

## 一种用于图像超分辨的实时高精度像素内配准方法

袁建华 殷学民 邹谋炎  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)  
(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 在超分辨图像复原处理中, 像素内的配准精度、速度是超分辨图像最终实现的实时性和高质量的关键因素。传统的利用泰勒级数展开像素内配准方法实时性较差; 分级少的块匹配配准精度相对较低。该文提出一种基于分段双三次多项式拟合的分级块匹配像素内配准技术, 在算法复杂度低的同时保证了配准精度, 并在文中给出了实验统计结果。

**关键词:** 图像处理; 超分辨; 像素内; 配准

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0047-03

## A Real-Time Sub-pixel Registration Method with High Precision Used for Image Super-Resolution

Yuan Jian-hua Yin Xue-min Zou Mou-yan  
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)  
(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In the research of super-resolution image processing, the precision and speed of the sub-pixel registration are the key factors. It is difficult for the Taylor's series expansion method to do in real-time, and the hierarchical block-match method with less levels can achieve only a lower precision. The bicubic curve function method with hierarchical block-match drawn in this paper can not only obtain a higher precision, but also be implemented in real-time.

**Key words:** Image processing; Super-resolution; Sub-pixel; Registration

### 1 引言

超分辨图像处理主要是利用多幅低分辨率图像来复原原始的超分辨率图像, 其开创性工作由 Tsai 和 Huang<sup>[1]</sup> 在 1984 年提出。该技术可以被应用在遥感, 生物医学, 军事, 民用安防等多个方面。在其 20 多年的发展过程中, 学者们进行了深入的研究, 从频域法, 概率复原法, 到代数法, 空间域, 以及研究算法的实时性等。但是其主要的研究还是集中在图像的复原方面, 而对于该工作中的像素内配准技术发展一直比较缓慢, 而像素内的配准技术对超分辨率图像复原的速度和质量至关重要。

在超分辨领域的像素内配准技术, 主要集中于图像的平移运动, 该运动一方面数学模型简洁易于复原处理, 另一方面在现实应用中也较普遍。传统的像素内配准技术主要基于两类: 一种是泰勒级数展开法; 另一种基于分级块匹配法。但是前者往往需要多次内插迭代, 后者随着配准精度的提高, 需要多次对图像进行上采样内插, 其算法的复杂性随级数上升。本文提出一种基于双三次多项式拟合的分级块匹配算法, 其算法复杂性低, 实时性好, 配准精度高, 可以很好地满足超分辨图像复原的速度和质量。

本文安排如下: 第 1 节, 引言; 第 2 节, 传统的像素内配准技术介绍; 第 3 节, 双三次多项式拟合法像素内配准原理; 第 4 节, 分级块匹配的实现方法; 第 5 节, 实验及结果; 第 6 节, 讨论及结论。

### 2 传统的像素内配准技术

泰勒级数应用于图像配准的主要思想由 Lucas 和 Kanade<sup>[2]</sup> 提出, 其主要的思想是将图像看出连续函数, 将一幅图像看成是另一幅图像的泰勒级数展开。Irani 和 Peleg<sup>[3]</sup> 将该思想应用于超分辨图像增强的像素内配准。

令参考图像为  $f$ , 待配准的图像为  $g$ , 则

$$g(x, y) = f(x + a, y + b) \approx f(x, y) + a \frac{\partial f}{\partial x} + b \frac{\partial f}{\partial y} \quad (1)$$

$$E = \sum \left[ f(x, y) + a \frac{\partial f}{\partial x} + b \frac{\partial f}{\partial y} - g(x, y) \right]^2 \quad (2)$$

将  $E$  最小化, 就可以得到关于  $(a, b)$  的方程组, 由于对于图像用函数的泰勒展开只在平移很小和函数的高阶导数很小的像素点有效, 所以该配准方法, 必须要经过反复迭代及内插才能实现精度高的像素内配准。

对于分级块匹配的运动估计, 其原理主要是假设图像之间是平移运动, 然后在要配准的空间中, 采用一定的搜索方

法,常用的有三步搜索法。在超分辨率图像处理中,对于像素内的配准,就是将待配准的图像进行上采样,一般采用双线性内插方法,然后配准,然后再上采样,再配准,直至达到需要的配准精度。目前很大一部分的像素内配准利用该方法,主要原理见图 1,其中的块匹配和线性内插可以重复多次。超分辨率图像复原中运用该方法进行像素内配准,Borman<sup>[4]</sup>进行了详细的工作。

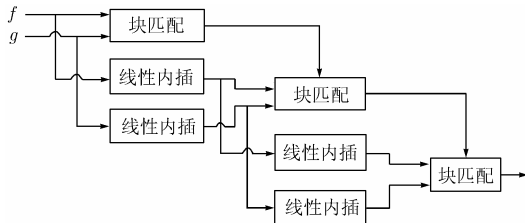


图 1 分级块匹配原理图

### 3 双三次多项式法像素内配准

对式(1)分析,如对其中的微分算子采用 Sobel 算子来模拟,图像在整数采样点取值,得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(l,k)}{\partial l} &= f(l+1,k-1) - f(l-1,k-1) + 2f(l+1,k) \\ &\quad - 2f(l-1,k) + f(l+1,k+1) - f(l-1,k+1), \\ \frac{\partial f(l,k)}{\partial k} &= f(l-1,k+1) - f(l-1,k-1) + 2f(l,k+1) \\ &\quad - 2f(l,k-1) + f(l+1,k+1) - f(l+1,k-1), \\ g(m,n) &\approx f(l,k) + a \frac{\partial f(l,k)}{\partial l} + b \frac{\partial f(l,k)}{\partial k} \end{aligned} \quad (3)$$

可以发现,其实泰勒级数展开,就是相应于图像在相应点的内插的一种,在这里利用 Sobel 得到的是 9 个点的内插方法。由于对于低分辨率图像的配准,主要利用图像中的低频部分的信息,图像中的高频信息往往由于某些原因存在着混叠现象,故直观上可以认为尽可能用平滑的函数模型来模拟图像的低频部分,亦即像素内的配准方法应该尽可能采用高次多邻域模型。对于同一个图像产生的两幅低分辨率图像,将它们低通滤波,主要是减轻高频段欠采样的频谱混叠的影响,然后将两幅图中相邻的点看成在同一个曲面上,亦即一副图像上的点可以由另一副图像上的附近的点来拟合。在本文中采用双三次多项式进行图像的拟合。其公式为

$$\begin{aligned} c(x,y) &= \sum_l \sum_k c(l,k)l(x-l)l(y-k) \quad (4) \\ l(x) &= \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3, & 0 \leq x < 1 \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3, & 1 \leq x < 2 \\ 0, & 2 \leq x \end{cases} \end{aligned}$$

对于图像仿射变换,Heckbert<sup>[5]</sup>了细致的工作,得出变换后的每个点等效于原图像和一个离散卷积核卷积来实现,

对于纯平移的运动,得到的图像可以等效于一个统一的离散卷积核和原图像卷积来实现,其中离散卷积核由式(4)得到。这样运动后的图像可以由式(5)来得到, $f$ 和 $g$ 分别是经过低通滤波后的参考图像和待配准图像, $h$ 是根据平移参数 $(a,b)$ 和式(4)得到的卷积核:

$$g = h(a,b) \otimes f \quad (5)$$

像素内的配准就等效于最小化式(6):

$$E = \|g - h(a,b) \otimes f\|, \quad \min_{(a,b)} E \quad (6)$$

其中范数可以根据不同的判定准则来定义,例如 MSE 准则可对应于 Frobenius 范数。

### 4 分级块匹配的实现方法

求式(6)的最小化等效于在需要配准的空间中搜索运动参数 $(a,b)$ ,在本文中将搜索的空间先细分为相应的网格点,最小化式(6)也就是在网格点上寻优,采用常用的块匹配的搜索方法,亦即根据 $2^{n-1}$ 阶的网格距离搜索, $n$ 为相应的分级数,假设搜索分 3 级,则将具体的空间分为 $15 \times 15$ 个网格点,搜索分级为 4, 2, 1 个网格距离。搜索分级数对应于相应的配准精度,假设搜索的空间为 $\pm \Delta$ 个像素,根据相应的配准精度来定义搜索分级,见表 1。

表 1 理论配准精度表

搜索分级	1	2	3	4
配准精度( $\pm \Delta$ )	1	1/3	1/7	1/15
搜索网格点	3×3	7×7	15×15	31×31
搜索分级	5	6	7	
配准精度( $\pm \Delta$ )	1/31	1/63	1/127	
搜索网格点	63×63	127×127	255×255	

在实际的应用中,可以根据预先定义的配准精度,计算好相应的 $h$ ,卷积可以用快速傅里叶来实现。这样每次搜索计算时只要计算相应的点积,矩阵相减,和相应的范数就可以了。

### 5 实验及结果

在实验中,采用计算机模拟的方法,假设原图像为 $256 \times 256$ 大小的 Lena 图像,进行水平和垂直分别偏移 0 至 $\pm 4$ 个像素,步进为 0.4 个单位像素,然后进行 4 倍的下采样,得到相应的低分辨率图像,相应像素内的距离为 0 到 $\pm 1$ ,步进为 0.1,再分别加上 0.0001 方差的高斯白噪声,先对图像进行滤波,采用 $3 \times 3$ 的高斯模板进行低通滤波,后分别采用泰勒级数展开和分级双三次曲面拟合进行像素内配准,搜索级数为 6,判定准则为 MSE,得到如下的统计结果见图 2。横坐标表示实验的像素配准错误的欧氏距离,纵坐标表示实验的统计次数。

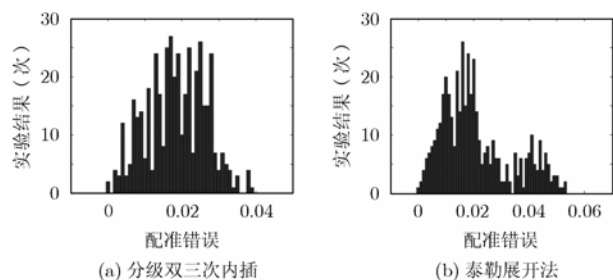


图 2 像素内配准错误统计图

## 6 讨论及结论

上述的实验结果中, 分级双三次内插的配准平均错误为 0.0184 个像素, 方差为 0.008, 泰勒展开法配准平均错误为 0.0209 个像素, 方差为 0.0126, 亦即本文提出的方法配准精度要略优于传统的高精度的泰勒级数展开法, 这跟理论基本上一致, 因为本文提出的方法用了 16 个点的邻域, 而泰勒级数法只用到了 9 个邻域; 从算法的复杂性来讲, 传统的泰勒级数展开法, 每次迭代均需要内插, 而且其收敛性比较慢, 实时性差, 而本文提出的像素内配准方法, 经过有限次的搜索, 就能达到一定的配准精度; 而且对于每次搜索可以采用快速傅里叶技术来实现卷积, 速度快, 实时性好。传统的相对快速的块匹配的像素内配准方法, 每级均需上采样内插, 需要占用大量的内存和乘法计算, 而且其复杂性随内插核的增大和要求的配准精度成几何级数增加。因而, 对于超分辨

图像处理中的像素内配准, 本文提出的方法可以代替传统的泰勒展开法和分级块匹配法。

## 参考文献

- [1] Tsai R Y and Huang T S. Multi-frame image restoration and registration. In *Advances in Computer Vision and Image Processing*, JAI Press, Greenwich, Ct. 1984, Vol.1: 317-339.
- [2] Lucas B D and Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the 1981 DARPA Image Understanding Workshop*, April, 1981: 121-130.
- [3] Irani M and Peleg S. Improving resolution by image registration. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, 53(3): 231-239.
- [4] Borman S. Topic in multiframe superresolution restoration. [Doctor's Thesis], Stanford University, 2004.
- [5] Heckbert P S. Fundamentals of texture mapping and image warping. [Master's Thesis], University of California, Berkeley, 1989.

袁建华: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为图像、视频处理技术。

邹谋炎: 男, 1941 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号处理、图像处理理论和算法、无线宽带通信技术。