

基于非局部 POCS 的超分辨率图像重建

罗国中 殷建平 祝 恩

(国防科技大学计算机学院 长沙 410073)

摘要 图像获取过程中,受成像系统的影响,无法获取原始场景中所有的信息。超分辨率图像重建技术就是在不改变成像系统的前提下,提高图像质量。POCS(凸集投影算法)可以利用多帧低分辨率图像重建一帧高分辨率图像。然而传统的 POCS 算法通常会产生“锯齿”边缘。在自然图像中,会存在许多的相似边缘结构。利用局部相似性的结构,可以有效地消除“锯齿”边缘。因此提出一种基于非局部 POCS 的超分辨率图像重建算法,以有效锐化图像边缘,提高图像的视觉感观。

关键词 超分辨率重建,POCS(凸集投影),非局部均值滤波,图像插值

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.08.009

Super-resolution Image Reconstruction Based on Non-local POCS

LUO Guo-zhong YIN Jian-ping ZHU En

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Image acquisition process, affected by the imaging system, cannot get all the information of the original scene. Super-resolution image reconstruction is the technique to boost image quality under the premise of not changing the imaging system. POCS (projection onto convex sets algorithm) can take advantage of multi-frame low-resolution image to reconstruct a high resolution image. However, the traditional POCS algorithm usually produces the “jaggy” edge. In nature images, there will be many similar-edge structure. Taking advantage of local similarity structure can effectively eliminate the “jaggy” edge. Therefore a non-local POCS-based super-resolution image reconstruction algorithm was proposed. It can sharpen image edge effectively, and improve the visual senses of the image.

Keywords Super-resolution reconstruction, POCS (convex set projection), Non-local mean filtering, Image interpolation

1 引言

图像超分辨率重建^[1]就是试图恢复成像系统成像过程中“丢失的细节”,从而提高图像的质量。随着科学技术的发展,图像超分辨率重建技术在军事、航天、医学等领域都有着广泛的应用。LR(低分辨率)图像可以看成是 HR(高分辨率)图像下采样、模糊后的图像。传统的图像插值技术有最近邻插值、双线性插值、三次样条插值。这些算法复杂度低,但会产生“锯齿”形状边缘。目前出现了一些自适应的插值算法。例如:边缘保持插值算法^[2-4]沿着边缘方向插值图像,能在一定程度上消除边缘“锯齿”现象。但是以上的图像插值算法没有考虑低分辨率图像形成过程中的模糊影响,不能恢复成像过程中已经丢失的图像细节信息,因此并不能真正提高图像的分辨率。

超分辨率重建最早由 Harris^[5]和 Goodman^[6]分别于 1964 年和 1968 年提出。基于集合理论的 POCS^[7,8](凸集投影)法是图像超分辨率重建问题的一类重要方法。凸集投影

理论中,超分辨率解空间中的解有多个限制条件,每个限制条件定义为向量空间中的凸集合。这些限制条件一般是图像的一些比较理想的性质,比如能量有界、数据可靠、数据平滑等。超分辨率重建的解空间就是这些限制条件的交集空间。然而 POCS 算法会使重建的结果产生“锯齿”和“振铃”边缘。这主要因为在迭代重建的过程中,将错误的信息反复用于重建,导致图像边缘质量下降。为了增强图像边缘重建质量,邵青等人改进 PSF,使重建后的图像边缘得到保持。

在自然图像中,通常某些局部模块在整幅图像中重复出现。例如非局部冗余信息对图像质量的提高会很有帮助。令人鼓舞的是非局部均值滤波算法^[9]在图像去噪中获得成功应用。本文的目的就是将非局部处理过程引入 POCS 算法中,以增强图像重建结果。初始的 HR 图像由 LR 图像双线性插值放大得到,然后采用非局部过程预处理初始 HR 图。在 POCS 迭代重建过程中,利用非局部冗余信息,修正每一次迭代后的重建结果。非局部相似性是计算以像素点为中心的窗口之间的距离。这可以有效地提高超分辨重建质量。

到稿日期:2013-05-31 返修日期:2013-07-24 本文受国家自然科学基金资助项目(60970034,61170287,61232016,61105050),高等学校全国优秀博士学位论文作者资助项目(2007B4),湖南省自然科学基金资助项目(2jj3069)资助。

罗国中(1986-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别、人工智能,E-mail:472338311@qq.com;殷建平(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为算法设计与分析、人工智能、模式识别、信息安全等;祝 恩(1976-),男,博士,教授,主要研究方向为图像处理、模式识别、信息安全等。

2 基于非局部 POCS 的超分辨率图像重建

低分辨率图像是由高分辨率图像经过形变、模糊、采样、噪声干扰形成的。整个过程可以模型化表示为：

$$g_k = DH_k B_k f + n_k, 1 \leq k \leq m$$

其中, B_k 表示形变矩阵, H_k 表示模糊矩阵, D 表示下采样矩阵, n_k 表示噪声。

POCS 超分辨重建算法就是利用这个模型重建高分辨率图像。但是 POCS 算法重建后图像会产生边缘“锯齿”现象。本文的创新点在于引进非局部均值滤波算法中的图像局部结构相似性原理, 利用图像局部相似性结构先验信息来修改、锐化图像边缘。该方法有效地去除了边缘“锯齿”。

2.1 凸集投影算法

凸集投影算法要求在一个矢量空间内定义一些闭合的凸形约束集合。实际的高分辨率图像就包涵在这些约束集合中。将任意一个初始估计向这些约束集合进行投影, 就可以获得高分辨率估计图像。每一个约束集合有一个相应的投影算子 P , 投影算子 P 把空间内的任意一点映射到该集合内离这一点最近的点上。可以定义松弛投影算子为：

$$T = (1-\lambda)I + \lambda P, 0 < \lambda < 2 \quad (1)$$

松弛算子可以用来增强算法和收敛稳定性, 但是它也容易平滑掉高分辨率图像的细节信息, 因此 λ 值的选择要适中。在闭合凸形约束集合中, 每个集合对应低分辨率图像序列 $y^{(l)}$ 内的一个像素点。

$$r^{(l)}(i, j) = y^{(l)}(i, j) - \sum_{(r,s)} z^{(k)}(r, s) A^{(l,k)}(r, s; i, j) \quad (2)$$

$$l = k - \frac{M-1}{2}, \dots, k, \dots, k + \frac{M-1}{2}, \forall (i, j) \in \theta^{(l)}$$

式中, $\theta^{(l)}$ 表示第 l 幅观测图的支撑域; $y^{(l)}(i, j)$ 表示第 l 幅观测图像上的像素点; $z^{(k)}(r, s)$ 表示第 k 幅高分辨率图像上的像素点; $A^{(l,k)}(r, s; i, j)$ 为从第 k 幅高分辨率图像到第 l 幅低分辨率图像的降质模型; $r^{(l)}(i, j)$ 为高分辨率图像经降质模型后的结果与实际观察的低分辨率图像之间的残差。

采用投影算子 $P^{(l)}(i, j)$ 进行残差余项 $r^{(l)}(i, j)$ 的反投影运算。

$$P^{(l)}(i, j)[x^{(k)}(r, s)] = x^{(k)}(r, s) + \begin{cases} \frac{(r^{(l)}(i, j) - \delta^{(l)}(i, j)) A^{(l,j)}(r, s; i, j)}{\sum_{o1, o2} A^{(l,k)^2}(o1, o2; i, j)}, & r^{(l)}(i, j) > \delta^{(l)}(i, j) \\ 0, & -\delta^{(l)}(i, j) \leq r^{(l)}(i, j) \leq \delta^{(l)}(i, j) \\ \frac{(r^{(l)}(i, j) + \delta^{(l)}(i, j)) A^{(l,j)}(r, s; i, j)}{\sum_{o1, o2} A^{(l,k)^2}(o1, o2; i, j)}, & r^{(l)}(i, j) < -\delta^{(l)}(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

还可以采用其他一些附加的非线性约束来改进结果, 如关于输出能量、相位、支撑域和幅度等约束。其中最为常见的就是幅度约束, 定义如下：

$$P_{\Lambda}[x^{(k)}(r, s)] = \begin{cases} 0, & x^{(k)}(r, s) < 0 \\ x^{(k)}(r, s), & 0 \leq x^{(k)}(r, s) \leq 255 \\ 255, & x^{(k)}(r, s) > 255 \end{cases} \quad (4)$$

凸集投影算法的执行流程如下：

- (1) 选择一个参考帧 K 。
- (2) 进行运动估计：
 - a) 把低分辨率图像双线性插值到高分辨率网格上；
 - b) 采用高斯函数对插值放大后的低分辨率图像进行滤波；

波；

c) 估计插值后的低分辨率帧与参考帧之间的运动。

(3) 如果点 (i, j) 处的运动估计是准确的, 则可以定义集合 $G^{(l)}(i, j)$, 并计算该点处的模糊函数 $A^{(l,k)}(r, s; i, j)$ 。

(4) 选择一幅插值后的图像, 经过运动补偿后作为初始估计 $z_0^{(k)}(r, s)$ 。采用类似的方法对其他低分辨率图像进行运动补偿, 并依此估计 $z_0^{(k)}(r, s)$ 的边缘。

(5) 对定义过的约束集合 $G^{(l)}(i, j)$ 的所有点 (i, j) 进行以下运算：

a) 计算残余项 $r_i^{(l)}(i, j)$ ；

b) 采用投影算子 $P^{(l)}(i, j)$ 进行残余项 $r_i^{(l)}(i, j)$ 的反投影运算。

(6) 利用幅度约束投影算子进行幅度约束。

(7) 如果满足停止准则, 则停止迭代过程, 否则转到步骤 (6)。

2.2 非局部预处理

根据采样定理, 当采样过程没有满足尼奎斯特定理时, 不可能完全恢复图像的边缘及纹理细节。由于人类的视觉系统对图像边缘敏感, 更加剧了这一问题。幸运的是, 自然图像通常包涵一些重复的模块和结构, 如图 1 所示。自然而然产生一种想法, 即利用图像中非局部的相似结构块来提高图像插值质量。在此我们提出一种简单但有效的非局部预处理技术来提高图像质量。该方法主要有 3 个步骤: 初始高分辨率图像估计、块匹配、非局部数据融合。

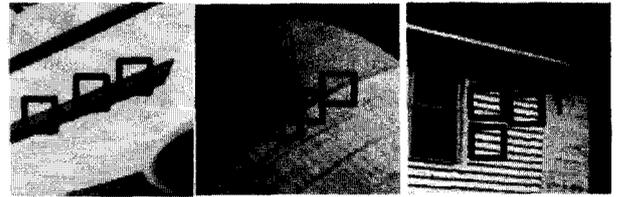


图 1 自然图像中的重复结构示例

目前存在的插值算法可以用来估计初始高分辨率图像, 综合考虑采用双线性插值算法。

2.2.1 块匹配寻找相似性像素组

初始的插值 HR(高分辨率图像) 像素点可以看成是未知丢失像素点的噪声估计, 插值错误可以模拟化为噪声。为了提高初始插值图像的质量, 用相似结构的 LR(低分辨率) 图像像素点加权融合来得到插值高分辨率图像。这一过程可以有效地减少插值噪声。在加权融合前, 需要通过计算局部块的相似度, 得出哪些是相似结构块, 并将相似的像素点存储在数组中。

假设 $y(i_0, j_0)$ 是初始 HR 插值图在位置 (i_0, j_0) 的像素值, $N_y(i_0, j_0)$ 是以位置 (i_0, j_0) 为中心的方型窗口, 例如 7×7 大小窗口。 $y(i, j)$ 是 LR 图在位置 (i, j) 的像素值, $N_y(i, j)$ 是以位置 (i, j) 为中心的方型窗口。两个图像块之间的距离为 $N_y(i_0, j_0)$ 和 $N_y(i, j)$ 。定义为：

$$d_{(i,j)} = \| N_y(i_0, j_0) - N_y(i, j) \|_2 \quad (5)$$

$\| \cdot \|$ 是 L_2 范数计算。如果距离 d 值小于一个预先设定的阈值, 表示两个块相似, 把 $y(i, j)$ 存储到数据集 $S_{(i_0, j_0)}$ 中。 $S_{(i_0, j_0)}$ 中包括 $y(i_0, j_0)$ 以及与其相似的 LR 像素点。虽然可以对整幅图进行块匹配处理, 但是应该设定限制条件。

实际中,我们限定搜索窗口的大小,比如:21×21 大小窗口。

2.2.2 数据融合

通过计算得到 LR 像素点对应于 HR 像素点 $y(i_0, j_0)$ 的数组信息 $S_{(i_0, j_0)}$ 之后,我们可以用所有在 $S_{(i_0, j_0)}$ 中的元素加权平均更新 $\hat{y}(i_0, j_0)$:

$$\hat{y}'(i_0, j_0) = \sum_{y(i,j) \in S_{(i_0, j_0)}} \omega(i, j) y(i, j) \quad (6)$$

权值 $\omega(i, j)$ 依赖于 $N_y(i_0, j_0)$ 与 $N_y(i, j)$ 之间的相似度,并受到 $0 \leq \omega(i, j) \leq 1$ 和 $\sum_{y(i,j) \in S_{(i_0, j_0)}} \omega(i, j) = 1$ 的约束。在非局部均值滤波去噪算法中,设置 $\omega(i, j)$ 为距离 $d(i, j)$ 的指数函数:

$$\omega(i, j) = \frac{1}{C(i, j)} e^{-\frac{d(i, j)}{t}} \quad (7)$$

$C(i, j)$ 是正规化常数:

$$C(i, j) = \sum_{y(i,j) \in S_{(i_0, j_0)}} \omega(i, j) \quad (8)$$

t 是一个参数,用来控制衰减速度。

注意,初始估计的丢失像素点,例如 $\hat{y}(i_0, j_0)$, 参与了图像融合过程,它的权值是 $\frac{1}{C(i, j)}$, 在所有的权值里面是最大的。经过非局部数据融合,能有效地提高插值图像的质量,减少插值错误。

3 实验结果

根据以上算法,利用 Matlab7.0 软件进行了仿真,选取视频连续 5 帧图像作为 LR 图像序列。非局部块匹配及数据融合时,搜索窗口半径限制为 30, 相似像素点的个数上限 $N=15$, 匹配块窗口大小为 7×7 。算法流程如图 2 所示。

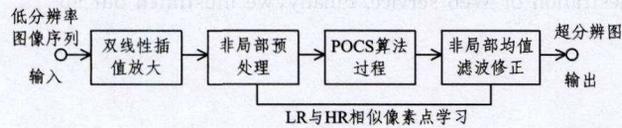


图2 系统框架

为了减少非局部处理过程运算量,将初始双线性插值放大的奇数行、奇数列作为原始低分辨率图像像素点,其余为初始估计高分辨率插值点。对初始估计高分辨率插值点进行非局部预处理,在不影响结果的情况下,可减少运算量。本文算法可以有效地去除边缘“锯齿”现象,提高图像的视觉感官和峰值信噪比,减少收敛迭代次数。将本文方法与改进 POCS 算法^[10]进行了对比实验,实验结果如图 3—图 5 所示,客观数据对比如表 1 所列。

表 1 图像重建的客观指标

PNSR (峰值信噪比)	POCS 算法	改进 PSF 的 POCS 算法	本文 NLPOCS 算法
car	30.9643	31.8050	32.4901
brands	30.6232	30.7712	31.4772
lena	30.8732	31.1588	31.8163

第一组实验采用连续的 5 帧 brands 图作为 LR 图像序列,将第一帧图双线性插值放大作为初始高分辨率图。

第二组实验采用视频中连续的 5 帧 car 图作为 LR 图像序列,将第一帧图双线性插值放大作为初始高分辨率图。

第三组实验采用 lena.bmp 图下采样,得到 5 帧 LR 图像序列,将第一帧图双线性插值放大作为初始高分辨率图。



图 3



图 4



图 5

结束语 传统的 POCS(凸集投影)算法,在提高图像的质量时,会产生边缘“锯齿”现象。由于人眼对事物边缘信息敏感,因此会加剧这一过程从而影响图像的视觉效果。自然图像中存在大量重复的局部结构块,充分利用这些非局部冗余信息可以锐化边缘,提高图像的整体质量。非局部均值滤波在图像去噪方面的成功应用,让我们找到一种思路。因此本文提出一种 NLPOCS 方法,该方法在提高图像主观质量和峰值信噪比的同时,有效地消除了边缘的“锯齿”。

(下转第 62 页)

- [7] Kimura H, Hanyu T, Kameyama M, et al. Multiple-valued logic-in-memory VLSI based on ferroelectric capacitor storage and charge addition[C]//Proceedings 32nd IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2002;161-166
- [8] Jang S, Wu D, Jarvin M, et al. Brayton: SmartOpt; an industrial strength framework for logic synthesis[C]//FPGA 2009. 2009; 237-240
- [9] Wang Ting, Tan Hao-xun, Liu Ren-ren. An Effective Conversion Algorithm of Arithmetic Expression from Infix Form to Prefix Form[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(58-60); 1350-1353
- [10] 王婷, 刘任任. 部分多值逻辑中单纯可离和完满对称关系的计数[J]. 计算机科学, 2012, 39(10); 224-226
- [11] 刘任任, 王婷, 谭昊勋. 关于部分多值逻辑函数集中准完备集的若干性质[J]. 计算机学报, 2012, 35(4); 754-760
- [12] Liu Ren-ren, Wang Ting. Some Results on Decision of Basic Groups and Basic Semigroups in Partial Multiple-Valued Logic [C]//ICMT2011. IEEE Computer Society, 2011; 6011-6015
- [13] 刘任任, 王婷, 谭昊勋. 部分四值逻辑中完满对称函数集的分类及最小覆盖成员的判定[J]. 计算机科学, 2010, 37(11); 257-260
- [14] 刘任任, 罗秋棠, 王婷. 部分多值逻辑中保正规关系的准完备集的性质[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2012, 58(2); 135-138
- [15] 王湘浩. 有限集合上缺值与不缺值函数的结构理论[J]. 吉林大学自然科学学报, 1963(2); 295-315
- [16] Freivald R V. A completeness criterion for partial functions of logic and many-valued logic (Russian)[J]. Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 1966, 167; 1249-1250
- [17] 罗铸楷. 部分多值逻辑函数集中的极大封闭集[J]. 数学学报, 1984, 27(6); 795-800
- [18] 罗铸楷. 部分多值逻辑函数的完备性理论[J]. 数学学报, 1984, 27(5); 676-683
- [19] 刘任任. 部分三值逻辑中准完备集之最小覆盖[J]. 湘潭大学自然科学学报, 1991, 13(2); 158-164
- [20] Liu Ren-ren. Some results on the decision for Sheffer functions in partial K-valued Logic, Multiple-Valued Logical[J]. An International Journal, 1996(1); 253-269
- [21] Liu Ren-ren. Some results on the decision for Sheffer functions in partial K-valued Logic(II)[C]//Proceeding of the 29th international Symposium on Multiple-valued logic. 1998; 77-81
- [22] Liu Ren-ren. Research on the Similarity among Precomplete Sets Preserving m-ary Relations in Partial K-Valued Logic[C]//Proceedings of the 30th International Symposium on Multiple-Valued Logic. 1999; 136-139
- [23] Rosenberg I G, Machida H. Gigantic Pairs of Minimal Clones [C]//ISMVL 1999. 1999; 74-79
- [24] Rosenberg I G, Schweigert D. Locally Maximal Clones II[J]. Journal of Automata, Languages and Combinatorics, 2000, 5(4); 421-456
- [25] Haddad L, Machida H, Rosenberg I G. On the Intersection of Maximal Partial Clones and the Join of Minimal Partial Clones [C]//ISMVL 2000. 2000; 396-401
- [26] Machida H, Miyakawa M, Rosenberg I G. Some Results on the Centralizers of Monoids in Clone Theory [C]//ISMVL. 2002. 2002; 10-16
- [27] Machida H, Rosenberg I G. On the Centralizers of Monoids in Clone Theory [C]//ISMVL 2003. 2003; 303-308
- [28] Liu Ren-ren, et al. Some results on the minimal coverings of pre-complete classes in partial k-valued logic functions [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2004, 19(6); 981-985
- [29] Machida H, Rosenberg I G. Monoids whose Centralizer is the Least Clone [C]//ISMVL 2004. 2004; 102-108
- [30] Liu Ren-ren, et al. On The Categorizing of Simply Separable Relations In Partial Four-Valued Logic [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3612; 1251-1256
- [31] Liu Ren-ren, et al. On the Categorizing of Fully Symmetric Relations in Partial Four-valued Logic [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2006, 4223; 286-289
- [32] Haddad L, Lau D. Characterization of Partial Sheffer Functions in 3-Valued Logic [C]//ISMVL 2007. 2007; 34-38
- [33] Liu Ren-ren. On Basic Groups and Basic Semi-groups in Partial Multiple-Valued Logic [C]//Proceedings of Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discover. 2007, 2
- [34] Haddad L. Partial Clones Containing All Selfdual Monotonic Boolean Partial Functions [C]//ISMVL 2009. 2009; 173-178
- [35] Couceiro M, Haddad L. Finitely Generated Maximal Partial Clones and Their Intersections [C]//ISMVL 2010. 2010; 122-127
- [36] Machida H, Pantovic J, Rosenberg I G. Galois Connection for Hyperclones [C]//ISMVL 2010. 2010; 201-204

(上接第 49 页)

图像超分辨率重建算法对图像质量的提高是有限条件的, 不可能无限制地提高图像的质量, 当图像过于模糊时, 重建后的图像质量改善有限。进一步探索图像质量下降的原因, 提高图像重建的质量, 仍需要继续深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Trai R Y, Huang T S. Multi frame Image Restoration and Registration [M]//Huang T S, ed. Advances in Computer Vision and Image Processing. UK: JAI Press Inc, 1984; 317-339
- [2] Li X, Orchard M T. New edge-directed interpolation [J]. IEEE Trans. Image Proc., 2001, 10(10); 1521-1527
- [3] Zhang L, Wu X. An edge-guided image interpolation algorithm via directional filtering and data fusion [J]. IEEE Trans. Image Proc., 2006, 15(8); 2226-2238
- [4] Muresan D D. Fast edge directed polynomial interpolation [C]//IEEE International Conference on Image Processing. 2005, 2; 990-993
- [5] Harris J L. Diffraction and Resolving Power [J]. J. O. S. A., 1964, 54(7); 931-936
- [6] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]//McGraw-Hill, New York, 1968; 77-197
- [7] Tekalp M, Ozkan M K, Sezan M I. High resolution image reconstruction from lower resolution image sequences and space varying image restoration [C]//Proceedings of IEEE International Conference on ASSP, San Francisco, IEEE, 1992; 169-172
- [8] Pattij, Sezan M I, Tekalp A M. Super resolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 8(6); 1064-1076
- [9] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [C]//Proc. IEEE CVPR. vol. 2, June 2005; 60-65
- [10] 邵青, 魏江, 卢选民. 基于 PSF 改进的 POCS 超分辨率图像重构 [J]. 现代电子技术, 2011(2)