

# 图象角点检测的矢量场方法

罗 斌

E. R. Hancock

(安徽大学电子系, 合肥 230039)

(英国约克大学计算机系)

**摘 要** 提出一种新的图象角点检测方法。该方法利用电磁场理论表达图象特征, 进而从特征图象中提取出角点。Canny 边缘图象中的边缘被视为电流密度源而产生磁场。根据电磁场理论, 可计算出相应的矢势。提出图象的角点位于该矢势图的鞍点和基于模板匹配的鞍点检测算法, 并给出实际的角点检测结果。

**关键词** 角点检测, 矢势, 微分算子

## 1 引 言

角点检测是计算机图象处理与计算机视觉的重要研究课题。准确的角点检测对许多计算机视觉任务的完成起到至关重要的作用。这些任务包括图象配准与匹配<sup>[1]</sup>、目标识别<sup>[2]</sup>及运动分析<sup>[3]</sup>等。

角点检测方法可分为两类。一类是基于边缘轮廓预分割后产生的链码的角点检测方法。该方法有 3 个步骤, 即图象预分割、轮廓链码提取和角点检测。角点被定义为轮廓直线段的交点<sup>[4]</sup>。有些文献提出角点数字特征描述的链码方法<sup>[5~9]</sup>。有兴趣的读者可阅读 Liu 的综述文章<sup>[10]</sup>。基于链码的角点检测方法依赖于可靠的图象分割, 精确的图象分割本身又是图象处理中的一个难题。

另一类角点检测方法直接从灰度图象中提取角点。其基本工具是图象照度函数的三阶导数<sup>[11]</sup>。虽然该方法不需要预分割作为前题, 但由于使用了图象的二阶偏微分, 所以对噪声很敏感。灰度图象角点检测算法有两类。基于模板的角点检测方法<sup>[12, 13]</sup>检测给定模板与每个图象子窗的相似性, 从而判断图象中是否存在与模板相应的角点。由于使用了多个方向模板, 算法耗时复杂。另一类是基于梯度的角点检测法<sup>[14~16]</sup>。该方法通过计算边缘的曲率来判断角点的存在性。角点计算数值的大小不仅与边缘强度有关, 而且与边缘方向的变化率有关。该方法对噪声

比基于模板的角点检测方法对噪声更敏感。因此, 角点检测的效果不佳。

本文旨在提出一种新的综合模板角点检测和灰度曲率角点检测方法特点的检测方法。该方法直接利用地形图分析法检测角点。地形结构图由图象的 Canny 边缘映射图表示<sup>[17]</sup>。图中的边缘代表图象平面中的电流密度, 从而将边缘图象的分析转换成对静磁场的分析。关键是计算与电流密度相联系的矢势。矢势的局部极大值代表边缘位置, 而局部极小值为对称轴线。本文提出图象的角点应位于矢势幅值的鞍点位置。图象中角点的检测被转换成矢势图中鞍点的检测。

有了图象的地形图表示, 剩下的问题是找到一种检测鞍点的算法。检测点的特征比检测线的特征更为困难。在角点检测中, 候选点必须同时满足鞍脊点和鞍谷点 2 个条件。基于这一发现, 我们设计了一种矢势图中鞍状结构的测试方法。这一基于模板的方法试图搜索一种鞍状结构, 该结构沿矢势方向为鞍谷状, 而在与其垂直方向上为鞍脊状。换句话说, 该方向模板将鞍脊与鞍谷的交汇点视为鞍点。本文还提出将模板置于矢势方向, 从而解决了模板匹配中运算量较大的问题。

## 2 图象的矢势表示法

首先, 利用 Canny 边缘检测算法得到边缘映射

图。原始图象  $I$  与宽度为  $\sigma$  的高斯核进行卷积。高斯卷积核形式如下:

$$G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

有了高斯滤波图象后, Canny 边缘映射图可通过计算梯度得到,

$$\vec{E} = \nabla G_\sigma * I \quad (2)$$

为了计算矢量场表示的边缘映射图, 我们引入第三维坐标  $Z$ 。在三维坐标系中, 边缘映射图仍局限于图象平面。即位于  $(x, y, 0)$  的边缘矢量为:

$$\vec{E}(x, y, 0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial G_\sigma * I(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial G_\sigma * I(x, y)}{\partial y} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

对理想阶跃边缘而言, 图象梯度与边界的法线方向一致。为了使用静磁场分析方法, 我们将边缘响应解释为沿图象边界流动产生矢势的电流源。换句话说, 我们将这些电流源的方向组织成与图象中物

$$\vec{A}(x, y, z) = \begin{pmatrix} -\iint \frac{\partial G_\sigma * I(x', y')}{\partial y'} \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dx' dy' \\ \iint \frac{\partial G_\sigma * I(x', y')}{\partial x'} \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dx' dy' \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

有必要对该矢势的结构作进一步讨论。表面看来, 矢势的分量仅限于图象平面。然而当我们从图象平面移开时,  $Z$  方向的作用是对原图象中更大范围产生的电流进行平均。换句话说, 当在不同高度对矢势场取样时, 我们得到的是尺度空间的表达方法。我们将另文探讨上述图象尺度空间表达的作用。

### 3 角点的微分几何特征

为了从地形图中检测角点, 我们致力于探讨相应磁场的几何性质。按照本文的表示方法, 图象中的对称轴线在矢势地形图中是一条矢势极小点组成的线段。图象中的边缘在地形图中是一条矢势极大点组成的线段。对称轴线上各点磁场方向与取样图象平面垂直, 而边缘上各点磁场方向与相应的取样图象平面相切。就地形图的微分结构而言, 对称轴线各点图象平面中矢势的旋度为零, 即

$$\vec{Z} \Delta \nabla \Lambda \vec{A}(x, y, z) = 0 \quad (8)$$

边缘上各点矢势散度的横向分量为零,

$$\nabla \cdot (\vec{Z} \Lambda \vec{A}(x, y, z)) = 0 \quad (9)$$

体边界相切。通过与图象平面的法向单位矢量  $\vec{Z} = (0, 0, 1)^T$  叉乘, 边缘矢量被重定向与原始目标相切。位于图象平面点  $(x, y, 0)$  的电流矢量源定义为

$$\vec{j}(x, y, 0) = \vec{E} \Lambda \nabla G_\sigma * I(x, y) \quad (4)$$

电流源的各分量可更明确的表示为

$$\vec{j}(x, y, 0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial G_\sigma * I(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial G_\sigma * I(x, y)}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

根据电磁场理论, 与电流密度场对应的矢势场由体积分及按距离倒数加权求得。即位置点  $\vec{r} = (x, y, z)^T$  的矢势为

$$\vec{A}(x, y, z) = N \int_V \frac{\vec{j}(x', y', z')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' \quad (6)$$

式中,  $\vec{r}' = (x', y', z')$ ,  $N$  为导磁率, 实验中设定为 1。由于产生矢势的电流局限于图象平面, 体积分转换成图象平面的面积分, 故有

角点或称为边缘曲率极大点可视为边缘上与局部对称轴线相交, 且边缘方向急剧变化的点。用本文的表达方法, 角点对应于矢势图象中对称轴条件和边缘条件同时满足的点。也即角点为对称轴与边缘的交汇点。因此, 我们将致力于寻找这样的特征点, 在一个方向上, 矢势幅值有局部极大值, 而在其正交方向上有局部极小值, 满足该条件的点正是地形图中的鞍点。我们从以下标量场出发,

$$g(x, y, z) = |\vec{A}(x, y, z)| \quad (10)$$

矢势的微分结构可用二阶微分描述,  $g(x, y, z)$  的梯度  $\nabla g$  和 Hessian 矩阵  $H_g$  为

$$\nabla g = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix}, H_g = \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中  $g_x = \frac{\partial g(x, y, z)}{\partial x}, g_y = \frac{\partial g(x, y, z)}{\partial y},$   
 $g_{xx} = \frac{\partial^2 g(x, y, z)}{\partial x^2}, g_{xy} = \frac{\partial^2 g(x, y, z)}{\partial x \partial y},$   
 $g_{yy} = \frac{\partial^2 g(x, y, z)}{\partial y^2}$

高斯曲率  $H$  和平均曲率  $K$  可由梯度  $\nabla g$  和 Hessian 矩阵计算

$$H = \frac{g_{xx}g_{yy} - g_{xy}^2}{(1 + g_x^2 + g_y^2)^2} = \frac{\det(\nabla \nabla^T g)}{(1 + \|\nabla g\|^2)^2} \quad (12)$$

$$K = \frac{1}{2} \frac{(1 + g_y^2)g_{xx} + (1 + g_x^2)g_{yy} - 2g_x g_y g_{xy}}{(1 + g_x^2 + g_y^2)^{3/2}} = \frac{1}{2} \nabla \cdot \left( \frac{\nabla g}{\sqrt{1 + \|\nabla g\|^2}} \right) \quad (13)$$

其中  $\nabla$  是二维梯度算子,  $\nabla \nabla^T$  是 Hessian 矩阵算子,  $(\nabla \cdot)$  是散度算子。

平均曲率和高斯曲率的符号可用于对局部表面几何结构进行分类。鞍状结构特征可用  $H < 0$  描述。我们感兴趣的是边缘和对称轴线相交的点, 即鞍脊与鞍谷的交汇点。因此, 判定鞍点的条件为

$$(K \neq 0) \wedge (H < 0) \quad (14)$$

按照上述条件搜索鞍点, 克服了判定鞍点的一些困难, 如  $(K = 0) \wedge (H < 0)$  的情况。该情况较难处理, 因为所求特征在此不提供方向性约束。本文缓解了这一困难, 并通过模板搜索实现了角点的检测。

## 4 算法实现

通过上述讨论, 我们得到以下角点判定准则:

- (1) 在矢势方向上, 矢势的幅值存在一个局部极小值;
- (2) 在与矢势垂直方向上, 矢势的幅值存在一个局部极大值。

我们提出一种简单的模板卷积方法, 实现角点的定位。该模板对正交的极大和极小值测试, 采用非极大抑制和非极小抑制检测。模板测试的方向与矢势方向一致。

由于图象存在噪声和其它不完善因素, 用本文的鞍点模板检测方法检测出的角点并非全为真实角点。然而我们可利用矢势的方向一致性改进鞍点检测, 以得到更完善的结果。我们的改进方案基于如下事实, 即在角点处矢势的方向沿边缘线将产生急剧变化。矢势方向不发生急剧变化的鞍点并非角点, 可以删除。

为了删除非真实的仅有较小角度变化的鞍点, 我们采用下列门限化方案:

$$\left| \frac{\partial A_x}{\partial x} \right| \cdot \left| \frac{\partial A_y}{\partial y} \right| > T \quad (15)$$

换句话说, 只有当矢势方向在  $X$  和  $Y$  两个方向上皆发生急剧变化时, 才确认鞍为角点。门限  $T$  是本文角点检测算法中唯一的启发式参数。

## 5 实验和结论

在本节中, 我们将用实验证明本文角点检测算法的正确性。为了说明矢势表达方法的性质和角点检测方法, 我们使用英文字母  $E$  的图象进行实验。图 1 为原始图象。图 2 为矢势的幅值图。图 3 为矢势的方向矢量图。图 4 为检测的结果。图 1, 2, 3, 4 图上标明的十字点为角点。矢势的幅值在图 2 上表示为高度, 以突出其几何结构。



图 1 原始图象

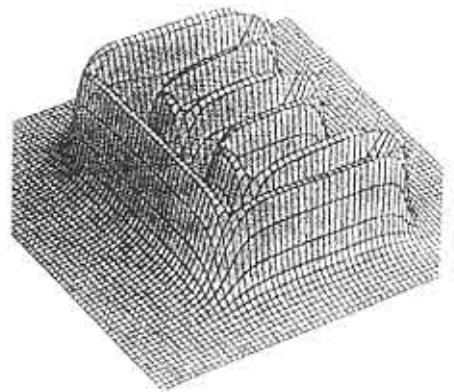


图 2 矢势的幅值

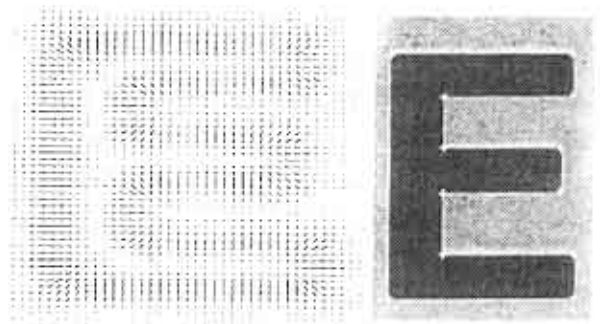


图 3 矢势的矢量图



图 4 角点检测结果

与角点相应的鞍点结构在图中清晰可见。边缘和对称轴线相应的鞍脊和鞍谷结构也很清晰。图3中,我们显示的是  $\vec{A}(x, y, 0)$  的矢量图。图中角点处矢势的方向发生急剧变化。

本文提出了一种新的角点检测方法。该方法对矢势的微分结构进行分析,矢势图象由原始图象的边缘映射图获得。按照我们的表达方法,角点是鞍脊和鞍谷的交汇点。文中提出了一种简单的模板角点检测方法。模板被置于与矢势同一方向以减小运算量。角点处矢势具有一个局部极小值,在与之相垂直的方向上有一个局部极大值。我们引入了一个角点检测的改进方案。该方案将矢势的  $x$  和  $y$  两个分量都发生方向急剧变化的鞍点判定为角点。

### 参考文献

- Costabile M F, Guerre C, Pieroni G. Matching shapes, a case study in time varying images. CVGIP, 1985, 29: 296~310.
- Han M H, Jang D. The use of maximum curvature points for the recognition of partially occluded objects. Pattern Recognition, 1990, 23: 21~33.
- Dreschler L, Nigel H. Volumetric model and 3D trajectory of a moving car derived from monocular TV-frame sequence of a street scene. Proceedings of IJCAI, 1992, 692~697.
- Xie X, Sudhakar R, Zhuang H. Corner detection by a cost minimization approach. Pattern Recognition, 1993, 26(8): 1235~1243.
- Freeman H, Davis L S. A corner finding algorithm for chain code curves, IEEE Trans. Comput., 1977, 26: 297~303.
- Beus H L, Tiu S S H. An improved corner detection algorithm based on chain-code plane-curves. Pattern Recognition, 1987, 20(20): 291~296.
- Koplowitz J, Plante S. Corner detection for chain coded curves. Pattern Recognition, 1995, 28(6): 843~852.
- Rosenfeld A, Johnston E. Angle detection on digital curves. IEEE Trans. Comput., 1973, 22: 875~878.
- Rosenfeld A, Weszka J S. An improved method of angle detection on digital curves. IEEE Trans. Comput., 1975, 24: 940~941.
- Liu H C, Srinath M D. Corner detection from chain-code. Pattern Recognition, 1990, 23(1-2): 51~68.
- Tsai D M. Boundary-based corner detection using neural networks. Pattern Recognition, 1997, 30: 85~97.
- Mehrotr R, Nichani S, Ranganathan N. Corner detection, Pattern Recognition, 1990, 23(11): 1223~1233.
- Rangarajan K, Shah M, Brackle D V. Optimal corner detection. CVGIP, 1989, 48: 230~245.
- Kitchen L, Rosenfeld A. Gray-level corner detection, Pattern Recognition Letters, 1982, 1: 95~102.
- Singh A. Gray level corner detection-A generalization and a robust real-time implementation. CVGIP, 1990, 51(1): 54~69.
- Deriche R, Giraudon G. A computational approach for corner and vertex detection, Int J. Comput. Vision, 1993, 10: 101~124.
- Canny J F. A computational approach to edge detection. IEEE Trans. PAMI, 1986, 8(6): 679~698.
- Cross A D, Hancock E R. Scale-space vector field for feature analysis. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juanm Puerto Rico, IEEE Computer Society, 1997: 738~743.



罗斌 安徽大学电子工程与信息科学系副教授,现从事信号与信息处理专业的教学和科研工作。主要研究方向是计算机视觉、医学图象和工业图象处理与分析、计算机图形学和模式识别。在学术刊物上发表论文 28 篇。

## Corner Detection Using Vector Potential

Luo Bin

E. R. Hancock

(Anhui University, Hefei 230039)

(York University, UK)

**Abstract** This paper present a new corner detection method. Image features are represented using the theory of electromagnetics. Corners are detected in the vector potential of the field. Canny edge map is used as elementary current density to create electromagnetic field. The vector potential of the field is calculated. We observed that corners are the saddle points in the vector potential. The saddle point detection algorithm is based on a simple template matching. The corner detection result is given.

**Keywords** Corner detection, Vector potential, Differential operator