

文章编号:1672-6987(2011)04-0435-06

# 基于局部灰度值编码的图像匹配

冯宇平, 赵文仓

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266042)

**摘 要:** 提出了结合图像局部灰度值编码匹配和相位相关进行图像模板匹配的新方法, 解决了相关匹配等传统算法计算量大和已有的分块编码匹配方法因块对齐使特征比较及结果处理过程复杂的问题。匹配过程分为粗匹配和精匹配。粗匹配将模板和搜索图进行 R-块划分, 根据每个 R-块与相邻 R-块灰度值的分布关系进行编码, 然后将模板在搜索图上按照步长遍历, 同时对编码值进行匹配, 得到初始匹配参数。接着根据初始匹配量用相位相关法进行精确匹配。实验表明, 新算法抗像素灰度变化, 对噪声和小角度旋转具有稳定性, 其算法的时间复杂度是  $O(M^2)$ , 比传统的归一化互相关算法快了 2 个数量级, 与现有的分块编码方法相比速度也提高了 2 倍。因加入了精匹配, 增强了算法的稳健性, 提高了匹配定位的精度。

**关键词:** 模板匹配; 相似性度量; 相位相关; 时间复杂度

**中图分类号:** TP 391      **文献标志码:** A

## Image Matching Based on Local Gray Value Coding

FENG Yu-ping, ZHAO Wen-cang

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** A new template matching method combining local gray value encoding matching and phase correlation is presented. The algorithm has solved the problems of large amount of calculation about the relevant matching and the complex processing caused by block alignment about existing sub-block coding matching. Matching process is divided into rough matching and fine matching. Rough matching divides the template and search image into certain size blocks called R-block, encodes the R-block according to the gray value distribution of R-block with the adjacent R-block, and matches to get the initial match parameters. Then, fine matching is finished according to the initial match. Experiments demonstrate that the new algorithm is robust to the linear transformation of pixel grey value and is stable with noise and small angle rotation. The time complexity of the proposed method is . The new algorithm is faster than traditional NCC algorithm by two orders of magnitude, and with the existing sub-block coding method has increased the speed twice. Matching precision is enhanced because of fine matching.

**Key words:** template matching; similarity measure; phase correlation; time complexity

在机器识别事物的过程中, 经常需要将已知      图像与陌生图像的全部或者部分在空间上进行配

收稿日期: 2011-04-27

作者简介: 冯宇平(1982—), 女, 博士。

准。根据已知模式的图像(模板)在另一幅陌生图像(搜索图)中寻找对应该模式的子图像的过程叫做图像匹配。图像匹配技术有着广泛的应用领域,45%的机器视觉应用需要用到它,并已在工业自动监控、资源分析、医疗诊断、航空航天测量、景象匹配制导、光学和雷达跟踪、运动估计及视频压缩等领域中都得到了应用。因此,对图像匹配技术的研究具有深远的现实意义。

图像模板匹配是计算机图像分析中最常用的方法,许多学者已提出了各种各样的算法,主要可以分为<sup>[1-4]</sup>基于像素灰度的匹配方法和基于图像特征的匹配方法。基于像素灰度的方法<sup>[5-6]</sup>,一般是进行两幅图像间的灰度比较,用一些计算量来表征图像间的灰度差异。基于特征提取的方法<sup>[7-10]</sup>根据提取的不同特征作为相似性度量进行匹配。特征提取方法计算代价通常较大,并且需要一些自由参数和经验阈值,实现比较复杂,不同情况下提取的特征也不同,但是抗干扰能力比较强。像素灰度法简单易行,抗噪声效果比较好,经常用在图像差异较小、帧间图像变化的场合(数字稳像、目标跟踪等),在图像匹配中占有重要地位。

传统的灰度算法匹配都是直接基于像素灰度值的,虽然可以采用加速算法,匹配速度相对还是比较慢,而文献<sup>[5]</sup>采用了一种像素灰度值编码匹配的方法,使速度明显改善,但其为了解决  $R$ -块的对齐问题,需要进行模板裁剪、边缘检测滤波等特征比较及结果处理等复杂过程。因此,本研究提出了一种基于像素灰度值编码进行图像匹配的新方法。该方法利用文献<sup>[5]</sup>中对图像进行分块编码的方法,但是无需考虑  $R$ -块的对齐问题,粗细结合匹配使算法的速度进一步提高,同时具有很好的匹配效果。

## 1 局部灰度值编码特征粗匹配

### 1.1 局部灰度编码特征的定义和提取

传统算法模板与搜索子图进行相似比较时通常采取的测度<sup>[5-6]</sup>是归一化互相关(NCC)或者误差平方和(SSD),这是直接利用像素灰度值表征图像内容进行匹配的方法,受灰度变化的影响,且时间复杂度高,这里采用一种对图像进行分块特征值编码匹配的方法,大大简化了对图像内容的表示,匹配时只需要进行特征值的相应比较,复杂性大大降低。

提取图像分块编码特征的过程如图 1 所示。

设图像尺寸是  $N \times N$ , 首先将图像划分为  $H^2$  个  $k \times k$  尺寸且互不重叠的方块,  $k$  可根据图像尺寸确定,称该方块为  $R$ -块<sup>[5]</sup>。如果图像的边长不是  $k$  的整数倍,则将最底部与最右边剩余的几行、几列裁剪掉。 $R$ -块的 8 邻域和  $D$  邻域如图 1 所示,对每个  $D$  邻域包含的四个  $R$ -块的灰度值和做排序,有  $4! = 24$  种可能,每种结果用 5 位的二进制编码来表示,记作  $P(D_j) \in \{00000, 00001, \dots, 10111\}$ 。对  $R$  块  $R_i$  4 个  $D$  邻域的编码  $P(D_j)$  做连接,得到  $F(R_i) = P(D_1)P(D_2)P(D_3)P(D_4)$ , 称  $F(R_i)$  为  $R_i$  块的编码。一幅图像的编码特征由它所有  $R_i$  块的编码组成,因图像最外一圈  $R_i$  块不存在 8 邻域,所以其编码无定义,一共有  $(H-2)^2$  个编码,图 1 中划斜线部分所示。

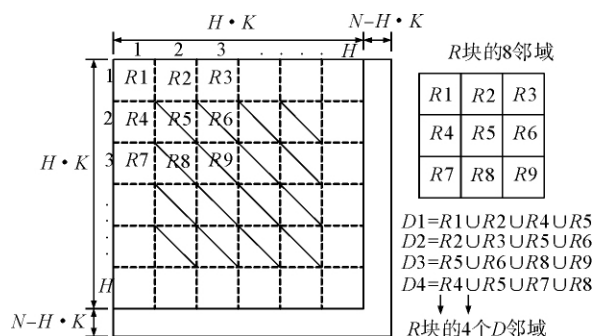


图 1 图像分块及编码特征定义图示

Fig. 1 Image sub-block and coding feature definition

由图 1 可见,图像的内容用一些简单的特征码值来表示,每个特征码值表示了  $R$ -块  $R_i$  的灰度与相邻 8 个  $R$ -块灰度的分布关系,全部的特征码值反应了图像不同空间位置灰度的分布关系,两幅图像内容越接近,其特征码值相同的越多。图像分块数越多,特征编码对图像内容的描述越精细,但同时也增大了编码和匹配的计算量。

另外定义图像有定义范围内所有  $R$ -块的编码特征按照行列顺序以十进制形式组成一个一维向量,称为图像的编码特征向量, $R$ -块个数等于向量的元素数。编码特征向量将直接用于后面图像相似性的匹配。

一幅  $N \times N$  的图像,提取它的分块编码特征,需要计算各个  $R$ -块的灰度值和、各个  $D$  邻域的编码和各个  $R$ -块的编码,总的时间复杂度是  $O(N^2)$ 。

### 1.2 局部灰度编码特征粗匹配

模板与搜索图的匹配示意图,如图 2 所示。设模板  $T$ (尺寸为  $N \times N$ ) 叠放在搜索图  $S$ (尺寸

为  $M \times M$  上平移,模板覆盖下的搜索图记为子图  $S^{i,j}$ ,  $i, j$  为子图左上角顶点在图  $S$  中的坐标, NCC 法是逐点进行扫描,计算模板与搜索子图的二维归一化互相关函数,互相关函数的最大值对应的位置  $i, j$  即为匹配位置。用 NCC 法求匹配的计算量很大,模板需要在  $(M-N+1)^2$  个参考位置上做相关计算,其中除一点以外都是在非匹配点上做无用功。本文采用改进的搜索策略,将模板在搜索图上按照一定步长  $(\Delta x, \Delta y)$  进行扫描,极大节省了计算时间。

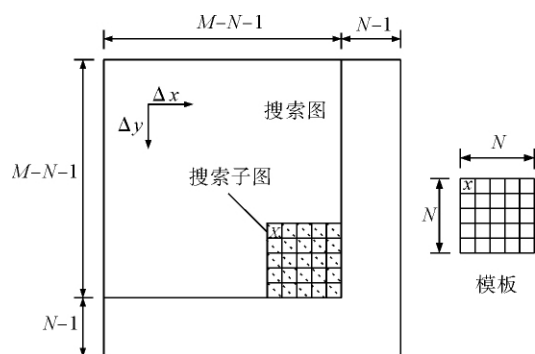


图2 模板与搜索图

Fig. 2 Template and search image

匹配时采用相同特征码值的数目为模板与搜索子图的相似性度量,2幅图像相同的码值越多,它们相同或相似的区域也就越多,图像之间越相似。图3是逐点扫描情况下,模板与搜索图匹配得到的相同特征码值的分布情况,在中间正确匹配位置处,相似性度量具有最大峰值,即模板和搜索子图相同特征码值的数目最大,且在正确匹配位置附近范围区域内,也存在比较大的峰值,随着距离的增大相似性度量呈现逐渐下降的分布趋势,在远离正确匹配位置处,大部分相似性度量很小,为零或1。

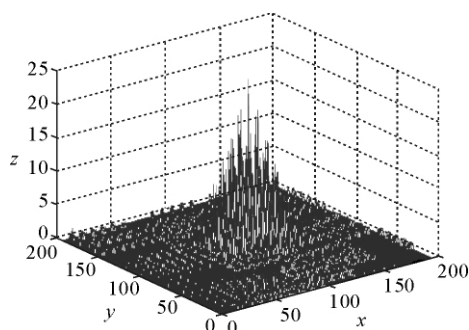


图3 模板与搜索图特征码值匹配的分布

Fig. 3 Distribution of feature coding matching between template and search image

粗匹配过程:根据  $R$ -块的划分原则分割模板图像,同时计算模板图像的编码特征向量,利用  $R$ -块的尺寸  $k$  对搜索图  $R$ -块划分,计算所有  $R$ -块的编码特征。将模板在搜索图上按照一定步长  $(\Delta x, \Delta y)$  进行扫描,对于搜索图上扫描到的像素点,以此像素点的坐标为准,剪裁出一个大小和模板一样的搜索子图  $S^{i,j}$ ,此像素点为  $S^{i,j}$  的左上角第一个像素,提取搜索子图  $S^{i,j}$  覆盖  $R$ -块的编码特征向量,并与模板的特征向量进行遍历比较,同时记下特征向量中相等元素的个数  $r$ ,最后取  $r$  最大的位置  $i_0, j_0$  为匹配点。在扫描过程中,如果  $r$  大于一定阈值时则停止匹配并保存  $i_0, j_0$  值为匹配点,同时对特征向量中相等元素个数的最大值  $r_{\max}$  进行更新。在对特征向量进行相等比较时可以采用先对特征值快速排序再比较的方法提高速度,这样便完成了编码特征的粗匹配过程。

粗匹配过程的计算量有两部分:1)模板和搜索图的  $R$ -块特征提取;2)模板和每个搜索子图特征向量的快速排序和特征比较。1部分的时间复杂度很明显是  $O(N^2) + O(M^2)$ 。2部分的时间复杂度是  $O(\frac{M^2}{\Delta x^2} [\frac{N^2}{k^2} \log_2 \frac{N}{k} + \frac{N^2}{k^2}])$ ,表示按照步长搜索,设  $\Delta x = \Delta y$ ,搜索图  $S$  应该有  $(M/\Delta x)^2$  个搜索子图,对每个搜索子图的特征向量进行排序的时间复杂度是  $O((N/k)^2 \log(N/k))$ ,与模板比较的时间复杂度是  $O((N/k)^2)$ 。

## 2 相位相关精匹配

由以上可知,粗匹配是按照一定步长搜索匹配的,模板和搜索子图可能不完全重叠,所以粗匹配结果与正确的匹配位置也会存在偏差。基于以上考虑,提出了结合相位相关进行精匹配修正的方法。

### 2.1 相位相关基本原理

相位相关法是基于二维傅里叶变换的性质:空间域上的平移等价于频域相位的平移。两幅图像的平移矢量可以通过它们互功率谱的相位直接计算。假设图像  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$  简单的平移相关。

$$f_1(x, y) = f_2(x - x_0, y - y_0), \quad (1)$$

相应的傅里叶变换

$$F_1(u, v) = F_2(u, v) e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}, \quad (2)$$

定义它们的归一化互功率谱

$$\frac{F_1(u, v) F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|} = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}, \quad (3)$$

其中  $F_2^*$  为  $F_2$  的复数共轭, 对 (3) 进行傅里叶逆变换, 在  $(x, y)$  空间的  $(x_0, y_0)$  处将形成一个脉冲函数  $\delta(x-x_0, y-y_0)$ , 脉冲峰值 (记为  $P_{f_1 f_2}$ ) 位置即为两幅图像间的平移量  $x_0$  和  $y_0$ 。相位相关法利用的是图像互功率谱中的相位信息, 因而减少了对图像内容的依赖性, 其获得的相关峰尖锐

突出, 具有较高的匹配精度, 而且抗灰度变化, 受噪声影响很小, 对轻微旋转具有稳定性。图 4 是两幅含有平移和明显亮度差异的人物照片, 而且图像 B 人工加入了椒盐噪声, 可见相关峰值很明显, 计算得到最大峰值位置即平移量  $x_0 = 64$ ,  $y_0 = 64$ , 同理论位置相符。



图 4 频域相位相关

Fig. 4 Phase correlation

## 2.2 精匹配

根据编码匹配的原理和后续实验数据可知, 粗匹配结果与正确的匹配位置相同或者相差不是很大, 所以在粗匹配位置  $i_0, j_0$  处剪裁出一个大小和模板一样的临时矩阵, 计算出该矩阵和模板的相位相关平移量  $x_0$  和  $y_0$ , 并用其来修正粗匹配结果, 得到最终的匹配结果为

$$\begin{cases} x = i_0 + x_0, \\ y = j_0 + y_0. \end{cases} \quad (4)$$

因模板图像比较小和使用 FFT, 精匹配过程计算速度很快。精匹配的主运算量是对模板和临时矩阵做的傅里叶变换及对互功率谱做的傅里叶逆变换, 它们的图像尺寸都是  $N \times N$ , 所以精匹配的时间复杂度是  $O(N^2 \log_2 N)$ 。

## 3 算法计算量分析

到此为止, 整个算法叙述完毕, 图 5 是算法的流程图, 整个算法的计算量由粗匹配加上精匹配。根据前面的分析, 总的时间复杂度是  $O(N^2) +$

$O(M^2) + O(\frac{M^2}{\Delta x^2} [\frac{N^2}{k^2} \log_2 \frac{N}{k} + \frac{N^2}{k^2}]) + O(N^2 \log_2 N)$ 。文献[5]中提到在多数匹配问题中模板的边长  $N < 100$ , 此种情况下一般  $N/k \leq 10$ ,  $\Delta x > 10$ , 则有  $\log_2 (N/k) < 4$ , 所以  $O(\frac{M^2}{\Delta x^2} \times$

$[\frac{N^2}{k^2} \log_2 \frac{N}{k} + \frac{N^2}{k^2}])$  可以写做  $O(M^2)$ , 总的时间复杂度也就是  $O(M^2)$ 。

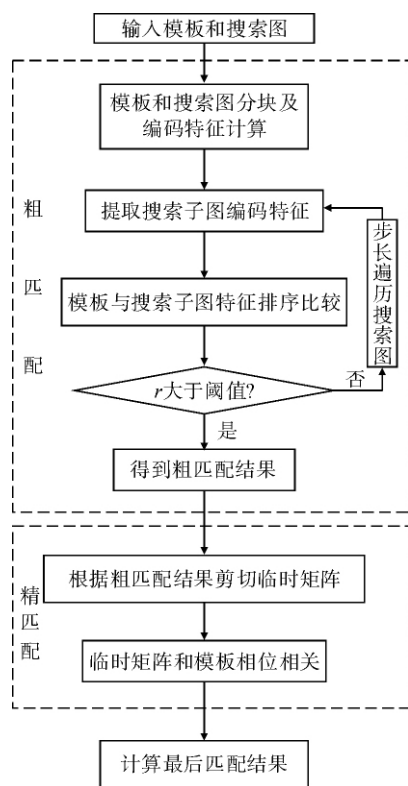


图 5 分块编码匹配算法流程图

Fig. 5 Flow chart of sub-block coding matching

传统的归一化互相关(NCC)、误差平方和(SSD)或绝对误差和(SAD)匹配算法的时间复杂度都是 $O(M^2N^2)$ ,比本文的 $O(M^2)$ 慢了2个数量级。文献[5]提到的编码算法虽然也可以达到 $O(M^2)$ ,但因为模板要进行 $K^2$ 次裁剪,每个搜索子图需要与 $K^2$ 种裁剪情况下的模板进行特征比较,而本文算法每个搜索子图只需要进行一次比较,具体情况下计算速度本文算法会比文献[5]的算法快2倍,而且粗匹配加了 $r$ 值限定条件可以提前停止粗匹配,算法的计算时间还可以进一步降低。

## 4 实验结果及分析

实验机器硬件配置为 P4 CPU 2.4G,内存 1GB,软件编程环境为 MATLAB 7.0。为验证算法的性能,采用两个实验进行结果分析。

### 4.1 准确性分析

实验 1 选用人物图像,如图 6 所示,搜索图的尺寸是  $256 \times 256$ ,模板的尺寸是  $64 \times 64$ ,正确的匹配位置是(101,101)。实验中将模板分成  $8^2$  个特征块, $R$ -块的尺寸  $k=8$ ,因图像最外一圈  $R$  块的编码无定义,所以编码特征向量的元素数为  $(8-2)^2$ ,设定步长  $\Delta x = \Delta y = 16$  个像素。



图 6 实验 1 的搜索图与模板

Fig. 6 Searching image and template of experiment 1

根据求出的匹配位置,以此为左上角,以模板的长和宽为尺寸,将匹配区域在搜索图上标记出来,如图 6(a)上的方框所示。从图中标出的匹配结果可以看出,对模板的定位准确。实际匹配过程中得到的粗匹配结果是 $(i_0, j_0) = (97, 113)$ ,相位相关平移量 $(x_0, y_0) = (4, -12)$ ,相位相关峰值 $P_{f_1 f_2} = 0.424\ 1$ ,最终匹配结果 $(x, y) = (101, 101)$ ,匹配误差为零。

实验 2 选用航拍图像,如图 7 所示,搜索图的尺寸是  $350 \times 320$ ,模板的尺寸是  $76 \times 76$ ,正确的匹配位置是(222,189)。实验中将模板分成  $8^2$  个特征块, $R$ -块的尺寸  $k=9$ ,设定步长  $\Delta x = \Delta y = 18$  个像素。从图 7 中标出的匹配结果可以看出,对模板的定位准确。实际匹配过程中得到的粗匹配结果是 $(i_0, j_0) = (217, 181)$ ,相位相关平移量 $(x_0, y_0) = (5, 8)$ ,相位相关峰值为 0.632 3,最终匹配结果 $(x, y) = (222, 189)$ ,匹配误差为零。

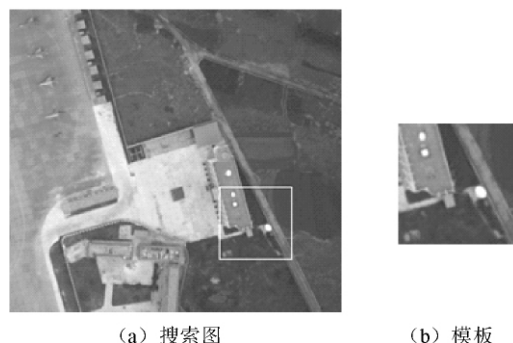


图 7 实验 2 的搜索图与模板

Fig. 7 Searching image and template of experiment 2

### 4.2 抗噪声和旋转性能分析

实验 3 选取的图像如图 8。

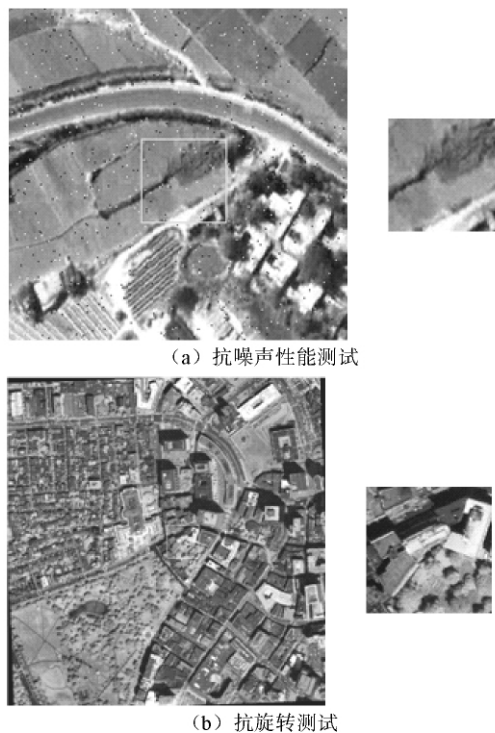


图 8 实验 3 的抗噪声与抗旋转测试图

Fig. 8 Testing picture of noise and rotation of experiment 3

图 8(a)中取添加了椒盐噪声的航拍图像作为搜索图,从标出的匹配结果可以看出,在噪声比较明显的情况下,本研究算法仍能得出正确结果。图 8(b)是遥感图像匹配结果,其中对搜索图进行了小角度旋转,匹配基本正确,但是当旋转角度比较大时,结果出现偏差或者错误,原因是矩形窗口不能覆盖具有旋转关系的两幅图像的同一部分,且编码过程和相位相关都是基于平移图像计算的。

实验中还对不同亮度辐射的图像进行了匹配计算,实验结果说明新算法对图像灰度的线性变换具有不变性,因篇幅有限具体实验结果图像没有给出。

#### 4.3 算法速度定量分析

根据前面的分析已知,传统的归一化互相关(NCC)、误差平方和(SSD)或绝对误差和(SAD)匹配算法的时间复杂度都是  $O(M^2 N^2)$ ,本文的 ILGVC 算法的时间复杂度是  $O(M^2)$ ,提高了 2 个数量级。表 1 给出了具体的计算时间,可以看出,ILGVC 比传统方法在计算速度上有了很大的提高。

表 1 不同匹配算法的计算时间  
Table 1 Time of different matching method

匹配方法	计算时间/s	
	实验 1 (256×256 / 64×64)	实验 2 (350×320 / 76×76)
NCC	71.01	132.50
SSD	25.20	57.22
SAD	43.50	101.59
ILGVC	8.50	11.16

## 5 结 语

本研究针对相关匹配等算法计算量大和现有的编码匹配方法因块对齐带来的特征比较结果处理过程复杂的问题,提出了一种结合图像局部灰度值编码匹配和相位相关进行图像模板匹配的新方法。继承了前人分块编码的思想,仔细剖析了编码特征用于图像匹配的可行性,提出了改进的快速编码粗匹配方法,大大减少了计算量,同时引入了相位相关精匹配,明显提高了匹配的准确性。

实验表明,新算法定位准确,具有对像素灰度变化和噪声的鲁棒性,小角度旋转情况下,匹配也具有一定的稳定性。算法的时间复杂度是  $O(M^2)$ ,比传统的归一化互相关算法快了 2 个数量级,与现有的编码匹配方法相比速度也提高了两倍。

该算法可以很好地用于模板匹配的计算,对两幅相同大小的图像,可以在一幅图中剪切子块作为模板,与另一幅图进行匹配,根据剪切位置和匹配位置可以得到两幅图的平移参数。当两图存在小角度旋转时,用本研究方法计算的平移参数可以用来估计重叠区域,在图像配准中指导特征提取和局部匹配,大大减少计算量;当两图旋转角度比较大时,可以先通过其它方法计算旋转角度,再用本研究法计算平移量,便可得出准确的匹配位置。本研究方法中如果粗匹配步长设置过大,模板和搜索子图错位明显,彼此的局部灰度编码特征也不一样,这样计算出的相似性度量在正确匹配位置附近达不到比较大的峰值,导致粗匹配结果不正确,无法修正,这也是下一步工作需要解决的问题。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡丽欢,廖英豪,郭东辉. 图像拼接方法及其关键技术研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(3):1-4.
- [2] 王红梅,张科,李言俊. 图像匹配研究进展[J]. 计算机工程与应用,2004,19:42-44.
- [3] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [4] 李立鸿,施鹏飞,赵群飞. 基于多分辨率技术的快速全景图像匹配算法[J]. 中国图象图形学报,2006,11(9):1271-1275.
- [5] 李强,张钊. 一种基于图像灰度的快速匹配算法[J]. 软件学报,2006,17(2):216-222.
- [6] 王晓东,霍宏,方涛. 基于快速归一化互相关函数的运动车辆阴影检测算法[J]. 计算机应用,2006,26(9):2065-2067.
- [7] 王小鹏,阎国梁,裴建刚,等. 由形态学边缘模式匹配实现数字稳像[J]. 光学精密工程,2009,17(3):683-689.
- [8] 冯晓伟,田裕鹏. 基于形状内容描述子的点特征匹配[J]. 光电工程,2008,35(3):108-111.
- [9] Wu G, Wu C F, Hou Q Y, et al. Target location method based on invariable moment feature matching[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 460-468.
- [10] 傅丹,王超,徐一丹,等. 一种直线段匹配的新方法[J]. 国防科技大学学报,2008,30(1):115-119.

(责任编辑 姜丰辉)