

Image Super Resolution

图像超分辨率技术 原理及应用

杨欣 著



TP391.41
4553



國防工業出版社
National Defense Industry Press

. 013032428

TP391.41
4553

图像超分辨率技术 原理及应用

杨 欣 著



TP391.41

4553

国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1641021

内 容 简 介

全书共分为 10 章,其中第 1 章为概述,重点介绍了超分辨率技术的概念以及近年来超分辨率技术的研究方向和发展趋势,其余 9 章为作者近年来在图像超分辨率重建方向上的一些研究成果,主要是一些基于时域的方法,同时,也给出了时域、频域相结合的方法。希望这些超分辨率重建方法对读者有所帮助。

本书适合研究图像超分辨率的科研人员参考,也可供相关专业的研究生和技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

图像超分辨率技术原理及应用/杨欣著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-118-08648-5

I. ①图... II. ①杨... III. ①图象分辨率
IV. ①TP391. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 037773 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 7¼ 字数 124 千字

2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

在数字图像处理科学与技术领域中,图像的分辨率是图像质量评价的关键性指标,也是实际应用中至关重要的参数。图像分辨率的高低能够反映图像的清晰程度。高分辨率的图像含有更高的像素密度,像素密度越高,图像所能提供的细节精度就越高,提供的信息内容就越丰富,对于实际应用中各种目标的识别与判断也更准确。因此,高分辨率图像在遥感侦测、军事侦察、公共安全监控识别、医学诊断、多媒体视频图像领域中都发挥着至关重要的作用。

然而,在图像的成像、采集和处理过程中,许多因素都会导致获得的图像质量下降:硬件设备的原因,如光学成像系统和传感器制造工艺导致的像差、畸变、带宽限制等;外部客观环境原因,如大气湍流扰动、太阳光照变化等;其他原因,如成像系统与真实场景的相对运动,聚焦不良,系统噪声以及图像的数模转换(A/D及D/A)等。这些都会造成图像失真和不同程度的退化,导致获取的图像质量较差,分辨率不高。而从提升硬件性能的角度出发提高图像的分辨率,往往要付出高昂的成本。为了寻求一种在不增加硬件成本的前提下显著提高图像分辨率的有效途径,研究者们提出了依靠软件方法的思想,由此图像超分辨率技术应运而生。

超分辨率(Super-Resolution, SR)技术就是对一组属于同一场景下的低分辨率(Low-Resolution, LR)图像序列进行处理,通过提取它们之间的时域和空域冗余信息,采用图像配准、运动参数估计等操作对其进行融合,最终重建得到一幅高分辨率(High-Resolution, HR)图像。其核心思想是用时间分辨率(同一场景的图像序列)换取更高的空间分辨率。图像SR重建中的一个基本问题是图像融合问题,是对多帧存在亚像素级别位移、各自含有相似而不同的亚像素信息的序列图像的融合问题。

20世纪60年代,Harris和Goodman首次以单张图像重建的概念和方法提出图像SR重建的概念,并且给出了具体的线性外推算法和正弦模板算法。其后几十年中,大批学者对其进行研究并提出了多种图像重建算法。虽然这一时期的各种算法都能得到较好的仿真结果,但是实际应用中由于噪声的影响,导致重

建图像没有获得预期效果,因此没有得到广泛的推广。图像 SR 重建技术一度被当时的一些学者称为“神话”而遭到放弃。直至 1984 年,Tsai 和 Huang 首次在频域中提出了基于序列图像的 SR 重建的概念和方法,利用傅里叶变换的移位性质对观测图像和原始场景的频率域系数进行处理,最后进行傅里叶反变换,重建出单幅高分辨率图像。这种方法从本质上解决了图像 SR 重建解不唯一的问题。20 世纪 80 年代中后期,伴随着计算机、电子技术和信号处理技术的发展,SR 重建的研究取得了突破性的进展。

图像 SR 重建技术按照参与重建过程的低分辨率图像数可以分为两大类:单帧图像重建方法和多帧图像重建方法。单帧图像重建方法是指通过处理一幅低分辨率图像的信息获得高分辨率图像,这种重建方法更多被认为是一种图像放大方法。单帧图像重建方法具有操作简单、运算量小、重建速度快等优点,但由于单帧图像所能提供的信息有限,从而导致重建图像效果一般。为了更好地利用低分辨率图像的信息,人们逐渐将研究热点转到多帧图像重建方法。多帧图像 SR 重建技术能够最大程度的利用序列低分辨率图像中每一帧所能提供的基本信息和冗余信息,其重建图像质量好于单帧图像重建。按照图像处理的空间分类,多帧图像 SR 重建一般分为频域方法和空域方法两大类。在研究的早期,大量的研究都集中在频域方法。频域法通过消除频域频谱混叠提高分辨率。频域重建方法理论简单,易于实现,但频域方法只能应用于全局平移运动和线性空间移不变退化模型,且对空域先验信息的融合能力不足,灵活性较差,所以后期的研究重点逐渐从频域方法转到了空域方法。空域重建方法就是在空间域中进行图像的 SR 重建。空域方法能够将帧间复杂运动、光学模糊、欠采样等降质因素与图像插值算法、图像滤波算法及迭代运算方法融合在一起,使空域重建方法更加灵活,适用于更广阔的范围,且具有较强的结合空域先验知识的能力。

迄今为止,已涌现出各种各样的图像超分辨率重建算法,而且还出现了一些实际应用,这方面的研究在方法和手段上已经逐渐丰富和成熟。作者希望通过本书总结自己近年来在图像超分辨率重建技术方面的一些研究成果,与国内同行们沟通,以使超分辨率技术得到更广泛的重视和研究,取得更为丰硕的成果,获得更广泛的应用。

全书共分为 10 章,其中第 1 章为概述,重点介绍了超分辨率技术的概念以及近年来超分辨率技术的研究方向和发展趋势,其余 9 章为作者近年来在图像超分辨率重建方向上的一些研究成果,主要是一些基于时域的方法,同时,也给

出了时域、频域相结合的方法,如第5章。希望这些超分辨率重建方法对读者有所帮助。

在本书的写作过程中,得到了南京航空航天大学、东南大学等单位老师和同学的大力支持,在此一并感谢。

由于作者学识、时间有限,加上超分辨技术方面的新理论、新技术层出不穷,本书难免存在疏漏和错误之处,恳请广大读者给予批评指正。

作者

目 录

第 1 章 超分辨率(SR)技术综述	1
1.1 概述	1
1.2 SR 的发展过程和研究概况	3
1.3 SR 重建基本原理	4
1.4 单帧 SR 重建	5
1.5 多帧图像频域 SR 重建	7
1.6 多帧图像空域 SR 重建	8
1.7 其他 SR 重建方法	13
1.8 尚存问题和未来展望	14
参考文献	15
第 2 章 基于非线性最小二乘的图像自适应 SR 重建以及运动估计	19
2.1 概述	19
2.2 SR 重建观测模型以及运动估计模型	20
2.3 基于 MAP 的图像 SR 重建和运动估计框架	20
2.4 优化与求解	22
2.5 实验结果与分析	25
2.6 结论	29
参考文献	29
第 3 章 基于最大后验概率的 SAR 图像自适应 SR 盲重建	31
3.1 概述	31
3.2 SR 重建观测模型	31
3.3 图像退化模型中模糊核函数的确定	32
3.4 自适应 SR 重建算法	33
3.5 实验结果与分析	37

3.6 结论	38
参考文献	39
第4章 基于自适应双边全变差的图像 SR 重建	40
4.1 概述	40
4.2 SR 重建观测模型	40
4.3 基于 SBTv 的 SR 重建	41
4.4 实验结果与分析	44
4.5 结论	47
参考文献	47
第5章 基于频域、时域相结合的自适应图像 SR 重建	49
5.1 概述	49
5.2 SR 重建观测模型	49
5.3 基于时域、频域相结合的自适应 SR 重建	49
5.4 实验结果与分析	53
5.5 结论	55
参考文献	56
第6章 基于 MAP 的自适应图像配准及 SR 重建	58
6.1 概述	58
6.2 SR 重建观测模型以及配准参数估计模型	58
6.3 本章算法	59
6.4 实验结果与分析	63
6.5 结论	66
参考文献	66
第7章 基于退化模型和邻域嵌套的彩色图像 SR 自适应重建	68
7.1 概述	68
7.2 模型建立与分析	68
7.3 基于退化模型与邻域嵌套的 SR 重建算法	69
7.4 实验结果与分析	72
7.5 结论	75
参考文献	76

第 8 章 基于分类预测器以及退化模型的图像 SR 快速重建	77
8.1 概述	77
8.2 模型建立与分析	78
8.3 本章算法	79
8.4 实验结果与分析	83
8.5 结论	87
参考文献	88
第 9 章 基于形态学边缘保持的自适应 SR 重建	89
9.1 概述	89
9.2 SR 重建模型	89
9.3 基于形态学边缘保持的自适应 SR 算法	90
9.4 实验结果与分析	93
9.5 结论	97
参考文献	97
第 10 章 基于投影修正和 POCS 的图像 SR 重建	99
10.1 概述	99
10.2 POCS 算法	99
10.3 基于投影修正的 POCS 重建算法	100
10.4 实验结果与分析	104
10.5 结论	106
参考文献	106

第 1 章 超分辨率 (SR) 技术综述

1.1 概 述

在数字图像处理科学与技术领域中,图像的空间分辨率是图像质量评价的关键性指标,也是实际应用中至关重要的参数。空间分辨率^[1]是指“离散的像元之间所能分辨目标物体细节的最小尺寸或对应目标物体两点之间的最小距离”。图像空间分辨率的高低能够反映图像的清晰程度。高分辨率的图像含有更高的像素密度,像素密度越高,图像所能提供的细节精度就越高,提供的信息内容就越丰富,对于实际应用中各种目标的识别与判断也更准确。因此高分辨率图像在遥感侦测、军事侦察、公共安全监控识别、医学诊断、多媒体视频图像领域中都发挥着至关重要的作用^[2,3]。

然而,在图像的成像、采集和处理过程中,许多因素都会导致获得的图像质量下降:硬件设备的原因,如光学成像系统和传感器制造工艺导致的像差、畸变、带宽限制等;外部客观环境原因,如大气湍流扰动、太阳光照变化等;其他原因,如成像系统与真实场景的相对运动,聚焦不良,系统噪声以及图像的数模转换(A/D 及 D/A)等。这些都会造成图像失真和不同程度的退化,导致获取的图像质量较差,分辨率不高。提高图像空间分辨率的途径主要有以下几种方法:

(1) 提高成像系统硬件的工艺水平,减少成像单元尺寸,从而增加单位面积内的像素数目^[4]。在相同的场景下,1000 万像素的相机和 500 万像素的相机分别以最高像素进行拍摄,显然前者将获得更高分辨率的图像。然而,高像素密度的成像传感器意味着更高的价格,而且伴随成像单元尺寸的降低,成像单元所能获得的光通量也相应减少,将导致图像信噪比大幅增大。

(2) 增大集成电路板的尺寸。但是较大尺寸的集成电路板意味着较大的电容,而大电容会影响电荷转移速率。

(3) 采用高精度的光电成像仪器。同样因为工艺复杂、成本较高,使得这种措施失去可行性。其他的方法如改进镜头的结构设计,改进采集处理过程中模数转换的位数和优化量化误差提高信噪比等。这些方法在实际应用中由于工艺复杂、成本难以控制而受到制约。

以上方法都是从提升硬件性能的角度出发提高图像的分辨率,往往要付出

高昂的成本。为了寻求一种在不增加硬件成本的前提下显著提高图像分辨率的有效途径,研究者们提出了依靠软件方法的思想,由此,图像 SR 重建应运而生。

图像超分辨率(Super - Resolution, SR)技术就是由一组属于同一场景下的低分辨率图像(Low - Resolution, LR)序列,通过提取它们之间的时域和空域冗余信息,采用图像配准、运动参数估计等操作对其进行融合,最终重建得到一幅分辨率比较高的图像(High - Resolution, HR)。其核心思想是用时间分辨率(同一场景的图像序列)换取更高的空间分辨率。图像 SR 重建中的一个基本问题是图像融合问题,是对多帧存在亚像素级别位移,各自含有相似而不同的亚像素信息的序列图像的融合问题。它要求:

- (1) 相同场景下的图像序列,以提高时间分辨率。
- (2) 图像序列之间存在亚像素级别的相对运动,对同一场景的细节的描述略有差异,使得图像序列能提供互补的冗余信息。
- (3) 重建过程是对图像序列所提供的相同的基本信息和不同的互补信息进行融合和恢复,并去除其中的模糊核噪声,得到的重建图像比图像序列中的任一帧图像的分辨率更高,所含细节更丰富。

图像 SR 重建过程如图 1 - 1 所示。

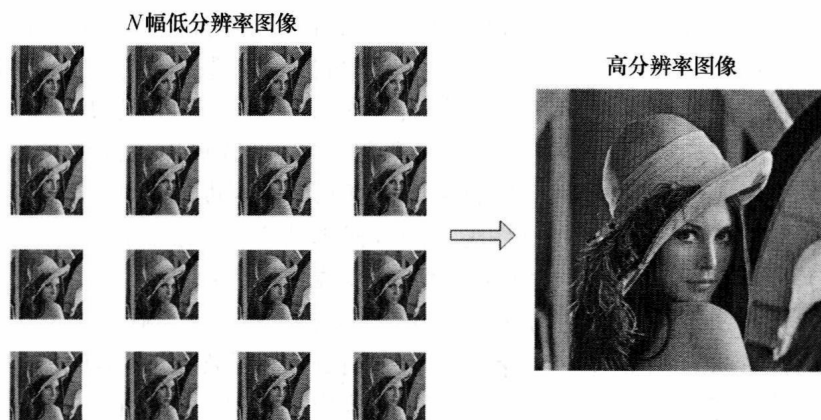


图 1 - 1 图像 SR 重建过程效果

由于图像 SR 重建技术不需要过高的硬件设备投入,只需通过软件的方法就能获得更高的空间分辨率,使得 SR 重建技术广泛应用于卫星遥感侦测、军事侦察、公共安全监控识别、医学数字影像诊疗、多媒体视频图像等领域。其典型应用主要有以下几个方面:

- (1) 卫星遥感侦测。在采集图像过程中,受到系统分辨率和恶劣自然环境的限制,不能获得高清晰度的图像。令卫星在天空飞过,对同一地区进行多种

角度的多次采样,从而获得同一场景下的序列图像,通过图像 SR 重建技术可以在不改变卫星图像探测设备的前提下,获得更高分辨率的图像,提高对目标的识别能力和识别精度。

(2) 公共安全监控识别。在银行等证券部门,商场、公路等公共场合的监控系统中,当发现异常行为或者犯罪行为发生之后,可以对监控视频中感兴趣目标区域进行重建处理,从而获得清晰的局部特征和精确的识别结果,为异常行为的处理或犯罪行为的判决提供线索和证据。

(3) 医学数字影像诊疗。在医学数字成像系统中,医学检测和诊断需要精确地识别病变体的位置及大小等情况,通常的影响诊疗方法如 CT(电子计算机 X 射线断层扫描技术)、MRI(核磁共振成像)和超声波检测等获得的图像往往不能满足清晰度要求,因此可以利用 SR 重建技术,对现有硬件水平下获取的较低分辨率的图像序列进行后期重建处理,获取高清晰度图像。

(4) 多媒体视频图像。图像 SR 重建技术可以将普通视频信号转为高清晰度的视频信号,在当前数字电视(DTV)向高清电视(HDTV)过渡的阶段,SR 重建技术发挥了巨大的作用;另外,SR 重建技术也可用于网络视频站点和移动媒体设备等场合,这些场合普遍要求以尽量小的存储量获得尽量高清晰度的视频图像,采用 SR 重建技术之后,用户在存储和传输时采用较低清晰度得视频图像以节省存储空间和网络带宽,而当对视觉效果有较高需求时,使用 SR 重建技术对其重建恢复。

1.2 SR 的发展过程和研究概况

20 世纪 60 年代,Harris^[5]和 Goodman^[6]首次以单张图像重建的概念和方法提出图像 SR 重建的概念,并且给出了具体的线性外推算法和正弦模板算法。其后几十年中,大批学者对其进行研究并提出了多种图像重建算法。虽然这一时期的各种算法都能得到较好的仿真结果,但是实际应用中由于噪声的影响,导致重建图像没有获得预期效果,因此没有得到广泛的推广。图像 SR 重建技术一度被当时的一些学者称为“神话”而遭到放弃。直至 1984 年,Tsai 和 Huang^[7]首次在频域中提出了基于序列图像的 SR 重建的概念和方法,实现从无噪声和模糊,存在互位移的降采样序列图像,利用傅里叶变换的移位性质对观测图像和原始场景的频率域系数进行处理,最后进行傅里叶反变换重建出单幅高分辨率图像。这种方法从本质上解决了图像 SR 重建解不唯一的问题。20 世纪 80 年代中后期,伴随着计算机、电子技术和信号处理技术的发展,SR 重建的研究取得了突破性的进展。

图像 SR 重建技术按照参与重建过程的低分辨率图像数可以分为两大类^[8]:单帧图像重建方法和多帧图像重建方法。单帧图像重建方法是指通过处理一幅低分辨率图像的信息获得高分辨率图像,这样的重建方法更多被认为是一种图像放大方法。单帧图像重建方法具有操作简单、运算量小、重建速度快等优点,但由于单帧图像所能提供的信息有限而导致重建图像效果一般。为了更好地利用低分辨率图像的信息,人们逐渐将研究热点转到多帧图像重建方法^[9,10]。

多帧图像 SR 重建技术能够最大程度地利用序列低分辨率图像中每一帧所能提供的基本信息和冗余信息,其重建图像质量好于单帧图像重建。按照图像处理的空间分类,多帧图像 SR 重建一般分为频域方法和空域方法两大类。在研究的早期,大量的研究都集中在频域方法。频域法通过消除频域频谱混叠提高分辨率。频域重建方法理论简单,易于实现,但频域方法只能应用于全局平移运动和线性空间移不变退化模型,且对空域先验信息的融合能力不足,灵活性较差,所以后期的研究重点逐渐从频域转到了空域方法。空域重建方法就是在空间域中进行图像的 SR 重建。空域方法能够将帧间复杂运动、光学模糊、欠采样等降质因素与图像插值算法、图像滤波算法及迭代运算方法融合在一起,这样使空域重建方法更加灵活,适用范围更广,且具有较强的结合空域先验知识的能力。

1.3 SR 重建基本原理

为了深入研究 SR 问题,首先需要建立一个观测模型,该模型能够描述理想图像与观测图像之间的关系,这样有助于对问题的深入分析与理解,通常是构造一个前向关系模型^[11],设有 p 幅大小为 $m \times n$ 的 LR 观测图像 $\{\mathbf{y}_k\}_{k=1}^p$,那么,根据图像的退化模型,有

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{D}\mathbf{B}_k\mathbf{M}_k\mathbf{x} + \mathbf{n}_k, 1 \leq k \leq p \quad (1-1)$$

式中: $\mathbf{y}_k$ 为第 k 幅 $m \times n$ 的 LR 观测图像经字典排序后组成的 $N \times 1$ ($N = mn$) 的向量。如果 L_1 和 L_2 分别为水平和垂直方向的下采样因子,那么, $\mathbf{x}$ 为大小为 $L_1m \times L_2n$ 的 HR 图像经字典排序后形成的 $L_1L_2N \times 1$ 的向量; $\mathbf{M}_k$ 为大小为 $L_1L_2N \times L_1L_2N$ 的变形矩阵,包含全局或局部的变换和旋转; $\mathbf{B}_k$ 为大小为 $L_1L_2N \times L_1L_2N$ 的模糊矩阵; $\mathbf{D}$ 为大小为 $N \times L_1L_2N$ 下采样矩阵; $\mathbf{n}_k$ 为 $N \times 1$ 的噪声向量。这样的降质过程可以用图 1-2 形象表示,最左边的图像表示理想高分辨率图像,依次经过变形变换、模糊变换、降采样变换和添加噪声过程后得到最右边的观测图像。

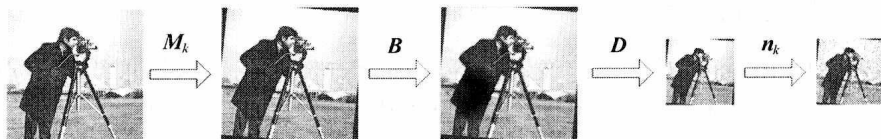


图 1-2 降质过程

建立观测模型后,可以知道若要获得理想的高分辨率图像 x 就要知道 D 、 B_k 、 M_k , 因此许多 SR 重建算法都根据观测模型将重建过程划分为三个主要步骤即:①图像配准^[12-14],也称为运动估计,即从序列低分辨率图像中获得它们之间的运动矢量;②模糊核函数的估计,即对点扩散函数进行计算,合理的点扩散函数的估计对于重建图像的质量有很大的作用,通常情况下,SR 重建算法认为点扩散函数是已知的,但是如果认为点扩散函数未知,则应将其置于重建过程中同时求解;③插值和重建,即将处理过的序列低分辨率图像中的信息以某种方式插值到一幅高分辨率图像中。

1.4 单帧 SR 重建

单幅图像的 SR 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,主要是高频信息^[15]。在单帧 SR 重建领域中,基于插值的方法由于其运算速度快,操作简单受到了广泛的关注。

1.4.1 最近邻插值

最近邻插值算法是一种最简单的插值算法,即待确定点的像素值取决于与它距离最近的已知像素点的灰度值,如图 1-3 所示。

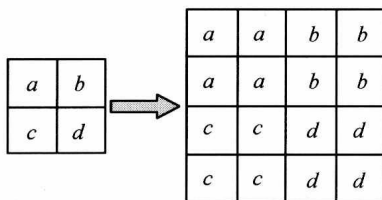


图 1-3 最近邻插值示意图

最近邻插值算法计算简单,运算速度快,但是这种插值方法由于插值规律过于简单,在图像的边缘区域会产生明显的块效应和边缘锯齿现象。

1.4.2 双线性插值

双线性插值通过对待确定像素值周围像素点作双线性运算求待插值点,算法示意图如图 1-4 所示,如果用 (x,y) 表示待插值点,点 (i,j) , $(i,j+1)$, $(i+1,j)$, $(i+1,j+1)$ 是已知像素点,则点 (x,y) 处灰度值 $f(x,y)$ 的计算式为

$$f(x,y) = b[af(i+1,j) + (1-a)f(i+1,j+1)] + (1-b)[af(i,j) + (1-a)f(i,j+1)] \quad (1-2)$$

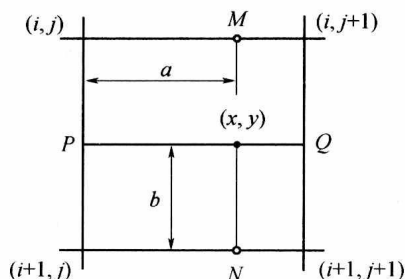


图 1-4 双线性插值示意图

与最近邻插值相比,双线性插值虽然运算稍复杂,程序运行时间稍长,但是双线性插值能够对图像边缘作平滑处理,很好地抑制了块效应和边缘锯齿效应。

1.4.3 双三次插值

双三次插值又称为立方插值,该插值方法最近邻插值和双线性插值更复杂,是利用待插值点周围四邻域内的 16 个像素点进行三次插值。双三次插值虽然计算量大,运算时间长,实时性能较差,但是这种算法能够消除块效应和边缘锯齿现象,插值图像的视觉效果明显好于前两种算法。

图 1-5 中给出了这三种常用插值算法的对比。

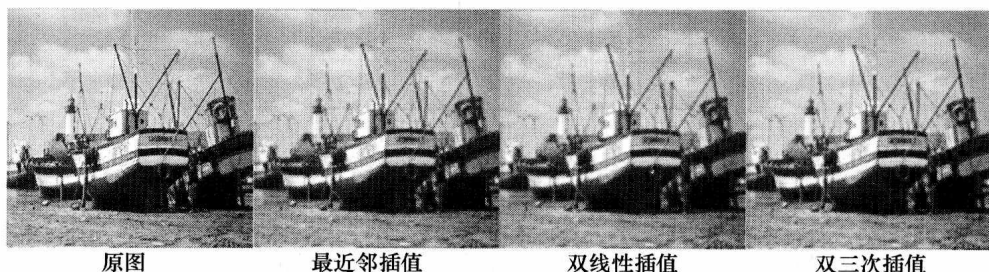


图 1-5 插值算法效果对比

从图 1-5 中可以看出,最近邻插值的效果边缘较粗糙,存在块效应和锯齿效应,双线性插值有效地克服了这种缺点,但是双线性插值的平滑性较重边缘细节被模糊导致效果变差,而双三次插值无论是克服锯齿效应还是细节平滑上都优于前两种算法,插值效果最好。

1.5 多帧图像频域 SR 重建

频域的 SR 重建方法起步较早,该方法采用消除频谱混叠的重建方法,其观测模型是基于傅里叶变换的位移特性。最早是由 Tsai 和 Huang^[16] 针对序列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、混叠性质来描述观测图像和理想高分辨率图像在频率域上的混叠的关系,实际上是在频域内解决图像插值问题,同时给出了频域 SR 重建算法的公式,仅考虑存在全局平移运动的情况,则经过全局平移产生的第 k 个位移图像表示为

$$x_k(t_1, t_2) = x(t_1 + \delta_{k1}, t_2 + \delta_{k2}) \quad (1-3)$$

根据连续傅里叶变换的平移性质,第 k 个位移图像的连续傅里叶变换可以表示为

$$X_k(w_1, w_2) = \exp[j2\pi(\delta_{k1}w_1 + \delta_{k2}w_2)]X(w_1, w_2) \quad (1-4)$$

位移图像 $x_k(t_1, t_2)$ 经过下采样因子 T_1 和 T_2 的下采样后,得到低分辨率图像 $y_k(t_1, t_2)$ 。由此得到高分辨率图像的连续傅里叶变换和采样图像的离散傅里叶变换的关系为

$$\gamma_k(u, v) = \frac{1}{T_1 T_2} \sum_{x=-\infty}^{\infty} \sum_{y=-\infty}^{\infty} X_k\left(\frac{2\pi u}{mT_1} + \frac{2\pi x}{T_1}, \frac{2\pi v}{nT_2} + \frac{2\pi y}{T_2}\right) \quad (1-5)$$

式中: X_k 为连续傅里叶变换; γ_k 为离散傅里叶变换。式(1-5)的矩阵表示形式如下:

$$Y = \Phi X \quad (1-6)$$

式中: Y 为 $p \times 1$ 的列向量,其第 k 个元素是 $y_k(t_1, t_2)$ 的离散傅里叶变换; X 是 $L_1 L_2 \times 1$ 的列向量,是 $x_k(t_1, t_2)$ 的连续傅里叶变换; Φ 是 $p \times L_1 L_2$ 的关系矩阵,表示联系混频的离散傅里叶变换系数和连续傅里叶变换系数的运动估计,可以通过求观测图像间的亚像素精度级的位移的方式确定。式(1-6)即为频域的观测模型,求得的解 X 就是原始高分辨率图像的频率域系数,再对其进行傅里叶反变换就可以实现原始图像的 SR 重建。频率域重建方法主要利用以下三个原理:

- (1) 傅里叶变换的平移特性。
- (2) 原始高分辨率图像与低分辨率观测图像离散傅里叶变换之间的频谱混叠关系。
- (3) 假设原始高分辨率图像具有带限特性。

图 1-6 给出频域 SR 重建算法流程图。

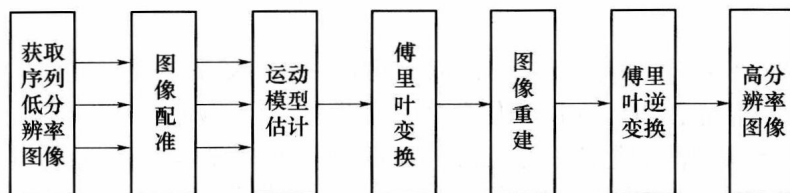


图 1-6 频域重建算法流程

之后的研究中,许多研究人员都提出了相关的改进算法,如 Kim^[17]等针对观测模型中对空间模糊和观测噪声的忽视,引入加权最小二乘和迭代方法求解高分辨率图像,在某种程度上改善了重建效果,但是模糊核函数的引入会使得解不稳定。随后, Kim 和 Su^[18]等针对之前算法中假设所有低分辨率图像具有相同的模糊和噪声特性带来的问题,提出一种自适应模糊核函数的新方法,并且采用 Tikhonov 正则化的方法,有效的克服了病态反问题。Rhee 和 Kang^[19]等为了减少存储需求和降低运算量,提出以离散余弦变换代替离散傅里叶变换的方法。

频率域重建方法具有运算简单、运算复杂度低、容易实现并行处理等优点,但是,由于该方法的观测模型中没有考虑点扩散函数并且是以不存在运动模糊和观测噪声的假设为基础,所以重建效果一般。同时,频率域重建方法的观测模型是建立在整体平移的基础上,基于的理论前提过于理想化,对于应用场合的要求较高,因此只能局限于全局平移运动和线性空间不变降质模型。

1.6 多帧图像空域 SR 重建

空域重建方法即是在图像的空间域内对观测模型进行定义和求解。空域观测模型中考虑到了全局和局部运动,光学模糊、运动模糊、观测噪声等影响重建性能的因素,从这一点来说,空域重建方法就具有频率域重建方法不可比拟的优势,并且空域重建方法还具有较强的包含空域先验知识的能力,因此空域重建方法逐渐成为热点和主流。