

图像超分辨率重建技术综述

王春霞, 苏红旗, 范郭亮

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要:超分辨率(SR)重建技术是利用一幅或多幅低分辨率(LR)图像的信息重建出一幅高分辨率(HR)图像,同时能够消除由成像器件引入的模糊、噪声。该技术应用领域广泛,已经成为国内外图像处理领域的研究热点之一。介绍了超分辨率重建技术的基本原理,并分别以单帧和多帧、频域和空域为分类依据,分别阐述了超分辨率重建技术的经典方法,系统地总结了各种方法的优缺点,提出了超分辨率重建技术可能的研究方向,从而为超分辨率重建相关技术的进一步研究提供一定的理论基础。

关键词:超分辨率重建;重建原理;重建方法;研究方向

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2011)05-0124-04

Overview on Super Resolution Image Reconstruction

WANG Chun-xia, SU Hong-qi, FAN Guo-liang

(School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University
of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Super-resolution image reconstruction technique produces a high-resolution image from several low-resolution images, can also eliminate additive noise and the distinction which has been come from limited detector of size and optical components. Therefore, it has been a lot topic in the field of image processing. Introduces the basic principle of super-resolution reconstruction technique, and classifies the classical method based on single frame and multi frame, the frequency domain and airspace. Systematically summarizes the advantages and disadvantages of various methods and provide theoretical basis for the super-resolution reconstruction technique of further research, and puts forward the research direction of super-resolution reconstruction technique.

Key words: super-resolution image reconstruction; reconstruction principle; reconstruction methods; research direction

0 引言

目前,计算机多媒体通信技术广泛地应用于安全监控、视频通讯、医疗、资源探测等领域。然而,许多成像系统受到其硬件条件的制约,所得到的图像分辨率不能满足实际应用的要求。提高空间分辨率最直接的方法是降低像素尺寸,提高单位面积的像素数目。目前 CCD 的尺寸下限已达 $50\mu\text{m}^2$,进一步降低每个 CCD 面积,信噪比(SNR)将会太低以至于无法正常使用。在这种背景下,超分辨率重建技术应运而生。该技术采用软件方法提高图像的空间分辨率,而不需要更换原有的成像设备,是一种经济、有效的提高图像分辨率的方法。因此,该技术自提出之日便引起了国内外众

多学者的关注。

1 超分辨率重建技术发展背景及现状

对于一个线性空间不变成像系统,其成像过程可以描述为:

$$g(x) = h(x) * f(x) \quad (1)$$

上式中 $f(x)$ 表示拍摄的物体, $g(x)$ 表示得到的物体图像, $*$ 表示卷积运算, $h(x)$ 表示点扩散函数。若对(1)式等号两边同时进行傅里叶变换,有

$$\begin{cases} G(u) = H(u)F(u) \\ F(u) = G(u)/H(u) \end{cases} \quad (2)$$

从(2)式中可以看到,把成像系统等价于一个傅里叶滤波器,对 $F(u)$ 的解进行了限制。但是 $H(u)$ 在截止频率之外为零,因此要想重建出截止频率之外的信息,似乎在理论上和实际中都不可能实现。但根据解析延拓、信息叠加和非线性操作等理论,在实际中存在着许多方法对 $F(u)$ 进行估计,采用这些方法可成功地实现截止频率之外信息的重建。

图像超分辨率重建的基本思想源于 20 世纪 60 年

收稿日期:2010-10-15;修回日期:2011-01-17

基金项目:国家“211 工程”三期重点学科建设项目;国家“985”优势学科创新平台建设项目

作者简介:王春霞(1984-),女,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为图像处理;苏红旗,博士,副教授,研究方向为数据采集、图像处理与仿真。

代 Harris 和 Goodman 提出的单幅图像重建的概念和方法。

Tsai 和 Huang^[1] 在 1984 年首次提出了基于序列(或多幅图像)的超分辨率重建方法。也被认为是频域超分辨率重建算法的开端。此后出现了许多改进算法,但都只是在 Tsai 算法的基础上进行的,并没有从根本上克服 Tsai 算法的缺点。由于不能充分利用图像的先验约束知识,频域算法至今没有取得实质性的发展。人们转而研究空域算法。近年来,空域算法研究发展迅速。其中,非均匀采样内插法和迭代反投影法结合先验信息能力较差,提高分辨率的效果有限。目前研究和应用较多的是 POCS 和规整化算法。

2 图像降质模型

对经典的超分辨率问题进行综合分析的关键在于用尽可能简单而有效的公式或模型来描述这个问题^[2]。下面通过分析 LR 图像生成的过程,我们建立了一个联系原始 HR 图像和实际 LR 图像的观测模型,如图 1 所示。

对于同一场景的 k 幅低分辨率图像,可以认为它们是由一幅高分辨率图像经过一系列的降质过程产生的。降质过程包括几何运动、光学模糊、降采样以及附加噪声等。如果用矢量 z 表示所求的高分辨率图像, g_k 表示某一幅低分辨率图像(下角 k 为图像编号),观测模型为:

$$g_k = DBM_k z + n_k \quad (3)$$

上式中: M_k 表示几何运动矩阵; B 表示模糊矩阵; D 表示亚采样矩阵; n_k 表示附加噪声^[2]。

3 超分辨率重建技术方法分类

3.1 单幅图像超分辨率和多幅图像超分辨率重建

根据要处理的源图像可以分为单幅图像超分辨率重建和多幅图像超分辨率重建^[3]。

单幅图像的超分辨率重建也称为图像放大,是指利用单幅图像的信息恢复出在图像获取过程中丢失的

信息(主要是指高频信息)。显然,基于单幅图像的超分辨率重建算法简单,但可利用的有效信息有限,因此重建出的图像精度不高。

多幅图像超分辨率重建是指利用多幅低分辨率图像(或图像序列)之间丰富的互补信息,从一系列低分辨率图像重建出一幅清晰的高分辨率图像或高分辨率图像序列。在图像序列的采集过程中受传感器因素或景物的运动的影响,使得临近的图像序列之间存在微小的差异,而这些差异中往往蕴藏着非常丰富的可利用信息。多幅图像超分辨率重建的方法除了可以利用单幅图像的信息和目标(前景)的先验信息之外,更重要的是还可以充分利用图像序列间的互补信息。因此,基于多幅图像的超分辨率重建技术在重建效果上明显优于基于单幅图像的超分辨率重建技术。

目前,基于单幅图像的重建技术研究较少,而更多的研究主要是基于多幅图像的超分辨率重建技术。其主要原因就在于基于多幅图像的重建方法利用了更多的图像信息^[5]。

3.2 空域法和频域法

在目前的研究和应用中,图像超分辨率重建算法更多的是被分为空域法或频域法。其中频域算法是利用傅里叶变换,将图像变换到频域内,进而消除低分辨率图像的频谱混叠,提高分辨率;空域算法则是在空域中建立低分辨率图像的成像模型,并以此作为依据实现图像的超分辨率重建。

3.2.1 基于频域的超分辨率重建方法

频域方法是基于傅里叶变换的移位特性,在频域上解决图像的内插问题。频域重建方法是一种直观的、去变形的超分辨率重建方法。其算法简单,运行速度快。该算法的缺点是:局限于线性空间不变;采用全局平移运动的降质模型;只能包含有限的空域先验知识。因此,该方法没有成为超分辨率重建技术算法研究的主流^[6]。

目前采用的频域超分辨率重建的方法主要是消混叠重建的方法。Tsai 和 Huang 早在 1984 年对消除频

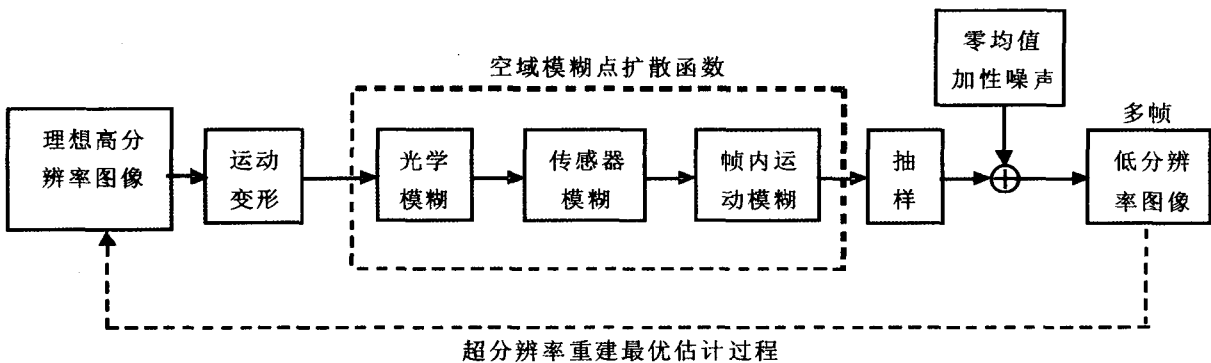


图1 超分辨率重建降质模型示意图

谱混叠重建方法进行了最早的研究。他们在假设原始场景信号带宽有限基础上,针对低分辨率图像之间的整体平移运动,利用离散傅里叶变换和连续傅里叶变换之间的平移、混叠性质,描述了高分辨率图像和低分辨率图像在频率域上的混叠关系,并在此基础上给出了频率域图像超分辨率重建公式。这样就用一个方程组将多幅低分辨率图像经混频的离散傅里叶变换系数与未知场景的连续傅里叶变换系数联系起来,方程组的解就是原始高分辨率图像的频率域系数,再用这些系数进行傅里叶反变换就可以实现原始图像的高分辨率重建。这种方法要求对图像间位移进行亚像素级精度的估计,而且每一幅低分辨率图像只能影响方程组中的一个不相关的方程。消混叠重建方法的计算较为简单,但该模型没有考虑到光学系统的点扩散函数,同时是在假设图像中不存在运动模糊和观测噪声的基础上进行的。另外,由于该频率域重建模型是建立在整体平移的基础上,因此缺少灵活性。

Tekalp, Ozkan 和 Sezan 对这一技术进行了改进。他们着重考虑了观测噪声、点扩散函数和线性空间的不变性等因素,并利用最小二乘法计算模型的解。1990 年, Kim, Bose 和 Valenzuela 对 Tsai 和 Huang 算法的求解公式做了重大改进。他们提出在超分辨率重建过程中考虑观测噪声和空间模糊等因素,并将递归最小二乘法应用于 Tsai 公式的混叠矩阵求解。Kaltenbacher 和 Hardie 提出了一种估算帧间整体平移参数的计算方法,提高了 Tsai 算法计算整体平移的效率。以上这些方法都是将整个信号频谱混叠公式分解为一系列方程并求解,只是在求解方法上存在差异。

3.2.2 基于空域的超分辨率重建方法

图像超分辨率重建应用中的另一类方法是空域的方法。空域方法是对影响低分辨率图像成像效果的空间域因素(包括光学模糊、运动模糊等)进行建模。因此,基于空间域的超分辨率重建方法更接近于实际应用情况。目前,流行的空域超分辨率图像重建方法有非均匀采样内插法、迭代反投影法、基于概率的方法、凸集投影法和 MAP/POCS 混合算法等。

非均匀采样内插法是对多帧低分辨率图像进行运动估计,并进行配准。经配准后的图像像素被放入到相应的高分辨率网格中。然后进行插值得到在高分辨率网格上分布规则的图像像素点。非均匀采样内插法是空域算法中计算效率较高的算法,但是这种算法过于简单化,没有充分使用先验约束,降质模型有限,无法重建出比单幅低分辨率图像更多的频域内容^[7]。

迭代反投影是 Irani 和 Peleg 于 1991 年提出的。该方法先预估计出一幅高分辨率图像(通常是对低分辨率图像进行插值得到),并将此高分辨率图像代入

到观测模型。经过一系列的仿射变换、运动模糊、降采样和添加噪声等过程后得到相应的低分辨率估计图像。然后,计算出估计得到的低分辨率图像与实际观测的低分辨率图像之间的差值(称为模拟误差),并将此误差反投影,估计出更新后的高分辨率图像。经过多次迭代,该方法能够改善高分辨率图像的质量。但是,由于估计的高分辨率图像不唯一,使得最终的重建结果也不唯一。另外,在该方法中引入先验约束也不容易实现^[8]。

凸集投影法是一类影响较大的超分辨率重建方法。Youla 等首先将凸集投影理论应用于图像复原。此后, Stark 和 Oskoui 将凸集投影方法应用于超分辨率重建。该重建算法是将每一个约束条件(如:正定性、能量有界性、低分辨率图像观测数据的可靠性、光滑性等)定义为一个约束凸集。通过这些约束凸集,解空间得到了简化。凸集投影也是一种迭代过程,对于超分辨率图像空间中的任意一点,经过多次迭代运算,可以得到一个满足所有凸集约束条件的收敛解。凸集投影重建算法可以方便地加入先验约束条件,对图像的边缘和细节有较好的保持效果,是目前超分辨率重建算法中效果最好、较有发展前景的研究方法之一。但是,这种方法的解也不唯一,解的质量依赖于初始估计,收敛较慢且不很稳定^[9]。

目前的超分辨率重建算法中最有研究前景的一类是基于概率的超分辨率重建算法。总体说来,基于概率的超分辨率算法可以分为最大后验概率算法和最大似然概率算法。最大似然概率算法可以看作是最大后验概率算法在无先验概率模型下的一种特例。Schultz 和 Stevenson 于 1992 年首先将最大后验概率应用于以 Huber-Markov 随机场先验模型为基础的图像插值,提高了图像的清晰度。随后,他们将早期的研究成果引入到超分辨率重建领域,并将超分辨率重建转化为一个最优问题:高分辨率图像出现的后验概率在低分辨率图像序列已知的前提下达到最大。最大后验概率估计方法具有以下优点:方便加入先验约束条件、解存在且唯一、降噪能力强、收敛稳定性高。但是其运算量较大,收敛较慢。另外,由于这类方法对得到的高分辨率图像细节的平滑作用,边缘保持能力不佳^[10]。

最大后验概率法/凸集投影法(MAP/POCS)混合方法是同时考虑观测图像的随机统计特征和凸集特征,在最大后验概率方法的迭代优化过程中加入先验约束条件。经实验证明,采用梯度下降最优化方法能保证这种混合方法收敛到全局最优解。混合方法结合了 MAP 和 POCS 各自的优点,充分利用了先验知识,并且收敛的稳定性也比较好,是目前为止最好的基于重建的算法^[11,12]。

3.2.3 基于学习的重建方法

在基于凸集投影和最大后验概率的重建方法中,所有的可用图像信息都是从输入数据中得到,没有任何附加的背景知识,整个重建过程相当于信息提取和信息融合。这些算法依赖于某种模型从输入图像中产生新的图像信息,且随着分辨率的提高,算法性能下降较快,无法改变重建效果。为了打破这种局限,出现了基于学习的超分辨率重建技术。在机器经验学习思想的指导下,利用若干高质量、高分辨率的图像构建训练集合,通过假定图像的高频成分和低频成分具有条件独立性,以马尔科夫网络为工具引入了低频训练匹配对应高频补偿的算法,将超分辨率重建问题归结到求解最大马尔科夫网络问题。

基于学习的超分辨率重建技术从大量的训练样本集中获取先验知识作为超分辨率重建的依据。训练样本都是与输入图像包含同类信息的图像,以输入图像为依据,用学习过程中获得的知识对输入图像中的信息进行补充。基于学习的方法充分利用了图像本身的先验知识,在不增加输入图像样本数量的情况下,仍能产生新的高频细节,获得比基于其他重建算法更好的结果。

4 结束语

超分辨率重建技术是目前图像处理领域的研究热点之一。其在理论上和实际应用中都具有重要意义。然而,目前提出的众多超分辨重建算法存在着一些不足和缺陷。为了能够获得更高质量的重建图像,满足各种实际应用的需要,预计该技术发展将集中于以下几个方面:

(1)任意倍数的重建。当前的重建算法大多是实现 2^n 倍重建。如何构造出连续变化的“像素曲面”,以实现任意倍数的图像重建将成为下一步研究重点。

(2)亚像素技术的发展和运用。超分辨率重建需要对图像进行亚像素精度的运动估计。因此,亚像素技术是图像超分辨率重建的基础。它的发展必将提高运动估计的精度。新的、更精确的运动模型将为超分辨率重建技术研究提供更加坚实的理论基础。

(3)针对不同应用领域的重建模型。超分辨率重

建技术广泛地应用于公共安全、计算机视觉、资源与环境卫星遥感应用、医学成像等领域。针对不同应用领域的高效、高稳定性的重建模型必将成为今后超分辨率重建算法新的研究领域。

(4)提高算法效率。目前的重建算法中,MAP、POCS等重建效果较好。但是,由于算法中使用迭代过程等原因,造成算法复杂度较高。实时、高效的超分辨率重建算法将是未来这一领域的研究重点之一。

参考文献:

- [1] Patti A J, Sezan M I, Tekalp A M. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1997, 6(8): 1064-1076.
- [2] Schultz R R, Stevenson R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6): 996-1011.
- [3] 王晓文,刘雨. 图像超分辨率研究综述[J]. 信息技术, 2009(7): 236-240.
- [4] Tekalp A M, Ozkan M K, Sezan M I. High-resolution image reconstruction from lower-resolution image sequences and space-varying image restoration[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [s. l.]: [s. n.], 1992: 169-172.
- [5] Van Ouwierkerk J D. Image super-resolution survey[J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(10): 1039-1052.
- [6] Kim S, Bose N, Valenzuela H. Recursive reconstruction of high-resolution image from noisy undersampled multiframes[J]. IEEE Trans. Assp., 1990, 38(6): 1013-1027.
- [7] Shah N R, Zakhor A. Resolution enhancement of color video sequences[J]. IEEE Trans. IP, 1999, 8(6): 879-885.
- [8] 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.
- [9] 浦剑,张军平,黄华. 超分辨率算法研究综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(1): 27-31.
- [10] 李桐. 超分辨率图像重建技术[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2006, 22(5): 69-71.
- [11] 张晓玲,沈兰荪. 超分辨率图像复原技术的进展[J]. 测控技术, 2005, 24(5): 1-5.
- [12] 李磊,周鸣争. 基于MAP技术的图像类推超分辨重建方法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(1): 77-80.

会议消息(二)

2011年10月下旬召开"第七届全国高等学校计算机课件评比大会",评出一、二、三等奖和优胜奖,征集课件自即日起至2011年6月30日止。详情请上网站<http://www.csteic.org/>。

联系办法:Email:csteic@vip.163.com。电话:027-88024369、13207179049。

联系人:张凤祥、王春枝、王虹。