

超分辨率重构在航空光电成像系统中的应用*

田浩南

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 介绍了超分辨率重构技术的基本原理及实现方法,分析了限制航空图像分辨率提高的主要因素。首先,依据工程应用需求列举出了3种可应用于航空光电成像系统的典型超分辨率重构技术;然后,着重讨论了错位误差对亚像元成像技术重构效果的影响,并通过仿真实验加以分析;最后,通过对发展现状的调研及工程应用需求的分析,对未来航空光电成像系统中应用超分辨率重构技术的发展方向进行了展望,具有一定的参考价值。

关键词: 航空光电成像系统;超分辨率重构技术;图像分辨率

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Application of super-resolution reconstruction in aerial E-O imaging system

Tian Haonan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China)

Abstract: The principles and basic methods of realizing super-resolution reconstruction are introduced, and the restrictions on increasing the resolution of aerial images are analyzed. According to the requirements of applications, three typical super-resolution techniques which can be used in applications are listed, and then we focus on the relationship between dislocation error and quality of reconstruction image in the sub-pixel imaging technique through simulation. Finally, we consider the development situation and application requirements, the further application prospect of super-resolution in the aerial E-O imaging system, which can really make a difference.

Keywords: aerial E-O imaging system; super-resolution reconstruction; image resolution

1 引言

近年来,随着无人侦察机和侦察飞艇在现代战争中的屡次亮相,侦察情报在战争中的作用愈显重要。为了获取更多的侦察信息,地面车辆、舰船、飞机、飞艇及卫星都被用作搭载侦察系统的载体用以扩大光学系统的动态视场并增加收容信息。相对于卫星侦察,航空侦查具有机动、灵活及针对性强等特点,成为现代战争中获取战术情报的基本手段。其中,能否获得高分辨率的图像也决定了侦察效果,这也对航空光电成像系统提出了更高的要求。

提高图像分辨率最直接的方法就是减小传感器的像素尺寸,但是随着像素尺寸的减小,到达传感器上的光能量也减少,从而引入散粒噪声,严重影响了图像质量。然而现今的图像传感器技术已经在不引入散粒噪声的前提下,最大程度地减小了像素尺寸;另外一种方法是增加图

像传感器的面积,但在实际的工程应用中,对设备的尺寸和造价都有严格的要求,应用造价昂贵的高精度光学和图像传感器受到诸多限制。因此,一种新型的提高图像分辨率的方法——超分辨率重构技术应运而生。

超分辨率重构技术是综合电子、计算机、数字信号处理等技术为一体的新一代提高图像分辨率的技术。超分辨率重构技术由于具有低成本、分辨率提升倍数高等优点,无论在军事还是民用领域都具有极大的应用价值和前景,对航空成像技术的发展具有重要意义。

2 超分辨率重构技术的基本方法

2.1 超分辨率重构技术的基本原理

处理超分辨率问题,首先要建立数学模型,通过该数学模型反映低分辨率图像(LR)与所求的高分辨率图像(HR)

收稿日期:2014-12

* 基金项目:国家自然科学基金(60902067)、吉林省重大科技攻关(11ZDGG0010)项目

之间的关系。数学模型都是根据实际的成像过程分析而来的,因此又被称为成像模型。成像模型描述的是理想高分辨率图像退化成为实际低分辨率图像的过程,如图1所示。

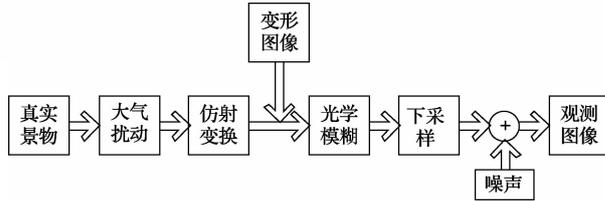


图1 典型的超分辨率成像模型

为了使成像模型具有一定的普遍性,这里假设每帧图像的大小均不相同,每帧图像所经历的平移、旋转、降采样以及模糊变换的参数也都不尽相同,并且进一步假设每帧图像受到的高斯加性噪声也各不相同。成像模型如式(1)所示:

$$Y_k = D_k C_k F_k X + E_k, \quad 1 \leq k \leq N \quad (1)$$

式中:矩阵 F_k 表示作用于低分辨率图像 X 中的大气扰动和几何形变过程(平移、旋转、仿射变换); C_k 代表光学模糊矩阵; D_k 为降采样矩阵; E_k 表示最后加在低分辨率图像上的高斯噪声。

将上式中格式由 $k = 1, \dots, N$ 组合在一起,可以用一个更加简练的矩阵表达式表达:

$$Y = HX + E \quad (2)$$

式中:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} D_1 & C_1 & F_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_N & C_N & F_N \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix}$$

上面得到的式(2)就是典型的超分辨率成像模型表达式。

2.2 超分辨率重构技术的基本方法

超分辨率图像重建技术的基本方法主要包括频域重建和空域重建。下面就对几种常用算法进行简要概述:

1) 频域重建

频域法主要依据傅里叶变换的位移性质,并假定原始HR图像的频带有限,从而恢复出一幅HR图像。频域方法的优点是:理论简单,计算量小,容易实现并行处理;缺点是:理论前提过于理想化,观测模型过于局限,鲁棒性较差,且难以应用先验知识。

2) 空域重建

空域法更加强调高分辨率图像与低分辨率图像的像素对应关系,在空域法的观测模型中,将运动、插值及迭代等过程融合在一起,更加符合实际低分辨率图像获取时的退化过程。3种经典空域法包括最大后验概率法、迭代反投影法和凸集投影法。

① 最大后验概率法

最大后验概率法基于贝叶斯理论,该算法从后验概率的角度出发,通过低分辨率图像已知这个条件,使高分辨

率图像出现的后验概率最大。

② 迭代反投影法

Irani 和 Peleg 首次提出这一方法。该算法的思路为逆向迭代逐次缩小误差,即首先估计出高分辨率图像,然后将其通过成像模型得到低分辨率图像,依据得到的低分辨率图像与实际的观测图像之间的误差反复更新初始估计,反复迭代直到初始估计的高分辨率图像最优。该方法的优势为简单易懂,但没有唯一的解且推算投影矩阵十分烦琐。

③ 凸集投影法

凸集投影法是由 Stark 和 Oskoui 首次引入超分辨率重构领域。该算法基于集合理论,并引入图像的先验知识作为约束条件,理想的重建结果即为定义了这些约束条件的凸集合的交集。该算法对于各种观测模型有较好的适用性,较好地利用了图像的先验知识,但初始条件对其重建结果影响过大,且解不唯一,时间复杂度高。

3 航空光电成像系统中可应用的超分辨率重构技术

3.1 航空图像分辨率提高的限制因素

高分辨率是航空成像技术的代表性指标之一,由于航空成像的特殊性,高分辨率成像受到光学系统、飞行状态及多种自然因素的影响^[1-2]。

1) 光学系统的限制

实际的工程应用中,对航空相机体积和重量都有严格的要求,因此光学系统孔径受到限制,从而使光学系统焦距受限,也就导致高分辨率图像获取也受到了限制。

2) 像移引起的成像模糊

由于光电成像系统随航空平台运动,即使曝光时间很短,拍摄目标与相机之间也会存在相对运动,这个相对运动称为像移。像移会引起图像质量的下降,表现形式为图像运动模糊。

3) 温度变化引起的成像模糊

航空相机的工作环境十分恶劣,高空作业所处的环境温度变化很大,航空相机中的感光材料和结构材料会受到温度非线性变化的影响,严重时会造成光电成像系统离焦,成像效果大打折扣。

4) 振动引起的成像模糊^[3]

航空光电成像系统搭载于航空平台上,在航空飞行的过程中难以避免航空平台的振动。当光学视轴在光学系统与航空平台相连的各点的振幅和相位不一致时易发生角位移,导致成像发生模糊,分辨率下降严重。

如上所述,在航空成像的全过程中,光电成像系统的成像质量受到诸多因素的影响,要想保证高分辨率的成像确非易事。

3.2 航空光电成像系统中可应用的超分辨率重构技术

目前,大多数超分辨率重构算法都是基于传统的超分辨率重构理论框架,即需要进行配准、插值融合及去噪等

后期处理过程。然而,在实际的工程应用中,必定要考虑实时性的问题,那些效果较好但实时性较差的算法很难被应用。结合实际的工程应用,列举几种更易于实现和工程应用的超分辨率重构技术。

3.2.1 非均匀插值算法

最直观的超分辨率重构方法之一。它包含3个步骤:配准、非均匀插值及去模糊。该算法依据配准得到的图像间的运动参数,将低分辨率图像依次投影到高分辨率网格上,得到分布不均匀的采样点图像,然后通过内插的方式得到均匀分布的采样点图像,最后进行去模糊等处理得到高分辨率图像。算法流程如图2所示。

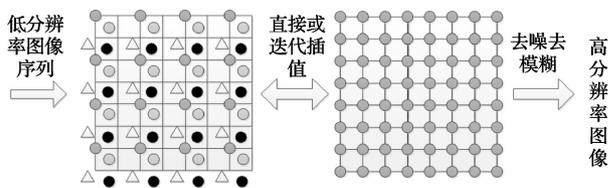


图2 基于配准和插值的重构

该算法直观,时间复杂度低,易于工程化。但这种算法只适用于低分辨率观测图像噪声方差和模糊降质程度都相同的情况,且处理过程易引入误差,所得重构结果无法保证最优。

3.2.2 亚像素成像技术

亚像素成像技术是一种软硬相结合实现图像超分辨率重构的技术。该技术最早应用在法国的 SPOT5 卫星上,该星与前几颗卫星相比分辨率从 10 m 提高到了 2.5 m,地面分辨率大幅增加。该技术通过将两片在水平和垂直方向分别错位线性阵列探测器内置在成像仪的焦平面内,然后采用数字图像处理算法将两幅低分辨率图像合成一幅高分辨率图像,如图3所示。

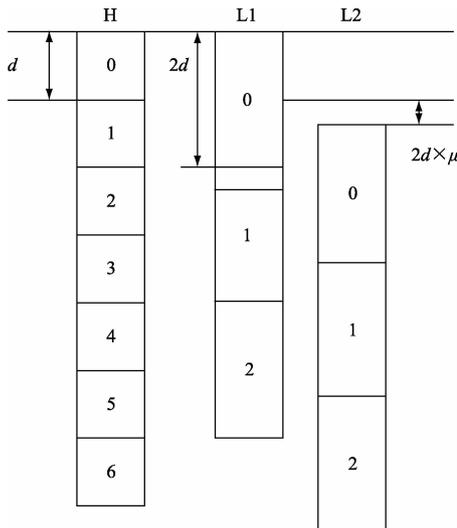


图3 高分辨率与低分辨率图像像素对应关系

现阶段流行的亚像素成像技术都是基于 SPOT5 亚像

元成像技术^[4-6],焦平面集成方法也成为亚像素成像的主要技术途径;即在一个芯片上集成两片相同的线阵探测器,一般在线阵方向错位 0.5 个像元、在垂直方向上为 $(n+0.5)$ 或 n 像元(n 为正整数)的错位。

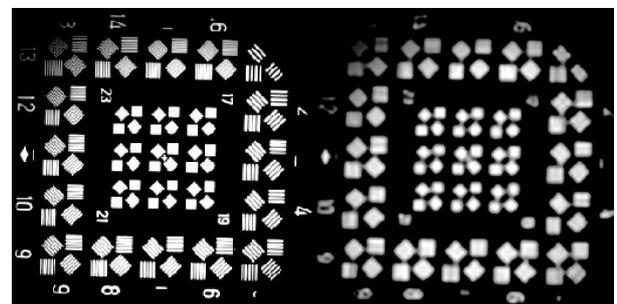
然而,在实际的工程应用中,在一个芯片上集成的两片线阵探测器,很难保证在某一方向上的错位精确度,难免会引入一些误差。下面以两线阵为例,针对引入误差的大小对重构效果的影响程度进行简要的分析。假设引入误差系数为 μ ,其取值范围为 $[0, 0.5]$,低分辨率图像与高分辨率图像的位置关系如图3所示。

由探测器的原理可知,2 个小像元灰度值的平均值等于它们所组成的大像元的灰度值,因此有:

$$\begin{cases} L_0^1 = \frac{H_0 + H_1}{2} \\ L_0^2 = \frac{H_1 + H_2 + (H_3 - H_1)\mu}{2} \\ L_1^1 = \frac{H_2 + H_3}{2} \\ L_1^2 = \frac{H_3 + H_4 + (H_5 - H_3)\mu}{2} \\ \vdots \end{cases} \quad (3)$$

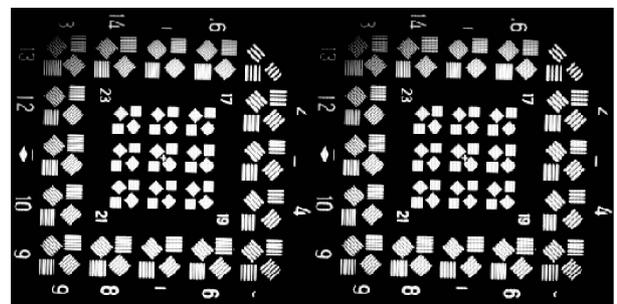
令 $H_0 = L_0^1$, 然后根据式(3)即可依次求出 H_1, H_2, \dots, H_n , 达到重构高分辨率图像的目的。

为了分析亚像素错位误差对重构效果的影响,采用 MATLAB 2012b 软件进行仿真实验,首先取一副 256×256 的灰度图像模拟地面景物的采样图像,然后通过模拟 CCD1/2 欠采样过程,可以得到 4 幅低分辨率图像,最后依据式(3)合成引入错位误差的高分辨率图像。仿真实验结果如图4所示。



(a)原始高分辨率图像

(b)低分辨率图像



(c) $\mu=0.05$ 时的重构结果

(d) $\mu=0.1$ 时的重构结果

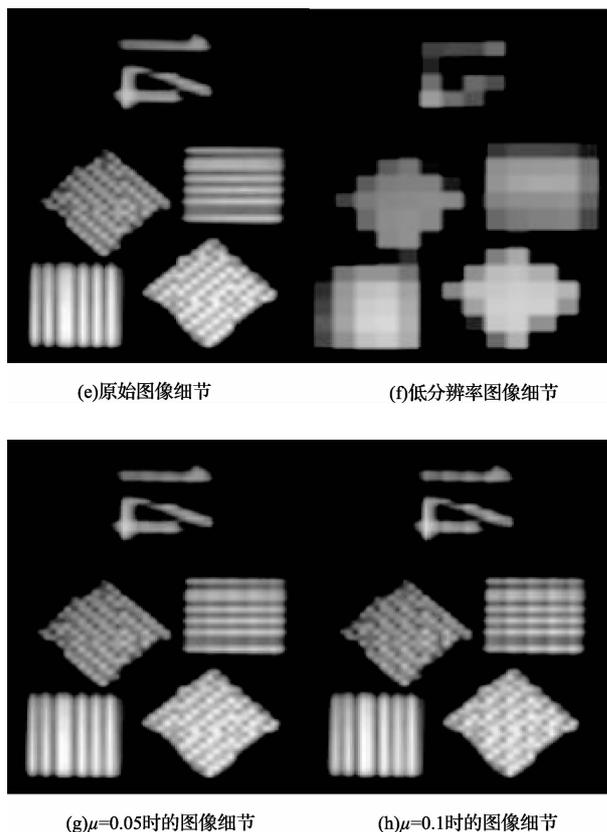


图4 仿真实验结果

为了能够更加直观地分析错位误差对重构效果的影响,引入基于结构失真的图像质量评价指标(structural similarity index measurement, SSIM)对引入错位误差的高分辨率图像与原始高分辨率图像作比较,从数值的变化来体现肉眼难以察觉的差异,数值关系如表1所示。

表1 错位误差系数 μ 与重建质量的关系

μ	SSIM	μ	SSIM
1/100	0.999 8	1/90	0.999 8
1/80	0.999 7	1/70	0.999 6
1/60	0.999 5	1/50	0.999 3
1/40	0.998 9	1/30	0.998 1
1/20	0.995 7	1/10	0.984 1
1/9	0.980 7	1/8	0.976 3
1/7	0.970 1	1/6	0.961 1
1/5	0.947 4	1/4	0.925 1
1/3	0.885 0	1/2	0.801 7

如表1所示,当错位误差系数 $\mu < 1/20$ 时,SSIM 值基本没有变化;当误差 μ 由 $1/20$ 继续增大时,SSIM 值的变化较之前有相对较大的变化。除此之外,由图4对比可以发现,当误差系数 μ 增大到 $1/20$ 时,重构效果与原始高分辨率图像差异不大;当误差系数增大到 $1/$

10 时,重构图像与原始图像就出现了较明显的差异。综合以上分析,当错位误差大于 $1/10$ 个低分辨率图像像素时,重构图像质量下降较明显;当错位误差小于 $1/20$ 个低分辨率图像像素时,重构效果与原始图像差异不大。

尽管两片线阵探测器亚像元成像可使空间分辨率提高。但是,有时仍不能满足实际应用的要求,因此也就衍生出了多线阵探测器亚像元成像,而线阵数也不能无限制的提高,会导致探测器采集到的数据存在混叠,造成模糊现象。总之,在实际工程应用中不能过度追求分辨率,而增加了图像后处理的难度。

3.2.3 基于 GPU 的非局部均值算法

在实际的工程应用中,对图像处理算法的实时性要求非常高,而常规的超分辨率重构算法复杂、计算量大,如果不采取适当的优化,很难被实际应用。

2012年,李家德等人在非局部均值超分辨率的基础上提出了一种更适用于实际工程应用的改进方案^[7],并在此基础上采用基于图形处理器(graphics processing unit, GPU)的并行计算方案^[8],大幅度提高了该算法的实时性。

GPU作为一种革新性的技术,近年来在科学计算领域备受关注。这项技术在多个领域都已有大量的科学应用,并在性能与能效方面取得了显著提升。GPU技术的飞速发展着实给超分辨率技术带来了福音,使其在实时性方面出现了质的飞跃。由于非局部均值超分辨率算法的推导过程过于繁琐,本文并不过多介绍该算法,而是着重介绍超分辨率技术结合GPU技术后,在实际工程应用中具有极大的潜力和发展前景。

为了更加直观地体现基于GPU技术的超分辨率技术在计算性能方面的优势,采用标准图像Lena进行仿真实验,将高分辨率Lena图像(256×256)降采样得到4帧低分辨率图像(128×128)。对这4帧低分辨率图像采用非局部均值超分辨率算法分别在CPU和GPU上执行,进行计算效率和性能的比较。

实验环境为:GPU为NVIDIA GeForce GTX 460, CPU为Intel Xeon 四核处理器,主频3.6 GHz,内存为8 GB。软件平台为VS2010和CUDA Toolkit 4.2。仿真结果如图5所示,计算性能如表2所示。



图5 GPU 仿真结果

表 2 性能比较

	CPU	GPU
计算时间/ms	1 024.9	8.1

如表 2 所示,采用了 GPU 并行计算方案后,超分辨率重构算法的计算性能得到了大幅度提升,这也在某种程度上解决了该算法的实时性问题,使其未来应用于光电成像系统中不再遥不可及。

4 系统验证结果

2013 年, Tao Xiaoping 等人在实际的工程项目中应用了亚像素成像技术^[9],通过搭建像面微位移主动控制系统,对实际的图像放大倍率进行实验分析,2 倍超分辨率图像实际提高分辨率达 1.75 倍,4 倍超分辨率图像实际提高分辨率达 2.5 倍,为航空、航天光电成像系统应用超分辨率技术奠定技术基础。系统验证结果如图 6 所示。

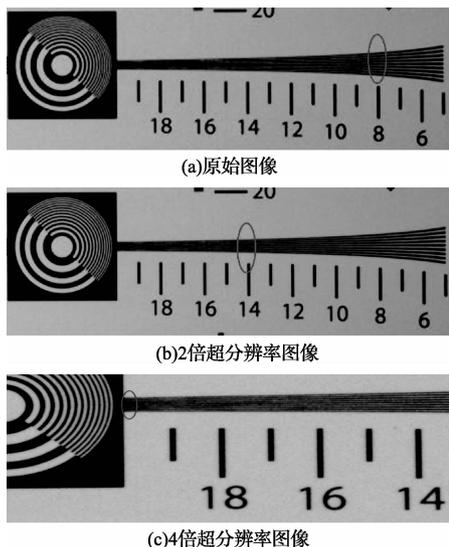


图 6 系统验证结果

5 航空图像超分辨率技术展望

5.1 嵌入式 GPU 的应用

自 NVIDIA 公司提出 GPU 的概念之后,这项技术正在世界范围内影响着计算领域的各个方面——小到手机,大到超级计算机,它还在改变着商业应用、科学计算、云计算、计算机可视化系统和机器人等领域。Teraflop(每秒万亿次浮点计算)如今能以一种经济可行的方式惠及多个领域,具有广阔的应用前景。在国外, GPU 已经可以做到芯片级,然而由于国外在对我国禁运此种芯片,使得现阶段无法应用此种芯片。从长远发展来看,在航空成像系统中逐步加入多种图像后处理算法是一种必然趋势,由于图像数据量的不断增加,必然需要性能强劲的计算芯片解决实时性问题。因此,这种高性能计算芯片具有广阔的应用前景^[10-11]。

5.2 主动超分辨率重建

主动超分辨率重建是亚像素成像技术的一种延伸,通过对现有超分辨率算法加入先验知识,从软件算法指导硬件设计的角度实现主动合作图像帧的获得,进而提高图像分辨率。主要依据超分辨率重建原理,提取影响最终超分辨率能力的因素,并在光学系统设计中,将这些因素转为先验知识,为后续处理提供重要数据支撑。

6 结论

根据现代航空成像系统的应用需求,提出了 3 种可应用于航空成像系统的超分辨率重构方法,并介绍了超分辨率重构技术的基本原理和实现方法。然后着重分析了错位误差对亚像素成像技术成像质量的影响。最后,对该技术在航空成像系统的应用前景进行了展望。

参考文献

- [1] 杨文波. 航空图像超分辨率重构技术研究[D]. 北京:中国科学院,2014.
- [2] 程晓薇,车英,薛常喜. CCD 数字航空相机高分辨率成像关键技术与发展[J]. 电光与控制,2009,16(4):7-10.
- [3] 钱义先,程晓薇,高晓东,等. 振动对航空 CCD 相机成像质量影响分析[J]. 电光与控制,2008,15(11):55-58.
- [4] 徐正平,翟林培,葛文奇,等. 亚像素的 CCD 几何超分辨方法[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2448-2452.
- [5] 聂亮,胡萌萌,韩军. 基于微位移的超分辨重建技术研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(3):35-38.
- [6] 刘妍妍,张新,徐正平,等. 利用异形像元探测器提高空间分辨率[J]. 光学精密工程,2009,17(10):2620-2627.
- [7] 李家德,张叶,贾平,等. 采用非局部均值的超分辨率重构[J]. 光学精密工程,2013,21(6):1576-1585.
- [8] 李家德. 图像超分辨率重构及其运动估计改善的研究[D]. 北京:中国科学院,2012.
- [9] TAO X P, YAN F. Image improvement based on sub-pixel post-integration for a staring imaging system in geostationary orbit[J]. Chinese Optic Letters, 2014, 12(4), 042802:1-5.
- [10] 闫钧华,杭谊青,许俊峰,等. 基于 CUDA 的高分辨率数字视频图像配准快速实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2):380-386.
- [11] 肖汉,张祖勋. 基于 GPGPU 的并行影像匹配算法[J]. 测绘学报,2010,39(1):46-51.

作者简介

田浩南,1987 年出生,硕士研究生,主要研究方向为航空图像超分辨率重构。
E-mail:tju_thn@163.com