

# 光纤耦合的亚像元图像超分辨率重建

安博文, 薛冰玢

(上海海事大学信息工程学院, 上海 201306)

**摘 要:** 光纤耦合图像之间存在亚像元级位移问题, 为此, 提出一种基于图像互补信息的超分辨率重建算法。采用传统相位相关法进行整像元级配准, 通过拟合多个谱峰值进行亚像元级配准, 利用待插值点周围的 4 条 B 样条曲线实现图像插值融合。实验结果表明, 该算法能提高图像空间分辨率, 且复杂度较低、重建图像质量较好。

**关键词:** 传像光纤束; 亚像元; 相位相关; 多峰拟合; B 样条插值; 超分辨率重建

## Super-resolution Reconstruction for Sub-pixel Image with Fiber Bundle Coupling

AN Bo-wen, XUE Bing-bin

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**【Abstract】** As the image coupled by the adjacent layer fibers has a sub-pixel dislocation, a super-reconstruction algorithm based on image complementary information is proposed. It makes pixel-level registration by traditional phase correlation, and sub-pixel registration by multi-peak fitting. Four B-spline curves for ultimate interpolation are used to fuse the matched image with the reference image. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively raise the spatial resolution with less complexity, and the reconstruction image owns better quality.

**【Key words】** image-carrying fiber bundle; sub-pixel; phase correlation; multi-peak fitting; B-spline interpolation; super-resolution reconstruction

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.17.060

### 1 概述

扫描成像是遥感领域获取高分辨率图像的重要途径。在扫描视场和成像距离确定后, 图像的空间分辨率取决于探测器的元数。而高性能超长红外外焦平面采用一个特殊结构的线面转换传像光纤束, 前端呈线阵排列、后端呈面阵排列, 难以对其进行加工。在扫描成像时, 目标区域依次经过传像光纤束线阵纵向相应像元<sup>[1]</sup>, 可以利用相邻层光纤耦合图像间互补的信息进行超分辨率重建, 重构出超过探测器采样的奈奎斯特极限频率的图像。

图像超分辨率重建方法可分为两大类: 频域方法和空间域方法<sup>[2]</sup>。频域方法通过在频域内消除频谱混叠来重建图像的高频信息。Tsai 和 Huang 提出了基于序列的超分辨率重建。后来研究者又提出了许多改进的方法, 如基于频谱外推<sup>[3]</sup>和混叠效应消除<sup>[4]</sup>方法, 但频域方法难以包含先验知识, 且运动类型在退化模型中仅局限为全局平移。空间域算法是目前的主流方法之一, 包含了更加灵活的图像观测模型, 通过构造代价函数, 利用迭代方法求解方程。目前, 空间域图像超分辨率重建的主要的方法包括非均匀

空域样本内插法、迭代反向投影算法(IBP)、凸集投影算法(POCS)、最大后验概率估计器(MAP)、极大似然估计器(ML)、自适应滤波算法等。空间域内算法的优点是所获得的图像分辨率较高, 可附加先验信息进行估计, 缺点是计算量较大。

相邻层光纤在其轴向和径向的相对位移均小于 1 根光纤的直径, 相邻层光纤耦合图像存在亚像元级错位的问题。为此, 本文利用空间域重建算法的优势, 提出一种超分辨率重建算法, 采用多峰拟合的扩展相位相关法进行亚像元级配准, 以减少计算量, 并通过三次均匀 B 样条插值法进行图像融合。

### 2 基于相位相关的图像配准

#### 2.1 平移参数估计

相位相关主要是基于 Fourier 变换中的平移定理。假设存在平移变换的 2 幅图像满足:

$$f(x, y) = g(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

将式(1)两边进行 Fourier 变换, 根据平移关系得:

$$F(u, v) = G(u, v)e^{-2\pi i(\frac{ux_0}{M} + \frac{vy_0}{N})} \quad (2)$$

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61171126); 上海市自然科学基金资助项目(11ZR1415200); 上海市教委科研创新基金资助重点项目(11ZZ142)

**作者简介:** 安博文(1969—), 男, 副教授、博士, 主研方向: 数字图像处理, 图像识别; 薛冰玢, 硕士研究生

**收稿日期:** 2011-11-30 **修回日期:** 2012-01-12 **E-mail:** anbowen@sina.com

定义 2 幅图像的互相关功率谱为:

$$P(u, v) = \frac{F(u, v)G^*(u, v)}{|F(u, v)G^*(u, v)|} = e^{-2\pi i(\frac{ux_0}{M} + \frac{vy_0}{N})} \quad (3)$$

其中,  $G^*(u, v)$  表示  $G(u, v)$  的共轭复数。由于有幅度归一化因子  $|F(u, v)G^*(u, v)|$ , 因此算法对于随机噪声和光照变化有良好鲁棒性。经 Fourier 逆变换得到二维 Dirichlet 函数:

$$p(x, y) = \sigma(x - x_0, y - y_0) \quad (4)$$

该函数值所在坐标即为图  $g(x, y)$  的相对平移量  $(x_0, y_0)$ 。

### 2.2 基于多峰拟合的相位相关扩展方法

文献[5]的研究表明, 相位相关通常在配准点对应一个相关峰所在坐标为  $(x, y)$ , 不相关峰以零均值正态分布在相关峰的两边。当出现亚像元级平移时, 其平移量落在相位相关频谱的最高峰值之间。设最高峰为  $C_1$ , 另外 3 个峰值设为  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ , 其位置分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$  和  $(x_4, y_4)$ , 实际的平移量  $(x_0, y_0)$  位于 4 个峰之间, 采用双线性拟合, 可求出亚像元级平移量  $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ :

$$\Delta x_0 \cong \pm \frac{|x_2' \times C_2 + x_3' \times C_3 + w_1 \times x_4' \times C_4|}{C_1 + |x_2' \times C_2 + x_3' \times C_3 + x_4' \times C_4|}$$

$$\Delta y_0 \cong \pm \frac{|y_2' \times C_2 + y_3' \times C_3 + w_2 \times y_4' \times C_4|}{C_1 + |y_2' \times C_2 + y_3' \times C_3 + y_4' \times C_4|} \quad (5)$$

$$w_1 = (x_2 - x_4) \times \frac{C_2}{C_2 + C_3} + (x_3 - x_4) \times \frac{C_3}{C_2 + C_3}$$

$$w_2 = (y_2 - y_4) \times \frac{C_2}{C_2 + C_3} + (y_3 - y_4) \times \frac{C_3}{C_2 + C_3} \quad (6)$$

其中,  $x_i' = x_i - x_1$ ,  $y_i' = y_i - y_1$ ,  $i=2, 3, 4$ ;  $w_1$  和  $w_2$  代表 4 个相关峰分别作用于水平和垂直方向的权值。采用相位相关法获得单位脉冲函数和整像元平移量  $(x, y)$  后, 通过式(5)、式(6)得到亚像元平移量  $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ , 则修正后的亚像元级配准结果为  $(x + \Delta x_0, y + \Delta y_0)$ 。

## 3 基于三次 B 样条插值的图像融合

### 3.1 三次 B 样条数学模型

B 样条曲线具有很强的曲线表达能力, 在计算机图形学上有着广泛的应用, 是重要的图像插值工具。设  $b_i (i=0, 1, \dots, n)$  为 B 样条曲线的控制顶点,  $l$  表示曲线段的个数, 三次均匀 B 样条曲线的矩阵表达式为:

$$p_l = \frac{1}{6} [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_l \\ b_{l+1} \\ b_{l+2} \\ b_{l+3} \end{bmatrix}$$

$$0 \leq u \leq 1, l = 0, 1, \dots, n-3 \quad (7)$$

若将型值点  $Q_i$  直接作为 B 样条曲线的控制顶点, 得到的三次均匀 B 样条曲线一般不经过型值点, 因此, 需根据给定型值点逆运算求出相应 B 样条曲线的控制顶点, 即求解线性方程组:

$$b_i + 4b_{i+1} + b_{i+2} = 6Q_i, i = 0, 1, \dots, k \quad (8)$$

对于非封闭曲线, 可取  $b_0 = b_1, b_{n+1} = b_n$ , 求出  $b_i$  后再代入式(7), 即可求得通过型值点  $Q_i$  的三次均匀 B 样条插值

曲线。

### 3.2 基于三次 B 样条插值的图像融合算法

设基准图像和配准后图像分别为  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$ , 融合后图像为  $R(2x, 2y)$ 。基于三次 B 样条插值的图像融合算法原理如图 1 所示。

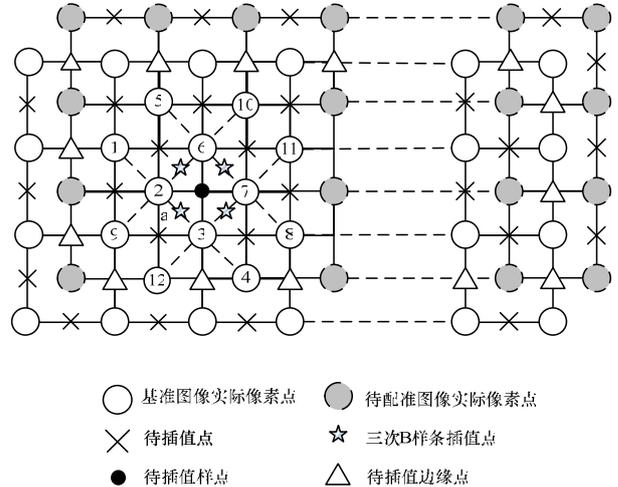


图 1 三次 B 样条插值算法示意图

具体步骤如下:

(1) 将基准图像和配准后图像的真实采样点放入重构图像, 补充边界点:

$$R(2x-1, 2y) = R(2x-1, 2y-1) = f_2(x, y) \quad (9)$$

$$R(2x, 2y-1) = R(2x, 2y) = f_1(x, y) \quad (10)$$

(2) 将图 1 中的点 1~4 作为点  $a$  的控制点, 令式(7)中  $u=0.5$ , 利用式(7)和式(8)计算出三次均匀 B 样条插值  $p_a$ , 同理, 利用点 5~8, 点 9、点 2、点 6、点 10, 以及点 11、点 7、点 3、点 12 分别计算出  $p_b$ 、 $p_c$  和  $p_d$ , 进而待插值样点(表示为  $R_c(x, y)$ )的值为:

$$R_c(x, y) = (p_a + p_b + p_c + p_d) / 4 \quad (11)$$

(3) 待插值边缘点(表示为  $R_\Delta(x, y)$ )的值为:

$$R_\Delta(x, y) = [R_\Delta(x-1, y) + R_\Delta(x+1, y) + R_\Delta(x, y-1) + R_\Delta(x, y+1)] / 4 \quad (12)$$

## 4 实验与结果分析

本文对成像系统采集到的第 2 层和第 3 层光纤耦合图像进行处理, 图像分辨率为  $8\ 000 \times 7\ 520$  像素, 如图 2 所示。

截取 2 幅图像中同一位置分辨率均为  $256 \times 256$  像素的图像。采用相位相关法得到第 3 层光纤耦合图像的整像元级相对位移为  $(0, 0)$ , 相位相关谱的 Fourier 逆变换幅值如图 3(a) 所示。采用基于多峰拟合的扩展相位相关法进行亚像元级修正, 得到第 3 层光纤耦合图像相对于第 2 层光纤耦合图像(基准图像)的平移量为  $(0.38, -0.40)$ 。其中,  $\Delta x_0 > 0$  表示相对右移;  $\Delta y_0 < 0$  表示相对上移。对第 3 层光纤耦合图像的配准结果如图 3(b) 所示。

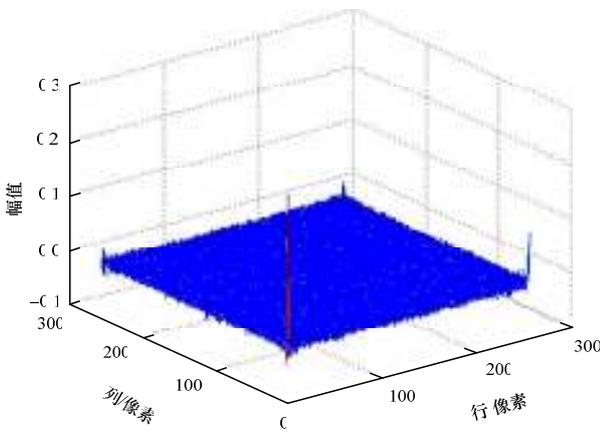


(a)第2层光纤耦合图像



(b)第3层光纤耦合图像

图2 第2层和第3层光纤耦合图像



(a)相位相关谱 Fourier 逆变换幅值



(b)多峰拟合法配准后的图像

图3 配准结果

文献[6-7]根据上采样矩阵傅里叶变换技术,将求出的修正平移量除以上采样倍数,得到亚像元级位移。假设图像分辨率为  $M \times N$ ,  $n$  为  $M$  和  $N$  中较小的一个,  $k$  为上采样倍数。传统的上采样 FFT 方法的复杂度为  $O(n^2 k^2 \ln n)$ , 文献[7-8]只对互功率谱附近一个较小的邻域范围进行上采样,算法复杂度为  $O(n^2 k)$ 。要达到亚像元级配准,局部相位相关上采样倍数  $k$  至少取为 10。而本文算法只需要对互相关谱峰值进行 24 次加法运算和 6 次除法运算,即可得出亚像元级的平移量,算法复杂度为  $O(1)$ ,计算量远远小于文献[6-7]的算法,运算效率较高。

分别采用三点插值法、四点插值法及本文算法对第 2 层光纤耦合图像和配准后的图像进行融合。三点法和四点法分别是指:带插值点分别取其邻域内的三点和四点的算术平均值作为其像素值。截取融合图像中同一位置分辨率均为  $512 \times 512$  像素的图像,3 种插值法得到的结果如图 4 所示。



(a)三点插值法 (b)四点插值法 (c)本文算法

图4 不同融合算法的重建图像对比

对两层光纤耦合的图像超分辨率重建后的图像如图 5 所示。图像分辨率由原来的  $8\ 000 \times 7\ 520$  像素提高至  $16\ 000 \times 15\ 040$  像素,即达到将空间分辨率提高至原来 2 倍的目的。



图5 超分辨率重建图像

图像信息熵 SNT 是衡量单幅图像重建效果的一个重要指标,体现了图像的细节表现能力。重构图像的信息熵越大说明其携带的信息量也越大。此外,图像的标准差  $\sigma$  反应了图像灰度相对于平均灰度的离散情况。标准差越大,图像灰度分布越分散,图像的反差越大,可看出的图像信息也越多。设图像为  $f(x, y)$ , 图像均值为  $\bar{f}(m, n)$ , 图像分辨率和总灰度级数分别为  $M \times N$  和  $L$ ,  $p(i)$  为图像各点灰度值的概率,信息熵和标准差分别定义为:

$$SNT = -\sum_{i=0}^{L-1} p(i) \ln p(i) \tag{13}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m,n) - \bar{f}(m,n)]^2}{(M \times N)}} \quad (14)$$

用3种插值方法对分别对不经配准和配准后的图像进行融合的评价指标如表1和表2所示。

表1 配准前3种插值融合图像的评价指标

指标	三点插值法	四点插值法	三次B样条法
信息熵/dB	6.877 1	6.899 8	6.911 6
标准差	33.550 3	33.944 6	34.072 4

表2 配准后3种插值融合图像的评价指标

指标	三点插值法	四点插值法	三次B样条法
信息熵/dB	6.889 1	6.907 1	6.918 4
标准差	33.708 5	34.068 4	34.193 6

从表1可以看出,在不经配准的情况下,与直接采用传统的三点法和四点法相比,本文得到的融合图像信息熵和标准差较大。从表2可以看出,本文采用的配准及插值融合的超分辨率重建算法,得到的图像信息熵和标准差明显高于三点插值法和四点插值法。通过表1及表2的对比可以看出,本文算法比不经配准直接用B样条插值方法得到的图像信息更为丰富,重建质量更好。

图6对不同方式得到的局部图像进行了对比。图6(a)显示了用Nikon D90采集的部分图像,图像尺寸为实际尺寸的50%。图6(b)和图6(c)分别为同一位置图像超分辨率重建前和重建后图像,图像尺寸均为实际尺寸的20%。



图6 局部图像对比

## 5 结束语

本文提出一种亚像元级配准及融合的超分辨率重建算法,利用光纤束耦合的扫描成像系统,针对光纤束六角

形排列的特点,采用微扫描方式使目标区域依次通过各层光纤。采用多峰拟合的相位相关扩展方法,能够使相邻层光纤耦合的图像配准精度达到亚像元级,且算法复杂度较低,可以满足实时处理的要求。根据配准结果采用三次均匀B样条插值的图像融合,考虑待插值点周围12个点的像素信息,得到的重建图像质量更高。实验结果表明,该算法可显著提高图像空间分辨率,为进一步实现对目标区域的信息提取奠定基础。由于本文中超分辨率重建的2幅源图像一维方向均超过7000像素,而待配准图像相对于基准图像只存在整体平移,因此只截取了源图像中特征明显的一部分区域进行配准。相比于对图像整体进行配准,存在一定误差。为更好地利用图像间的冗余和互补信息,下一步工作将研究如何提高算法的配准精度。

## 参考文献

- [1] 安博文, 陈桂林. 光纤耦合系统中非均匀性校正[J]. 红外技术, 2007, 29(5): 261-264.
- [2] 张 剑. 图像超分辨率重建问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [3] Li Xiaoliang, Lam K M, Shen Lansun. An Image Magnification Algorithm Using the GVF Constraint Model[J]. Journal of Electronics(China), 2008, 25(4): 565-571.
- [4] 刘良云, 李英才, 相里斌. 超分辨率图像重构技术的仿真实验研究[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(7): 629-635.
- [5] Stone H S. Blind Cross-spectral Image Registration Using Pre-filtering and Fourier-based Translation Detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(3): 637-650.
- [6] 刘洪臣, 杨旭强, 冯 勇. 亚像元成像系统B样条插值方法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 90-93.
- [7] Manuel G S, Samuel T T, James R F. Efficient Subpixel Image Registration Algorithms[J]. Optics Letters, 2008, 33(2): 156-158.
- [8] 王彩玲, 程 勇, 赵春霞, 等. 局部相位相关用于图像亚像素级配准技术研究[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 427-432.

编辑 金胡考

(上接第217页)

## 参考文献

- [1] Intille S S, Bobick A F. Tracking Using a Local Closed-world Assumption: Tracking in the Football Domain[EB/OL]. (2010-11-21). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.49.8581>.
- [2] Seo Y, Choi S, Kim H, et al. Where are the Ball and Players Soccer Game Analysis with Color-based Tracking and Image Mosaicking[C]//Proc. of the 9th International Conference on Image Analysis and Processing. Florence, Italy: ACM Press, 1997.
- [3] Zivkovic B K. An EM-like Algorithm for Color Histogram Based Object Tracking[C]//Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2004.
- [4] Stauffer C, Grimson W. Adaptive Background Mixture Models for Real Time Tracking[C]//Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 1999.
- [5] 吴海松, 华庆一, 李光俊, 等. 体育视频中的运动员检测与跟踪[J]. 计算机工程, 2008, 34(19): 230-232.
- [6] 袁广林, 薛模根. 基于核函数粒子滤波和多特征自适应融合的目标跟踪[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(12): 1774-1784.
- [7] Figueroa P, Leite N, Barros R. Tracking Soccer Players Using the Graph Representation[C]//Proc. of the 17th International Conference on Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2004.
- [8] Hosse R M. Automatic Soccer Players Tracking in Goal Scenes by Camera Motion Elimination[J]. Image and Vision Computing, 2009, 17(4): 469-479.

编辑 刘 冰

