

# 灰度图像匹配的快速算法

罗钟铉      刘成明  
(大连理工大学应用数学系 大连 116024)  
(luozx9609@vip.sina.com)

**摘 要** 提出了一种基于小波变换和投影特征的图像匹配的快速算法. 先在若干级小波变换的低频图上利用投影特征、序贯相似性算法等手段得到一个可能的匹配点的集合, 然后对该集合上的点在原图上作匹配运算, 得出准确匹配位置. 该算法大大提高了运算速度, 同时又保持了匹配的精度, 可以满足实时性的要求.

**关键词** 图像匹配; 小波变换; 投影特征  
中图法分类号 TP391

## Fast Algorithm of Image Matching

Luo Zhongxuan    Liu Chengming  
(Department of Applied Mathematics, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract** Wavelet transform and projection were referred to after wavelet transform projection and sequential similarity detection algorithm (SSDA) were applied to the low frequency part of the image to get a set of potential matching points, and then matching operation was done on the original image to get the right position. This method greatly improves the operation speed, while the precision remains fine, so it can be used for real-time matching.

**Key words** image matching; wavelet transform; projection

### 1 引 言

图像匹配技术是根据已知的图像模块(模板图)在另一幅图像(搜索图)中寻找相应或相近模块的过程, 它是计算机视觉和模式识别中的基本手段, 已在卫星遥感、空间飞行器的自动导航、机器人视觉、气象云图分析及医学 X 射线图片处理等许多领域中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>. 已有的图像匹配算法可分为两类: 基于图像几何特征的匹配和基于像素灰度值的匹配. 前者是利用空间位置相对不变的景物特征(如边缘、角点等)进行匹配, 其优点是计算量较小; 但基于目前的特征提取手段, 只能对几何特征单一且明确的图像有效, 而处理复杂图像时往往难尽人意. 而后者则具有匹配精度高的优点, 且可以通过

其他算法提高运算速度, 故本文所采取的算法属于后者, 即基于像素灰度值的相关算法.

传统的模板匹配法概念清晰, 便于实现, 但是速度太慢, 不利于实时操作. 特别是水下原始情形全景再现等实际应用中, 从大量视频信号实现数字全景需要处理海量图像的匹配, 图像匹配的质量和速度是至关重要的. 如何在保证匹配精度的前提下进一步提高匹配速度是目前匹配技术需要解决的迫切问题. 目前快速算法主要有: 将图像作小波分解, 利用分解后的子图分别作匹配运算<sup>[2]</sup>; 利用投影特征将二维数据简化为一维<sup>[1, 3]</sup>; 为减少模板搜索过程的运算量人们提出的 SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm) 算法<sup>[4]</sup>; 将小波分解和 SSDA 相结合的方法<sup>[5]</sup>; 变模板相关的实时算法, 但此算法对模板图的形状有限制<sup>[6]</sup>; 不变矩方法也能提高

运算速度,但相对来说仍然较慢<sup>[7]</sup>. 本文采用小波变换和引入投影特征,SSDA 技术给出了快速的图像匹配技术,获得了满意的效果

2 相似性度量

相似性变量相关公式很多,常用的有误差累加公式和灰度相关归一化公式. 设模板图像为  $g(x, y)(x=0, 1, \cdots, U-1; y=0, 1, \cdots, V-1)$ , 搜索图像为  $f(x, y)(x=0, 1, \cdots, M-1; y=0, 1, \cdots, N-1)$ , 记  $f_{ij}(x, y)=f(x+i, y+j)(x=0, 1, \cdots, U-1; y=0, 1, \cdots, V-1; i=0, 1, \cdots, M-U-1, j=0, 1, \cdots, N-V-1)$ , 则  $g$  在  $f$  中  $(i, j)$  处的误差累加公式为

$$\epsilon(i, j) = \sum_{x=0}^{U-1} \sum_{y=0}^{V-1} |f_{ij}(x, y) - g(x, y)| \quad (1)$$

式(1)运算量小,但其取值范围为  $[0, +\infty)$ , 在程序中难以控制,故常将其作归一化处理

$$R(i, j) = \frac{\sum_{x=0}^{U-1} \sum_{y=0}^{V-1} [f_{ij}(x, y) - f_{ij}] \times [g(x, y) - \bar{g}]}{\left\{ \left[ \sum_{x=0}^{U-1} \sum_{y=0}^{V-1} [f_{ij}(x, y) - f_{ij}]^2 \right]^{1/2} \times \left[ \sum_{x=0}^{U-1} \sum_{y=0}^{V-1} [g(x, y) - \bar{g}]^2 \right]^{1/2} \right\}} \quad (2)$$

其中,

$$f_{ij} = \frac{1}{UV} \sum_{x=0}^{U-1} \sum_{y=0}^{V-1} f_{ij}(x, y),$$
$$\bar{g} = \frac{1}{UV} \sum_{x=0}^{U-1} \sum_{y=0}^{V-1} g(x, y).$$

式(2)就是灰度相关归一化公式,  $R(i, j)$  的取值范围为  $[-1, 1]$ , 它取值最大的  $(i, j)$  即认为是匹配位置

3 小波变换和投影特征

在图像处理中,小波变换由于其良好的多分辨率特性及局部性,已成为代替 Fourier 分析的一个强有力的数学工具

设  $\varphi(x) \in L^2(R)$ , 若  $\varphi(x)$  满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\varphi(\bar{\omega})|^2}{|\bar{\omega}|} d\bar{\omega} < \infty,$$

则称  $\varphi(x)$  为一个基本小波, 将  $\varphi(x)$  作一个二进膨胀和二进位移, 得  $\varphi_{j,k} = 2^{j/2} \varphi(2^{j/2}(x-k))$ , 即人们常用的离散二进小波. 若  $\{\varphi_{j,k}\}$  满足

$$(\varphi_{j,k}, \varphi_{l,m}) = \delta_{j,l} \delta_{k,m}; j, k, l, m \in Z;$$

则称  $\varphi$  为一个正交小波, 其中  $(,)$  表示内积. 这样  $\{\varphi_{j,k}\}$  构成  $L^2(R)$  的一组正交基

在信号处理中, Mallat 提出了多分辨率的思想<sup>[8]</sup>, 把小波变换和数字滤波器紧密联系在一起, 使信号分解方法大大简化. 设  $\varphi(x)$  为尺度函数, 对应的小波函数为  $\psi(x)$ , 它们满足尺度方程

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sum h(n) \varphi(2x-n) \\ \psi(x) = \sum g(n) \varphi(2x-n) \end{cases},$$

其中  $g(n) = (-1)^n h(1-n)$ .  $\{\varphi_{j,k}\}_{k \in Z}$  构成  $V_j$  的标准正交基,  $\{\psi_{j,k}\}_{k \in Z}$  构成  $V_j$  的正交补空间  $W_j$  的标准正交基

利用滤波器  $h(n)$  和  $g(n)$  对图像的行和列分别作卷积, 则可将图像分成 4 块(图 1b 所示)为图 1a 一级小波变换的结果. 其中第 II 象限的部分为图像的低频部分, 保留了原图像的基本信息, 大小为原来的  $1/4$ . 对这一部分的行和列继续作卷积, 就得到二级小波变换. 本文就是利用  $L$  级小波变换后的低频图像作匹配的.



a Lena 原图



b 小波变换图

图 1. 一级小波变换示意图

设

$$G = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \cdots & g(0,V-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \cdots & g(1,V-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g(U-1,0) & g(U-1,1) & \cdots & g(U-1,V-1) \end{bmatrix}$$

则模板图  $g$  的垂直投影定义为

$$P_g = [p_0 \ p_1 \ \cdots \ p_{V-1}] \ G \quad (3)$$

本文算法取式(3)中的  $p_i = 1(0 \leq i \leq V-1)$ , 则  $P_g$  中的每一个元素为  $G$  中相应列的元素的累加和, 代表了这一列的总体亮度特征<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示. 可以将  $g$  和  $f_{ij}$  同时作投影后的  $P_g$  和  $P_{f_{ij}}$  分别代替  $g$  和  $f_{ij}$  作匹配运算<sup>[1,3]</sup>.



图 2 垂直投影示意图

4 快速匹配算法

4.1 算法思路

传统的模板匹配的基本算法就是将模板图  $g$  在搜索图  $f$  上遍历所有可能的位置, 从中找出相关度最大位置即认为是匹配位置. 这种算法总的运算量等于每个位置的运算量乘以搜索位置数, 显然其计算量是相当大的. 要加快运算速度就要减少搜索位置和每个位置处的计算量. 以往的基于小波多分辨率分析的金字塔式匹配算法, 对搜索图和模板作  $L$  级小波分解后, 将其低频部分作模板匹配; 然后逐级上溯, 直到在原图上计算出匹配位置. 由于小波分解过程中的低频部分丢失了细节信息, 因此不能保证达到最高的精度. 与此算法不同, 本文算法的基本思想就是首先利用小波变换和垂直投影技术得到一个可能的匹配点集合  $S$ , 再将模板图  $g$  在搜索图  $f$  上对  $S$  中对应的点上利用灰度相关归一化公式作匹配运算, 从而求得正确匹配位置.

4.2 算法步骤

本文算法的步骤为

Step1. 对搜索图  $f$  和模板图  $g$  分别作  $L$  级小波分解, 并

保存各级分解后的低频部分  $f^l$  和  $g^l(1 \leq l \leq L)$ .

Step2. 将  $g^L$  和  $f_{ij}^L$  同时作投影后得  $P_g^L$  和  $P_{f_{ij}}^L, i=0, 1, \cdots, M/2^L, j=0, 1, \cdots, N/2^L$ .

Step3. 用误差累加式 (1)  $\epsilon(i, j) = \sum_{x=0}^{V-1} |P_g^L(x) - P_{f_{ij}}^L(x)|$  找可能匹配的点. 吸收 SSDA 的优点, 设一阈值 LIMIT, 当  $\epsilon(i, j)$  累加值超过 LIMIT 时, 可认为是不匹配的. 停止并转而下一位置计算  $\epsilon(i, j)$ . 对  $i=0, 1, \cdots, (M-V)/2^L, j=0, 1, \cdots, (N-V)/2^L$ , 取  $\epsilon(i, j)$  最小的前 10 个点, 构成  $L$  层次上的候选点集  $M_L$ .

Step4. 在  $L-1$  层次上,  $M_L$  中的 10 个点对应  $f^{L-1}$  中的 90 个点. 对这些点, 利用 Step2, Step3 的方法, 求得候选点集  $M_{L-1}$ .

Step5. 对  $l=L-2, L-3, \cdots, 1$ , 重复 Step4, 直到求得  $M_1$ .

Step6. 在  $g$  上的  $M_0$  中心点的位置处, 运用灰度相关归一化式(2)进行搜索, 求得相关度最大的点即认为是匹配的点.

4.3 阈值 LIMIT 的选取

本文算法中 LIMIT 的选取对运算的精度和速度有很大的影响. 若取的太小, 就会在低频图搜索时漏掉某些点从而导致误匹配; 若取的太大, 则会增加许多不必要的计算, 速度下降. 因此, 从精度和速度两方面来考虑, 既要使阈值大于真实位置处的累加误差, 又要将大多数点排除在外. 一般说来, LIMIT 的值与模板图的大小、噪声有关, 故本文采用了如下的经验公式:  $LIMIT = \lambda \times 10 \times \text{模板图的长度} \times \text{模板图的高度}$ ;  $\lambda$  可视噪声的强弱取  $0.05 \sim 1$  之间的某个值.

5 实验结果及分析

实验采用  $512 \times 512$  的 Lena 头像作搜索图  $f$ , 从搜索图  $f$  上任意位置取一块子图像  $g$  作模板图 (本例中模板图为从搜索图上(85, 86)处取下大小为  $136 \times 101$  的子图), 分别用传统的模板匹配法、文献 [1] 提出的投影匹配法和本文算法进行匹配运算, 运行结果如图 3 和表 1 所示. 运行环境为赛扬 1.3GHz, 128MB RAM, VC++ 6.0 (部分源程序来自于文献 [10]).

表 1 几种匹配算法运行结果比较

	模板匹配	投影匹配	快速匹配	带噪声快速匹配
位置	(85, 86)	(85, 86)	(85, 86)	(85, 83)
相关度	1.00	1.00	1.00	0.81
运算时间(s)	80.61	27.36	0.16	0.21

其中运算时间为从硬盘读入图像数据到计算出

匹配位置的时间。在图像有旋转和尺度变化时, 需要根据其几何特征对图像进行校正后再匹配, 校正后的模板图跟搜索图会有一定的差别。为了检验算法的鲁棒性, 在模板图上加入随机噪声(如图 4a)后, 再在搜索图上作匹配, 匹配结果如图 4b 所示, 其误差在允许范围之内。本文算法还与文献[ 5] 提

出的实时算法进行了比较, 文献[ 5] 的算法要求模板图的大小为 $(2n+1)\times(2n+1)$ , 而且, 其快速算法较之与模板算法仅能提高 40 余倍, 而本文算法则灵活得多, 速度也可提高近 400 倍。搜索图尺度越大, 越能显示本文算法的优越性。

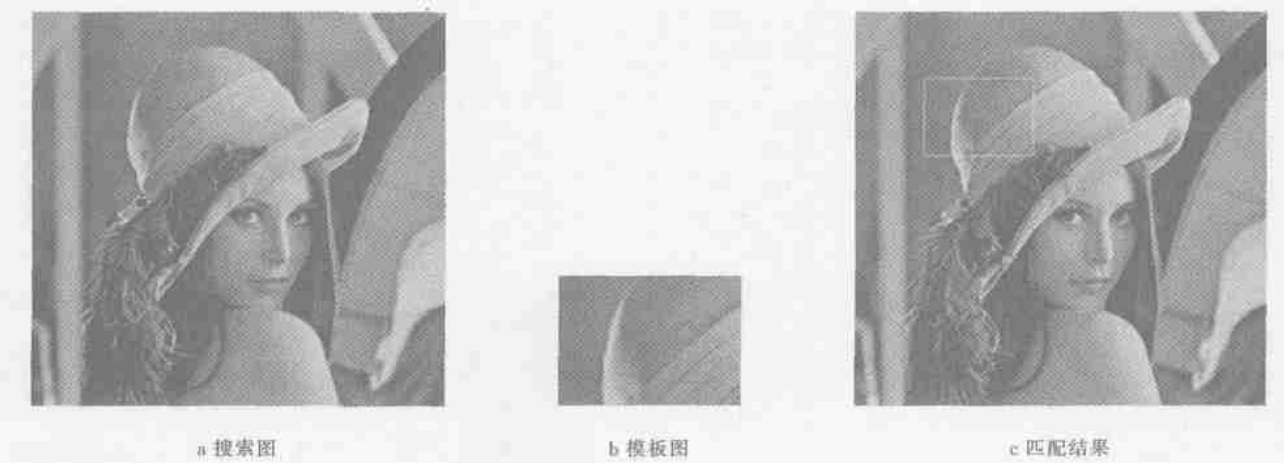


图 3 快速匹配效果图



图 4 带噪声快速匹配效果图

本文算法极大地提高了运算速度, 其主要原因在于:

- (1) 利用小波变换的多分辨特性, 对若干层小波分解的低频部分作运算, 大大减少了搜索位置的个数;
- (2) 引入投影特征, 将二维数据化为一维;
- (3) 在计算累加误差时若中途判定为不是匹配的, 则停止运算, 减少了无用功;
- (4) 先用运算速度快的算法得到一个可能的匹配点的集合, 只在最后 90 个点上运用运算量大的灰度相关归一化公式。

6 结 论

基于小波变换和投影特征的匹配算法具有运算速度快、匹配精度高等优点, 可以用于实时计算。

参 考 文 献

[ 1 ] Du Zhiguo, Bo Ruifeng, Han Yan. Fast algorithm of image matching based on projection [ J ]. Journal of Test and Measurement Technology of NCIT, 2000, 14(1): 18~20(in Chinese) (杜志国, 薄瑞峰, 韩 炎. 基于投影特征的图像匹配的快速算法[ J ]. 华北工学院测试技术学报, 2000, 14(1): 18~20)

- [2] Jiang Xiaoyu, Huang Yingqing. Multi-resolution template match using wavelet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5A(4): 304~308(in Chinese)  
(蒋晓瑜, 黄应清. 基于小波变换的多分辨模板匹配[J]. 中国图像图形学报, 2000, 5A(4): 304~308)
- [3] Sun Yuan, Zhou Ganghui, Zhao Lichu, *et al.* Fast template matching algorithm based on the projection [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(5): 702~704(in Chinese)  
(孙远, 周刚慧, 赵立初, 等. 灰度图像匹配的快速算法[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(5): 702~704)
- [4] Shen Tingzhi, Fang Ziwen. Digital image processing and pattern recognition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998(in Chinese)  
(沈庭芝, 方子文. 数字图像处理及模式识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998)
- [5] Zhang Guozhu, Wang Cheng, Wang Runsheng. A method of multiresolution image matching based on wavelet transform [J]. Computer Engineering and Application, 2001, 37(13): 113~114(in Chinese)  
(张国柱, 王程, 王润生. 基于小波变换的多分辨率图像匹配方法[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(13): 113~114)
- [6] Xiong Guoqing, Yu Qifeng. Fast matching algorithm for real-time tracking [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(1): 41~43(in Chinese)  
(熊国清, 于起峰. 用于实时跟踪的快速匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(1): 41~43)
- [7] Yan Bojun, Zheng Lian, Wang Keyong. Fast target detecting algorithm based on invariant moment [J]. Infrared Technology, 2001, 23(6): 8~12(in Chinese)  
(严柏军, 郑链, 王克勇. 基于不变矩特征匹配的快速目标检测算法[J]. 红外技术, 2001, 23(6): 8~12)
- [8] Chui Charles K. An Introduction to Wavelet [M]. Boston: Academic Press, 1992. 198~217
- [9] Fuh Chiour-shann, Liu Horng-bin. Projection for pattern recognition [J]. Image and Vision Computer, 1998, 16(9~10): 677~687
- [10] Zhou Changfa. Mastery of Image Programming with VC++ [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999 (in Chinese)  
(周长发. 精通VC++图像编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999)



罗钟铤 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向多元函数逼近论、计算几何与计算机辅助设计、多元样条函数与机械化计算、多孔媒介中热湿传导模型及科学计算、三维重构与图形/图像处理



刘成明 男, 1979 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉