

# 基于运动估计误差和边缘约束的超分辨率重构

刘 淼 曹汉强 李旭涛 王勃飞

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

**摘 要** 为改善图像超分辨率重构的效果,提出了一种基于运动估计误差和边缘约束条件的凸集投影的方法。在数据一致性和幅度约束的条件下,分析了运动估计误差的分布特点,计算出了它的特征参数,形成一种对解的约束条件;为抑制边缘振荡效应,采用了边缘约束条件,提出了一种基于统计的判断像素所属方向的方法。实验表明,该算法的重构结果与传统的方法相比,主观视觉效果得到明显增强,且信噪比有所提高。

**关键词** 超分辨率 图像重构 凸集投影 运动估计误差 边缘约束

中图法分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)07-1168-05

## Super Resolution Restoration Based on Motion Estimation Error and Edge Adaptive Constraints

LIU Miao, CAO Han-qiang, LI Xu-tao, WANG Bo-fei

(Department of Electronic & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** In order to improve the quality of image by super-resolution restoration, a method based on motion estimation error with edge restrict was proposed. Under the condition of data consistency and amplitude restriction, the motion estimation error was analyzed, with its characteristic parameter being calculated; meanwhile, in order to suppress the ringing artifacts, edge constraint was adopted and a method based on statistic analysis for judging the pixel's direction was proposed. The experimental results show that the performance of the this algorithm is better than the traditional method both in vision effect and peak signal to noise ratio.

**Keywords** super-resolution, image restoration, projection to convex set(POCS), motion estimation error, edge constraint

## 1 引 言

超分辨率重构是一种利用信号估计理论,将几幅包含相似信息而存在不同细节的低分辨率图像融合成一幅或几幅高分辨率图像的技术。通过该技术可以得到高质量的图像而无需提高系统的硬件成本,已在工业、公安、天文、军事监视、医疗诊断等领域得到了广泛应用。超分辨率重构方法分为频域<sup>[1]</sup>、空间域和压缩域3类。空间域的方法使用图像序列通用的观测模型,算法灵活效果好。其中包括插入-迭代投影方法<sup>[2]</sup>、Bayesian方法<sup>[3,4]</sup>,集合论方

法<sup>[4,5]</sup>等。集合论方法中的POCS算法利用投影到凸集的原理进行图像重构,算法直观有效,且易扩展,是一种不断发展的图像重构方法。

超分辨率重构一般由插值、运动估计和图像修复3个环节构成<sup>[2]</sup>,其中运动估计关系到相邻帧的子像素信息是否能准确地用于参考图像的重构。子像素的运动估计不准导致的重构图像失真,可以看成是运动估计误差噪声引起的,在已有的很多重构方法中,这种运动估计误差通常都被忽略,或简单假设在所有低分辨率图像之间运动估计误差都是相同的<sup>[6]</sup>,因而影响了重构图像的精度。本文在数据一致性约束、幅度约束的基础上,分析了运动估计误差

基金项目:国家自然科学基金项目(60272099)

收稿日期:2005-09-19;改回日期:2006-03-10

第一作者简介:刘淼(1982~),男,硕士研究生。主要从事数字图像处理、视频超分辨率重构的研究。E-mail:miaoliu@smail.hust.edu.cn

的分布特点,使用数字特征法估计运动估计误差噪声的特征参数,将其作为对解的约束条件;同时为抑制边缘振荡效应,使用了边缘约束条件,并在实现中提出了一种基于方差统计量的像素所属方向的判断方法,用于边缘约束中边缘像素方向的判断。该算法的重构结果较传统的方法,主观视觉效果得到增强,且信噪比有所提高。

## 2 问题描述与建模

在数字视频的获取过程中,每一帧图像存在着空间分辨率的自然丢失,它由光学失真(散焦,衍射等)、有限的快门速度产生的运动模糊、传感器中或传输过程中产生的噪声以及传感器密度不足而造成。设观测得到的降质视频序列为 $\{G_k\}$ , $k=1,\dots,p$ ,尺寸为 $L_h N_h \times L_v N_v$ ,其中 $N_h, N_v$ 分别表示求平和竖直方向上的分块数, $L_h, L_v$ 分别表示各分块的水平和竖直方向的尺寸。将原始高分辨率视频序列表示为 $\{F_n\}$ , $n=1,\dots,q$ ,尺寸为 $D_h L_h N_h \times D_v L_v N_v$ ,其中 $D_h, D_v$ 分别表示水平和竖直方向上的采样因子。将 $G_k, F_k$ 分别按照逐行逐列的顺序向量化为 $g_k = \text{vec}(G_k)$ , $f_n = \text{vec}(F_n)$ ,假设它们之间的关系可以表示为 $g_k = DB_k M_k f_n + n_k$ ,其中 $M_k$ 是一个大小为 $L_h N_h L_v N_v \times L_h N_h L_v N_v$ 的运动矩阵, $B_k$ 代表大小为 $L_h N_h L_v N_v \times L_h N_h L_v N_v$ 的模糊矩阵, $D$ 是一个大小为 $N_h N_v \times L_h N_h L_v N_v$ 的减采样矩阵, $n_k$ 表示加性噪声向量,大小为 $L_h N_h L_v N_v \times 1$ 。

将低分辨率图像定义为含噪声的相关高分辨率像素的加权和,可得到以下统一的观测模型:

$$g_k = H_k f_n + n_k \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

其中, $H_k = DB_k M_k$ 。

超分辨率重构就是通过对式(1)进行求解来实现的。由于 $H_k$ 通常是病态的,因而很难直接求出式(1)的唯一解,一种可行的做法是在式(1)的基础上,引入各种先验知识,以形成对解的约束,以便得到 $f_n$ 的解。

使用POCS的方法<sup>[2,4]</sup>将先验知识考虑到解中,可以认为是将解限制成为凸集 $C_i$ 的一个成员,凸集 $C_i$ 定义为由满足特殊性质的向量组成的集合。如果约束集的交集非空,那么就可以通过向这些凸集投影,找到一个属于交集 $C_s = \bigcap_{i=1}^n C_i$ ( $S$ 代表solution)的解。

假设运动信息是准确的,基于观测模型式(1)

的数据一致性约束集可由低分辨率图像 $G_k(x_1, y_1)$ (下角l表示low-resolution)中的每一个像素表示:

$$C_k^D(x_1, y_1) = \{F_n(x_h, y_h) : |r^{(f_n)}(x_1, y_1)| \leq \delta_k(x_1, y_1)\} \quad (2)$$

其中

$$r^{(f_n)}(x_1, y_1) = G_k(x_1, y_1) - \sum_{x_h, y_h} F_n(x_h, y_h) \times H_k(x_1, y_1; x_h, y_h) \quad (3)$$

$\delta_k(x_1, y_1)$ 是统计置信区间,其由统计噪声决定的噪声方差, $r^{(f_n)}(x_1, y_1)$ 为点 $(x_1, y_1)$ 的计算误差,实际图像是集合 $C_k^D(x_1, y_1)$ (上角D代表data)的一个成员,它在特定的统计置信度范围内, $(x_h, y_h)$ 表示高分辨率图像像素坐标(下角h表示high-resolution)。

除数据一致性约束集外,另外一些约束集,如幅值约束、边缘约束等可用来进一步改善重构结果。为此,本文提出了基于运动估计误差和边缘约束的重构算法。

## 3 基于运动估计误差和边缘约束的重构算法

### 3.1 运动估计误差的分布分析

运动估计是超分辨率图像重构算法的重要组成部分,它关系到相邻帧之间的子像素信息能否得到有效利用。由于使用图像强度进行2维运动估计存在的固有病态性(孔径、覆盖/显露效应等),运动估计的结果通常存在误差。这种误差可以看作是噪声<sup>[6]</sup>。

考虑式(1)中的 $H_k$ 包含了第 $k$ 帧低分辨率图像和高分辨率图像之间的子像素运动信息,可以表示为

$$H_k = \hat{H}_k + \Delta H_k \quad (4)$$

式中, $\hat{H}_k$ 包含高分辨率图像对第 $k$ 帧低分辨率帧准确运动信息, $\Delta H_k$ 是由于不准确的运动估计而产生的误差,当运动估计的误差增加时, $H_k$ 和 $\hat{H}_k$ 之间的差异就会增加,使用 $H_k$ 进行重构,会严重影响重构的高分辨率图像的质量,可以将式(1)改写如下:

$$g_k = (\hat{H}_k + \Delta H_k)f_n + n_k = \hat{H}_k f_n + (\Delta H_k f_n + n_k) = \hat{H}_k f_n + \hat{n}_k \quad (5)$$

当不考虑 $n_k$ 时, $\hat{n}_k = \Delta H_k f_n$ 即表示第 $k$ 帧观测帧与高分辨率帧之间运动估计误差产生的噪声。

采用视频图像MobilAndCalendar序列进行实验分析,图1显示了运动估计的结果,进行投影就可以得到如图2所示运动估计误差分布,直观上看,该误

差并不是严格 Gaussian 型的(中心位置的峰值尖冲大,两边拖尾长),这和文献[6]的介绍有些差异,但这并不矛盾,因为这里处理的是视频图像。随着帧间距的增大,其中的背景变化不大,但物体的位置形状会有明显的差异,这种局部的差异会使运动估计误差分布的拖尾变长(使用其他视频序列可以得到类似的结果)。通过统计投影误差,可以得到表 1 所示的帧距与运动估计误差分布参数的关系,即随着帧距的增加,误差的方差会增加。这与图 2 显示的图形是一致的。这种分布可以看成是广义的 Gaussian 型分布,其标准差和运动估计的误差成正比,其均值近似为 0。因此,可以建立以下关于误差噪声的约束集

$$C_k^D(x_1, y_1) = \{F_n(x_h, y_h) : |r^{(k)}(x_1, y_1)| \leq \lambda \sigma_k\} \quad (6)$$

式中,  $\sigma_k$  表示参考帧与第  $k$  个低分辨率帧之间的运动估计误差噪声的标准差,  $\lambda$  表示置信区间。通过统计可以实现  $\sigma_k$  自适应取值。

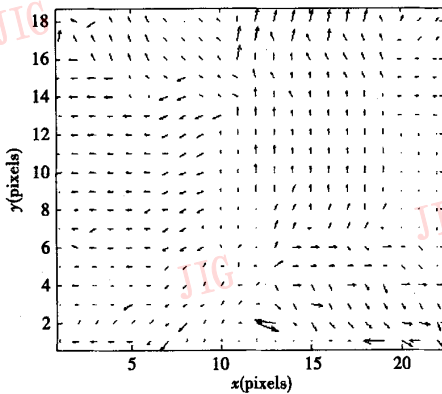


图 1 运动矢量场

Fig. 1 Motion Vector field

表 1 帧距与运动估计误差分布参数的关系

Tab. 1 Relationship between frame interval and motion estimation error parameter

帧间距	1	2	3	4	5	6
均值	-0.3547	-0.3553	-0.6535	-0.6877	-0.8918	-0.9241
方差	27.6866	35.1121	39.6863	43.2536	45.9148	47.8995

### 3.2 基于统计的边缘方向判断方法

为了克服使用各向同性的点扩散函数而造成的边缘振荡<sup>[7]</sup>,保护边缘信息,可以使用基于边缘的投影重构方法<sup>[5]</sup>,即对于非平滑区和边缘的像素采用各向异性的修复函数,为此需要在边缘检测的基础上,

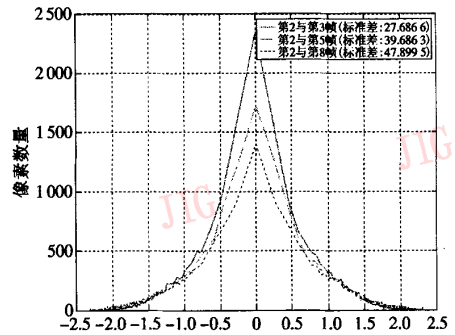


图 2 运动估计投影误差分布

(横轴原点两边分别取正负对数)

Fig. 2 Distribution of the projection error of motion estimation

判断边缘点所属的方向,进而选择合适的修复函数。

本文提出了一种基于统计的边缘方向判断方法,假设点扩散函数的影响范围为半径为  $3 \times 3$  的区域(如图 3 所示的以  $E$  为中心的 9 点),要判断  $E$  所属的边缘方向,则要首先计算中心点周围 4 个方向的方差  $var_1, var_2, var_3$  和  $var_4$ ,然后找出其中的最小者,最小的含义是 3 个像素点灰度值之间的偏差最小,它们应该归属为同一边缘方向,与方差下标对应的方向即为该中心点所属的方向;最后根据判断得到的方向来选择修复函数。

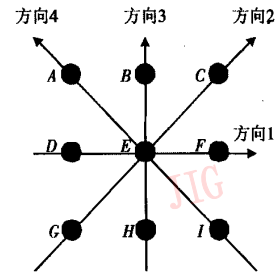


图 3 判断像素点所属边缘方向图示

Fig. 3 Direction judge for pixels at edges

### 3.3 算法实现

将数据一致性、边缘信息保持、幅度约束和运动估计误差噪声约束结合起来,得到一种新的基于 POCS 超分辨率重构方法。算法实现步骤如下:

- (1) 以视频序列中一帧低分辨率图像作为参考帧,其前后各  $L$  帧作为观测帧;
- (2) 对参考帧进行插值,得到高分辨率图像的初始估计  $x^0$ ,估计出高分辨率和低分辨率图像间的运动信息;
- (3) 根据点扩散函数和运动信息,将高分辨率

图像投影到每一帧观测帧,计算运动估计误差的均值与方差;

(4) 判断高分辨率图像的边缘方向,确定修复函数;

(5) 使用修正的数据一致性算子和噪声统计特性对高分辨率图像进行修正;

(6) 当投影误差均值  $r_n$  收敛到满足  $|r_{n+1} - r_n|/r_n \leq \varepsilon, \varepsilon = 0.001$  或迭代次数满足设定要求时结束,否则回到步骤 5。

### 4 实验结果与分析

采用 QCIF 视频图像序列 Claire 和 CIF 视频图像序列 MobilAndCalender 进行了实验。分别取出其

中的连续 5 帧,分别对其进行 4:1 的等距离抽取得到 5 帧低分辨率图像,然后对中间一帧进行重构。这样做可以将重构的结果和普通的方法在主观和客观上同时进行比较。

#### 4.1 考虑配准误差与未考虑配准误差的重构结果的比较

分别使用普通 POCS 方法以及本文方法进行实验得到如图 4(a)、(b)所示的结果。

从图 4 中的火车铁轨和挂历上的数字部分进行的比较不难看出,本文的方法能够恢复出一定的细节;同时,由于本文方法使用了边缘约束和基于运动估计误差的约束条件,因此所得的结果与未使用这些约束条件相比,不仅边缘振荡效应明显减少,而且信噪比也有了提高(表 2)。



(a) 普通 POCS 算法重构结果



(b) 本文方法重构结果

图 4 MobilAndCalender 图像重构结果的比较

Fig. 4 Comparison between restoration results

表 2 MobilAndCalender 序列的性能参数

Tab.2 Performance parameters of "MobilAndCalender"

性能参数	普通 POCS 方法	本文方法
SNR(dB)	9.265 8	9.759 7
PSNR(dB)	20.299 8	20.793 7
MSE(dB)	27.713	27.337

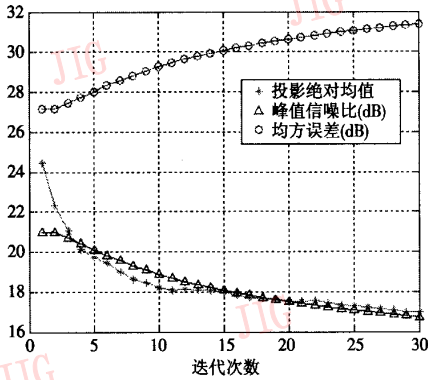
#### 4.2 选取观测帧的数量对重构结果的影响

重构过程中,可利用的观测帧的数量,对图像重构的结果会产生影响,因为观测帧数越多,可供利用的子像素信息越多,所以越容易恢复参考帧丢失的信息。但使用的帧数越多,运算所耗时间也会成正

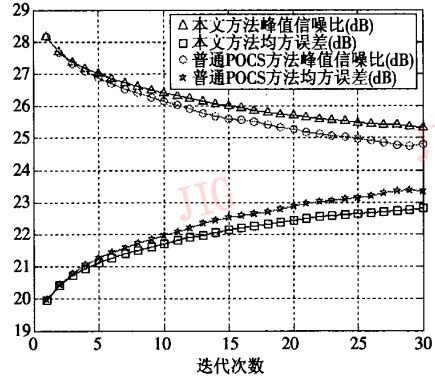
比的增加。所以需要根据应用场合在使用观测帧的数量和重构时间上做出权衡。

#### 4.3 迭代次数对重构结果的影响

基于 POCS 的重构是一个迭代的过程,迭代的次数会影响重构的效果,通过实验发现随着迭代次数地增加,图像的整体效果得到了增强,但当迭代次数超过一定值的时候,边缘的振荡效应会加剧,重构图像的均方误差会增加,峰值信噪比也会下降;在相同迭代次数下,本文方法与仅建立在数据一致集上的 POCS 方法相比,不仅峰值信噪比值衰减的小,均方误差增加的值也小。图 5 显示了迭代次数与峰值信噪比、均方误差以及投影误差均值之间的关系。



(a) MobilAndCalendar 序列



(b) Claire 序列

图 5 重构图像参数与迭代次数之间的关系

Fig. 5 Relationship between iteration number and parameters

通过实验可以发现迭代 3 ~ 6 次就可以得到较好的结果。

### 5 结 论

本文提出了一种基于运动估计误差噪声和边缘约束的新的超分辨率重构方法。该方法将运动估计误差噪声和边缘约束条件,考虑在传统的基于数据一致性的 POCS 的重构框架中,并重点针对欠采样图像的复原进行了研究。本文方法的特点在于充分利用了运动估计误差噪声的统计特点和图像的边缘信息,自适应地改变投影修复阈值。实验结果表明,不论是在主观效果上还是客观参数上,本文方法所得到的结果较未考虑运动估计误差的方法有所的提高。需要指出的是,该方法尚未考虑含噪降质图像的情况,另外算法还可以进一步优化,以实现实时应用。

致 谢 本文的工作得到了华为技术有限公司高校科技基金(YJCB2004007MU)和华中科技大学研究生创新基金(JJ-05-071)的资助,这里一并表示感谢。

### 参考文献 (References)

- 1 Tsai R Y, Huang T S. Multiframe image restoration and registration

- [J]. Advances in Computer Vision and Image Processing, 1984, 1(1): 317 ~ 339.
- 2 Park Sung Cheol, Park Min Kyu, Kang Moon Gi. Super-resolution image reconstruction; a technical overview[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 20(3): 21 ~ 36.
- 3 Tekalp A M, Ozkan M K, Sezan M I. High-resolution image reconstruction from lower-resolution image sequences and space varying image restoration[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP)[C], San Francisco, CA., USA, 1992, 3: 169 ~ 172.
- 4 Patti A J, Altunbasak Y. Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher order interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 179 ~ 186.
- 5 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.
- 6 Lee Eun Sil, Kang Moon Gi. Regularized adaptive high-resolution image reconstruction considering inaccurate subpixel registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(7): 826 ~ 837.
- 7 Li Hui-fang, Du Ming-hui. Super-resolution image restoration based on improved POCS algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(10): 24 ~ 27. [李慧芳, 杜明辉. 基于改进的 POCS 算法的超分辨率图像恢复 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(10): 24 ~ 27.]