

图像超分辨率复原方法及应用

陈健^{1,2,3} 高慧斌¹ 王伟国¹ 毕寻^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

³吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 介绍了超分辨率复原方法的概念和理论基础,重点总结了一些常用的超分辨率复原理论的国内外研究现状,并对它们的理论依据、优缺点和适用范围进行了详尽分析,对超分辨率复原理论的应用领域进行了介绍。超分辨率复原方法分为频域法和空域法。频域复原法原理简单清楚,计算方便,但是所建立的运动模型都是平移模型,不具有—般性,同时难以利用正则化约束,这就导致难以使用图像的先验信息来帮助进行超分辨率复原。空域复原法可以很方便地建立复杂的运动模型,同时考虑了几乎所有的图像降质因素,例如噪声、降采样、由非零孔径时间造成的模糊、光学系统降质和运动模糊等,还可以加入更完善的先验知识,相比于频域复原法,空域超分辨率复原模型更符合实际的图像退化过程,是目前应用最广泛的一类超分辨率复原方法。

关键词 图像处理;超分辨率复原;频域法;空域法;凸集投影约束

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.020004

Methods and Applications of Image Super-Resolution Restoration

Chen Jian^{1,2,3} Gao Huibin¹ Wang Weiguo¹ Bi Xun^{1,2}

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

³*College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China*

Abstract The basic concepts and theories of super-resolution restoration method is introduced. Some applications focused on common method of super-resolution restoration is summarized. Their theoretical basis, advantages and disadvantages, and scope of applications are exhaustively analyzed. The applications of super-resolution restoration theory is introduced. Overall, the super-resolution restoration methods are divided into frequency domain method and space domain method. Frequency domain recovery method is simple in principle and easy in calculation. But its motion model is shift model have no generality. Meanwhile it is difficult to use the priori information of the image to help super-resolution restoration. Space domain recovery method can be easily taken degradation and motion blur. More perfect priori knowledge is added. Compared with the frequency domain method, space domain super-resolution restoration model is more close to actual degradation processes and currently the most widely used super-resolution restoration method.

Key words image processing; super-resolution restoration; frequency region method; space region method; projection onto convex sets

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.3010; 100.3020

1 引言

“超分辨率”一词的定义,经历了一系列的发展过程。成像系统可以看作是一个低通滤波器,经历了降采样和低通滤波的过程,原始图像中的一些高频信息被滤除掉了,所成的图像并不是十分清晰。传统的图

收稿日期: 2014-07-28; 收到修改稿日期: 2014-09-04; 网络出版日期: 2015-01-19

基金项目: 吉林省重大科技公关专项(20126015)

作者简介: 陈健(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事高精度快速数字伺服系统方面的研究。

E-mail: chenjian4500@163.com

像复原方法只能在系统的极限衍射频率范围内去估计图像信息,无法突破硬件条件的限制,为此超分辨率复原方法应运而生。最初学者们认为超分辨率复原方法指的就是估计超过成像系统衍射极限范围的图像信息的复原方法。随后,学者们发现对同一个场景所成的图像序列包含的信息是不尽相同的,结合这些低分辨率图像序列,采用图像处理的方法就可以获得视觉效果较好的高分辨率图像。随着超分辨率方法的进一步发展,超分辨率复原方法将越来越多的图像降质因素考虑在内,包括序列图像的亚像素位移、红外相机的动态响应范围、成像系统的固有噪声和图像的运动模糊等,越来越接近于实际的降质模型。

从图像处理角度,所谓的超分辨率复原,就是利用一幅或者多幅低分辨率的图像,结合特定的方法,来估计频率信息大于光学成像系统截止频率的高分辨率图像的过程,该过程主要克服的困难有光学系统的像差、大气扰动和目标与光学系统之间的相对运动产生的模糊、成像系统噪声、红外相机降采样丢失的信息和光学系统离焦等。超分辨率复原是图像融合的一个分支,同样是一个病态问题,也就是说输入图像参数的轻微扰动都会导致估计图像产生较大的偏差,学者们一直都在致力于解决这个问题。

目前,超分辨率复原已经应用于多个领域,也已经成为图像配准方面发展比较活跃的一个分支。例如法国的 SPOT 和美国的 EarthSat 公司已经成功地将超分辨率复原技术应用于商业领域,在卫星图像复原中取得较好的效果。

2 超分辨率复原理论的国内外研究现状

超分辨率的概念在 20 世纪 60 年代由美国国家航天局的 Banham 等^[1]提出,用于增强卫星图像的分辨率。超分辨率复原理论中,最基础的方法包括基于长椭圆函数的方法、基于叠加正弦模板的方法、基于频谱外推的方法、基于能量连续降减的方法和基于线性均方外推的方法等^[2]。但是,这些方法大多数是基于数学层面上的公式推导,用到的图像模型都是比较理想的,在现实中因为图像会受到各种噪声的污染和运动模糊等,这些方法缺乏实用性。因此超分辨率复原理论当时作为一个不可能实现的理论而被搁置。1984 年,有人提出了一种使用一组序列图像来获得一帧高分辨率图像的方法,使得超分辨率复原理论取得突破性的进展。Hunt 等^[3]在理论上证实超分辨率方法的可行性,同时提出了多种实用方案,自此超分辨率复原技术开始蓬勃发展。迄今为止,超分辨率复原理论依然是图像处理领域中一个重要的热点课题。

目前,绝大多数的超分辨率复原理论来源于单帧图像复原理论。虽然经过长期的发展和积累,单帧图像复原理论已经非常成熟,但是其理论体系自身存在较大的局限性,输入只是单帧图像,包含的信息量非常有限,无法取得令人满意的效果。而序列图像的超分辨率复原理论则是利用序列图像的时域信息量和空域信息量进行图像复原处理,进而可以复原出一帧高分辨率图像,复原的高分辨率图像包含的信息量超过任何一帧原始低分辨率图像。

超分辨率复原理论主要分为单帧图像复原理论和序列图像复原理论,下面对这两个方面分别进行简述。

2.1 基于单帧图像的超分辨率复原理论

基于单帧图像的超分辨率复原,是指利用一帧低分辨率的图像,经过处理得到高分辨率图像^[4]。该理论最初于 20 世纪 60 年代提出,经过多年的发展理论体系已经逐渐成熟,但是单帧图像复原技术的理论存在很大的理论局限性。在经典的单帧图像复原理论中,输入只是单帧图像,包含的信息量非常有限,无法取得令人满意的效果^[5-7]。而基于序列图像的超分辨率复原则是利用序列图像的时域信息量和空域信息量进行图像复原处理,进而可以复原出一帧高分辨率图像,复原的高分辨率图像包含的信息量超过任何一帧原始低分辨率图像。

基于单帧图像的超分辨率复原理论的实质就是要使放大的图像具有更多的景物细节。以往,通常的超分辨率图像复原方法是在图像帧内进行插值处理,例如双线性插值、局部自适应放大插值、三次样条插值等方法,这种简单插值的方法复原速度很快,但效果却不理想,这是因为单帧图像的固有信息较少,使用插值并不能有效去除红外相机欠采样造成的模糊和细节损失。经过一段时间的发展,提出了一些基于新的假设的图像插值方法,例如基于分析的方法、基于正交变换域的方法、基于能量连续降减的方法、基于多卷积核和非线性滤波的方法、基于方向插值的方法等^[8],但上述方法均假设图像是不含噪声的理想图像,这在真实情

况下是不可能存在的。因此,上述方法仅仅停留在理论推导上,尚未应用在实际工程中。

近年来的研究进展中,通过将小波分析理论和神经网络理论应用在超分辨率复原应用中,进而提高了超分辨率复原技术的实际应用能力。Ahmed等^[8]通过使用径向基函数网络,在输入模板中创建隐单元,提高了超分辨率复原的性能。Plaziac等^[9]通过使用固定大小的反向传递网络,同样提高了超分辨率复原的性能。Candincia等^[10]通过使用独立组织网络,对图像实行分类插值操作,取得了较好的超分辨率复原效果。神经网络理论应用在超分辨率复原中的优点是复原效果较好,但是缺点是带来了巨大的运算量,同时神经网络的训练过程漫长,进而使系统不具有实时性。Schultz等^[11]通过使用基于隐马尔可夫树模型进行超分辨率复原,该方法认为超分辨率复原问题可以归结为一个约束最优化问题,同时提出了一种新的能量函数,该方法能够取得较好的超分辨率复原性能,但是获得的高分辨率图像边缘容易变模糊。Lix等^[12]研究了基于最小平方的边缘内插理论,根据不同分辨率图像之间的相关性,进行自适应的插值,提高了超分辨率复原的性能,但是此方法的缺点是使纹理区边缘不具有自相似性。

将小波分析理论和神经网络理论应用在超分辨率复原应用中的经典方法有以下两个:1)是小波复原方法,小波复原方法的优点是过程简单,缺点是使纹理区边缘不具有自相似性,具有一定的缺陷;2)是神经网络恢复残差法,该方法优点是复原效果较好,但是缺点是带来了巨大的运算量,同时神经网络的训练过程漫长,进而使系统不具有实时性。

最近的研究中,学者们提出了一些基于稀疏表示和尺度空间的单帧图像超分辨率复原方法^[13-14],这类方法使用局部稀疏模型对图像块建模,通过训练得到低分辨率图像块与高分辨率图像块之间的映射关系,复原效果较传统方法有所提高,但缺陷是训练时间较长,所需数据库也较庞大。

2.2 基于序列图像的超分辨率复原理论

自然获取的视频序列中,一组图像通常会存在一定的相关性,例如相邻图像帧场景变化较小,目标位置也接近相同,也就是可以认为这一系列序列图像包含着近似但不一致的信息。序列图像的超分辨率复原就是通过这些近似并且不完全一致的信息量,进而实现低分辨率的图像复原出高分辨率的图像。与传统的单帧图像的超分辨率复原理论相比,基于序列图像的超分辨率复原不仅可以使图像的先验信息和单帧图像的自身信息,也可以使用一系列序列图像间的相关信息量,进而序列图像的超分辨率复原效果比单帧图像的超分辨率复原效果要好。针对序列图像的超分辨率复原理论领域,Ng等^[15]在频域提出了创新的理论,提出了基于频域方法的超分辨率复原理论。Bose等^[16]在空域提出了创新的理论,提出了基于空域方法的超分辨率复原理论。下面对基于频域方法的超分辨率复原理论和基于空域方法的超分辨率复原理论分别加以介绍。

2.2.1 基于频域方法的超分辨率复原理论

基于频域方法的超分辨率复原理论中,研究得较为成熟的是消混叠复原理论。该理论由Tasi等^[17]提出,基于傅里叶变换的平移特性和连续离散的傅里叶变换频谱特性,通过求解混叠来实现提高图像的空间分辨率,进而实现超分辨率复原的效果。该理论使用多帧低分辨率子图像的离散傅里叶变换系数和一帧高分辨率图像的连续傅里叶变换系数建立方程组,通过求解该方程组,最后进行连续傅里叶逆变换就可以得到高分辨率的图像。该方法计算简单,但是缺点与单帧图像复原理论一致,都是没有考虑图像噪声和运动模糊的影响。同时该模型只考虑了图像平移的情况,对于目标发生其他复杂变换,该方法无能为力,这限制了该方法的实用性。

为了克服上述方法的缺点,众多学者提出了不同的改进方法。Tekalp等^[18]考虑了运动模糊和图像噪声的影响,对于现实自然图像具有较好的处理效果。Kim等^[19]假定不同的低分辨率图像具有不同的模糊算子,使用Tikhonov方法进行正则化。Elad等^[20]的改进方法基于数据,该方法计算复杂度较小,便于在硬件平台上进行移植,但最终的求解得到的结果不一定是最优解。Davila^[21]的改进方法中,没有使用傅里叶变换而是使用离散余弦变换(DCT),即使低分辨率图像不充足,也能取得较好的复原效果。Ngugen等^[22]提出的改进方法使用整体平移参数,大大提高了计算速度。后期研究的发展,学者们还提出了基于多通道采样定理和最小二乘等方法,但都局限于方法某一方面的改进,没有更大的理论创新性的突破,只是在方法复杂程度和最优解这两个矛盾中寻求解决途径。

频域法的原理简单清楚,基于离散傅里叶变换和连续傅里叶变换,通过实现并行处理来提高处理速度,

但是所建立的模型存在局限性,不具有全局性,这样建立的模型就不能使用图像的先验和优先级来实行标准化。

2.2.2 基于空域方法的超分辨率复原理论

基于空域方法的超分辨率复原方法^[23]直接在图像空域进行处理,区别在于不同的描述模型、不同的滤波方法和不同的配准步骤。基于空域方法的超分辨率复原理论可以分为以下主要理论体系:基于非均匀空间样本插值的理论体系、基于滤波器的理论体系、基于迭代反向投影的理论体系、基于代数滤波后向投影的理论体系、基于集合理论复原的理论体系(凸集投影POCS)、基于统计复原的理论体系[最大后验概率估计器(MAP)和最大似然估计器(ML)以及基于混合MAP/POCS的理论体系^[24-25]等]。

基于非均匀空间样本插值的理论体系是最简单直观的高分辨率复原理论。首先针对低分辨率图像采用运动补偿和内插的方法合成一帧高分辨率图像,然后以此单帧高分辨率合成图像为基础迭代实现超分辨率图像复原,该方法包括运动估计、非均匀空间样本插值和图像复原三个步骤。Ur等^[26]根据广义多通道采样定理^[27-28],对低分辨率图像进行插值和去模糊,取得较好的复原效果。Hardie等^[29]使用梯度配准方法估计序列图像之间的空间关系,随后进行插值和维纳滤波。Nguyen等^[30-32]结合小波变换的思想,使用多帧低分辨率图像来估计高分辨率图像不同小波空间的系数。基于非均匀空间样本插值的理论优点是操作简单、原理直观,但是该理论还存在一定的局限性。首先低分辨率图像的噪声参数必须相同,其次图像恢复过程中存在一定的误差,导致的结果就是复原得到的高分辨率图像并不是全局最优的。

基于滤波器的理论体系具有较快的复原速度,适用于电视信号变换、超分辨率影视成像等实时性要求比较高的场合。文献[33]提出将Kalman自适应滤波器用于超分辨率复原中,是滤波器理论的先驱。文献[20]使用一种自适应的迭代滤波方法,通过估计当前低分辨率图像、前一帧高分辨率图像和带估计的高分辨率图像的最小均方误差,得到较快的收敛速度。文献[34-35]提出两种称为最陡下降和最小均方的递归滤波方法,希望在运算速度和复原效果之间寻求平衡。文献[36]将维纳滤波的思想用于超分辨率复原之中,将低分辨率图像通过一种步长措施映射到高分辨率网格上,使用维纳滤波进行噪声抑制和模糊复原,得到令人满意的效果。

基于迭代反向投影的理论体系^[37-38]的方法是一个逆过程,该方法首先将估计的高分辨率图像投影到低分辨率的图像空间中,获得低分辨率图像的估计,接着计算真实低分辨率图像和估计低分辨率图像的误差,直到误差小于规定的阈值为止。文献[39]提出将傅里叶变换用于低分辨率图像中目标的运动估计,计算图像帧之间的相位差,反变换得空间域的位移,接着根据这个位移和迭代反投影方法,复原高分辨率图像,该方法具有亚像素的定位精度。文献[40]使用一种新的变换模型来描述目标的位移情况,得到较好的配准和复原效果。文献[41]提出在迭代过程中加入一些权值系数,对迭代参数进行自适应的选择,该方法能有效提高准确性。文献[42]提出新的透视运动模型,对低分辨率图像的位移做出了更准确的描述。文献[43]在模型中加入运动补偿,取得更好的复原效果。基于迭代反向投影的理论体系缺点是结果不唯一,并且将先验约束引入是一个复杂的过程,大大增加了该方法的复杂度。

基于代数滤波后向投影的理论体系^[20]是通过假设相对于光学系统的分辨率、传感器的分辨率要更高,这样成像系统就可以实现图像采集区域的重叠采集。基于代数滤波后向投影的理论体系优点是使用了层析图像领域中的复原技术,提高了超分辨率复原的效果,但是该理论还存在一定的局限性,即该理论忽略了观测噪声。

POCS是超分辨率复原领域中的一种主流方法^[44-45]。该方法的思想是使用一系列的凸约束集合来描述超分辨率复原方法中的一些特性,包括图像正则、数据保真和能量有界等,通过迭代方法,找到这些POCS的解空间交集,就是所求的超分辨率复原的解空间。文献[46]改进了文献[45]中的方法,考虑了自然图像中的运动模糊问题。文献[47]将数据压缩方法与POCS方法相结合,对经过压缩的视频数据进行超分辨率复原,取得较好的效果。文献[48]在复原过程中考虑了边缘信息,并采用一种线过程模型进行描述,可以抑制结果中的振铃现象。文献[49]引入最大后验概率估计,取得较好的复原效果。文献[50]使用一种称为模拟-修正的迭代过程来抑制吉布斯现象。文献[51-52]将小波变换和外存策略引入POCS方法中,可以对大尺寸的图像进行超分辨率复原。文献[53]同时考虑了光学系统离焦引起的模糊和光学系统的固有噪声对超分辨率复

原的影响。后来,Patti等^[54-56]对POCS方法做出了一系列的改进,例如考虑成像系统的非零孔径时间、红外相机的物理尺寸、更为复杂的目标运动模型等。文献[57]提出使用椭圆形状的POCS来描述复原因子。总的来说,POCS方法实现简单,并且便于使用先验知识,但是通常得不到唯一解,对边缘细节的保护能力较差,迭代次数一般较大,计算时间较长,同时收敛结果很大程度上取决于初始值的选取。

基于统计复原的理论体系首先设定一个多重参考模型先验模型,先验概率模型具有局部平滑函数、边缘保持能力和凸函数等三个特点,通过设计有效的步骤,使得复原后超分辨率图像的后验概率最大。因此最大后验概率复原方法在等概率先验条件下就是最大似然复原模型。文献[58]最先提出了这种超分辨率复原方法,开启了最大后验概率超分辨率复原的先河。文献[59]针对低分辨率图像之间的不同位移关系建立了两种运动模型,大大提高了最大后验概率超分辨率复原的实用性。文献[60]建立了先验概率模型的高斯分布,该方法收敛速度较快,但是对图像细节复原效果并不好。文献[61-63]使用两步配准法估计图像之间的变换参数,提高了配准精度,较大程度上提高了复原质量。文献[64-65]对MAP方法进行改进,利用多通道的影像先验知识,研究了视频序列的复原方法,提高了配准精度。文献[66]将MAP方法应用于四维正电子发射扫描图像中。Irani等^[67-68]受到计算机辅助X线断层的启发,提出了新的似然估计方法,但是该方法稳定性较差。国内研究方面,文献[69]将序列图像的位移信息提取出来并融入MAP复原的图像中,提高了复原图像的质量。王静等^[70]提出了一种频域校正方法,解决了MAP方法中的不适定问题,是一种较好的单帧图像复原方法。韩玉兵等^[71]在最大后验概率方法中引入一种快速的滤波方法。韩华等^[72]将结构相似性评价指标引入基于MAP的单帧图像的超分辨率复原方法中,取得较好的复原效果。陈华等^[73]利用小波分解先对图像进行去噪,再用MAP方法进行超分辨率复原。总的来说,基于统计复原的理论体系具有思想简单,容易引入先验知识等优点,但缺点是实际中先验模型难以获得。

基于混合MAP/POCS的理论体系其实是将上面提到的两种方法进行结合,在POCS方法的POCS约束中加入最大后验概率模型,使得约束更加严格。现有的研究表明,基于混合MAP/POCS方法要收敛到全局最优解,只有保证使用梯度下降最优化方法,该方法的先驱是Elad等^[74]。国内方面,苏秉华等^[75]对其进行了研究,将马尔可夫约束的MAP方法和POCS方法相结合,该方法理论上并没有新的创新,目前应用得也较少。

近些年的研究中,一些研究人员提出了更加复杂的超分辨率复原方法。Capel^[76]针对文本图像序列,提出了基于特定场景和连续变差模型的子空间方法,该方法的缺点是针对特定场景建模,适用性较差。Elad^[77]和Barash^[78]对双边滤波器进行了一系列的研究,基于此研究,Farsiu等^[79]将双边滤波器^[80]和全变差模型相结合,并提出了一种稳健的帧间平移运动估计方法,能够取得很好的复原效果。Gilboa等^[81]将图像超分辨率复原问题转化为偏微分方程的求解问题,提出基于正反向偏微分方程(PDE)演化的图像去噪和超分辨率复原方法。Shechtman等^[82]在时间图像序列中加入空间维度,并基于时空二维进行低分辨率图像配准,解决了多视频序列的复原问题。文献[83]使用扩散张量增强图像边缘,为超分辨率复原提供依据,同时使用变分法开展复原过程。Zomet等^[84]并没有使用同一个探测器的图像序列,而是使用不同的探测器对同一场景同时进行拍摄和超分辨率复原。Nguyen等^[85]提出了基于Tikhonov正则化的超分辨率复原方法,使用光流法进行序列图像的运动估计。Wirawan等^[86]的复原方法没有用到先验知识,是一种盲超分辨率复原方法,此方法可以应用于MIMO系统。Baker等^[87]和Lin等^[88]分别在理论上探讨了超分辨率复原方法最高能达到的性能极限。Sun等^[89]将轮廓信息作为先验知识,引入超分辨率复原中。Tung等^[90]使用图割方法同时进行超分辨率复原并生成三维(3D)视频。Nguyen等^[91-92]将超分辨率复原应用在远距离虹膜识别中。Liu等^[93]提出了一种新的贝叶斯估计法,用于自适应视频超分辨率复原。Wang等^[94]和Yang等^[95]提出了基于字典训练的图像超分辨率复原,这种复原方法效果较好,但是需要训练时间较长。同时,Yang等^[96]和Wang等^[97]还提出了基于稀疏表示的超分辨率复原方法。随着非局部思想在图像去噪领域取得的巨大成功,学者们将其引入到超分辨率复原中^[98-99],取得很好的复原效果,引出了超分辨率复原的一个新的方向。

3 超分辨率复原理论的应用领域

超分辨率复原理论具有广阔的应用领域,下面着重介绍其中几个重要方面应用^[100]:

1) 应用于静态图像打印场合中。在图像分辨率较小的时候,将其打印成大尺寸的图片会使视觉效果变得

模糊。通过一组序列的动态图像来打印一张超分辨率静态图像,可以在增加图像尺寸的同时丰富细节信息;

2) 应用于遥感图像与军事图像捕获采集场合中。由于受到硬件系统成像分辨率和成像条件的限制,通常在遥感、军事中使用的红外图像采集系统难以获得高清晰度的图像,并且图像的重复信息很多。此时可以借助超分辨率图像复原技术,通过处理一系列的低分辨率红外图像,获得高分辨率的清晰红外图像。我国的卫星图像分辨率一般都比较低,例如中巴资源卫星1号为19.5 m,而国外SPOT5卫星为2.5 m, Quickbird卫星为0.6 m。我国需要用到的高分辨率卫星数据通常要借助国外卫星,价格昂贵。因此通过超分辨率复原获得高分辨率的卫星图像对于我国的军事和民用产业均具有重要意义;

3) 应用于医学图像处理(例如CT成像和超声波成像)场合中。医学图像处理是指运用图像层析技术找到病原位置、病体大小等,这要求所成医学图像具有较高的分辨率。通常使用的医学成像硬件设备无法生成足够清晰的图像,因此可以借助超分辨率图像复原技术,获得更好的医学检测效果;

4) 应用于数字电视转换场合中。因为高清电视(HDTV)的传输成本较高,目前大多数的数字电视节目使用的是数字电视(DTV)格式,这便导致图像的清晰度不高。如果使用超分辨率复原技术就可以将DTV形式的电视节目转换成HDTV形式的电视节目,这样降低直接使用HDTV的成本,提高DTV向HDTV转换过程中的系统兼容性;

5) 应用在图像压缩场合中。可以节省视频和图像的存储空间。通常情况下存储低分辨率视频和图像,在需要使用视频时,针对需要使用的视频段实行超分辨率复原,进而获得高分辨率视频和图像;

6) 应用于计算机视觉场合中。一方面,超分辨率复原可以获得清晰图像,提高方法的识别能力,另一方面,可以对特定目标进行专注分析,获得感兴趣区域的高分辨率图像,而不必使用全局图像,降低计算和存储消耗;

7) 应用于生物特征识别场合中。例如人脸识别、指纹识别和虹膜识别等,在军事和民用安防领域均具有广阔的应用前景,这些场合容易获得具有冗余信息的多帧同一场景图像,进行超分辨率复原后,可以提高识别准确度。

4 结 论

频域法的主要理论依据是傅里叶变换的平移特性,通过在频域内进行插值复原。频域法的优点是:原理简单清楚,计算方便,可以通过并行处理来提高处理速度;理论发展清晰,大多数是由消混叠复原方法发展而来。频域法的缺点是:所建立的运动模型都是平移模型,不具有一般性;在频域中,难以利用正则化约束,这就导致难以使用图像的先验信息来帮助进行超分辨率复原。目前,频域法已经不再是主流的超分辨率复原方法。

相比之下,空域复原方法可以很方便地建立复杂的运动模型,同时考虑了几乎所有的图像降质因素,例如噪声、降采样、由于非零孔径时间造成的模糊、光学系统降质和运动模糊等,还可以加入更完善的先验知识,如马尔可夫随机场理论和集合理论约束等。因此,空域超分辨率复原模型更符合实际的图像退化过程,能够得到很好的复原效果,是目前应用最广泛的一类超分辨率复原方法。

在空域超分辨率复原方法中,使用最多的是凸集投影约束法和最大后验概率法。凸集投影约束法迭代次数一般较大,计算时间较长,同时收敛结果很大程度上取决于初始值的选取,难以收敛,通常得不到唯一解,同时对噪声比较敏感。最大后验概率法抗噪能力较强,收敛速度快且有唯一解,但是对边缘的保留能力较差。为了提高凸集投影法的快速性,可以加入松弛迭代因子,同时,也可以将凸集投影方法和最大后验概率方法相结合,得到混合MAP/POCS方法。混合方法具有两种方法的优势,既能得到唯一解,又可以较好地保留图像的边缘细节。

参 考 文 献

- 1 M R Banham, A K Katsaggelos, *et al.*. Digital image restoration[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1997, 14(2): 24-41
- 2 H Trussel, M Civanlar. Feasible solution in signal restoration[J]. IEEE Trans Accoust Speech Signal Processing, 1984, ASSP-32: 201-212.

- 3 B R Hunt. Super-resolution of images: Algorithms, principles, performance[J]. *International J Imaging Systems Technol*, 1995, 6(4): 297-304.
- 4 X Gao, K Zhang, D Tao, *et al.*. Joint learning for single-image super-resolution via a coupled constraint[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2012, 21(2): 469-480.
- 5 H He, W C Siu. Single image super-resolution using Gaussian process regression[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011. 449-456.
- 6 K I Kim, Y Kwon. Single-image super-resolution using sparse regression and natural image prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(6): 1127-1133.
- 7 Y W Tai, S Liu, M S Brown, *et al.*. Super resolution using edge prior and single image detail synthesis[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010. 2400-2407.
- 8 F Ahmed, S C Gutfasou, M A Karim. High-fidelity image interpolation using radial basis function neural networks[C]. *Proc IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 1995, 2: 588-592.
- 9 N Plaziac. Image interpolation using neural networks[J]. *IEEE Trans on image Processing*, 1999, 8(11): 1647-1651.
- 10 F M Candlineia, J C Principle. Super resolution of images based on local correlations[J]. *IEEE Trans Neural Networks*, 1999, 10(2): 372-380.
- 11 R R Schultz, R L Stevenson. A Bayesian approach to image expansion for improved definition[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1994, 3(3): 233-242.
- 12 X Li, M T Orchard. New edge-directed interpolation[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2001, 10(10): 1521-1527.
- 13 R Zeyde, M Elad, M Protter. *On Single Image Scale-Up Using Sparse-Representations*[M]. Berlin Heidelberg: Springer Press, 2012. 711-730.
- 14 D Glasner, S Bagon, M Irani. Super-resolution from a single image[C]. *IEEE Conference on Computer Vision*, 2009. 349-356.
- 15 M K Ng, N K Bose. Mathematical analysis of super-resolution methodology[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, 20(3): 62-74.
- 16 N K Bose. *Multi-Dimensional Systems Theory and Applications*[M]. Holland: Kluwer Academic Publishers Press, 2003.
- 17 R Y Tsai, T Huang. Multi frame image restoration and registration[J]. *Advances in Computer Vision and Image Processing*, 1984, 1(2): 317-339.
- 18 A M Tekalp, M K Ozkan, M L Sezan. High-resolution image reconstruction for lower-resolution image restoration[C]. *Proceedings of the IEEE international Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1992, 3: 169-172.
- 19 S P Kim, W Y Su. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multi-frame images[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 1993, 2(4): 534-539.
- 20 M Elad, A Feuer. Super-resolution restoration of an image sequence: adaptive filtering approach[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 1999, 8(3): 387-395.
- 21 C E Davila. Efficient recursive total least squares algorithms for FIR adaptive filtering[J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 1994, 42(2): 268-280.
- 22 N X Ngugen. *Numerical Algorithm for Image Super Restoration*[D]. California: Stanford University, 2000.
- 23 Zhou Fang. A review of super-resolution image restoration[J]. *Automation and Instrument*, 2006, (1): 10-14.
周芳. 图像超分辨率复原技术的现状与展望[J]. *自动化与仪表*, 2006, (1): 10-14.
- 24 F M Candlineia, J C Principle. Super resolution of images based on local correlations[J]. *IEEE Trans Neural Networks*, 1999, 10(2): 372-380.
- 25 Zhang Xinming, Shen Lansun. The development of super-resolution restoration from image sequence[J]. *Control Technology*, 2002, 21(5): 33-35.
张新明, 沈兰荪. 超分辨率复原技术的发展[J]. *测控技术*, 2002, 21(5): 33-35.
- 26 H Ur, D Gross. Improved resolution from sub-pixel shifted pictures[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1992, 54(2): 181-186.
- 27 A Papoulis. Generalized sampling expansion[J]. *IEEE Trans Circuits Syst*, 1977, 24(11): 652-654.
- 28 J L Brown. Multi-channel sampling of low pass signals[J]. *IEEE Trans Circuits Syst*, 1981, CAS-28: 101-106.
- 29 R C Hardie, K J Barnard, E E Armstrong. Joint MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of under-sampled images[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 1997, 6(12): 1621-1633.
- 30 N Nguyen. *Numerical Algorithms for Image Super-Resolution*[D]. California: Stanford University, 2000.
- 31 N Nguyen, P Milanfar. A wavelet-based interpolation-restoration method for super-resolution[J]. *Circuits Systems Signal Process*, 2000, 19(4): 321-338.

- 32 S Lertrattanapanich. Super-Resolution from Degraded Image Sequence Using Spatial Tessellations and Wavelets[D]. University Park: Pennsylvania State University, 2003.
- 33 A J Patti, M Sezan, A M Tekalp. A new motion compensated reduced order model kalman filter for space-varying restoration of progressive and interlaced video[J]. IEEE Trans Image Processing, 1998, 7(4): 543-554.
- 34 M Elad, A Feuer. Super-resolution restoration of image sequence[J]. IEEE Trans Pattern Anal. Machine Intelligence, 1999, 21(9): 817-834.
- 35 M Elad, A Feuer. Super-resolution reconstruction of continuous image sequences[C]. International Conference on Image Processing, Kobe, Japan, 1999. 459-463.
- 36 M S Alam, J G Bognar, R C Hardie, *et al.*. Infrared image registration and high-resolution reconstruction using multiple translationally shifted aliased video frames[J]. IEEE Trans Instrumentation Measurement, 2000, 49(5): 915-923.
- 37 B R Frieden, H G Aumann. Image reconstruction from multiple 11-D scans using filtered localized projection[J]. Appl Optics, 1987, 26(3): 223-226.
- 38 M Irani, S Peleg. Improving resolution by image registration[J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(3): 231-239.
- 39 Guo Weiwei, Zhang Pinzheng. Super-resolution image reconstruction with iterative back projection algorithm[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2009, 3(3): 321-329.
郭伟伟, 章品正. 基于迭代反投影的超分辨率图像重建[J]. 计算机科学与探索, 2009, 3(3): 321-329.
- 40 Tan Fengqing, He Xiaohai, Chen Weilong, *et al.*. A video super-resolution reconstruction method based on sub-pixel registration[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(7): 972-976.
覃凤清, 何小海, 陈为龙, 等. 一种基于子像素配准视频超分辨率重建方法[J]. 光电子·激光, 2009, 20(7): 972-976.
- 41 Zhang Yongyu, Li Cuihua, Yu Liba, *et al.*. IBP super-resolution reconstruction based on improvement approach of Keren registration method[J]. Journal of Xiamen University, 2012, 51(4): 686-69.
张永育, 李翠华, 余礼钺, 等. 基于 Keren 改进配准算法的 IBP 超分辨率重建[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2012, 51(4): 686-69.
- 42 S Maan, R W Picard. Virtual bellows: Constructing high quality stills from video[C]. Proc of International Conference on Image Processing, Austin, TX, 1994, 1: 363-367.
- 43 B C Tom, A K Katsaggelos. Resolution enhancement of video sequences using motion compensation[C]. Proc of IEEE Int. Conf Image Processing, Lausanne, Switzerland, 1996, 1: 713-716.
- 44 D C Youla, H Webb. Image restoration by the method of convex projections: Part I, theory[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1982, 1(2): 81-94.
- 45 H Stark, P Oskoui. High resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projection[J]. JOSA A, 1989, 6(11): 1715-1726.
- 46 M Tekalp, M K Ozkan, M I Sezan. High-resolution image reconstruction from lower-resolution image sequences and space varying image restoration[C]. IEEE international Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1992, 3: 169-172.
- 47 B K Gunturk, Y Altunbasak, R M Mersereau. Super-resolution reconstruction of compressed video using transform-domain statistics[J]. IEEE Trans Image Processing, 2004, 13(1): 33-43.
- 48 Huang Hua, Kong Lingli, Qi Chun, *et al.*. Super-resolution image reconstruction based on projections onto convex sets and line process modeling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(10): 1059-1062.
黄 华, 孔玲莉, 齐 春, 等. 基于凸集投影和线过程模型的超分辨率图像重建[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(10): 1059-1062.
- 49 Zhu Xiang, Yuan Jie, Du Sidan. Recovery of JPEG compressed image sequence[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(8): 1841-1844.
朱 翔, 袁 杰, 都思丹. 基于 JPEG 序列的图像重建[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1841-1844.
- 50 Xiao Chuangbai, Duan Juan, Yu Jing. POCS super-resolution reconstruction from image sequences[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 108-113.
肖创柏, 段 娟, 禹 晶. 序列图像的 POCS 超分辨率重建方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 108-113.
- 51 Zhang Xian, Xu Kun, Li Yong. Remote sensing image super-resolution based on POCS and out-of-core[J]. Journal of Tsinghua University, 2010, 50(10): 1743-1746.
张 现, 徐 昆, 李 勇. 基于外存和凸集投影法的遥感图像超分辨率方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(10): 1743-1746.
- 52 Zhang Yan, Li Xianying, Man Yiyun. Remote sensing images upsampling based on projection onto convex sets and

- complex wavelet packet transfer[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3): 482-488.
- 张 砚, 李先颖, 满益云. 基于凸集投影法和复数小波包域的遥感图像上采样研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 482-488.
- 53 J Patti, M Sezan, A M Tekalp. High-resolution image reconstruction from a low-resolution image sequence in the presence of time-varying motion blur[C]. Proc IEEE Int Conf Image Processing, Austin, TX, 1994, 1: 343-347.
- 54 J Patti, M Sezan, A M Tekalp. Super-resolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time[J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(8): 1064-1076.
- 55 J Patti, M Sezan, A M Tekalp. Robust methods for high-quality stills from interlaced video in the presence of dominant motion[J]. IEEE Trans Circuits and Systems for Video technology, 1997, 7(2): 328-342.
- 56 J Patti, Y Altunbasak. Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants[J]. IEEE Trans Image Processing, 2001, 10(1): 179-186.
- 57 B C Tom, A K Katsaggelos. An Iterative Algorithm for Improving the Resolution of Video Sequence[A]. Proc SPIE Conf. Visual Communication and Image Processing, Orlando, FL, 1995. 1430-1438.
- 58 R R Sehultz, R L Stevenson. A Bayesian approach to image expansion for improved definition[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3(2): 233-242.
- 59 R C Hardie, K J Bamard, E E Armstrong. Joint MAP registration high-resolution image estimation using a sequence of under sampled image[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1621-1633.
- 60 P Cheeseman, B Kanefsky. Super-resolved surface reconstruction from multiple images[R]. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, Tech ReP FIA-94-12, 1994.
- 61 B R Hunt, P J Sementilli. Description of a Poisson imagery super-resolution algorithm[C]. Astronomical Data Analysis Software and System I, California, USA, 1992, 25: 196-199.
- 62 P J Sementilli, M S Nadar, B R Hunt. Poisson MAP super-resolution estimator with smoothness constraint[C]. Proceedings of SPIE Neural and Stochastic Methods in Image and Signal Processing II, 1993, 2032: 2-13.
- 63 G K Chantas, N P Galatsanos, N A Woods. Super-resolution based on fast registration and maximum a posteriori reconstruction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(7): 1821-1830.
- 64 S P Belekos, N P Galatsanos, A K Katsaggelos. Maximum a posteriori video super-resolution using a new multichannel image prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6): 1451-1464.
- 65 L J Karam, N G Sadaka. An Efficient selective perceptual-based super-resolution estimator[J]. IEEE Trans Image Processing, 2011, 20(12): 3470-3481.
- 66 D Wallach, F Lamare. Super-resolution in respiratory synchronized positron emission tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2012, 31(2): 438-448.
- 67 M Irani, S Peleg. Motion analysis for image enhancement, resolution, occlusion and transparency[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 1993, 4(4): 324-336.
- 68 M Irani, S Peleg. Super resolution from image sequences[C]. Piscataway, NJ, USA: Proceedings of international Conference on Pattern Recognition, 1990. 115-120.
- 69 Xian Haiying, Fu Zhizhong, Wan Qun, *et al.*. Super resolution algorithm based on non-redundant information[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 216-221.
- 鲜海莹, 傅志中, 万 群, 等. 基于非冗余信息的超分辨率算法[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 216-221.
- 70 Wang Jing, Zhang Shiping, Sun Quansen, *et al.*. MAP based remote sensing image super-resolution with frequency domain correction[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(1): 84-88.
- 王 静, 章世平, 孙权森, 等. 基于MAP估计的遥感图像频域校正超分辨率算法[J]. 东南大学学报, 2010, 40(1): 84-88.
- 71 Han Yubing, Wu Lenan. Super resolution reconstruction of video sequence based on adaptive filter[J]. Chinese Journal of Computer, 2006, 29(4): 642-647.
- 韩玉兵, 吴乐南. 基于自适应滤波的视频序列超分辨率重建[J]. 计算机学报, 2006, 29(4): 642-647.
- 72 Han Hua, Wang Hongjian, Peng Silong. A new super-resolution algorithm for a single image based on local structure similarity[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2005, 17(5): 941-947.
- 韩 华, 王洪剑, 彭思龙. 基于局部结构相似性的单幅图像超分辨率算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 941-947.
- 73 Chen Hua, Jin Weiqi, Wang Xia, *et al.*. A method of restoration for the 3D image of wide-field microscope based on wavelet packet analysis denoising[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(1): 72-75.
- 陈 华, 金伟其, 王 霞, 等. 基于小波包分析的三维宽场显微图像复原方法[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(1): 72-75.
- 74 M Elad, A Feuer. Restoration of a single super-resolution image from several blurred, noisy and under sampled measured images[J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(12): 1646-1658.

- 75 Su Binghua, Jing Weiqi. POCS-MPMAP based super-resolution image restoration[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 502-504.
苏秉华, 金伟其. 基于POCS-MPMAP合成算法的超分辨率图像复原[J]. 光子学报, 2003, 32(4): 502-504.
- 76 D P Capel. Image Mosaicing and Super-Resolution[D]. London: University of Oxford, 2001.
- 77 M Elad. On the bilateral filter and ways to improve it[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(10): 1141-1151.
- 78 D Barash. Bilateral filtering and anisotropic diffusion: Towards a unified viewpoint[C]. Hewlett-Packard Laboratories Technical Report, 2000. 18.
- 79 S Farsiu, M D Robinson. Fast and robust multiframe super resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(10): 1327-1344.
- 80 C Tomasi, R Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images[C]. Proc of the 6th international Conference on Computer Vision, 1998. 839-846.
- 81 G Gilboa, N Soehnen, Y Y Zeevi. Forward- and-backward diffusion processes for Adaptive image enhancement and denoising[J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(7): 689-703.
- 82 E Shechtman, Y Caspi, M Irani. Space-time super-resolution[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(4): 531-545.
- 83 H Kim, K S Hong. Variational approaches to super-resolution with contrast enhancement and anisotropic diffusion[J]. J Electron Imaging, 2003, 12(2): 244-251.
- 84 A Zomet, S Peleg. Multi-sensor super-resolution[C]. Proceedings of the IEEE Workshop on applications of computer Vision, 2001. 27-31.
- 85 N Nguyen, P Milanfar, G Golub. A computationally efficient super resolution image Reconstruction algorithm[J]. IEEE Trans Image Processing, 2001, 10(4): 573-583.
- 86 P D Wirawan, H Maitre. Multi-channel high resolution blind image restoration[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989. 3229-3232.
- 87 S Baker, T Kanade. Limits on super-resolution and how to break them[C]. Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Patten Recognition, 2000. 372-379.
- 88 Z C Lin, H Y Shum. Fundamental limits of reconstruction-based super-resolution algorithms under local translation [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(1): 83-97.
- 89 J Sun, Z Xu, H Y Shum. Image super-resolution using gradient profile prior[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. 1-8.
- 90 T Tung, S Nobuhara, T Matsuyama. Simultaneous super-resolution and 3D video using graph-cuts[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. 1-8.
- 91 K Nguyen, C Fookes, S Sridharan, *et al.*. Quality-driven super-resolution for less constrained iris recognition at a distance and on the move[J]. IEEE Trans Information Forensics and Security, 2011, 6(4): 248-1258.
- 92 T K Nguyen, C B Fookes, S Sridharan, *et al.*. Feature-domain super-resolution for IRIS recognition[C]. Proceedings of The 18th International Conference on Image Processing, 2011. 3258-3261.
- 93 C Liu, D Sun. A Bayesian approach to adaptive video super resolution[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011. 209-216.
- 94 S Wang, D Zhang, Y Liang, *et al.*. Semi-coupled dictionary learning with applications to image super-resolution and photo-sketch synthesis[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012. 2216-2223.
- 95 J Yang, Z Wang, Z Lin, *et al.*. Coupled dictionary training for image super-resolution[J]. IEEE Trans Image Processing, 2012, 21(8): 3467-3478.
- 96 J Yang, J Wright, T S Huang, *et al.*. Image super-resolution via sparse representation[J]. IEEE Trans Image Processing, 2010, 19(11): 2861-2873.
- 97 J Wang, S Zhu, Y Gong. Resolution enhancement based on learning the sparse association of image patches[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(1): 1-10.
- 98 Y Hu, K M Lam, G Qiu, *et al.*. From local pixel structure to global image super-resolution: a new face hallucination framework[J]. IEEE Trans Image Processing, 2011, 20(2): 433-445.
- 99 H Zhang, J Yang, Y Zhang, *et al.*. Non-Local Kernel Regression for Image and Video Restoration[M]. Berlin Heidelberg: Springer Press, 2010. 566-579.
- 100 Chen Jian. Research on Infrared Dim-Small Target Super-Resolution Restoration Arithmetic Based on POCS[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
陈 健. 基于POCS的红外弱小目标超分辨率复原算法研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2014.