

# 基于边缘几何特征的图像精确匹配方法

聂 1) 赵荣椿<sup>1)</sup> 康宝生<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> { 西北工业大学计算机学院 西安 710072 }

<sup>2)</sup> { 西北大学计算机科学系 西安 710069 }

**摘 要** 提出一组快速高精度计算切线斜率的五点公式,用以估计图像边缘曲线的角度特征,并利用角度直方图估计图像几何变换的旋转参数,实现具有大旋转差异图像间的粗匹配.在进行角度补偿后,利用灰度互相关判据搜索匹配点对,计算出几何变换参数,实现较高精度的旋转和平移校正,最后用松弛迭代法完成图像的精确匹配.与基于小波方向角特征的匹配方法相比,文中方法利用图像中主要的边缘信息实施匹配,具有较好的鲁棒性,可成功实现对各类具有较大相关程度图像间的精确匹配,对图形匹配也具有重要意义.

**关键词** 图像匹配;边缘特征;角度直方图;松弛迭代法

中图法分类号 TP391

## A Precise Image Registration Method by Utilizing the Geometric Feature of Edges

Nie Xuan<sup>1)</sup> Zhao Rongchun<sup>1)</sup> Kang Baosheng<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> { College of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 }

<sup>2)</sup> { Department of Computer Science, Northwest University, Xi'an 710069 }

**Abstract** In this paper, a new image registration algorithm is proposed to perfectly address the problem caused by rotation between images. Our algorithm is based on the observation that the geometric features at the edge of an image can provide important information for the image registration. The main novelty of the algorithm is in proposal of a fast high-precision formula being applied to calculate the tangent angles of any point at the edges, and these angles are used as robust features to estimate the approximate rotation angle between two images. By the approach, we first detect the edge of the original images for a set of feature points, calculate their tangent angle with our new formula and then use the statistical differences of the tangent angles of all feature points within two images to estimate the rotation parameters of the geometric transform. Finally, a step of coarse-to-fine image registration is performed based on the correlation criterion. Experimental results in various types of images have been provided to verify the accuracy of our automatic registration algorithm.

**Key words** image registration; edge feature; angle histogram; correlation criteria

## 1 引 言

图像匹配是图像分析与计算机视觉中的关键技术之一,在图像镶嵌、模式识别、地理信息处理、医学图像分析等领域都有重要的应用.图像匹配是指在

包含有共同目标的两幅图像间依据目标信息对正两图,在同一场景的一对图像间建立视觉相关的过程.待匹配图像间存在的几何平移和旋转变换是匹配算法需解决的问题.目前,图像间大的旋转差异是造成难以自动精确匹配的主要困难.解决该问题较常用的做法是利用人工指定控制点进行匹配<sup>[1-2]</sup>,该方

法虽然可以实现大角度变换关系的校准,但无法做到自动完成,发挥不了机器视觉的优势.另外,Lay等<sup>[3]</sup>提出使用小波变换求角度直方图的方法对旋转角度自动校正,但是小波方向角的求取易受噪声干扰,不能得到稳定的匹配效果.本文提出采用数值微分五点公式,求出曲线切线的斜率进而得到其倾角,作为对边缘曲线特征的描述,再借助角度直方图估计旋转角度,从而完成图像间几何变换的粗校正.在此基础上,使用灰度相关的方法搜索匹配点对,进而求解几何变换参数达到较精确的匹配,最终用松弛迭代法完成精确匹配.利用数值微分五点公式计算曲线切线的斜率,不仅运算量小,且具有较高精度和稳定性.本文算法无需人工干预,是一种完全自动的图像匹配方法.

2 图像边缘曲线的提取

边缘是图像基本特征之一,是图像中两个具有不同灰度的均匀区域的边界,它反映灰度的突变.图像边缘可用其切线方向、法线方向、位置和强度等信息描述.由于边缘是图像的信息丰富区域,且较少随图像的几何变换而丢失或改变,因此边缘检测在图像匹配中具有重要的意义.图 1 所示为图像旋转前后边缘的状况.



图 1 图像边缘的主要信息不随图像的旋转而改变

为了计算图像的边缘曲线上各点切线的倾角,要求获得的边缘曲线满足两个必要条件:大边缘应

该具有较好的连贯性,大边缘应为单像素宽.我们对目前应用领域中已有的信息测度算子、Sobel、Roberts、Laplace 和小波算子等多种边缘提取算子进行了实测比较分析,认为应用 Canny 算子提取的边缘线能较好地满足这两点要求. Canny 算子的主要特点是通过调节一个尺度参数  $\sigma$  的值,即可得到任意细致程度下的边缘信息,对图像的大边缘而言,可获得非常连贯的曲线.二维 Canny 算子首先用高斯滤波器平滑图像,然后使用差分模板近似计算梯度值和方向,再在梯度方向上确定局部极大模点,用双门限法去除噪声并保留边缘点,最后进行插值将边缘点连接起来以形成连贯的曲线<sup>[4]</sup>.对图像应用 Canny 算子运算,可直接获得单像素宽的图像边缘连贯曲线.图 2 所示为对两例图像分别运用 Canny 算子和其他算子获得的图像边缘.

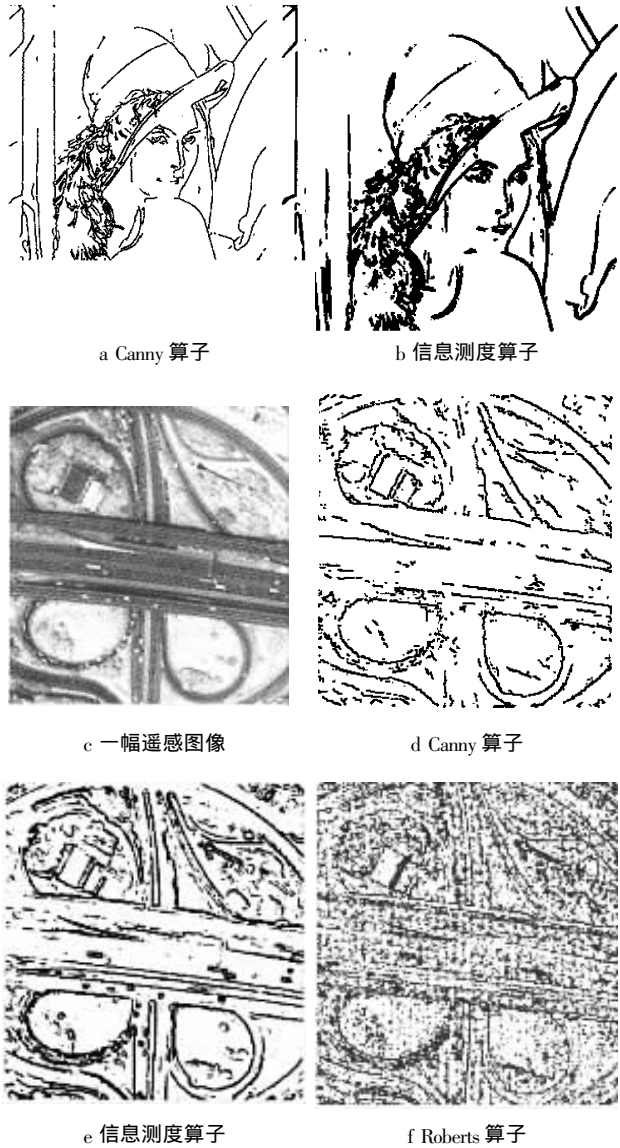


图 2 Canny 算子与其他算子的边缘检测效果比较

从图 2 中可以看出, Canny 算子获得的图像的大边缘呈现为连贯的曲线, 信息测度算子虽然也可获得明显的边缘, 但却不是单像素宽. 本文提出的图像匹配算法是在直接采用 Canny 算子提取边缘曲线的基础上构造的.

### 3 边缘曲线的切线斜率的计算

对于图像中边缘曲线切线斜率的计算, 因不知道曲线的函数表达式, 所以不能使用对连续函数求导数的方法. 有人提出使用三次样条插值对数据进行拟合后再处理, 但该方法一般要经过求取曲线的解析表达式、求导、代入计算等几个步骤, 这样做工作量较大且不一定是必要的. 本文分别利用牛顿向前插值公式、牛顿向后插值公式和适用于中间点插值的斯蒂林公式<sup>[5]</sup>, 推导出了一组数值微分五点公式, 用来计算曲线切线的斜率, 这组公式计算简单快捷, 且可较精确估计其误差. 大量实验结果表明, 本文方法计算出的斜率非常接近精确值. 本文建立的五点公式如下:

左端点公式为

$$f'(x_0) = \frac{1}{12h} \{ -25f(x_0) + 48f(x_0 + h) - 36f(x_0 + 2h) + 16f(x_0 + 3h) - 3f(x_0 + 4h) \} + \frac{h^4}{5} f^{(5)}(\xi) \quad (1)$$

右端点公式为

$$f'(x_0) = \frac{1}{12h} \{ 25f(x_0) - 48f(x_0 - h) + 36f(x_0 - 2h) - 16f(x_0 - 3h) + 3f(x_0 - 4h) \} + \frac{h^4}{5} f^{(5)}(\xi) \quad (2)$$

中间点公式为

$$f'(x_0) = \frac{1}{12h} \{ f(x_0 - 2h) - 8f(x_0 - h) + 8f(x_0 + h) - f(x_0 + 2h) \} + \frac{h^4}{30} f^{(5)}(\xi) \quad (3)$$

应用式(1)~(3)可分别求出一条曲线左端点、右端点和中间点处切线的斜率. 它们分别利用待计算点右侧、左侧和两侧点的纵坐标值代入计算, 这里对点的选取是等间距的,  $h$  为两点间的间距. 式(1)~(3)中最后一项为误差项, 表明可能的误差是  $h$  的四阶无穷小, 即五点公式是具有四阶精度的计算方法, 只要  $h$  取得充分小, 就可保证足够的计算精度. 其中, 式(3)的计算量最小精度最好. 因此, 对于

曲线上大多数点可应用式(3)计算斜率. 在非封闭曲线端点的附近, 其某一侧的数据无法得到, 这时可分别利用式(1)~(2). 通过对前面求得的边缘上每一点分别使用式(1)~(3), 则可获得通过这些点处切线斜率的近似值, 进而获得这些切线的倾角角度.

### 4 角度直方图分析对旋转关系的粗校正

设由待匹配图像  $f_1$  和  $f_2$  得到的边缘点集合分别为  $Pf_1 = \{p_i = p_i(x, y), i = 1, 2, \dots, N_{f_1}\}$  和  $Pf_2 = \{q_j = q_j(x, y), j = 1, 2, \dots, N_{f_2}\}$ . 其中,  $N_{f_1}$  和  $N_{f_2}$  分别是  $f_1$  和  $f_2$  中边缘曲线上点的个数, 可通过五点公式分别求得两幅待匹配图像中这些边缘点处切线的倾角. 设  $A(u)$  为过边缘点  $u$  的切线倾角,  $Pf_1$  中的点  $p_i$  与  $Pf_2$  中的点  $q_j$  切线角度之差表示为  $\theta_{i,j} = A(q_j) - A(p_i)$ , 得到  $\theta_{i,j}$  后取整, 并使其变化范围在  $0^\circ \sim 359^\circ$  之间. 对  $\theta_{i,j}$  作出直方图, 可以认为最大峰值处  $\theta$  值为这两幅图像发生旋转的角度<sup>[6]</sup>. 这是由于相匹配点对切线的角度差  $\theta_{k,l}$  一定是两图像间旋转角度的近似值, 所有由匹配点对计算出的倾角差将会集中于  $\theta_{k,l}$  附近, 而非匹配点的切线角度差随机落在  $0^\circ \sim 359^\circ$  之间. 因此, 角度直方图中  $\theta_{k,l}$  附近将出现峰值, 由该峰值处的角度可近似估计得到两图像间的旋转角度. 该方法的优点在于对两图像间的旋转角度的估计来自所有边缘点共同表决的结果, 边缘提取时产生的少量误差将不会改变表决结果, 具有很强的鲁棒性. 为了更好地获得两幅图像旋转角度, 使它们接近真实的估计值, 我们利用第 1 节中提取到的大边缘曲线, 阻止零散琐碎的小边缘参加对角度直方图的贡献. 这是因为大的边缘信息不会随图像的旋转而轻易改变, 琐碎的小边缘则不能保证稳定的不变性. 显然, 建立角度直方图时应该利用对得到正确的角度估计有益的信息. 为此, 可通过设立阈值将所获得的边缘曲线分为大边缘和小边缘, 使本节的处理过程仅对大边缘曲线进行.

应该指出的是, 利用角度直方图估计两图像间旋转角度的近似值, 其前提是两幅图像应该有足够的相关性, 即公共区域部分较大. 当两幅待匹配图像的相关区域很小时, 利用直方图估计相似的前提不存在, 本文方法将可能失效. 但在很多重要的应用领域, 常见的如遥感图像、医学图像等)一般都具有较大的相关区域, 本文方法都是适用的. 否则, 通

过先对原图像做一定的人工预处理,再在两幅图像中划定的相关局部区域进行直方图估计,仍然可以应用本文算法。

5 基于互相关判据的点匹配

为了达到图像间的匹配,首先要确定几组相匹配的点,本文借助灰度互相关匹配判据来确定这样的点。数字图像可看作是一个二维灰度分布函数,而灰度相关匹配则是在某个待匹配图像上选择一个模板窗口,并从目标图像中寻找与其最相似的对应窗口。对于存在着较小旋转误差的两幅图像,用该方法可较准确地得到存在的匹配点。由于前面已经应用角度直方图的统计分析对待匹配图像做了旋转关系的粗校正,从而为使用基于互相关的点匹配法提供了充分条件。目前,人们已提出很多用于计算图像相关性的判据,通过实验比较我们认为,采用式(4)所示的分窗口归一化相关判据<sup>[7]</sup>可以很好地找到匹配点。先在参考图上选取以待匹配点  $t$  为中心的模板  $T(M \times M)$ ,对目标图像  $S$  进行移动窗搜索并计算在每一点  $(i, j)$  处的相关值  $R(i, j)$ 。 $R(i, j)$  出现最大值时的位置  $(i, j)$  就是与  $t$  相匹配点的所在位置。

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^i_j(m, n) \times T(m, n)}{\left( \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^i_j(m, n)]^2} \right) \left( \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [T(m, n)]^2} \right)} \quad (4)$$

6 几何变换关系模型的建立与参数的求解

我们通过已经获得的匹配点对,计算两幅待匹配图像间的旋转与平移变换参数。图像的几何变换关系可通过如下的变换模型给定

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

规定只按某一个方向旋转,通过互相关判据获得两组匹配点对,可惟一地确定待匹配图像间的几何变换关系。由于经过粗旋转校正已经使两幅图像的旋转误差  $\theta$  很小,因此依据式(5)可得到变换参数的近似计算式为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \\ \theta &= \arcsin \left[ \left( \frac{x_1 - x_0}{x'_1 - x'_0} - \frac{y_1 - y_0}{y'_1 - y'_0} \right) / \left( \frac{y'_1 - y'_0}{x'_1 - x'_0} - \frac{-x'_1 + x'_0}{y'_1 - y'_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$  和  $(x'_0, y'_0)$ 、 $(x'_1, y'_1)$  分别为两组匹配点对的坐标。式(5) (6)中,  $\theta$  为两图像的旋转误差,  $t_x$  和  $t_y$  为它们的平移误差。

7 图像的精确匹配

利用第6节计算得来的几何变换参数,对待匹配图像做相应的旋转和平移变换,将获得接近于匹配的结果。事实上,在我们所做测试中的很多情况下,这时已经获得很高的匹配精度。最后,我们借助松弛迭代法来实现两幅图像完全匹配,建立匹配率评价函数为

$$M = M_x + M_y \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{1}{\sum_{i=1}^N [f_1(x_i, y_i) - f_2(x_i + d_x, y_i)]^2}, \\ M_y &= \frac{1}{\sum_{i=1}^N [f_1(x_i, y_i) - f_2(x_i, y_i + d_y)]^2}. \end{aligned}$$

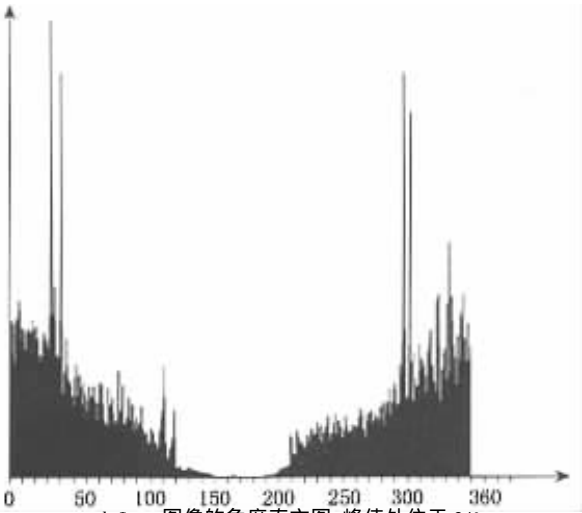
在经过旋转和平移校正的结果图上随机抽取  $N$  对匹配点对,通过式(7)计算匹配率  $M$ ,逐渐增大或减小某一幅图像坐标的  $x$  和  $y$  值并对比  $M$  值的改变。当正确调整  $x$  和  $y$  时  $M$  增大,这时应该继续对  $x$  和  $y$  向原方向调整;否则,向反方向调整。不断地进行该迭代过程,经过一定次数的迭代,将取得  $M$  的极大值。此时对  $x$  和  $y$  的调整结束,并最终使图像精确匹配。

8 实验结果

我们利用 Visual C++ 6.0 实现了本文算法,通过选取若干幅图像进行测试,均能很好匹配,结果令人满意。图3~5所示为部分实验的结果。其中,图3b所示为对 Lena 图像用角度直方图的统计结果,可以看出,角度的估计值与真实值只相差  $2^\circ$ ,且峰值非常突出。图3c所示为匹配效果,从视觉效果上几乎难以找到错位的痕迹。图3d所示为匹配后的差影,从分别位于两原图中 Lena 肩臂轮廓的相交部位可清楚地看到,它们对得非常整齐。



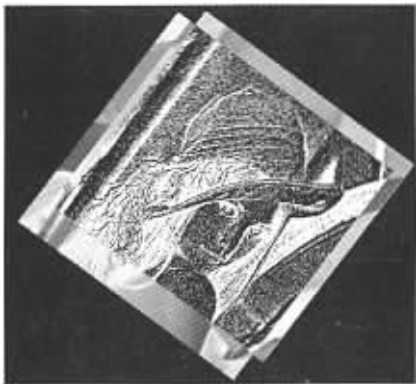
a 两幅旋转差为 36°的 Lena 图像



b Lena 图像的角度直方图 峰值处位于 34°



c Lena 图像的匹配结果



d 两幅图像的差影效果

图 3 对 Lena 图像的匹配效果分析

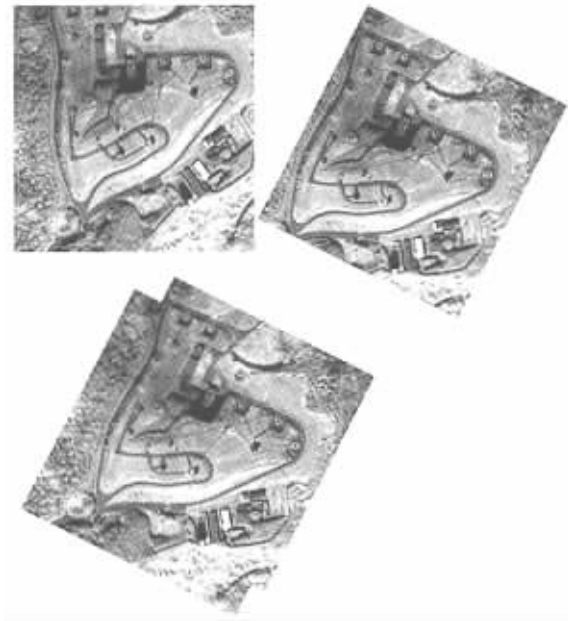


图 4 一幅航拍图像的匹配结果



图 5 一幅卫星遥感图像的匹配结果

表 1 所示为在对 Lena 图像分别旋转不同角度后 利用五点公式和角度直方图计算的一组旋转误差估计值与真实值间的对比.

表 1 一组估计值与真实值的比较 (°)

真实值	估计值	真实值	估计值
36	34	140	135
50	55	160	157
80	76	180	180
100	93	200	198
120	114	250	243
130	133	270	261

9 结 论

本文算法使用性能较优且应用广泛的 Canny 算子提取图像的边缘线,利用数值微分五点公式求取边缘切线的角度,进行两幅待匹配图的旋转粗校正,再通过基于互相关的点匹配方法较准确地选定两对匹配点,进而求解旋转平移的几何关系方程,最后应用松弛迭代法加以修正得到精确的匹配结果.本文方法对于具有较大相关程度的两幅图像,不论是遥感图像、医学图像、自然景物图像等各种不同类型的图像,都能获得理想的匹配效果.此外,五点公式结合角度直方图还可适用于对强相关的二维图形间的旋转校正.对于重合区域较小的待匹配图像,应用本文方法时需要通过人工处理等手段使其在相关的局部区域内进行.本文选取的特征来源于对整幅图像大边缘的统计信息,不因少量个体的误差而影响其结果,具有较强的鲁棒性,这一点优于文献[3].本文方法的整个过程不需要人工干预,也不需要已知控制点,因而优于文献[1-2]的方法,具有较大的

应用价值.

参 考 文 献

[1] Pala V, Pons X. Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1995, 61(7): 935 ~ 944

[2] Huseby R B, Halck O M, Solberg R, A model-based approach for geometrical correction of optical satellite images[A]. In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99, IEEE 1999 International, Hamburg, 1999, 1: 330 ~ 332

[3] Lay K, Kong L. Fusion and restoration of images from their registration based on wavelet-derived gradient computation[A]. In: Proceedings of SPIE, Beijing, 1998, 3561: 52

[4] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679 ~ 698

[5] Richard L, Burden J. Douglas Faires. Numerical Analysis[M]. 7th ed. California: Brooks/Cole, Pacific Grove, 2001

[6] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis and Machine Vision[M]. London: Chapman & Hall Computing, 1994

[7] Niblack W. An Introduction to Digital Image Processing[M]. London: Prentice-Hall, 1986