conference Proceedings. London, England, 1999.

(下转第 10 页)

(上接第 57 页)

- 2 Mao X, Nagasaka Y, Imamiya A. Automatic generation of pencil drawing from 2D images using line integral convolution. CAD/Graphics, 2001, 22(8): 240 - 248.
- 3 Li N, Huang ZY. A feature - based pencil drawing method. Computer Graphics and Interactive Techniques. Australasia and South East Asia, 2003.
- 4 李龙生, 周经野, 等. 一种改进的铅笔画的生成方法. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1423 - 1429.
- 5 蒲新成, 周爱民. 铅笔素描风景画技法. 华中建筑, 2005, 23(2): 154 - 157.
- 6 Kang H, Chui C, Chakraborty U. A unified scheme for adaptive stroke - based rendering. The Visual Computer, 2006, 22(9): 814 - 824.
- 7 Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986: 679 - 698.
- 8 Iverson L A, Zucker S W. Logical/Linear Operators for Image Curves. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995: 982 - 996.