单幅图像超分辨率重建方法研究

李伟[1]，董秋艳[2]
（1.中国人民公安大学安全防范系，北京 102623；2.哈尔滨工业大学机电工程学院，哈尔滨 150001）

摘要：该论文研究了单帧低分辨率图像重建方法，主要有插值方法、插值法与迭代反投影法和凸集投影法相结合的方法。仿真实验结果表明插值与迭代反投影和凸集投影相结合的方法均比单独进行插值放大效果更好，在提高图像分辨率的同时能较好的复原图像细节。

关键词：超分辨率；插值；凸集投影；迭代反投影
中图分类号：TP391.41 **文献标识码：**A **文章编号：**1007-9599 (2013) 01-0013-03

1 引言

目前图像处理技术广泛应用于视频监控，安全防范，航空拍摄，医学成像等领域。图像分辨率依赖于传感器的物理特性，光线，密度和检测器元素的空间响应。受拍摄场景、采集图像硬件设备限制等因素影响，获得的图像有时分辨率较低，清晰度较差，参考价值不高。改善传感器等硬件设备来提升图像分辨率往往很难实现，而利用图像复原方法能够提高低分辨率图像的清晰度[1]。传统图像复原技术不能将频率复原到衍射极限相应的截止频率外，从而丢失能量和信息，图像的分辨率得不到真正提高，而图像超分辨率重建技术能够提高图像分辨率，改善图像质量。图像超分辨率重建方法的核心思想是利用一幅或者多幅具有互补信息的低分辨率图像来重构一幅或者多幅细节更丰富的高分辨率图像。

图像超分辨率重建思想源于20世纪60年代Harris和Goodman提出的单幅图像重建的概念和方法[2, 3]。1984年Tsai和Huang[4]提出由低分辨率图像序列进行单幅高分辨率图像重建，图像的超分辨率重建技术已成为图像处理中的一个热门研究方向。单幅图像超分辨率重建主要利用对高分辨率图像的先验知识和以混叠形式存在的高频信息进行复原，恢复出图像获取时丢失的信息[5]。序列图像超分辨率重建除了可以利用单幅图像中包含的信息，还可以利用相邻图像之间的互补信息进行重建，重建效果要优于单幅图像重建的效果。实际拍摄时由于各种条件限制，同一场景不具备拍摄多帧图像的条件，对单帧图像的超分辨率重建在这些情况有更高的实用价值。

2 超分辨率重建方法

2.1 插值算法

2.1.1 双线性插值

双线性插值相当于对坐标为 (x,y) 的像素点周围四个邻接点的像素值在 x 和 y 方向作线性内插，待采样点的像素值根据待采样点与相邻点的距离确定相应的权值计算得到，插值过程如图1所示。重采样点像素值 $f(i+u,j+v)$ 表达式如（1）式：

$$f(i+u,j+v)=(1-u)(1-v)f(i,j)+(1-u)vf(i,j+1)+u(1-v)f(i+1,j)+uvf(i+1,j+1) \quad (1)$$

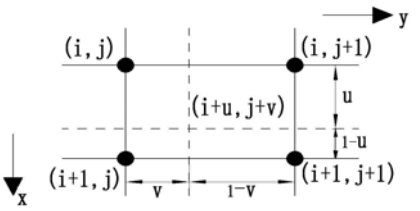


图 1 双线性插值示意图

2.1.2 双三次插值

双三次插值比双线性插值复杂，但获得的插值效果更好。四像素点进行三次插值时待采样点像素值是利用其周围16个邻点的像素值作三次插值，同时考虑到四个直接邻点像素值的影响和各邻点间像素值变化率的影响[6]，插值过程如图2所示。

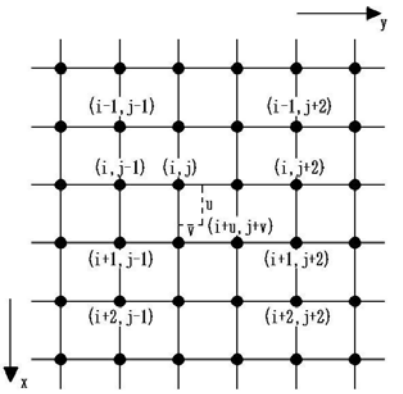


图 2 双三次插值示意图

目标像素值 $f(i+u,j+v)$ 的计算公式如（2）式：

$$f(i+u,j+v)=\boldsymbol{ABC} \quad (2)$$

其中：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} h(1+u) & h(u) & h(1-u) & h(2-u) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} f(i-1,j-1) & f(i,j-1) & f(i+1,j-1) & f(i+2,j-1) \\ f(i-1,j) & f(i,j) & f(i+1,j) & f(i+2,j) \\ f(i-1,j+1) & f(i,j+1) & f(i+1,j+1) & f(i+2,j+1) \\ f(i-1,j+2) & f(i,j+2) & f(i+1,j+2) & f(i+2,j+2) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} h(1+v) \\ h(v) \\ h(1-v) \\ h(2-v) \end{bmatrix}$$

式中 $h(x)$ 为插值函数，其一般形式如下：

$$h(x)=\begin{cases}(a+2)|x^3|-(a+3)|x^2|+1 & ,\quad 0\le|x|<1\\ a|x^3|-5a|x^2|+8a|x|-4a & ,\quad 1\le|x|<2\\ 0 & ,\text{其他}\end{cases} \tag{3}$$

参数 a 值的确定有不同的准则，一般希望插值函数与 sinc 函数在 x=1 点斜率相匹配，得到 $a=-1$，此时得到的 $h(x)$ 也是最常用的插值基函数。

2.2 基于融合的重建方法

本文对单幅图像进行超分辨率重建的流程如图（3）其中图像插值方法分别采用双线性插值（如2.1.1所示）和双三次插值（如2.1.2所示），超分辨率重建方法分别采用迭代反投影法和凸集投影法。

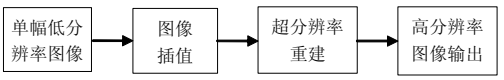


图3 单幅低分辨率图像重建流程图

2.2.1 迭代反投影法[7]

利用插值算法对分辨率为$[M\times N]$的原始图像 g 进行 t 倍放大，得到$[tM\times tN]$的高分辨图像初始估计 $\hat{f}^0$。对初始估计图像设定降质模型 **A**，根据降质参数生成k幅随机偏移的模拟低分辨率图像 $\hat{g}_i(i=1,2,...,k)$；将模拟低分辨率图像 $\hat{g}_i(i=1,2,...,k)$ 与原始低分辨率图像 g 的误差利用反投影算子 h^{BP} 反投影到高分辨率图像初始估计 $\hat{f}^n$。进行迭代运算，第 n 次迭代所得的高分辨率估计图像 $\hat{\boldsymbol{f}}^n$ 经降质模型 **A** 后获得的模拟低分辨率估计图像为 $\hat{g}^n$。更新超分辨率重建估计图像，直到误差达到要求。迭代反投影过程如下：

$$\hat{\boldsymbol{f}}^{n+1}=\hat{\boldsymbol{f}}^n+h^{\mathrm{BP}}(g-\mathbf{A}\hat{g}^n) \tag{4}$$

2.2.2 凸集投影法

凸集投影法是基于集合理论的一种超分辨率重建方法，就是从成像空间中任意一点开始投影定位到凸集的交集上的过程[8]。图像 $f(x,y)$ 所具有的性质 $A_1,A_2,\dots A_m$ 都可以与希尔伯特向量空间的一个相关的闭凸集 C_i 相对应，该集中所有的信号都具有特性 A_i，求得这些闭凸集的交空间就能得到超分辨率重建问题的最终解[9]。设 C_i 表示图像的先验信息，f 在 C_i 上的投影为 P_if（其中 P_i 代表任意矢量投影到 C_i 上的投影算子），经迭代运算即可得到满足所有性质的原图像的估计，迭代关系式如下：

$$f^{(n+1)}=P_1P_2\dots P_Lf^{(n)} \tag{5}$$

迭代过程如图4。

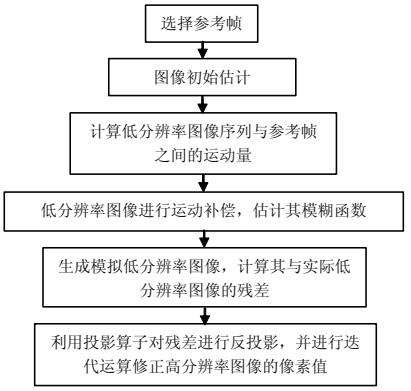


图4 POCS方法重建流程图

3 仿真实验及结果分析

本文仿真环境为Matlab 7.11，选取一幅彩色和一幅灰度 256×256 高分辨率图像用于仿真实验，如图5（a）和图6（a）所示。为构造低分辨率图像，对这两幅图像进行了降采样处理，生成分辨率为 64×64 的低分辨率图像，如图5（b）和图6（b）所示。本文进行了3组超分辨率重建实验，第一组实验对单幅图像分别进行双线性插值和双三次插值重建，重建结果如图5（c）、（d）和图6（c）、（d）所示；第二组实验首先对低分辨率图像分别进行双线性插值和双三次插值放大，然后对插值结果图像进行一定的平移、模糊和角度旋转等处理生成8帧模拟序列图像，进而利用IBP方法对模拟序列图像进行重建，结果如图5（e）、（f）和图6（e）、（f）所示；第三组实验首先对原始低分辨率图像分别进行双线性插值和双三次插值放大，然后对插值结果图像进行一定的平移、模糊和角度旋转等处理生成8帧模拟序列图像，进而利用POCS方法对模拟序列图像进行重建，结果如图5（g）、（h）和图6（g）、（h）所示。

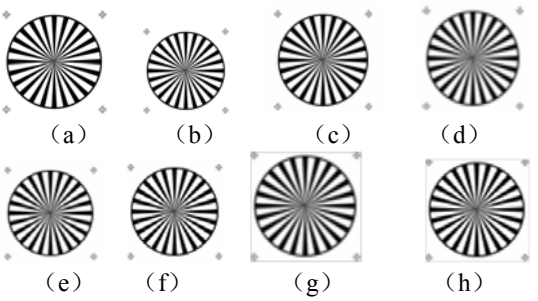


图5 灰度图像重建图

（a）原始灰度图像；（b）原始低分辨率图像；（c）双线性插值结果；（d）双三次插值结果；（e）双线性插值与IBP相结合；（f）双三次插值与IBP相结合；（g）双线性插值与POCS相结合；（h）双三次插值与POCS相结合

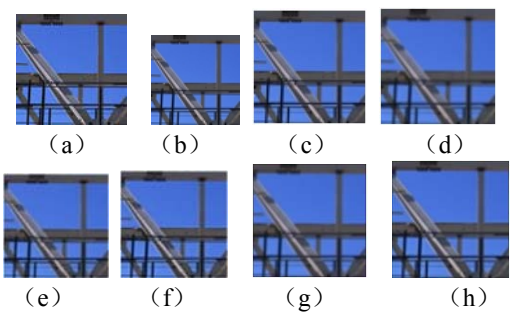


图6 彩色图像重建图

（a）原始彩色图像；（b）原始低分辨率图像；（c）双线性插值结果；（d）双三次插值结果；（e）双线性插值与IBP相结合；（f）双三次插值与IBP相结合；（g）双线性插值与POCS相结合；（h）双三次插值与POCS相结合

为了验证重建方法的优劣，本文还对重建图像进行了质量评价。图像质量评价方法一般分为根据人眼视觉效果的主观评价方法和根据具体数学公式计算的客观评价方法。最常用的客观评价指标有均方误差（MSE）和峰值信噪比（PSNR），MSE的计算公式如式（6）所示，PSNR

的计算公式如式（7）所示。本文重建图像的客观评价数据如表1所示。

$$MSE(X,Y)=\frac{1}{mn}\sum_{i=1}^{i=n}\sum_{j=1}^{j=m}[X(i,j)-Y(i,j)]^2 \quad (6)$$

$$PSNR(X,Y)=10\log_{10}(\frac{\max(X)^2}{MSE(X,Y)})=10\log_{10}(\frac{255^2}{MSE(X,Y)}) \quad (7)$$

其中 $X(i,j)$ 表示原始高分辨率图像，$Y(i,j)$ 表示重建所得高分辨率图像。

表1 重建图像质量客观评价数据表

评价指标 \ 重建方法		双线性插值	双三次插值	IBP		POCS	
				双线性插值	双三次插值	双线性插值	双三次插值
黑白图像	MSE	4176.7	4466.6	2956.1	2616.2	4485.3	4194.2
	PSNR	11.923	11.631	13.423	13.954	11.613	11.903
彩色图像	MSE	535.12	566.40	503.69	484.42	602.07	590.53
	PSNR	20.846	20.600	21.109	21.279	20.334	20.418

从图5、图6可以看出，只进行双线性插值重建的结果图像边缘部分锯齿状纹理较多，图像锐化效果较好，而双三次插值重建结果图像边缘相对平滑，锯齿较少，图像整体较模糊，锐化效果较差。

从表1和图5、图6可以看出，基于双三次插值的IBP重建算法比基于双线性插值的IBP算法PSNR更大，重建结果边缘锐化效果较好，整体图像也更清晰，边缘振荡效应较明显，没有后者平滑；基于双三次插值的POCS算法比基于双线性插值的POCS重建方法PSNR更大，整体图像清晰度比后者高，图像中边缘振荡效应较后者大，且重建图像都出现边框；从客观评价指标数据可以看出IBP算法重建结果PSNR高于POCS算法重建结果。主观观测重建结果图可以看出基于双三次插值的IBP算法的重建效果最好，基于双三次差值的POCS方法重建结果比基于双线性插值的IBP方法重建结果的PSNR值小，但重建效果更好，整体图像更清晰。IBP算法和POCS算法的重建效果都比只进行双线性插值或者双三次插值放大的效果要好，这两种方法都能在提高图像分辨率的同时较好地保持图像的细节信息。这表明重建图像质量高低不能仅依靠MSE和PSNR客观评价指标的高低来判断。

4 结论

本文针对单幅图像的超分辨率重建方法进行了研究和仿真实验，比较了双线性插值、双三次插值、插值与IBP相结合的算法及插值与POCS相结合算法对单幅图像超分辨率重建的效果。利用IBP算法和POCS算法的重建效果都优于单纯的利用双线性插值或者双三次插值对单幅图像的放大。对于一些不同场景、不同内容的单幅图像进行超分辨率重建需要采用何种重建方法能得到更好的重建效果还有待进一步研究。

参考文献：

[1]M.Irani,S.Peleg.Improving resolution by image registration.CVGIP:Graph.Models Image Process,1991,5 (3): 231-239

[2]J.L.Harris.Diffraction and resolving power.J.O.S.A.,1964,54(7):931-936

[3]J.W.Goodman .Introduction to fourier optics. New York:Mc Graw-Hill,1968

[4]R Y Tsai, T S Huang. Multiple frame image restoration and registration,Advances in Computer Vision and Image Processing.Greenwich,CT:JAI Press Inc.1984:317-339

[5]王春霞,苏红旗,范郭亮.图像超分辨率重建技术综述[J].计算机技术与发展,2011,05:124-127.

[6]王会鹏,周利莉,张杰.一种基于区域的双三次图像插值算法[J].计算机工程,2010,19:216-218.

[7]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,2009,03:321-329.

[8]卓力,王素玉,李晓光.图像/视频的超分辨率复原[M].人民邮电出版社,2011.1.

[9]杨李涛,路林吉,范征宇.基于改进POCS算法的视频图像超分辨率重建[J].微型电脑应用,2010,07:33-36.

[作者简介]李伟（1989- ），男，中国人民公安大学安全防范系硕士研究生，研究方向：安全防范、图像处理；董秋艳（1988- ），女，哈尔滨工业大学机电工程学院硕士研究生，研究方向：自动控制、模式识别。