

一种基于 Euler Spiral 的缺失边界修复算法*

邵晓芳 孙即祥 梁光明 黄 英

(国防科技大学 电子科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

摘 要 在总结分析相关工作的基础上,提出了一种基于 Euler Spiral 修复认知轮廓中缺失边界的算法。该算法首先通过活动轮廓模型进行认知轮廓的初始定位,将视觉的预测性插值问题转化为中间插值问题,然后结合取向估计和 Euler Spiral 修复缺失的轮廓边界,取代了活动轮廓模型的迭代优化过程。对典型认知轮廓图形和遥感图像的实验结果验证了算法的有效性。

关键词 Euler Spiral 活动轮廓模型 轮廓提取

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Euler Spiral for Contour Completion

SHAO Xiao-fang, SUN Ji-xiang, LIANG Guang-ming, HUANG Ying

(College of Electrical Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract This paper proposes an algorithm based on Euler Spiral to complete the missing boundary in illusory contour. By this method, an active contour model is first initialized and extended turning the predictive visual interpolation one to a pure interpolation problem; then orientation estimation and Euler Spiral are combined to complete the missing boundary. The experimental results on illusory contour figures and a remote sensing image show the efficiency of the algorithm.

Key words Euler spiral; active contour model; contour extraction

认知轮廓现象是一种重要的视觉心理现象。目前,认知轮廓作为一种理解轮廓知觉、形状知觉和深度知觉的重要线索,已经越来越引起人们的兴趣。认知轮廓现象和原理在现代利用计算机进行图像的场景分析和机器人视觉中已经得到广泛的应用。感知修复能力是人类视觉中最惊人的特性之一,怎样使计算机视觉具有这种能力一直是一个难题。对认知轮廓的研究,必将促进计算机视觉中这一难题的解决,同时对揭示人脑的认知规律将是一项非常有意义的工作。本文将主要结合计算机视觉的相关模型和研究方法,在总结分析相关工作的基础上,提出一种基于 Euler Spiral 修复认知轮廓中缺失边界的算法。

1 相关工作

1904 年 Schumann 首次描述了认知轮廓现象之后,1955 年 Kanizsa 提出了最著名的例证——Kanizsa 三角。此后,生理学、心理学以及计算机视觉等领域的许多学者都对这一现象进行了研究。计算机视觉界的研究将问题转化为轮廓提取问题,主要有基于神经网络模型的方法^[1]、张量投票法^[2]、基于随机修复场模型的方法^[3]、基于物理的引力场模型的方法^[4]、基于水平集的方法^[5]、频域滤波法^[6]、形状匹配法^[7]等。

总体说来,除了频域滤波法和形状匹配法以外,其余的算法的基本思想都是将认知轮廓的提取转化为对以切线角和曲率为特征的边缘的平滑连接。早期的算法大都基于神经网络模型,算法比较复杂,而且收敛性和输出难于分析,张量投票法无需迭代,可以同时处理直线和曲线,但是对于比较长的缺失边界修复效果不够理想,随机修复场模型忽略了一些像图像预处理这样的基本问题,并且没有考虑认知轮

* 收稿日期 2005-03-16
作者简介 邵晓芳(1977—),女,博士生。

廓所具有的内部区域一致特性、封闭性等等,而引力场模型的算法普适性比较差;基于水平集的方法把问题转化为在三维空间中提取曲面边界,计算复杂度很高;频域滤波法针对频域考虑认知轮廓问题,认为认知轮廓是“客观存在”的轮廓,只不过省略了一些冗余信息而已,但是这种方法和基于神经网络的方法有相似的缺点;形状匹配方法的最大缺陷是将轮廓的形状信息假定为已知条件,逃避了问题的“认知”过程,而这一“认知”过程正是问题的难点和实质所在。

2 基于 Euler Spiral 的缺失边界修复算法

基于 Euler Spiral 的缺失边界修复算法的主要思想是首先利用活动轮廓^[8]的可变形性和封闭性,通过图像中的局部边缘信息,结合区域特征控制模型逼近图像中的认知轮廓,然后采用正交滤波^[9]的方法对边缘图进行取向估计,最后根据取向估计结果通过 Euler Spiral 修复缺失的轮廓边界,具体步骤如下:

Step 1 模型的初始化:对图像进行边缘提取,并根据边缘分布计算出图像的几何中心,以此几何中心为圆心,以一个较小的半径 r 初始化“活动轮廓”为一个圆;

Step 2 模型的扩张:根据外能沿径向扩张活动轮廓模型;

Step 3 取向估计:根据图像的边缘图得出各点的取向估计;

Step 4 边界修复:根据取向估计结果在模型的相邻收敛点之间应用 Euler Spiral 修复缺失的边界。

下面重点介绍模型的扩张和基于 Euler Spiral 修复缺失边界。

2.1 模型的扩张

设边缘提取后的图像为 $I(x, y)$,活动轮廓模型的轮廓曲线为 $\alpha(s) = \{(\alpha(i), \beta(i)) \mid i = 1, \dots, n\}$, s 为弧长, n 为活动轮廓模型轮廓线初始点的个数。模型的外部能量 E_{ext} 主要是使模型逼近图像边缘,因而模型在外能作用下的扩张速度与边缘点的位置有关,这里取为边缘点的标志函数。

取边缘点的标志函数为

$$edge(x, y) = \frac{1}{1 + (|\nabla G_\sigma(x, y) * I(x, y)|)^2} \quad (1)$$

式中, $G_\sigma(\xi) = \exp[-(\xi/\sigma)^2] / (\sigma\sqrt{\pi})$, σ 为尺度参数,显然,灰度梯度越大的点, $edge(x, y)$ 越小,在边缘处近似为零。

模型扩张的速度与各点 (x, y) 相应的 $edge(x, y)$ 的值有关,在待提取的轮廓内部,各初始点以较快的速度一致地向边缘扩张,在边缘处各点的扩张速度趋近于零。在算法实现过程中,当出现扩张速度近似于零的点时,其它点的速度也会受到限制。同时为了避免多个初始点收敛到一点的情况,实验中还限制了点扩张的方向,各点均沿其径向进行扩张。

2.2 基于 Euler Spiral 修复缺失边界

通过活动轮廓模型的初始定位和取向估计,问题被转化为:给定点对 $A(x_0, y_0), C(x_2, y_2)$,以及它们相应的切矢量 $T_0(\cos\theta_0, \sin\theta_0), T_2(\cos\theta_2, \sin\theta_2)$,目标是找到连接两点的能量最小曲线,该曲线满足在 A, C 两点的边界条件。

满足这些约束条件的 Euler Spiral 就是以“曲率变化和最小”为能量最小原则进行两点之间的平滑连接,在这里我们通过求解满足 Euler Spiral 的曲线来修复缺失的边界,使整个轮廓模型满足 E_{int} 最小。

$$E_{int} = \int k_s^2 ds \quad (2)$$

式中, $k_s = dk(s)/ds$, s 代表弧长,而 $k(s)$ 为曲线的曲率函数,因而 k_s 为曲线的曲率变化函数。

Euler Spiral 方程的一般形式^[10]:

$$\begin{bmatrix} \alpha(s) \\ \beta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{|\gamma|}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 - \frac{k_0^2}{2\gamma}) - \sin(\theta_0 - \frac{k_0^2}{2\gamma}) \\ \sin(\theta_0 - \frac{k_0^2}{2\gamma}) - \cos(\theta_0 - \frac{k_0^2}{2\gamma}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\gamma) \left[C\left(\frac{k_0 + \gamma s}{\sqrt{\pi|\gamma|}}\right) - C\left(\frac{k_0}{\sqrt{\pi|\gamma|}}\right) \right] \\ S\left(\frac{k_0 + \gamma s}{\sqrt{\pi|\gamma|}}\right) - S\left(\frac{k_0}{\sqrt{\pi|\gamma|}}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, $k(s) = \gamma s + k_0$, 为曲率函数,其中 k_0 为初始点曲率, s 为弧长, γ 为曲率沿弧长的变化系

数。

$$\alpha(s) = \int_0^s \cos\left(\frac{\pi}{2} \xi^2\right) d\xi, \quad S(s) = \int_0^s \sin\left(\frac{\pi}{2} \xi^2\right) d\xi \quad (4)$$

这里, 我们已知点对的位置和取向信息, k_0, k_2 (方向角的变化) 也可以根据取向估计求出, 只要求得 γ, L (L 为总的弧长), 就可以获得 Euler 曲线的完整描述, 于是问题转化为解方程:

$$\begin{cases} k_2 = \gamma L + k_0 \\ \theta_2 = \frac{1}{2} \gamma L^2 + k_0 + \theta_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L = 2 \frac{\theta_2 - \theta_0}{k_2 + k_0} \\ \gamma = \frac{k_2^2 - k_0^2}{2(\theta_2 - \theta_0)} \end{cases} \quad (5)$$

根据认知轮廓的特点, 轮廓线一般由直线或圆弧组成, 因此插值所得的轮廓线或者是 $\gamma = \alpha$ (圆弧), 或者是 $k_0 = \alpha$ (直线)。上述计算过程可以根据边界条件得到进一步的简化。

3 实验结果

在 CPU P4 1.0G、256M DDR 的计算机配置以及 Windows2000 操作平台上, 通过使用 Matlab 6.5 编程进行了四组实验, 运行时间分别为 33.26s、26.72s、20.32s 和 85.25s。各组实验结果如图 1~4 所示, 各图中 (a) 为原始图像、(b) 为模型初始化的结果、(c) 为模型扩张的结果、(d) 为轮廓插值后的最终结果。

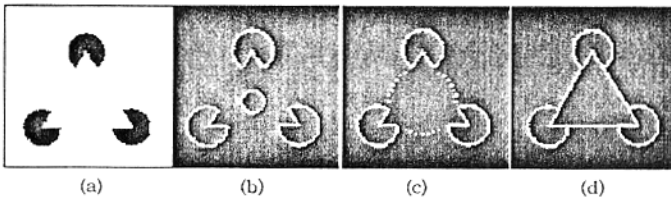


图 1 Kanizsa 三角的实验结果

Fig.1 Experimental results on Kanizsa triangle

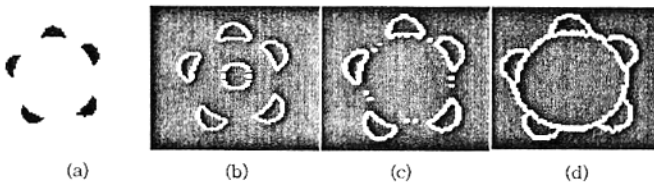


图 2 SubjectiveCircle 的实验结果

Fig.2 Experimental results on SubjectiveCircle

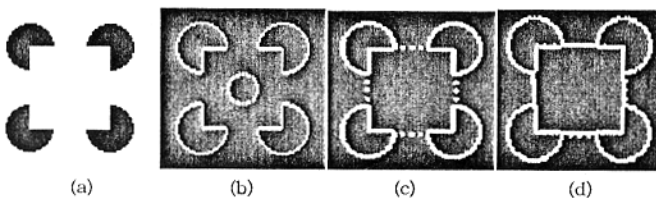


图 3 Kanizsa 矩形的实验结果

Fig.3 Experimental results on Kanizsa rectangle

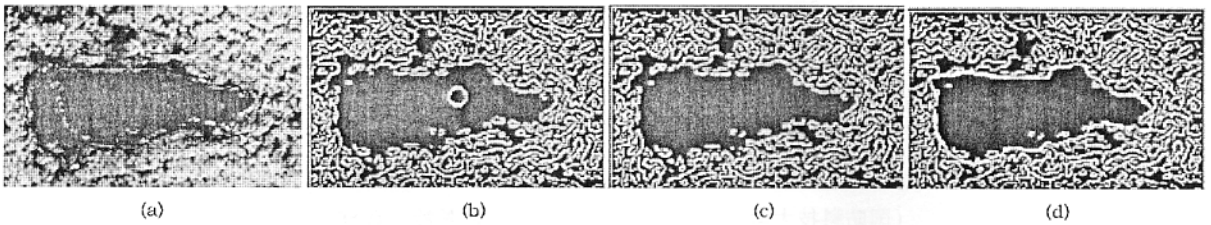


图 4 对遥感湖泊图像的实验结果

Fig.4 Experimental results on remote sensing image of a lake

上述实验中前三组的图形都是认知轮廓的研究者提出的典型例子,图 4 是对遥感湖泊图像的处理结果,可以看到算法取得了比较好的效果。

4 结束语

在总结相关工作的基础上,提出了一种提取认知轮廓的算法。该算法结构完整,实现相对简单,充分考虑了认知轮廓所具有的内部区域一致性、封闭性等特征,克服了前面分析的相关工作中存在的不足。但是,由于初始点定位采用边缘点的中心矩进行,没有克服活动轮廓模型在初始化问题上的缺陷,无法处理无规则几何中心的图形和一幅图像中有多个认知轮廓的情况,这将是我们下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] Shashua A , Ullman S. Structural Saliency :The Detection of Globally Salient Structures Using a Locally Connected Network[A]. 2nd intl. Conf. on Computer Visior[C], Clearwater , FL , 321 - 327 ,1988.
- [2] Guy G , Medioni G. Inferring Global Perceptual Contours from Local Features[J]. International Journal of Computer Vision ,1996 ,20 :113 - 133.
- [3] Khomber K , Williams L R. Analytic Solution of Stochastic Completion Fields [M]. NEC Research Institute 4 Independence Way ,Princeton , Nj08540.
- [4] 刘海鹰 ,黄胜华 ,洪继光. 一种新的被遮挡的光滑边界与错觉轮廓的感知修复模型[J].自动化学报 ,1999 ,25(15) :598 ~ 605.
- [5] Sarti A , Malladiv R ,Sethian J A. Subjective Surfaces : A Method for Completing Missing Boundaries[A]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America[C] ,2000 ,1X(97) : 6258 - 6263.
- [6] Radriguez-sanchez R. A Constraint of Invariance in Integral Features across Frequency Bands Produces Illusory Percepts[EB]. <http://citeseer.ist.psu.edu/220568.html> , DECSAI - 98 - 03 - 15.
- [7] Zhu W ,Chan T. Illusory Contours Using Shape Information[R]. UCLA CAM Report , <http://www.math.ucla.edu/applied/cam/index.html> , 2003 03 - 09.
- [8] 夏利民 ,谷士文 ,罗大庸 ,等. 基于活动轮廓的机器人视觉伺服控制[J].国防科技大学学报 ,2000 ,2X(1) :60 - 64.
- [9] Mumford D. Elastica and Computer Visior[A]. In C. L. Bajaj , editor , Algebraic Geometry and its applications[C] ,Springer-Verlag , New York , 1994 :491 - 506.
- [10] Fameback G. Orientation Estimation Based on Weighted Projection onto Quadratic Polynomials[A]. In :Vision , Modeling , and Visualization[C] , 2000 89 - 96.

